



# **Nachhaltige Gebäudesanierung durch lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

**DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN**

der Studienrichtung

**BAUINGENIEURWISSENSCHAFTEN**

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Maydl

Begutachter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Streicher

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Bednar

Eingereicht von:

Dipl.-Ing. Danilo Schulter

Graz, 13.11.2013



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den verwendeten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

*D. Schulter*

Graz, am 13.11.2013

Danilo Schulter



## **Danksagung/Vorwort**

Mein besonderer Dank für die umfassende Betreuung und Begutachtung der Dissertation gilt dem Leiter des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Maydl.

Zudem danke ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Streicher vom Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften: Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen der Universität Innsbruck für die zügige Begutachtung der Dissertation und für die Bereitschaft zur Abnahme des Rigorosums.

Ebenfalls danke ich Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar vom Institut für Hochbau und Technologie: Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz der Technischen Universität Wien für die zügige Begutachtung der Dissertation.

Ich danke auch dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, welches durch Zusage der Fördermittel im Programm „Haus der Zukunft“ eine umfassende Bearbeitung der offenen Forschungsfragen ermöglichte. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch beim Projektteam der AEE-Intec, insbesondere bei Dipl.-Ing. Dr. Karl Höfler und Dipl.-Ing. Sonja Geier für die tatkräftige Mitarbeit und den wertvollen praxisbezogenen Hinweisen bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung für die kollegiale Unterstützung bedanken, insbesondere bei Ao.Univ.-Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr. techn. Enrico Eustacchio, Dipl.-Ing. Jutta Walther und Doris Marchler.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern für die moralische und tatkräftige Unterstützung bedanken.



## Kurzfassung

Nachhaltiges Bauen zielt auf die Erfüllung der langfristigen Funktionalität und Nutzerzufriedenheit mit minimalen Umweltwirkungen und optimierten Lebenszykluskosten ab und stellt einen Paradigmenwechsel im Bauwesen dar. Ein wichtiger Ansatzpunkt ist, die langfristige Nutzung des Gebäudebestands durch ökoeffiziente Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen sicherzustellen. Ziel der Arbeit ist es, das energetische Einsparpotential sowie die damit verbundene Reduktion von Umweltwirkungen bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand durch thermische Sanierung und energetische Modernisierung abzuschätzen.

Der österreichische Gebäudebestand wurde mit Referenz-Gebäuden entsprechend einem bottom-up-Ansatz modelliert und die Flächen der thermischen Gebäudehülle überschlagsmäßig ermittelt. Folglich konnten gebäudespezifische Einflussfaktoren (Geometrie, Nutzungsart etc.) bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs (HWB) für die jeweilige Bauepoche berücksichtigt werden. Des Weiteren wurden die solar nutzbaren Flächen für Photovoltaik (PV) und Solarthermie je Gebäudetyp und Bauepoche abgeschätzt. Im besten Fall kann durch eine umfassende Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten ein jährlicher Nutzwärmeverbrauch von 35 PJ/a erreicht werden, dies stellt eine Absenkung um ca. 80 % im Vergleich zum unsanierten Gebäudebestand dar.

Nach Abzug der erforderlichen Flachkollektorflächen für die Erzeugung der maximal in das Energiesystem integrierbaren Wärmemenge wurden die restlichen Flächen für die Ermittlung des PV-Stromerzeugungspotentials herangezogen. Maximal können jährlich 17,9 TWh erzeugt werden, dies entspricht ca. 50 % der in Österreich mittels Wasserkraft erzeugten Strommenge.

Der stoffliche und energetische Aufwand zur Gebäudesanierung wurde anhand der Ökobilanz-Ergebnisse von über 180 Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen ermittelt. Für die Dissertation dienen die Ergebnisse daraus als Grundlage für bauteil- und bauepochenspezifische Vergleiche hinsichtlich wesentlicher Einflussfaktoren auf Bauteil-Ebene sowie zur Berechnung des erforderlichen Aufwands zur Sanierung bzw. Modernisierung des Bestands.

Für die Berechnung des Einsparpotentials durch thermische Sanierungen und energetische Modernisierungen des österreichischen Gebäudebestands wurden die stofflichen und energetischen Aufwendungen von den solaren Energiegewinnen und dem eingesparten Energieverbrauch für Raumheizung abgezogen. Für den Indikator „Treibhauspotential (GWP)“ wurde beispielsweise ein jährliches Einsparpotential von ca. 31 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, einschließlich PV und Solarthermie“ ermittelt.

Das Verhältnis zwischen den erforderlichen Aufwendungen und den erreichbaren Erträgen wurde mit Hilfe von Dominanzanalysen aufgezeigt. Beispielsweise sind im günstigsten Fall ca. 1,8 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr für eine vollständige thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten aufzuwenden, um im Gegenzug ein jährliches Einsparpotential von ca. 7,7 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente erreichen zu können. Im schlechtesten Fall wird das gleiche Einsparpotential mit einem 90 % höheren Aufwand erreicht. Dadurch wird aufgezeigt, dass durch die ständige Verbesserung der Gebäude-Energiestandards von Niedrigenergie- über Passiv- hin zum Plusenergiehaus die lebenszyklusorientierte Auswahl von ökoeffizienten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen immer mehr an Bedeutung gewinnt.

Das Rest-Potential wurde mit statistisch erhobenen Verbrauchs- und Emissionskennzahlen für die jeweiligen Sanierungsvarianten ausgewertet. Im besten Fall kann durch die Sanierung des Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten und Modernisierung mittels PV und Solarthermie der Ausstoß an Treibhausgasen deutlich unter das Kyoto-Ziel gesenkt werden.





## Abstract

Sustainable construction means to fulfill the user requirements with minimal environmental impacts and optimized life cycle costs and leads to a paradigm shift in the construction sector. An important starting point is to ensure continuing use of existing buildings by sustainable renovation. The objective of this thesis is to estimate possible savings of energy and environmental impacts by improving the energy efficiency of the Austrian building stock from low energy to plus energy standard.

The Austrian building stock was modeled with reference buildings according to a bottom-up approach to estimate the entire area of the thermal envelope and the usable area for solar energy production. Therefore, building-specific factors (geometry, type of use, etc.) could be taken into account in the estimation of the energy consumption for heating of the Austrian building stock.

In best case an annual energy consumption for heating of 35 PJ per annum can be achieved by renovation with passive house components. This represents a reduction of approximately 80 % compared to of energy consumption for heating of the Austrian building stock in the year 2006.

First of all the necessary flat collector areas for the generating of the useable solar heat relating to the Austrian building stock was assessed and the rest of the area was used for PV installations. A maximum of 17.9 TWh per annum can be produced, which represents approximately 50% of the amount of electricity generated by hydropower in Austria.

The input of material and energy needed for renovation was determined with the results of life cycle assessment (LCA) of more than 180 construction details. The significant factors were identified by comparing the LCA results as a function of building period and constructive elements. The LCA results were also used to calculate the input needed for renovation of the Austrian building stock.

The potential savings of energy consumption and CO<sub>2</sub>-emissions were determined by subtracting the input needed for renovation from the benefits of solar energy production and the reduction of energy consumption for heating.

For example, the global warming potential (GWP) could be reduced by 31 million tons of CO<sub>2</sub>-equivalents per annum by renovating of the Austrian building stock renovation with passive house components, PV and solar heat.

The ratio between the input needed for renovation and the benefits are shown with ABC-analysis for worst and best case scenarios. For example, the renovation of the Austrian building stock with passive house components will raise the global warming potential by 1.8 million tons CO<sub>2</sub>-equivalents per annum in the best case, but possible savings of 7.7 million tonnes of CO<sub>2</sub>-equivalent will be achieved. In worst case the same savings are achieved but with a 90% higher CO<sub>2</sub>-output than the best case. As a consequence of the ongoing improvement of energy efficiency, the use of eco-efficient construction and building materials and a life cycle oriented design becomes more and more important.

The remaining potential was evaluated for four renovation scenarios with statistical data about energy consumption and CO<sub>2</sub>-output. In best case, the emissions of greenhouse gases can be reduced below the Kyoto target level by sustainable renovation of the Austrian building stock with passive house components, PV and solar heat.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	13
1.1	Allgemeine Einführung in die Thematik.....	13
1.2	Ausgangssituation/Motivation.....	13
1.3	Inhalte und Zielsetzungen .....	14
1.4	Methodische Vorgangsweise.....	16
1.5	Abgrenzung zu bestehenden Dissertationen & Publikationen .....	18
2	Dauerhaftigkeit von Bauprodukten .....	22
2.1	Dauerhaftigkeit im Bauwesen.....	22
2.2	Probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse - ISO 13823 [51] .....	29
2.3	Prinzipien zur Lebensdauervorhersage - ISO 15686 .....	33
2.4	Gegenüberstellung publizierter Lebensdauermodelle.....	42
2.5	Entwicklung eines Modells zur Lebensdauervorhersage .....	46
2.6	Ausblick - lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl .....	54
3	Lebenszyklusbewertung von Sanierungsmaßnahmen .....	58
3.1	Erhebung – Bestandsaufbauten.....	58
3.2	Erhebung – Gebäudespezifischer Sanierungsaufwand .....	58
3.3	Lebenszyklusbewertung - Vorgangsweise .....	60
3.4	Ergebnisse - bauepochenspezifischer Ökobilanz-Vergleich .....	63
4	Heizwärmebedarf – österreichischer Gebäudebestand.....	66
4.1	Modellierung des österreichischen Gebäudebestands .....	66
4.2	Berechnung – Heizwärmebedarf (HWB) .....	67
4.3	Ergebnisse - HWB-Berechnung .....	70
5	Solarurbanes und technisches Flächenpotential.....	73
5.1	Modell zur Berechnung der solar nutzbaren Flächenpotentiale.....	73
5.2	Berechnungsannahmen – Solarthermie- und PV-Potential .....	74
5.3	Solar nutzbares Flächenpotential.....	77
5.4	PV-Stromerzeugungspotential.....	79
6	Einsparpotential- und Dominanzanalyse.....	82
6.1	Gewählte Vorgangsweise - Modellberechnung.....	82
6.2	Festlegungen für die Ökobilanzierung.....	83
6.3	Darstellung der Ökobilanz-Ergebnisse.....	85
6.4	Einsparpotentialanalyse .....	87
6.5	Dominanzanalyse – Plusenergiehausstandard (PH+) .....	96

6.6	Dominanzanalyse – Passivhausstandard (PH) .....	101
6.7	Dominanzanalyse – Niedrigenergiehausstandard mit Photovoltaik & Solarthermie (NEH+) .....	105
6.8	Dominanzanalyse – Niedrigenergiehausstandard (NEH) .....	112
7	Analyse des Restpotentials .....	117
7.1	Bilanzierung des Restpotentials .....	117
7.2	Restpotential – Variante 1 – Wohngebäudebestand .....	119
7.3	Restpotential – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand .....	121
7.4	Restpotential – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand .....	123
7.5	Abfallaufkommen – Variantenvergleich .....	126
8	Zusammenfassung .....	129
8.1	Lebenszyklusbewertung von Sanierungsmaßnahmen .....	129
8.2	Modell - österreichischer Gebäudebestand .....	130
8.3	PV-Stromerzeugungspotential .....	131
8.4	Zusammenfassung – Einsparpotential .....	132
8.5	Zusammenfassung – Dominanzanalyse .....	133
8.6	Zusammenfassung – Restpotential .....	135
8.7	Relevanz der Kreislaufwirtschaft .....	136
9	Ausblick .....	138
9.1	Ableitung von Handlungsempfehlungen .....	138
9.2	Weiterer Forschungsbedarf .....	140
A.	Bauteilspezifische LCA-Vergleiche .....	143
B.	Ecofys-Kennzahlen .....	184
C.	Literaturverzeichnis .....	185
D.	Abbildungsverzeichnis .....	193
E.	Tabellenverzeichnis .....	197
F.	Glossar .....	198

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeine Einführung in die Thematik

Nachhaltiges Bauen zielt darauf ab, die Nutzeranforderungen mit minimalem ökonomischem und ökologischem Aufwand zu erfüllen. Ein wichtiger Ansatzpunkt ist die Funktionalität des Gebäudebestands langfristig zu erhalten und an die gestiegenen Anforderungen anzupassen. Eine Sanierung des Gebäudebestands auf energetische Standards, wie Niedrigst-, Null- oder Plusenergiegebäude erfordert jedoch oft einen hohen stofflichen und energetischen Aufwand. Gerade deshalb sollte eine umfassende Sanierung des österreichischen Gebäudebestands im Einklang mit den Anforderungen des nachhaltigen Bauens stehen. Mittels einer ganzheitlichen Betrachtung aller relevanten Stoff- und Energieflüsse über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes soll das Optimum in ökologischer und ökonomischer Hinsicht erreicht werden. Bisher wurde jedoch der Energiebedarf für das Heizen als nahezu einziger Kennwert zur energetischen Bewertung des Gebäudes herangezogen. Die Entwicklung hin zum Plusenergiehaus führt dazu, dass nun ein Gebäude nicht nur ein Verbraucher, sondern auch ein Erzeuger von Energie wird. Folglich müssen im Rahmen einer energetischen Bilanzierung auch die vor Ort erzeugte Energie berücksichtigt werden, wodurch die Komplexität hinsichtlich einer Lebenszyklusbewertung von Gebäuden erhöht wird. Bislang wird eine sogenannte „Plusenergie“-Bilanzierung durch die Gegenüberstellung des Energiebedarfs oder -verbrauchs und der Energieerzeugung durchgeführt. Die Folge dieser energieseitigen Betrachtungsweise ist, dass stoffliche Aufwendungen bisher vernachlässigt wurden, beispielsweise die erforderlichen Bauprodukte für eine thermische Sanierung. Die laufende Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden hat jedoch zur Folge, dass der kumulierte Energieaufwand für Instandhaltungs- und Entsorgungsprozesse im Vergleich zum operativen Energieaufwand immer mehr an Bedeutung gewinnt. Zusätzlich müssen für eine aussagekräftige Potentialanalyse hinsichtlich der Ökoeffizienz auch die bautechnischen Randbedingungen berücksichtigt werden, um so die Grenzen einer Sanierung mit Niedrigenergiehaus- und Passivhaus-Komponenten, einschließlich einer Modernisierung mittels PV und Solarthermie in Abhängigkeit von der Bauepoche und dem Gebäudetyp aufzeigen zu können. Aus diesem Grund müssen die über den gesamten Lebenszyklus aufgewendeten Ressourcen eingehend betrachtet werden, um eine Verlagerung des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Emissionen in vor- bzw. nachgelagerte Prozessketten zu vermeiden. In diesem Zusammenhang ist die Kreislauffähigkeit der künftig anfallenden Baurestmassen von Bedeutung, da diese für die Schonung von natürlichen Ressourcen und des Deponieraums entscheidend ist.

## 1.2 Ausgangssituation/Motivation

Nachhaltiges Bauen bedeutet verkürzt, die langfristige Funktionalität und Zufriedenheit der Nutzer mit minimalen Umweltwirkungen und Lebenszykluskosten zu erfüllen [70]. Diese Anforderungen sind künftig bei der Entwicklung von Bauprodukten und Bauteilen zu berücksichtigen. Folglich sind besonders Bauprodukte und Bauteile der thermischen Gebäudehülle hinsichtlich ihrer architektonischen Qualität und der Erfüllung der bauphysikalischen Anforderungen von Bedeutung, wie beispielsweise in Fassaden eingebaute Bauprodukte aufgrund ihrer exponierten Lage. Der verstärkt auftretende Trend zur Integration neuer Technologien in die Gebäudehülle, wie z.B.

Photovoltaik, solarthermische Anlagen oder haustechnische Komponenten in sogenannten „aktiven“ Fassaden kann im Widerspruch zu den Grundsätzen der Nachhaltigkeit hinsichtlich einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung stehen. Nachhaltigkeit für Sanierungsmaßnahmen aus nicht-energetischer Sicht bedeutet, dass zum einen Einzelkomponenten kontrollierbar, austauschbar und rezyklierbar sind und zum anderen die Sanierungslösung als Ganzes wartungs- und reparaturfreundlich ist. Am Beispiel der „Multifunctional Plug & Play Fassade (MPPF)“ [17] wird deutlich, dass ein fächerübergreifendes Zusammenwirken von Ingenieuren unterschiedlichster Fachrichtungen (Bauwesen, Gebäudetechnik, Maschinenbau, technische Physik, Elektrotechnik) und Architekten erforderlich ist. Gerade in der Systementwicklung von Bauteilkomponenten führt eine Vernachlässigung von interdisziplinären Planungsschnittstellen zu einer Vielzahl an negativen Folgewirkungen in technischer, ökonomischer und ökologischer Hinsicht. Während ein erhöhter Montageaufwand oder Improvisationen für Anschlüsse oder Übergänge bereits in der Ausführungsphase sichtbar werden, können weitere negative Auswirkungen erst langfristig nach vielen Jahren im Betrieb auftreten, wie beispielsweise Schimmelbildung durch Kondensation, Bauteilrisse durch Zwängungsspannungen, ein deutlich erhöhter Wärmebedarf bzw. Instandhaltungs- und Entsorgungsaufwand. Diese bauepochen- und gebäudespezifischen Randbedingungen von Gebäudesanierungen auf Plusenergiehausstandard wurden im baukonstruktionsorientierten Leitfaden der FFG-geförderten Know-How-Plus-Studie [93] strukturiert erfasst und für die angestrebte Potentialanalyse bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand herangezogen.

Der Sinn und Nutzen von lebenszyklusoptimierten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen soll anhand einer Potentialanalyse, bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand aufgezeigt werden. Die bisher publizierten Energieeinsparstudien sind grundsätzlich auf einen bestimmten Themenbereich ausgerichtet, weshalb der Bedarf einer ganzheitlichen Bilanzierung aller Stoff- und Energieflüsse über den gesamten Lebenszyklus besteht. Bei Potentialanalysen wird meist zur Einschränkung des Arbeitsaufwands ein top-down-Ansatz gewählt, wodurch eine genauere Berücksichtigung der Gegebenheiten des österreichischen Gebäudebestands verhindert wird. Im Gegensatz dazu wurde für die Know-How-Plus-Studie [93] und für die Dissertation ein ganzheitlicher bottom-up-Ansatz gewählt, der einerseits auf die Möglichkeiten und Grenzen von Gebäudesanierung auf unterschiedliche Gebäude-Energiestandards und deren Wechselwirkungen näher eingeht und andererseits die Ökoeffizienz der zur Verfügung stehenden Sanierungs- und Modernisierungslösungen mittels Lebenszyklusbewertungen (Ökobilanzen) aufzeigt.

Für die angestrebte Potentialanalyse werden aufgrund der fächerübergreifenden Problemstellungen relevante Ergebnisse von den einschlägigen Studien berücksichtigt, wodurch ein Konnex zwischen Ergebnissen der vorliegenden Arbeit und den herangezogenen Forschungsprojekten geschaffen wird und damit die Notwendigkeit einer interdisziplinären Zusammenarbeit im Bauwesen verdeutlicht.

### **1.3 Inhalte und Zielsetzungen**

Ziel dieser Dissertation ist es, das Einsparpotential des österreichischen Gebäudebestands durch thermische Sanierung und energetische Modernisierung mittels Lebenszyklusbewertungen sowie deren Grenzen aufzuzeigen. Um die Vielzahl an Einflussfaktoren aus unterschiedlichen Fachrichtungen erfassen zu können, wurde ein bottom-up-Ansatz für die Modellbildung gewählt. Zur besseren Übersicht erfolgt eine Untergliederung der Dissertation entsprechend der entwickelten Modelle in drei Ebenen (Bauteil-Ebene, Gebäude-Ebene und Ebene „Österreichischer Gebäudebestand“). Ziel ist es, alle relevanten Einflussfaktoren aus verschiedenen Fachrichtungen strukturiert zu sammeln und in der Modellberechnung zu berücksichtigen (siehe Abbildung 1).

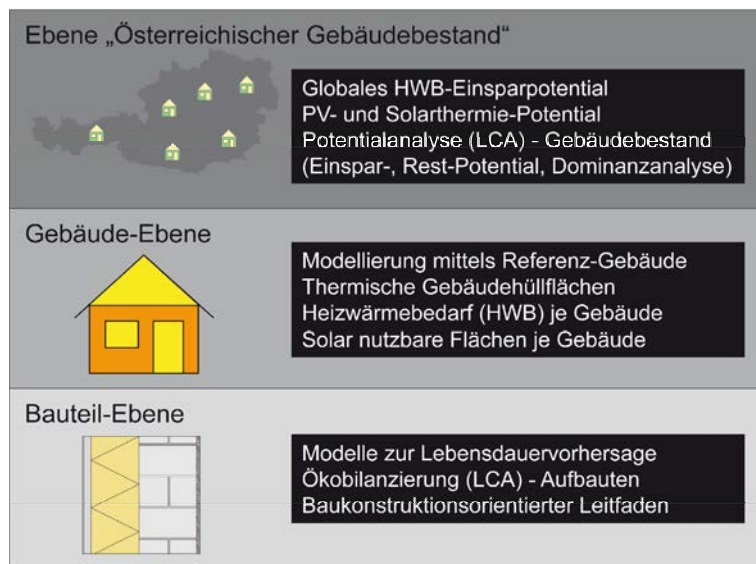


Abbildung 1 Dreistufige Projektstruktur mit Ergebnissen

### 1.3.1 Zielsetzung auf Bauteil-Ebene

Die Möglichkeiten und Grenzen bei thermischen Gebäudesanierungen, einschließlich energetischer Modernisierungsmaßnahmen (PV und Solarthermie) sind für die jeweilige Bauepoche strukturiert zu sammeln und bei der Modellberechnung zu berücksichtigen.

Für die Lebenszyklusbewertung der Aufbauten ist die Entwicklung eines Modells zur Lebensdauerabschätzung erforderlich. Bei der Modellbildung sind die Dauerhaftigkeitskonzepte in normativen Regelwerken zu berücksichtigen, um die Schnittstelle zwischen Planung und Lebenszyklusbewertung aufzeigen und den weiteren Handlungsbedarf für eine praktikable Umsetzung ableiten zu können. Das Modell muss auch auf die Lösbarkeit und Trennbarkeit der zusammengeführten Bauprodukte Bezug nehmen, um den Nutzen von instandhaltungs- und wartungsfreundlichen Konstruktionen aufzeigen zu können.

Zur Abschätzung der stofflichen und energetischen Aufwendungen einer Sanierung des österreichischen Gebäudebestands sind umfassende Lebenszyklusbewertungen von etablierten, aber auch innovativen Sanierungslösungen durchzuführen. Die Bewertungsergebnisse sind aufgrund der angestrebten Potentialanalyse nach Bauepochen und Bauteilen der thermischen Gebäudehülle zu untergliedern.

### 1.3.2 Zielsetzung auf Gebäude-Ebene

Für die Hochrechnung der bauteilbezogenen Lebenszyklusergebnisse ist ein Gebäudemodell zu entwickeln, welches bauepochenspezifische Kennzahlen hinsichtlich der zu sanierenden thermischen Gebäudehüllflächen, der solar nutzbaren Flächen und des Energieverbrauchs für Raumheizung des unsanierten und sanierten Gebäudebestands bereitstellt.

Die bauepochen- und standortspezifischen Einflüsse (A/V, Geometrie, Klimazone etc.) sind bei der HWB-Berechnung mittels Energieausweis-Rechner für die Abschätzung des Nutzwärmeverbrauchs bzw. Energieverbrauchs für Raumheizung zu berücksichtigen.

### 1.3.3 Zielsetzung auf Ebene „österreichischer Gebäudebestand“

Das bedeutende Potential hinsichtlich solarer Energieerzeugung und der Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung durch thermische Sanierungen des österreichischen

Gebäudebestands ist mittels Hochrechnung der bauteil- und gebäudespezifischen Bewertungsergebnisse abzuschätzen. Zusätzlich ist das künftige Abfallaufkommen, gegliedert nach den möglichen Verwertungswegen (Recycling, thermische Verwertung und Deponie) zu ermitteln und die Relevanz der Kreislauffähigkeit von Baurestmassen aufzuzeigen.

Die Ökoeffizienz von thermischen Sanierungs- und energetischen Modernisierungsmaßnahmen ist durch Ökobilanz-Vergleiche bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand für vier unterschiedliche Gebäude-Energiestandards aufzuzeigen.

Die relevanten Einflussfaktoren auf die Ökobilanz-Kennwerte sind anhand der Potentialanalyse zu identifizieren und Handlungsempfehlungen für die Baubeteiligten abzuleiten.

## 1.4 Methodische Vorgangsweise

Aus Sicht der Nachhaltigkeit ist die langfristige Nutzung des Bestands durch ökoeffiziente Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen im Vergleich zum Neubau zu bevorzugen (siehe Abbildung 2). In diesem Konnex wird auf die thermische und technisch-funktionale Sanierbarkeit des Bestands unter Berücksichtigung der normativen und rechtlichen Vorgaben eingegangen. Zur Bewertung der technisch-funktionalen Sanierbarkeit werden dauerhaftigkeitsrelevante Aspekte in Kapitel 2 behandelt. Diese werden im Rahmen der Ökobilanzierung der Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen in Kapitel 3 berücksichtigt. Die relevanten Einflussfaktoren hinsichtlich der energetischen Sanierbarkeit des Gebäudebestands werden bei der Abschätzung des Energieverbrauchs für Raumheizung (Kapitel 4) sowie bei der Abschätzung des PV-Stromerzeugungspotentials (Kapitel 5) berücksichtigt. Abschließend wird mit den Teilergebnissen eine Potentialanalyse bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand durchgeführt. Die Auswertung erfolgt hinsichtlich des Einsparpotentials und der relevanten Einflussfaktoren (Dominanz-Analyse) in Kapitel 6 und des Rest-Potentials in Kapitel 7.

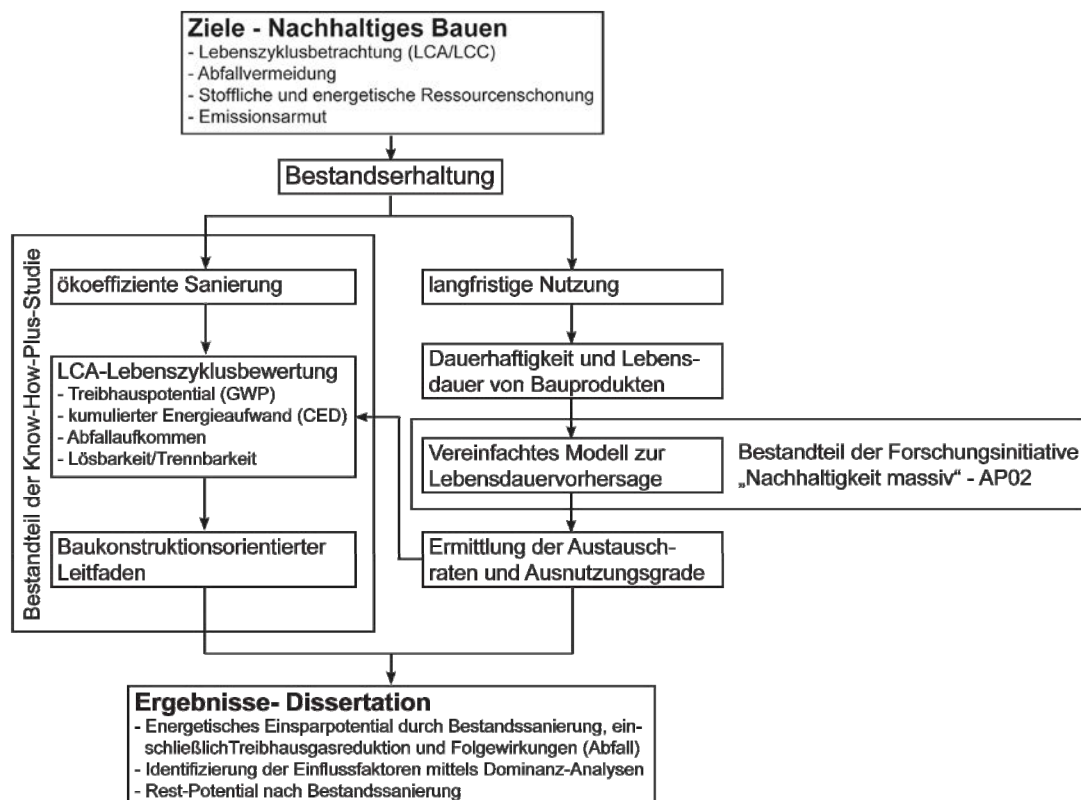


Abbildung 2 Zielsetzung und gewählte Vorgangsweise



Die methodische Vorgangsweise wird nachfolgend beginnend von der Lebenszyklusbewertung auf Bauteil-Ebene über die Modellierung des Gebäudebestands bis hin zur Potentialanalyse bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand detailliert erläutert.

### **1.4.1 Vorgangsweise auf Bauteil-Ebene**

Für die angestrebte Potentialanalyse von Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand mittels bottom-up-Ansatz ist einerseits ein Modell zur Vorhersage der voraussichtlichen Lebensdauer der Bauprodukte erforderlich. Andererseits sind die Möglichkeiten und Grenzen für die jeweilige Bauepoche und den Gebäudetyp zu erfassen und bei der Abschätzung des Einsparpotentials zu berücksichtigen. Die Beschreibung der möglichen Sanierungsmaßnahmen, einschließlich der relevanten Einflussfaktoren wird in einem baukonstruktionsorientierten Leitfaden strukturiert gesammelt.

#### **1.4.1.1 Entwicklung eines Modells zur Lebensdauervorhersage**

Für die Entwicklung eines Modells zur Lebensdauervorhersage wird eine Übersicht über publizierte Lebensdauermodelle und Dauerhaftigkeitskonzepte in normativen Regelwerken erarbeitet (siehe Kapitel 2). Aufbauend auf den Ergebnissen der Literaturerhebung wird ein Modell für die Lebensdauervorhersage entwickelt, welches die gestellten Anforderungen hinsichtlich einer qualitativen Lebenszyklusbewertung von über 180 Aufbauten erfüllt.

#### **1.4.1.2 Baukonstruktionsorientierter Leitfaden**

Für die qualitative Beschreibung von gängigen, aber auch innovativen Sanierungslösungen wurden im Rahmen des FFG-geförderten Projekts „Know-How-Plus“ [93] Datenblätter für die jeweilige Bauepoche ausgearbeitet. Diese beinhalten eine Beschreibung des Bestands sowie der Sanierungsmöglichkeiten, einschließlich der Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung. Des Weiteren wurde für die quantitative Lebenszyklusbewertung von ca. 180 Aufbauten auf Bauteil-Ebene ein Bewertungsraster entwickelt, der eine Anpassung der Bauprodukt-Lebensdauern hinsichtlich der angewandten Fügetechnik (Lösbarkeit) ermöglicht (siehe Kapitel 3).

### **1.4.2 Vorgangsweise auf Gebäude-Ebene**

Zur Durchführung der Potentialanalyse ist eine Modellierung des österreichischen Gebäudebestands hinsichtlich der nachfolgenden Parameter erforderlich:

- Für die jeweilige Bauepoche sind Referenz-Gebäude festzulegen und anschließend die Flächen der thermischen Gebäudehülle und der Heizwärmebedarf vor und nach der Sanierung mit einem Energieausweis-Rechner zu ermitteln (siehe Kapitel 4).
- Mittels der Statistik Austria-Daten [97] sowie gebäude- und bauepochenspezifischen Kennzahlen ist das solar nutzbare Flächenpotential für PV und Solarthermie in Abhängigkeit von der Bauepoche und vom Gebäudetyp abzuschätzen (Kapitel 5).

### **1.4.3 Vorgangsweise „österreichischer Gebäudebestand“**

Die Potentialanalyse bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand wird für vier unterschiedliche Gebäude-Energiestandards durchgeführt, um Aussagen über die Ökoeffizienz der zur Verfügung stehenden thermischen Sanierungs- und energetischen Modernisierungsmaßnahmen treffen zu können (Kapitel 6 und Kapitel 7).

Folgende Gebäude-Energiestandards wurden für die Modellberechnung zugrunde gelegt:

1. Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)
2. Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (NEH+)
3. Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)
4. Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+)

Als Indikatoren für die Ökobilanzierung der Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen wurden der kumulierte Energieaufwand – erneuerbar und nicht erneuerbar (CED), das Treibhauspotential (GWP) und das Abfallaufkommen festgelegt.

Die Ergebnisse werden in Kapitel 8 zusammengefasst und für die Ableitung von Handlungsempfehlungen und des weiteren Forschungsbedarfs in Kapitel 9 herangezogen. Im Vordergrund stehen die Erarbeitung von Aussagen über die Relevanz der bautechnischen Einflussfaktoren (Lebensdauer, Lösbarkeit etc.) und zur Ökoeffizienz der bilanzierten thermischen Sanierungs- und energetischen Modernisierungsvarianten, untergliedert nach den vier definierten Gebäude-Energiestandards. Für plakative Vergleichszwecke werden die Ergebnisse der Modellberechnungen den Statistikdaten (z.B. Bundesabfallwirtschaftsplan [12], e-control [25]) gegenübergestellt, um das erreichbare Einsparpotential besser vermitteln zu können.

## 1.5 Abgrenzung zu bestehenden Dissertationen & Publikationen

Die im Jahr 2007 veröffentlichte WIFO-Studie über innovative Klimastrategien für die österreichische Wirtschaft war der erste Impuls für das FFG-geförderte Projekt „Know-How-Plus – Möglichkeiten und Grenzen von Gebäudesanierungen auf Plusenergiehausstandard“ [93] hinsichtlich einer umfassenden Potentialanalyse mittels Ökobilanzen. In der WIFO-Studie [79] wurde das CO<sub>2</sub>-Einsparpotential für unterschiedliche Sanierungsquoten, einschließlich eines Wechsels auf erneuerbare Energieträger aufgezeigt. Der stoffliche und energetische Aufwand der erforderlichen Sanierungsmaßnahmen mittels Lebenszyklusbewertungen wurde leider nicht berücksichtigt. Gerade dies ist aber von Interesse, um generelle Aussagen zur Ökoeffizienz von Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen treffen zu können. Die für die WIFO-Studie verwendeten bauepochen- und gebäude-spezifischen HWB-Kennzahlen wurden im Rahmen der Know-How-Plus-Studie [93] mit anderen Literaturquellen kritisch hinterfragt. Eine HWB-Berechnung mittels Excel-Schulungs-Tool [87] wurde für alle zugrunde gelegten Referenz-Gebäude durchgeführt. Im Rahmen dieser Dissertation wurde jedoch nicht nur eine thermische Sanierung mit Passivhaus-Komponenten sondern auch mit Niedrigenergiehaus-Komponenten bilanziert.

Eine übersichtliche Darstellung möglicher Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der Bauepoche und vom Gebäudetyp ist bis zum jetzigen Zeitpunkt ausständig. Grundsätzlich wurden bisher nur Sanierungsmaßnahmen auf Passivhaus-Niveau betrachtet und eine Ökobilanzierung nur bis zur Errichtungs- bzw. Sanierungsphase durchgeführt. Eine Erweiterung auf den gesamten Lebenszyklus ist notwendig, um eine Verlagerung des Klimaschutz- und Energieproblems in bislang nicht berücksichtigte Lebenszyklusphasen zu vermeiden. Für die Lebenszyklusbewertung wurde das generelle Alterungsmodell herangezogen, welches für die Forschungsinitiative „Nachhaltig massiv“ mit dem Titel „AP 02 Lebensdauer von Bauteilen und Bauprodukten“ [94] am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie entwickelt wurde, wobei einige Anpassungen hinsichtlich einer praktikablen Umsetzung, einschließlich des Bezugs zu Dauerhaftigkeitskonzepten in normativen Regelwerken erforderlich waren.

Die im Jahr 2009 veröffentlichte Studie über „Regenerative Energie in Österreich“ [59] beinhaltet unter anderem eine top-down-Analyse über den Einsatz von PV- und Solarthermie-Anlagen. Einige Erkenntnisse dieser Studie wurden aufgrund der hohen Relevanz als wesentliche Randbedingungen für die Modellberechnung im Rahmen der Know-How-Plus-Studie [93] zugrunde gelegt bzw. für Plausibilitätskontrollen herangezogen. Dadurch wurde eine interdisziplinäre Schnittstelle zwischen diesen beiden Studien geschaffen, die einen direkten Vergleich der Projektergebnisse ermöglicht.

Von der Know-How-Plus-Studie [93] wurden einige Teil-Ergebnisse sowie die entwickelten Modelle für weiterführende Analysen übernommen (siehe Kapitel 1.4). Der baukonstruktionsorientierte Leitfaden wurde in Kooperation mit der AEE Intec erarbeitet, wobei die Entwicklung der Sanierungsvarianten und der bauphysikalische Nachweis von der AEE Intec durchgeführt wurden. Die Ökobilanzierung der Aufbauten, die Entwicklung und Anwendung der erforderlichen Modelle für die Durchführung der angestrebten Potentialanalysen wurden seitens des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz durch den Verfasser bearbeitet.

In der IG-Studie [67] erfolgte eine Analyse unterschiedlicher Sanierungsszenarien bezogen auf den österreichischen Wohngebäudebestand hinsichtlich des künftigen Energiebedarfs und CO<sub>2</sub>-Austoßes, wobei keine Lebenszyklusbewertung der thermischen Sanierungsmaßnahmen (Bauprodukte) durchgeführt sowie die Nutzung von PV und Solarthermie bilanziert wurde.

In [92] wurde das Einsparpotential hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energie durch thermische Sanierungen aufgezeigt, wobei ein Optimum zwischen Investitionsaufwand und CO<sub>2</sub>-Einsparung hinsichtlich einer Erhöhung der Fördereffizienz angestrebt wurde. Die erforderlichen Baumaßnahmen wurden bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

Im Forschungsprojekt Tabula [3] wurde eine Typologie des österreichischen Gebäudebestands erarbeitet, um die Energieeffizienz von Gebäudesanierungen mittels Energieausweis aufzeigen zu können. Nichtwohngebäude sowie die Nutzung von PV und Solarthermie wurden nicht berücksichtigt.

Im EU-Forschungsprojekt Enslic [91] wurden Lebenszyklusbewertungen (LCA) für ausgewählte Gebäude durchgeführt, einschließlich der Darstellung der relevanten Einflussfaktoren. Des Weiteren wurde eine Richtlinie für eine einheitliche Vorgangsweise bei der Ökobilanzierung von Neubau und Gebäudesanierungen ausgearbeitet. Es wurde aber keine Potential-Analyse für den österreichischen Gebäudebestand für unterschiedliche Sanierungs- und Modernisierungsszenarien durchgeführt.

Die technisch-wirtschaftliche Analyse von thermischen Sanierungen von Einfamilienhäusern wurde in [7] durch eine Gegenüberstellung des Heizwärme- und Endenergiebedarfs und den Investitionskosten durchgeführt. Eine Ökobilanzierung der Sanierung wurde nicht behandelt.

Im laufenden EU-Forschungsprojekt Episcopo [101] liegt der Schwerpunkt auf der transparenten Darstellung der energetischen Sanierungs-Strategien mittels Energieeffizienz-Indikatoren. Eine systematische Beurteilung der Energieeffizienz des Gebäudebestands soll entsprechend einem Bottom-Up-Ansatz vorgenommen werden und die erzielten Fortschritte mittels Monitoring laufend überprüft werden. Nach den bisher vorliegenden Informationen wird keine Ökobilanzierung der erforderlichen Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen vorgenommen.

Basierend auf einer Umfrage über durchgeführte Sanierungsmaßnahmen wurde in [105] das theoretische Einsparpotential hinsichtlich Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen bezogen auf den österreichischen Wohngebäudebestand hochgerechnet. Eine Ökobilanzierung der erforderlichen thermischen Sanierungsmaßnahmen wurde nicht berücksichtigt.

Ein planungsbegleitendes Bewertungsinstrument für Gebäudesanierungen wurde in [104] entwickelt. Die bauteilspezifische Modellierung der Sanierungsmaßnahmen wurde als Grundlage für

Lebenszykluskosten-Analysen herangezogen. Es wird die Etablierung einer Benchmark vorgeschlagen, die für Top-down-Analysen verwendet werden kann.

In [36] wurden die Ecofys-Kennzahlen für die Abschätzung des technischen und solarurbanen Flächenpotentials für die PV- und Solarthermie-Nutzung bezogen auf den deutschen Gebäudebestand herangezogen und mit publizierten Kennzahlen verglichen. Die berechneten Ergebnisse stellen tendenziell die obere Bandbreite der publizierten solar nutzbaren Flächen dar. Eine Lebenszyklusbewertung nach ökonomischen oder ökologischen Aspekten wurde nicht durchgeführt.

Im Forschungsprojekt Regio-Energy [96] wurde das technische Potential für erneuerbare Energieerzeugungssysteme (z.B. PV, Solarthermie etc.) aufgezeigt. Es wurde das Potential für erneuerbare Energieerzeugung für Österreich ausgewiesen, aber keine genauere Aufgliederung über die solar nutzbaren Flächen in Abhängigkeit von Bauepoche und Gebäudetyp. Diese Informationen wurden aber für die vorliegende Arbeit zur Abschätzung des erforderlichen Sanierungs- und Modernisierungsaufwand benötigt.

Müller [74] schätzte das Einsparpotential hinsichtlich des Heizwärme- (HWB) und Warmwasserwärmebedarfs bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand für drei unterschiedliche Szenarien ab, wobei auch eine Zunahme der Nutzflächen berücksichtigt wurde. Des Weiteren wurde auf eine Überschätzung des HWB-Einsparpotentials hingewiesen, indem der berechnete und der tatsächliche Heizwärmebedarf miteinander verglichen wurde. Diese Erkenntnis wurde in der vorliegenden Arbeit bei der Abschätzung des Nutzwärmeverbrauchs durch einen Abgleich mit statistisch erhobenen Verbrauchskennzahlen berücksichtigt. In [74] wurde keine Lebenszyklusbewertung nach ökologischen Gesichtspunkten durchgeführt.

Anhand dreier ausgewählter Gebäude (Bauepoche 1970 bis 1980) wurde in [64] mittels Lebenszykluskosten-Analysen und CO<sub>2</sub>-Bilanzen die Amortisationsdauer für zwei Sanierungsszenarien berechnet. Eine Variante stellte eine thermische Sanierung der Gebäudehülle dar, während die andere einen Austausch der Heizanlage auf energieeffiziente Alternativen bilanzierte. Es wurden die volkswirtschaftlichen Effekte durch umfassende Bestandssanierungen aufgezeigt. Eine Ökobilanzierung der erforderlichen Sanierungsmaßnahmen wurde nicht durchgeführt.

Im EU-Forschungsprojekt Request [2] wurden Wirtschaftlichkeitsvergleiche für unterschiedliche Sanierungsvarianten bezogen auf den Wiener Wohngebäudebestand (Mehrfamilienhäuser bis zum Baujahr 1976) behandelt. Es wurden die Investitionskosten für eine Gebäudesanierung auf Niedrigenergiehausstandard sowie die eingesparten Heizkosten ermittelt und daraus Aussagen über die Effizienz der jeweiligen Sanierungsmaßnahmen abgeleitet. Ziel ist es, die Sanierungsrate basierend auf den Empfehlungen von Energieausweis-Berechnungen voranzutreiben. Eine Ökobilanzierung der Sanierungsmaßnahmen war nicht Bestandteil dieser Studie.

In der Dissertation von Schriegl [92] wurden Szenario-Analysen mit einem Computermodell durchgeführt, welches den Wohngebäudebestand und Heiz-Warmwasseraufbereitungssysteme abbildet. Es wurde das Entwicklungspotential in Österreich bis zum Jahr 2020 in Abhängigkeit vom jeweiligen Optimierungsparameter (Kosten, Ausstoß an Treibhausgasemissionen oder Energieverbrauch) abgeschätzt. Die Umweltwirkungen durch die Bauprodukterzeugung sowie die externen Kosten wurden berücksichtigt. Eine genauere Untersuchung der Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich der Lösbarkeit der zusammengefügt Bauprodukte im Instandhaltungsfall (Begrenzung der Lebensdauer) sowie der Trennbarkeit der Baurestmassen (Kreislauffähigkeit) wurde nicht durchgeführt.

In [65] wurde entsprechend einem bottom-up-Ansatz das Einsparpotential durch thermische Sanierung des Bestands öffentlicher Gebäude abgeschätzt. Zur Anwendung kam das Programm

„Ernst/EE-Lab“ dessen Basisalgorithmus in der zuvor erwähnten Dissertation von Schriegl [92] entwickelt wurde. Der Nichtwohngebäudebestand öffentlicher Gebäude wurde mit der Gebäudedatenbank des Programms „Ernst/EE-Lab“ modelliert und der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser und der damit verbundene CO<sub>2</sub>-Ausstoß abgeschätzt. Es wurden Sanierungsmaßnahmen an der thermischen Gebäudehülle sowie Änderungen am Wärmebereitstellungssystem in Form von Szenarien-Analysen bilanziert und die erforderlichen Investitionskosten den erreichbaren Energieeinsparkosten gegenübergestellt.

## 2 Dauerhaftigkeit von Bauprodukten

Ein wichtiger Aspekt der Nachhaltigkeit ist eine ausreichende Dauerhaftigkeit der verwendeten Bauprodukte für eine geplante Nutzungsdauer eines Bauwerks. Dies erfolgt im Bauwesen grundsätzlich anhand von Regelwerken hinsichtlich planmäßiger Einwirkungen und für eine festgelegte Nutzungsdauer des Bauwerks. Die Lösbarkeit der zusammengefügte Bauprodukte sowie das Verhalten bei außerplanmäßigen Einwirkungen (Hagel, Hochwasser etc.) wird gar nicht oder nur rudimentär berücksichtigt. Da ein vorzeitiger Austausch jedoch zu einer Erhöhung des stofflichen und energetischen Ressourcenbedarfs führt, sind diese Aspekte in Zukunft verstärkt zu betrachten. In diesem Kapitel wird deshalb zuerst auf die bisherige Vorgangsweise bei der Auswahl von Bauprodukten eingegangen und jene dauerhaftigkeitsrelevante Kriterien identifiziert, die bislang in der Planung und in Regelwerken unzureichend berücksichtigt werden. Beginnend mit den Dokumenten auf europäischer Ebene bis hin zur Umsetzung auf nationaler Ebene soll aufgezeigt werden, wie die Dauerhaftigkeit bereits in den Überlegungen zur Bauproduktauswahl berücksichtigt wurde.

Anschließend werden die in Frage kommenden Modelle einer kritischen Analyse unterzogen und darauf aufbauend Festlegungen für die angestrebte Lebenszyklusanalyse von thermischen Sanierungsmaßnahmen und energetischen Modernisierungsmaßnahmen (Photovoltaik, Solarthermie etc.) getroffen und Schlussfolgerungen für die Entwicklung eines Modells zur Lebensdauervorhersage von Bauprodukten im eingebauten Zustand getroffen.

Ein Ausblick über die aktuellen Entwicklungen hinsichtlich der Berücksichtigung von dauerhaftigkeitsrelevanten Aspekten wird aufgezeigt und beispielhaft anhand des neuen Ansatzes zur Bauproduktauswahl mittels Leistungsmerkmalen gemäß der EN 1504 [84] erläutert. Abschließend wird der Nutzen einer Lebenszyklusdatenerhebung für die Praxis beschrieben und Handlungsempfehlungen für eine praktikable Umsetzung abgegeben.

### 2.1 Dauerhaftigkeit im Bauwesen

#### 2.1.1 Rahmenbedingungen in der EU

Für das „In Verkehr bringen“ von Bauprodukten sind die Vorgaben der Bauproduktenrichtlinie bzw. seit 24. April 2011 jene der Bauprodukteverordnung einzuhalten. Die wesentlichen Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie bzw. die Grundanforderungen der Bauprodukteverordnung werden jedoch nicht auf das Produkt selbst, sondern auf das Bauwerk bezogen. Eine CE-Kennzeichnung des Bauprodukts darf vom Hersteller angebracht werden, wenn die Konformität mit den zugehörigen harmonisierten Normen, Europäischen Technischen Zulassungen (neu: Europäisches Bewertungsdokument lt. BPV) oder anerkannten, nicht harmonisierten technischen Spezifikationen (neu: Europäische Technische Bewertung lt. BPV) nachgewiesen wird. Der Hersteller erklärt mit der CE-Kennzeichnung seines Bauprodukts, dass alle Anforderungen der zugehörigen technischen Spezifikation und das Konformitätsbewertungsverfahren erfüllt werden. [35]

Die Bauproduktauswahl ist vom Planer nach architektonischen, technischen, ökonomischen und neuerdings auch nach ökologischen Aspekten unter Einhaltung der wesentlichen Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie bzw. der Grundanforderung der Bauprodukteverordnung zu treffen. Die Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie lauten wie folgt:

1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit,
2. Brandschutz,
3. Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz,
4. Nutzungssicherheit,
5. Schallschutz,
6. Energieeinsparung und Wärmeschutz.

In der Bauprodukteverordnung [28] wurde eine Erweiterung der bisherigen wesentlichen Anforderungen der Bauprodukten-Richtlinie um den Punkt 7 „sustainable use of natural resources (dt.: Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen)“ vorgenommen. Die Forderung lautet, dass Bauwerke so geplant, gebaut und rückgebaut werden müssen, dass eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen sichergestellt wird. ([28], Anhang I, Seite 4)

In diesem Zusammenhang kann abgeleitet werden, dass im Hinblick auf künftige Instandhaltungs- bzw. Rückbaumaßnahmen auch auf die Fügeverfahren im Rohbau, beim Ausbau und in der Gebäudetechnik und auf eine Abstimmung der unterschiedlichen Lebensdauer der Bauprodukte auf die Nutzungsdauer des Bauwerks zu achten ist. [94]

Die Dauerhaftigkeit muss zur Erlangung eines CE-Kennzeichens für das jeweilige Bauprodukt entweder durch direkte oder indirekte Prüfungen (z.B. Frost-Tausalzprüfung von Beton) nachgewiesen werden. Wie diese Prüfungen im Detail auszusehen haben, hängt von den geforderten Produkteigenschaften im eingebauten Zustand ab.

Für den Fall, dass für ein Bauprodukt keine Erfahrungen bzgl. Dauerhaftigkeitsprüfverfahren vorliegen, ist das EOTA-Guidance Document 003 [33] heranzuziehen. In diesem EOTA-Guidance Document 003 [33] wird auf die Verwendung der ISO 15686 hingewiesen, die einen generellen Ablauf zur Ermittlung der Dauerhaftigkeitsaspekte beginnend von der Datenerhebung, Gliederung der Einflussfaktoren über die Prüfmethode bis hin zur Aufbereitung der Ergebnisse vorgibt.

Die Berücksichtigung der Lebensdauer bzw. Dauerhaftigkeit in technischen Regelwerken (Eurocode, hEN oder ETAG) wird durch die ISO 13823 [55], ISO 2394 [52] und ISO 15686-Normenreihe geregelt. Außerdem existieren noch andere Dokumente (Interpretative Documents, EOTA - Guidance Paper), die Aussagen zur Auswahl dauerhafter Bauprodukte beinhalten. Die wesentlichen Prinzipien, Inhalte und Schnittstellen zwischen den jeweiligen Dokumenten sind in der Abbildung 3 dargestellt.

In ISO 2394 [52] werden Nutzungsdauern für Bauwerke, einschließlich der Zuverlässigkeitsindizes als Grundlage für Zuverlässigkeitsanalysen angegeben und den Eurocodes zugrunde gelegt. Die ISO 13823 [55] erweitert den Ansatz der ISO 2394 [52] unter Einbezug der zeitlich abhängigen Veränderung der Widerstandsseite durch Materialschädigung, wodurch die voraussichtliche Lebensdauer in Abhängigkeit vom zugrunde gelegten Sicherheitsniveau mittels probabilistischer Methoden ermittelt werden kann.

Die ISO 15686-Normenreihe gibt hingegen generelle Rahmenbedingungen zur standardisierten Ermittlung und Anwendung von Lebensdauerdaten vor. Es werden generelle Prinzipien für die lebensdauerorientierte Planung von Neubau und Sanierung, die Faktormethode zur Ermittlung der voraussichtlichen Lebensdauer und Anforderungen zur Durchführung und Berichterstattung von Lebensdauerdaten erläutert. Angestrebt wird die Bereitstellung von Lebensdauerdaten als Eingangsdaten für Lebenszyklusanalysen in ökonomischer und ökologischer Hinsicht.

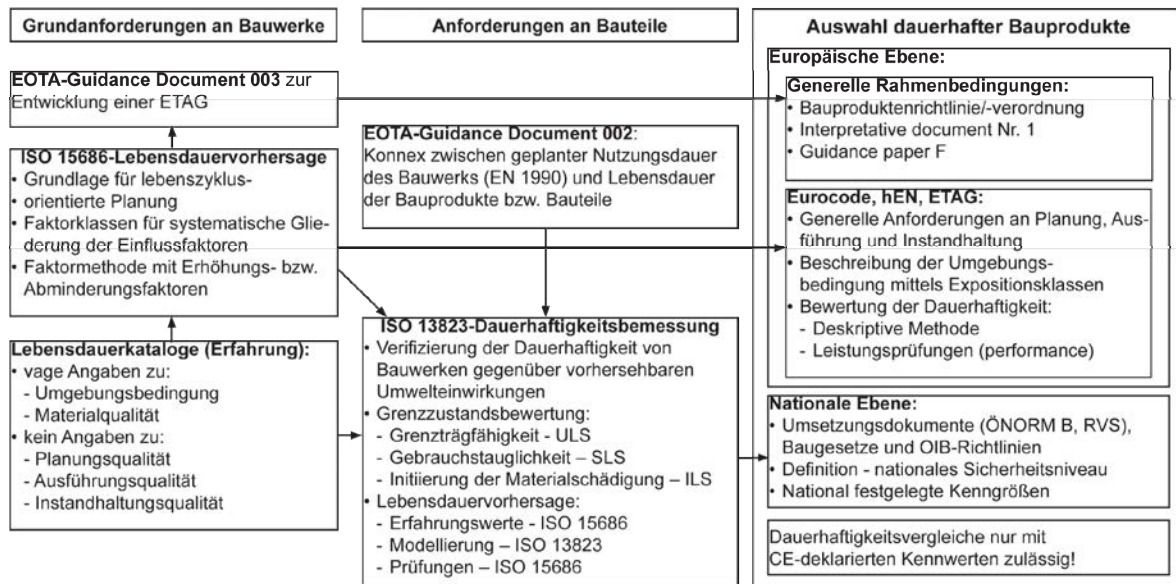


Abbildung 3 Rahmenbedingungen für den Umgang mit der Dauerhaftigkeit im Bauwesen

## 2.1.2 Berücksichtigung von Dauerhaftigkeitsaspekten - Guidance Paper F

Im Guidance Paper F wird speziell auf die Dauerhaftigkeit von Bauprodukten und die Berücksichtigung von Dauerhaftigkeitsaspekten in der Normung eingegangen. Unter Lebensdauer wird jener Zeitraum verstanden, in dem das Leistungsvermögen eines Bauprodukts durch Instandhaltung auf einem bestimmten Niveau aufrecht erhalten wird, um alle Grundanforderungen der Bauprodukteverordnung zu erfüllen, die an richtig geplante und ausgeführte Bauwerke gestellt werden. ([31], S.5)

Voraussetzung für eine Festlegung einer ökonomisch angemessenen Nutzungsdauer ist die Berücksichtigung folgender Aspekte: Planungs-, Errichtungs- und Nutzungskosten, Ausfallkosten, Risiko und Konsequenzen durch Versagen in der geplanten Nutzungsdauer, planmäßige Instandsetzungen, Kosten für Inspektion, Wartung, Instandhaltung und Instandsetzung, Kosten für Administration und Betrieb, Entsorgung sowie Umweltaspekte. ([31], S.4)

### Diskrepanz zwischen angenommener und tatsächlicher Lebensdauer

Es ist zwischen der angenommen ökonomischen Lebensdauer eines Bauprodukts, welche in Regelwerken der Dauerhaftigkeitsbewertung zugrunde gelegt wird, und der tatsächlichen Lebensdauer eines eingebauten Bauprodukts zu unterscheiden. Letztere hängt von einer Vielzahl von Einflüssen ab, die außerhalb des Einflussbereichs des Bauprodukterzeugers liegt. Folglich kann die Angabe von Lebensdauern nicht als Herstellergarantie, sondern nur als Hilfe für die Bauproduktauswahl unter Berücksichtigung einer ökonomisch angemessenen Lebensdauer angesehen werden. ([31], S.5)

Ersteller von Normen und Richtlinien sollen laut [31] folgende Punkte beachten: ([31], S.5)

- Gewöhnliche Lebensdauer der in Betracht kommenden Bauprodukte und Bauwerke,
- Anforderungen hinsichtlich der Instandhaltung,
- Geringer technischer und ökonomischer Instandhaltungs- und Instandsetzungsaufwand,
- Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen.



### **Definition – Dauerhaftigkeit**

Die Dauerhaftigkeit eines Bauprodukts ist die Fähigkeit eines Bauprodukts, die wesentlichen Anforderungen für einen gegebenen Zeitraum unter vorhersehbaren Einwirkungen zu erfüllen. Die Dauerhaftigkeit hängt folglich von der geplanten Nutzung und Instandhaltung ab. ([31], S.5)

Die Dauerhaftigkeit von Bauprodukten kann durch leistungsbezogene Methoden als auch durch deskriptive Methoden verifiziert werden. Deskriptive Methoden werden zur Beschreibung der Dauerhaftigkeit von Bauprodukten mit abgesicherten Langzeit-Erfahrungswerten herangezogen, wobei diese stets auf die potentiellen Umgebungsbedingungen zu beziehen sind, beispielsweise mittels Expositionsklassen. ([31], S.6)

Zur Dauerhaftigkeitsbewertung von Bauprodukten werden grundsätzlich leistungsbezogene Prüfungen durchgeführt, um anhand der Veränderung der Bauprodukteigenschaften unter definierten Prüfbedingungen Rückschlüsse auf die Dauerhaftigkeit ziehen zu können.

### **Folgende Arten von leistungsbezogenen Prüfungen stehen zur Verfügung ([31], S.7)**

- **Direktprüfungen:** Der Nachweis hinsichtlich der Einhaltung eines bestimmten Leitungsniveaus durch die maßgebenden Produkteigenschaften (z.B. Abrieb, Ermüdung etc.) wird hinsichtlich der Sicherstellung einer akzeptablen Dauerhaftigkeit als ausreichend erachtet.
- **Indirekte Prüfungen:** Bei diesem Prüfablauf werden dauerhaftigkeitsrelevante Produkteigenschaften nicht direkt sondern durch stellvertretende korrelierende Produkteigenschaften getestet, wie beispielsweise die Porosität für die Frost-Tausalzbeständigkeit.
- **Natürliche Bewitterung / Alterungsprüfungen:** Jene Prüfverfahren ermöglichen eine direkte Aussage zur Dauerhaftigkeit beispielsweise durch Korrosionsprüfungen oder durch Langzeitprüfungen unter realen Umgebungsbedingungen.
- **Zeitraffende Bewitterung und Alterungsprüfungen:** Verglichen mit dem zuvor erwähnten Prüfverfahren wird der gewöhnliche Alterungsprozess beschleunigt, um die Prüfdauer reduzieren zu können.
- **Prüfung unter Extrembedingungen:** Die Prüfung erfolgt unter Extrembedingungen, die nicht mit gewöhnlichen Umgebungsbedingungen im eingebauten Zustand vergleichbar sind, beispielsweise der Kochtest für faserverstärkten Kunststoff.

Grundsätzlich soll jede hEN oder ETAG für jede relevante Produkteigenschaft nur jeweils ein Prüfverfahren zur Bewertung der Dauerhaftigkeit beinhalten. Falls dies nicht erfüllt wird, dann sollen Vorkehrungen getroffen werden, dass die unterschiedlich ermittelten Kennwerte als gleichwertig oder korreliert gewertet werden dürfen. ([31], S.7)

Bei der Entwicklung einer Norm soll ein pragmatischer Ansatz zwischen kostenintensiven Prüfverfahren und deskriptiven Methoden gewählt werden, wodurch sichergestellt werden soll, dass durch Einhaltung der Konformität mit den maßgebenden Normen und ETAG-Richtlinien eine gewöhnliche Lebensdauer bei ordnungsgemäßer Instandhaltung vorausgesetzt werden kann. ([31], S.8)

Falls für ein Bauprodukt unterschiedliche Lebensdauern existieren, dann sind Klassifizierungssysteme für die Bewertung der Dauerhaftigkeit, bezogen auf die jeweilige Umgebungsbedingung, in der zugrunde gelegten Norm bereitzustellen. ([31], S.10)

### **Im Guidance Paper F ist eine hierarchische Reihung von Methoden zur Dauerhaftigkeits-Bewertung angegeben ([31], S.12)**

1. **Direkte Bewertung mittels Prüfung oder Berechnung:** Das Bauprodukt wird einer bestimmten Einwirkung ausgesetzt. Anschließend erfolgt die Bewertung der Dauerhaftigkeit anhand der gemessenen Kennwerte.
2. **Indirekte Prüfung:** Dieser Prüfablauf entspricht im Wesentlichen der direkten Bewertung. Der Unterschied ist, dass die gemessenen Produkteigenschaften mit den dauerhaftigkeitsrelevanten Produkteigenschaften korrelieren und folglich für Dauerhaftigkeitsbewertungen stellvertretend herangezogen werden können. (Beispiel: abgewitterte Masse bei Frost-Tausalz-Prüfung)
3. **Beschichtungen:** Falls das zu bewertende Bauprodukt stets eine Beschichtung voraussetzt (z.B. Anstrich, Putz etc.), dann sind vom Bauproduktenerzeuger alle relevanten Angaben über die in Frage kommenden Beschichtung (Dicke, Typ etc.) bekanntzugeben.
4. **Vorgegebene Anforderungen:** Es werden bestimmte Voraussetzungen vorgegeben, die direkt oder indirekt mit der Dauerhaftigkeit in Zusammenhang stehen. Dies erfordert ausreichend Erfahrung mit dem jeweiligen Bauprodukt im eingebauten Zustand, um eine Aussage bezüglich der Dauerhaftigkeit machen zu können.
5. **Indirekte Bewertung:** Im Gegensatz zur indirekten Prüfung ist der direkte Zusammenhang zwischen den gemessenen und den dauerhaftigkeitsrelevanten Produkteigenschaften bedingt korreliert. Ein Bauprodukt wird als dauerhaft angesehen, wenn es die in einer Norm definierten Anforderungen erfüllt, wobei diese in Form von Grenzwerten vorgegeben werden.

Im Guidance Paper [31] wird angemerkt, dass **die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsbewertung ein Teil der CE-Kennzeichnung sein müssen.** ([31], S.12)

### **2.1.3 Vorschriften zur Dauerhaftigkeit - Interpretative Documents**

Interpretative Documents stellen laut dem ASI Austrian Standards Institute [80] den Konnex zwischen den Grundanforderungen gemäß der Bauprodukteverordnung und den Mandaten an das CEN zur Erstellung harmonisierter Produktnormen bzw. EOTA zur Erstellung von ETAG's her.

Im „Interpretative document No. 1: Mechanical resistance and stability“ wird unter der Kategorie „Working life and durability“ angemerkt, dass Aspekte der Dauerhaftigkeit im Mandat an das CEN zur Erstellung einer harmonisierten Produktnorm oder an die EOTA zur Erstellung einer ETAG zu erfassen sind, wenn Vorschriften zur Dauerhaftigkeit von Bauwerken hinsichtlich der Erfüllung der wesentlichen Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie bzw. Grundanforderungen der Bauprodukteverordnung mit den Produktmerkmalen zusammenhängen. Es ist jedem Mitgliedsland vorbehalten, Vorgaben zur Nutzungsdauer hinsichtlich der Erfüllung der Grundanforderungen für jede Art von Bauwerken oder Bauteilen zu machen. [30]

### **2.1.4 Dauerhaftigkeitsbezug in EOTA-Dokumenten**

Im Gegensatz zu hEN können in Europäischen Technischen Zulassungen (ETAG) quantitative Angaben über die Nutzungsdauer des Bauprodukts gemacht werden. So wird beispielsweise in der ETAG 04 – Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen für außenseitige Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) mit Putzschicht – eine voraussichtliche Nutzungsdauer von mindestens 25 Jahren für den vorgesehenen Verwendungszweck angegeben, unter der Voraussetzung einer angemessenen Nutzung und Instandhaltung des Wärmedämmverbundsystems. [34]

Die Annahme einer „voraussichtlichen Nutzungsdauer“ beruht auf Erkenntnissen aus der Materialforschung und praxisbezogenen Erfahrungswerten und bedeutet Folgendes: es wird erwartet, dass nach Ablauf der voraussichtlichen Nutzungsdauer die tatsächliche Lebensdauer unter normalen

Nutzungsbedingungen erheblich länger sein kann, ohne dass durch einen größeren Qualitätsverlust eine nachteilige Auswirkung auf die wesentlichen Anforderungen bzw. Grundanforderungen erkennbar ist. [34]

Im **EOTA-Guidance Document 002** [32] ist in tabellarischer Form ein Zusammenhang zwischen der voraussichtlichen Nutzungsdauer von Bauwerken und der Nutzungsdauer von Bauprodukten dargestellt (siehe Tabelle 2-1). Die angegebenen Nutzungsdauern für Bauprodukte sollen in ETAG und hEN als Richtwerte angenommen werden, wenn keine praxisbezogenen Erfahrungswerte oder aussagekräftige Materialforschungsergebnisse hinsichtlich der zu erwartenden Lebensdauer vorliegen. Die Nutzungsdauer von Bauwerken wird durch nationale Regelwerke geregelt. Aus Sicht der EOTA wird die angenommene Nutzungsdauer eines Bauprodukts als Ausgangspunkt für die Festlegung der erforderlichen Prüfmethode herangezogen.

*Tabelle 2-1 Konnex - Nutzungsdauer Bauwerk und Bauprodukt nach [32], verändert*

Kategorie	Geplante Nutzungsdauer des Bauwerks			
	10 Jahre	25 Jahre	50 Jahre	100 Jahre
reparierbar / leicht austauschbar	10	10	10	10
reparierbar / mit höherem Aufwand austauschbar	10	25	25	25
dauerhaft	10	25	50	100
Zugrunde gelegte Nutzungsdauer von Bauprodukten in ETAG, hEN (Jahre)				

Die an ein Bauprodukt gestellten Leistungen werden durch die wesentlichen Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie bzw. Grundanforderungen der Bauprodukteverordnung, ergänzt durch die „Interpretative Documents“, beschrieben. Die maßgebenden Leistungsanforderungen, Leistungskriterien und das zugrunde gelegte Prüfverfahren zur Bewertung der Nutzungsdauer werden im Mandat erläutert. ([33], S.4)

### 2.1.5 Nutzungsdauerorientierte Tragwerksplanung - Eurocode

Eurocodes stellen eine normative Grundlage für die Tragwerksplanung in EU und EFTA-Mitgliedsländern dar und geben Anforderungen und Prinzipien hinsichtlich der Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Tragwerken vor. Durch den Bezug auf das Bauwerk stellen Eurocodes eine direkte Verbindung zu den Grundlegendokumenten dar, weswegen bei der Entwicklung von Regelwerken stets auf den Konnex zwischen Produktnormen und Eurocodes zu achten ist. Durch nationale Anhänge wird eine Anpassung an das nationale Sicherheitsniveau durch jene Parameter ermöglicht, die im Eurocode für nationale Entscheidungen offen gelassen wurden. ([82], S. 5 ff)

Laut ÖNORM EN 1990 ist die geplante Nutzungsdauer folgendermaßen definiert: ([82], S. 11)

„Angenommene Zeitdauer, innerhalb der ein Tragwerk unter Berücksichtigung vorgesehener Instandhaltungsmaßnahmen für seinen vorgesehenen Zweck genutzt werden soll, ohne dass jedoch eine wesentliche Instandsetzung erforderlich ist.“

In der ÖNORM EN 1990 sind 5 Klassen für die Festlegung der geplanten Nutzungsdauer vorgegeben (siehe Tabelle 2-2), die als Grundlage für Dauerhaftigkeitsnachweise herangezogen werden, wie beispielsweise für Ermüdungsnachweise. ([82], S. 21)

Tabelle 2-2 Nutzungsdauerklassen - ÖNORM EN 1990 nach [82], verändert

Klasse	Geplante Nutzungsdauer	Beispiele
1	10	Temporäre Tragwerke
2	10-25	Austauschbare Tragwerksteile
3	15-30	Landwirtschaftlich genutzte Tragwerke
4	50	Gebäude
5	100	Monumentale Bauwerke

Im fib Model Code 2010 [38] werden die neuesten Entwicklungen hinsichtlich des Entwurfs und Bemessung von Betontragwerken erläutert, welche als Empfehlungen für die Überarbeitung bestehender Regelwerke anzusehen sind. Die wesentlichen Erneuerungen sind die Erweiterung um den Faktor „Zeit“ durch die Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus und die Übersicht über den Stand der Wissenschaft hinsichtlich alternativer nicht-metallischer Bauprodukte als Bewehrungen für Betontragwerke. Es werden fünf unterschiedliche Methoden zur Bewertung der Tragsicherheit unter Berücksichtigung der Aspekte „Dauerhaftigkeit, Robustheit und Nachhaltigkeit“ erläutert, die auch für die Abschätzung der Rest-Lebensdauer von bestehenden Betontragwerken genutzt werden können.

### 2.1.6 Nationale Umsetzung der bisherigen Bauproduktenrichtlinie

Die Bauproduktenrichtlinie wurde durch die Bauprodukteverordnung [28] ersetzt, wobei diese keine nationale Umsetzung erfordert, da sie direkt anzuwenden ist. Eine Anpassung der OIB-Richtlinie 1 bis 6 zur Berücksichtigung des Punkts 7 „Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“ der Bauprodukteverordnung wird künftig erforderlich sein. Im Nachfolgenden werden die dauerhaftigkeitsrelevanten Aspekte der derzeit verbindlichen OIB-Richtlinien erläutert.

Die Zuverlässigkeit der Tragwerke hat laut Punkt 2.1.2 der OIB Richtlinie 1 - Mechanische Festigkeit und Standsicherheit den Anforderungen der ÖNORM EN 1990 [82] zu entsprechen. ([76], S.2)

Die Forderung an Tragwerksplanung und -herstellung hinsichtlich ausreichender Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit gegenüber Einwirkungen ist erfüllt, wenn die allgemein anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden. ([76], S. 2)

Unter Regeln der Technik werden laut den erläuternden Bemerkungen zu OIB-Richtlinie 1 ([77], S. 1) Normen, Richtlinien und ähnlich dokumentierte Regelwerke verstanden.

Die Verwendbarkeit von Bauprodukten für den dauerhaften Einbau in ein Bauwerk wird auf nationaler Ebene geregelt, beispielsweise in Österreich anhand der ÖE-Liste, herausgegeben vom OIB. Anhand der ÖE-Liste können für harmonisierte europäische Normen (hEN) oder Europäische Technische Zulassungen (ETAG) die maßgebenden nationalen Umsetzungsnormen (ÖNORM B oder RVS) identifiziert werden. Im nationalen Anhang einer ÖNORM EN werden Festlegungen hinsichtlich einer Anpassung des Sicherheitsniveaus an nationale Gegebenheiten getroffen. Beispielsweise wird im nationalen Vorwort der ÖNORM EN 1991-1-3 hingewiesen, dass sie mit der nationalen Umsetzungsnorm ÖNORM B 1991-1-3 gemeinsam anzuwenden ist. Im Umsetzungsdokument werden national festgelegte Kenngrößen (engl.: Nationally Determined Parameter, NDP) angegeben. [30]

In der Bauproduktenrichtlinie wird angemerkt, dass die Anforderungen über eine wirtschaftlich angemessene Nutzungsdauer und unter der Voraussetzung einer normalen Instandhaltung erfüllt werden müssen. Grundsätzlich werden durch die Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie bzw. die Grundanforderungen der Bauproduktverordnung planmäßige Einwirkungen vorausgesetzt. ([24], S.20)

Beispielsweise wird im Steiermärkischen Baugesetz gemäß § 43 gefordert, dass die Planung und Ausführung eines Bauwerks in all seinen Teilen nach den Regeln der Technik und den

bautechnischen Vorschriften so durchgeführt werden muss, dass es nach seinem Verwendungszweck und den örtlichen Verhältnissen den Grundanforderungen der Bauprodukteverordnung entspricht. ([1], S. 26) [1]

## **2.2 Probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse - ISO 13823 [55]**

Probabilistische Zuverlässigkeitsanalysen erfordern grundsätzlich aufwendige materialwissenschaftliche Untersuchungen, um den zeitlichen Schädigungsverlauf beschreiben zu können. Sie werden deshalb nur für die Bewertung von Bauwerken mit hohem Risikopotential (z.B. Brücken) angewandt.

Die ISO 13823 [55] beschreibt generelle Prinzipien und Vorgangsweisen zur Verifizierung der Dauerhaftigkeit von Bauwerken gegenüber vorhersehbaren Umwelteinwirkungen, die zu einer Abnahme der Widerstandsfähigkeit des Bauprodukts bis hin zum Versagen führen. ([55], S.1)

### **2.2.1 Wesentliche Bestandteile – ISO 13823 [55]**

Zur materialwissenschaftlichen Beschreibung der möglichen Schädigungsprozesse ist in der ISO 13823 ein vierstufiger Ablauf vorgesehen. Die wesentlichen Bestandteile der ISO 13823 sind nachfolgend kurz beschrieben und in der Abbildung 4 grün unterlegt dargestellt:

#### **2.2.1.1 Umgebungsbedingung des Bauwerks / Structure Environment**

Die Umgebungsbedingung des Bauwerks beschreibt jene Einflüsse wie beispielsweise Regen oder Temperatur, welche die Dauerhaftigkeit von Bauprodukten und Bauteilen beeinflussen. ([55], S.5)

#### **2.2.1.2 Transfermechanismen / Transfer mechanism**

Jener Mechanismus, der Umwelt-Einflüsse (UV, Regen, Tausalze, etc.) in chemische oder biologische Substanzen umwandelt oder durch den physikalische oder biologische Prozesse verursacht werden, die zu einer Alterung bzw. Reduktion der Widerstandsfähigkeit des Bauprodukts führt. ([55], S.5)

#### **2.2.1.3 Umwelteinwirkung / Environmental action**

Umwelteinwirkungen sind chemische, elektrochemische, biologische, physikalische oder mechanische Einwirkungen, die eine Materialschädigung oder –deformation hervorrufen, wie Korrosion oder Fäule. ([55], S.5)

#### **2.2.1.4 Auswirkung / Action effects**

Auswirkungen können zum Beispiel ein reduzierter Materialwiderstand, Eigenspannungen oder ein unakzeptables Erscheinungsbild sein. ([55], S.5)

Der Zeitraum bis zur Initiierung der Materialschädigung ist mit dem Begriff  $t_{\text{start}}$  definiert. An diesen folgt der Zeitraum  $t_{\text{exponiert}}$ , der mit dem Versagen des Bauprodukts endet. Zusammen ergeben sie die voraussichtliche Lebensdauer  $t_s$  (siehe Abbildung 4).

In der Abbildung 4 sind zusätzlich die Arbeitsschritte zur materialwissenschaftlichen Beschreibung jener Schädigungsprozesse dargestellt, die zu einer Abnahme der Widerstandseite führen.

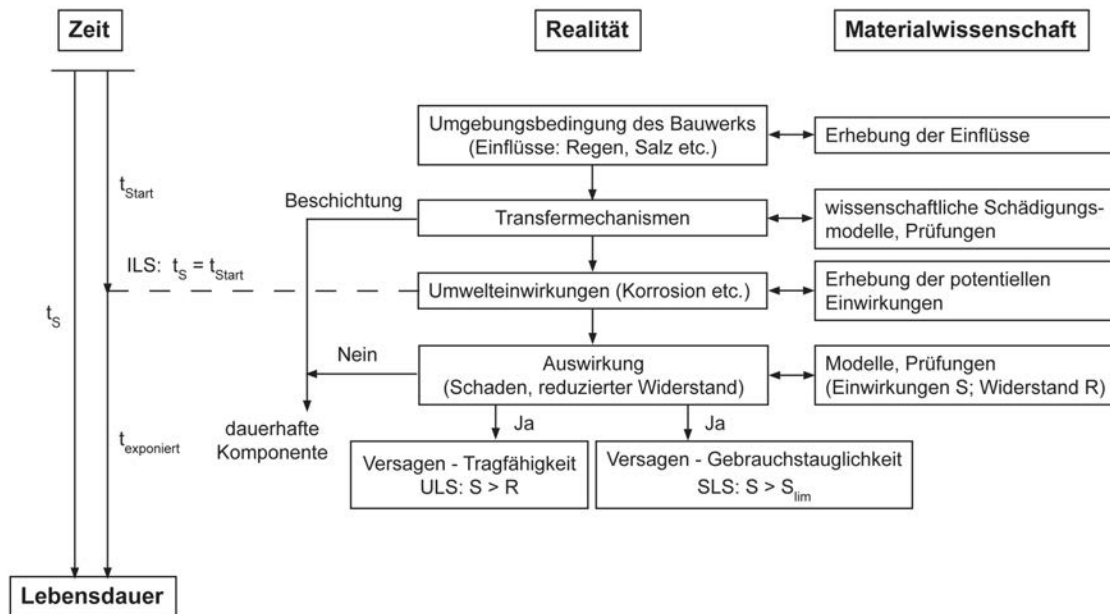


Abbildung 4 Wesentliche Bestandteile der ISO 13823 [55], verändert

## 2.2.2 Überprüfung - Dauerhaftigkeitsanforderung

Zwei Ansätze zur Überprüfung der Dauerhaftigkeitsanforderungen werden in der ISO 13823 ([55], S. 8) vorgeschlagen:

1. Lebensdauerbewertung
2. Grenzzustandsbewertung

### 2.2.2.1 Lebensdauerbewertung

Bei diesem Nachweisverfahren werden die geplante Nutzungsdauer und die voraussichtliche Lebensdauer eines Bauwerks oder von Bauteilen und der Zuverlässigkeitsindex festgelegt. Falls eine Lebensdauerbewertung mittels Erfahrungswerten oder Testergebnissen durchgeführt wird, führt dies zur Gleichung  $t_{\text{S}} = t_{\text{SP}}$ . Für eine probabilistische Lebensdauerbewertung mittels Grenzzustandsmethoden ist die Gleichung  $P(t_{\text{S}} \leq t_{\text{d}}) \leq P_{\text{target}}$  anzusetzen. ([55], S. 8)

Die Lebensdauer  $t_{\text{S}}$  wird mit mathematischen Modellen als eine Funktion der Basisvariablen  $X_i$ ,  $Y_i$  und der Zeit  $t$  berechnet.  $X_i$  ist eine Funktion in Abhängigkeit vom Transfermechanismus zur Ermittlung des Zeitpunkts  $t_{\text{Start}}$ . Die Funktion  $Y_i$  bezieht sich auf den zeitlich abnehmenden Materialwiderstand infolge Materialschädigung bis zum Zeitpunkt des Versagens. Alternativ kann der Grenzzustand auch mit Teilsicherheitsbeiwerten, entsprechend dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept ermittelt werden. ([55], S. 8)

### 2.2.2.2 Grenzzustandsbewertung

In der ISO 13823 [55] sind drei Arten von Grenzzuständen definiert und auf folgende Kriterien bezogen (siehe Abbildung 4):

1. Grenztragfähigkeit – ultimate limit state (ULS)
2. Gebrauchstauglichkeit – serviceability limit states (SLS)
3. Initiierung der Materialschädigung – initiation limit state (ILS)

### 2.2.2.3 Grenzzustandsbewertung - Tragfähigkeit

$R(t)$  stellt den Widerstand des Bauwerks oder Bauteils gegenüber den Einwirkungen  $S(t)$  dar.  $P_f(t)$  entspricht der Versagenswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt  $t$  und darf die maximal zulässige Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{\text{target, ULS}}$  nicht überschreiten. ([55], S. 8)

$$P_f(t) = P[R(t) - S(t) < 0] < P_{\text{target, ULS}}$$

In Abbildung 5 ist beispielhaft die Abnahme der Widerstandsseite  $R(t)$  durch Alterungseffekte bzw. die Zunahme der Einwirkung  $S(t)$  durch das Heraufsetzen des höchstzulässigen Gesamtgewichts von Lastkraftwagen über die Zeit  $t$  dargestellt. Die voraussichtliche technische Lebensdauer  $t_{\text{sp}}$  ist erreicht, wenn die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f(t) < 0$  ist.

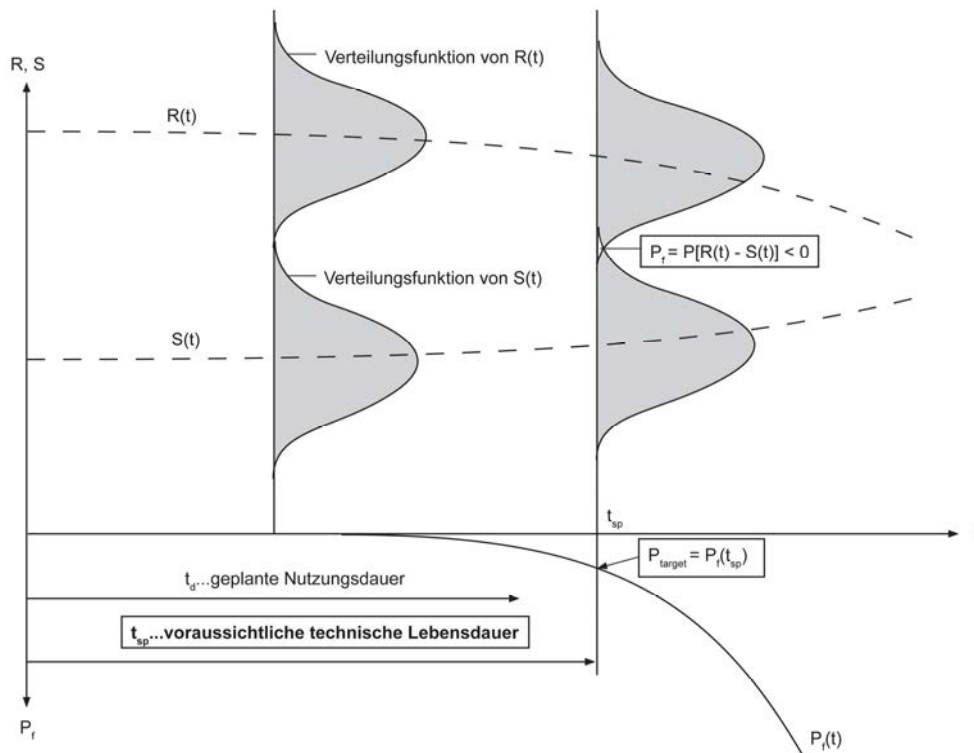


Abbildung 5 Grenzzustandsbewertung - ISO 13823 [55], verändert

### 2.2.2.4 Grenzzustandsbewertung - Gebrauchstauglichkeit

Die Grenze der Gebrauchstauglichkeit wird als  $S_{\text{lim}}$  bezeichnet. Innerhalb der geplanten Nutzungsdauer darf der Grenzzustand nicht erreicht werden. Diese Anforderung wird mit der Gleichung  $S_{\text{lim}} > S(t)$  beschrieben.  $S(t)$  ist die Auswirkung durch eine Einwirkung zum Zeitpunkt  $t$ , beispielsweise belastungsbedingte Verformungen.  $S(t)$  wird als mathematische Funktion in Abhängigkeit von den Basisvariablen  $X_i$ ,  $Y_i$  und  $t$  definiert, die zur Modellierung von  $R$ ,  $S$ ,  $t_{\text{start}}$  und  $t_{\text{exposed}}$  verwendet werden.

In der Praxis wird oft der semi-probabilistische Ansatz mit Teilsicherheitsbeiwerten verwendet, Die Gleichung zur Beschreibung der Grenze der Gebrauchstauglichkeit wird mit  $P_f(t) = P[S_{\text{lim}} - S(t) < 0] < P_{\text{target, SLS}}$  beschrieben. ([55], S. 9)

### 2.2.2.5 Grenzzustandsbewertung - Initiierung der Materialschädigung

Es können die zuvor erwähnten Ansätze verwendet werden, wobei der Zeitraum  $t_{\text{exposure}}(Y_i, t)$  auf null gesetzt wird, d.h., die Lebensdauer eines Bauprodukts endet bei Abnahme der Widerstandsseite. [55]

### **2.2.2.6 Grenzzustandsbewertung – Bauwerksebene versus Bauteil-/Bauproduktebene:**

Grenzzustandsbewertungen können auch auf Bauteil-/Bauproduktebene mit Hilfe von Systembewertungen (z.B. Fehlerbaumanalyse) durchgeführt werden. ([55], S. 9)

### **2.2.3 Voraussichtliche Lebensdauer - Predicted service life**

In der ISO 13823 [55] werden drei Möglichkeiten zur Ermittlung der voraussichtlichen Lebensdauer von Bauwerken und Bauteilen erläutert: ([55], S. 13)

1. Erfahrungswerte – Basis: ISO 15686-8 [56]
2. Modellierung – Basis: ISO 13823 [55]
3. Prüfungen – Basis: ISO 15686 [56]

#### **2.2.3.1 Erfahrungswerte**

Die Erhebung und Anwendung der Erfahrungswerte sind gemäß der ISO 15686-2 [54] durchzuführen. Systematisch erhobene regionale Langzeiterfahrungen stellen die zuverlässigsten Informationen über traditionelle Bauprodukte und Bauteile dar. ([55], S. 13)

#### **2.2.3.2 Modellierung**

**Begriffsmodell:** Der Modellaufbau hat den Anforderungen der ISO 13823 [55] zu entsprechen, wobei eine verbale Beschreibung mittels Kategorien (Umgebungsbedingung, Transfermechanismus etc.) in Abhängigkeit vom jeweiligen Bauwerk, Bauteil oder Bauprodukt erfolgt. ([55], S. 13)

**Mathematisches Modell:** Dieses Modell kann entweder auf einem probabilistischem, semi-probabilistischem Konzept der ISO 2394 [52] oder auf der Faktor-Methode der ISO 15686 [56] basieren. ([55], S. 13)

#### **2.2.3.3 Prüfungen**

Die voraussichtliche Lebensdauer  $t_{sp}$  eines Bauprodukts oder Bauteils wird durch Prüfungen des jeweiligen Bauprodukts oder Bauteils ermittelt, wobei die Anforderungen der ISO 13823 [55] und der ISO 15686 Teil 2 [54] hinsichtlich der Durchführung und Auswertung der Prüfergebnisse einzuhalten sind. ([55], S. 13)

### **2.2.4 Planungsstrategien hinsichtlich Dauerhaftigkeit**

Generelle Prinzipien für einen lebenszyklusorientierten Planungsprozess sind in der ISO 15686-1 [53] vorgegeben. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks hängt auch von der konstruktiven Durchbildung ab, besonders jene Details, die für den Wärme-, Feuchtigkeitsschutz und für die Luftdichtheit maßgebend sind. Des Weiteren sollen Unterlagen für die Ausführungsphase hinsichtlich kritischer Detailausbildung und erforderlicher Materialqualität zum Inspektionszeitpunkt bereitgestellt werden, beispielsweise die erforderliche Beschichtungsdicke oder Betonüberdeckung. In der ISO 13823 [55] wird die Erstellung eines Instandhaltungsplans bereits in der Planungsphase empfohlen, welcher Bezug auf die Anforderungen hinsichtlich Inspektion, Wartung, Reinigung und Instandsetzung nimmt. In diesem Zusammenhang ist die Lösbarkeit von Bauteilschichten bzw. die Austauschbarkeit von Bauteilen relevant, die eine im Vergleich zur geplanten Nutzungsdauer des Bauwerks eine kürzere Lebensdauer aufweisen. ([55], S. 14)



## 2.3 Prinzipien zur Lebensdauervorhersage - ISO 15686

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Inhalte der ISO 15686 erläutert, da diese für die Erarbeitung von europäischen Regelwerken unter der Berücksichtigung von Dauerhaftigkeitsaspekten maßgebend sind. Die ISO 15686-Normenreihe stellt generelle Prinzipien für die Lebensdauerabschätzung von Bauprodukten bzw. Bauteilen bereit. Sie gibt Rahmenbedingungen für die Bereitstellung harmonisierter Lebensdauerdaten von Bauprodukten bzw. Bauteilen vor, wodurch eine zuverlässige Vergleichsbasis unterschiedlicher Lebensdauerdaten (Erfahrungswerte, Laborkennwerte etc.) in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (Klima, Nutzungsart etc.) geschaffen wird.

Zusätzlich wird die Faktormethode erläutert, die eine Berechnung der voraussichtlichen Lebensdauer durch Multiplikation einer Referenz-Lebensdauer mit Erhöhungs- bzw. Abminderungsfaktoren vorsieht. Sie wird aber nur dann zur Anwendung empfohlen, wenn eine Anpassung einer bekannten Referenz-Lebensdauer an eine ähnliche Umgebungsbedingung erforderlich wird. ([54], Seite 4 ff)

### 2.3.1 Ziele einer lebensdauerorientierten Planung

Die Berücksichtigung der Lebensdauer von Bauprodukten in der Planungsphase und die Abstimmung der Lebensdauer von Bauprodukten auf die Nutzungsdauer von Bauteilen bzw. des Bauwerks ist für die Minimierung der Stoff- und Energieflüsse sowie der Lebenszykluskosten relevant. In der ISO 15686-2 [54] wird diesbezüglich eine Übersicht über die Ziele einer lebensdauerorientierten Planung angegeben ([12], S. 25):

- Angabe der zu erwartenden Lebensdauer unter definierten Umgebungsbedingungen;
- Reduzierung der Betriebs- und Instandhaltungskosten;
- Reduzierung des Aufwands für Reparatur, Rückbau und Entsorgung;
- Aufzeigen des Einflusses der Umgebungsbedingung, wie beispielsweise korrosionsfördernder Medien auf die Lebensdauer von Bauprodukten;
- Abschätzung der Restlebensdauer eines Bauwerks bzw. Bauteils;
- Konzeption von Planungsgrundlagen für künftige Instandhaltungs-, Nutzungsänderungs- und Rückbaumaßnahmen (Zugänglichkeit, Austauschzyklen, Trennbarkeit etc.);
- Abgleich zwischen geplanter Nutzungsdauer des Bauwerks und der voraussichtlichen Lebensdauer von Bauprodukten und Bauteilen.

### 2.3.2 Berücksichtigung lebensdauerrelevanter Aspekte in der Planung

Der Planungsprozess ist für die Dauerhaftigkeit eines Bauwerks aufgrund der Bauproduktauswahl nach funktionalen und ausführungstechnischen Gesichtspunkten unter Berücksichtigung der Grundanforderungen der Bauprodukteverordnung maßgebend. In der ISO 15686-1 [53] wird der untenstehende lebenszyklusorientierte Planungsablauf vorgeschlagen: ([11], S. 25)

- Festlegung der geplanten Nutzungsdauer des Gebäudes;
- Umfassende Erhebung der technisch-funktionalen Anforderungen an das jeweilige Bauprodukt bzw. Bauteil (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit etc.);
- Auswahl von Bauprodukten nach technisch-funktionalen Gesichtspunkten und die Berücksichtigung von Materialunverträglichkeiten (z.B. Kontaktkorrosion);
- Erstellen einer Ausschreibung unter Berücksichtigung der erforderlichen Bauprodukteigenschaften;
- Planungsorientierte und elementweise Gliederung des Bauwerks und Identifizierung potentieller Schwachstellen;
- Genaue Lebensdauerabschätzung für Bauprodukte mit hohem Einfluss auf die Nutzungsdauer des Bauwerks;

- Festlegung von konstruktiven bzw. materialspezifischen Maßnahmen gegenüber Einwirkungen aus der Umgebungsbedingung;
- Maßnahmen zur Gewährleistung der geforderten Ausführungsqualität;
- Erstellen von Instandhaltungs-, Nutzungsänderungs-, und Rückbaukonzepten;
- Berücksichtigung der Reparierbarkeit und Austauschbarkeit von Bauprodukten im eingebauten Zustand sowie der Zugänglichkeit für Inspektions- und Instandhaltungsmaßnahmen.

### 2.3.3 Qualität und Herkunft von Lebensdauer-Daten

In der ISO 15686-8 [56] werden verschiedene Arten von Datenquellen erwähnt, die sich von ihrer Herkunft und Qualität unterscheiden. Folgende Datenquellen sind laut ISO 15686-8 ([56], Seite 11) zur Lebensdauervorhersage verwendbar:

- Angaben von Bauprodukterzeugern sind aus Bedenken gegenüber möglicher Gewährleistungsansprüche in der Regel kaum vorliegend;
- Sammlungen von Erfahrungswerten stellen das am häufigste angewandte Verfahren zur Erhebung von Lebensdauerangaben über Bauprodukte und Bauteile dar;
- Expertenbefragung mittels Delphi-Methode kann für eine detaillierte Sammlung von Lebensdauerangaben hilfreich sein, wird aber in der Praxis kaum durchgeführt;
- Materialwissenschaftliche Forschungsergebnisse (z.B. Korrosionsrate von Metallen in definierter Umgebungsbedingung) sind für abgegrenzte Themenbereiche zutreffend und für generelle Aussagen bedingt geeignet;
- Failure Mode Effects Analysis (FMEA)-Studien (dt.: Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) werden grundsätzlich für die Analyse von Massenfertigungsprozessen und nicht für einzelobjektbezogenen Errichtungsprozesse angewandt.

### 2.3.4 ISO 15686 - Begriffsdefinitionen

In der ISO 15686-2 ([54], Seite 1 ff) sind einige wichtige Fachbegriffe in englischer Sprache angegeben. Aufgrund einer fehlenden Übersetzung der Norm werden nachfolgend jene englischsprachigen Begriffe inhaltlich in Deutsch beschrieben, die zur Beschreibung des entwickelten Modells zur Lebensdauervorhersage in Kapitel 2.5 benötigt werden. Zur besseren Übersicht wurde eine Untergliederung der Definitionen hinsichtlich der Lebensdauer und Modellparameter gemacht.

#### Lebensdauer-Definitionen - ISO 15686-2 [54]

- **design life - DL:** Geplante Nutzungsdauer des Bauwerks;
- **estimated service life - ESL:** Die mittels Faktormethode rechnerisch ermittelte Lebensdauer;
- **predicted service life - PSL:** Voraussichtliche Lebensdauer, die entsprechend einer ISO 15686-konformen Datenerhebung (z.B. strukturierte Erfahrungswerte) zu erwarten ist;
- **reference service life - RSL:** Referenz-Lebensdauer ist jene Lebensdauer, die unter einer bestimmten Referenz-Umgebungsbedingung erwartet werden kann; dient zugleich als Ausgangswert für die Lebensdauerabschätzung mittels der Faktormethode;
- **service life prediction - SLP:** Lebensdauerabschätzung bzw. -vorhersage;
- **residual service life:** Restlebensdauer;
- **durability:** Dauerhaftigkeit; Vermögen eines Gebäudes, Bauteils oder Bauprodukts hinsichtlich der Erfüllung definierter Funktionen/Anforderungen über einen bestimmten Zeitraum und unter geplanter Umgebungsbedingung;

#### Definitionen der Modellparameter - ISO 15686 [54]

- **long term exposure:** Exposition des zu prüfenden Bauprodukts in definierter Umgebungsbedingung über die geplante Nutzungsdauer;

- **accelerated short-term exposure:** Zeitraffende Prüfung eines Bauprodukts unter verschärfter Expositionsbedingungen durch höhere Einwirkintensität (z.B. Frostbeständigkeit von Beton mittels XF3-Prüfung);
- **in-use condition:** Umgebungsbedingung;
- **agent intensity:** Einwirkintensität (z.B. Dissoziationsgrad von Säuren);
- **terminal critical property:** Satz an kritischen Eigenschaften eines Bauprodukts;
- **degradation model:** Schädigungsmodell;
- **agent dose:** Dosis einer bestimmten Substanz, die dem Durchschnittswert der geplanten Einwirkintensität während eines definierten Zeitraums entspricht;
- **degradation indicator:** Indikator für Materialschädigung bzw. Qualitätsverlust;
- **dose-response function:** Funktion von Dosis und Schädigungsindikator;
- **performance:** Leistung eines Bauprodukts bezogen auf eine kritische Eigenschaft zu einem bestimmten Zeitpunkt;
- **performance characteristic:** physikalische Größe, die auf eine kritische Eigenschaft bezogen ist;
- **performance requirement/criterion:** akzeptables Mindestniveau einer kritischen Eigenschaft;
- **incompatibility:** Inkompatibilität, eine schädliche chemische und/oder physikalische Interaktion zwischen Bauprodukten, die zu einer vorzeitigen Alterung bzw. Materialschädigung führt.

### 2.3.5 Vorgangsweise zur Lebensdauervorhersage

Ein wesentlicher Bestandteil der ISO 15686-2 ist die umfassende und strukturierte Ermittlung von Lebensdauerdaten von Bauprodukten und Bauteilen durch Feldversuche, Erfahrungswerte, Zustandsanalysen und Laborversuche. In der ISO 15686-2 ([54], Seite 5) wird der in Abbildung 6 dargestellte Ablauf zur Ermittlung von Lebensdauerdaten vorgeschlagen.

In der ISO 15686-2 werden vier Verfahren zur Lebensdauerabschätzung vorgeschlagen: [54]

- Zeitraffende Prüfverfahren;
- Inter- oder Extrapolation von Lebensdauerdaten ähnlicher Bauprodukte/Bauteile;
- Inter- oder Extrapolation von Lebensdauerdaten von Bauprodukten unter vergleichbaren Einbaubedingungen;
- Extrapolation der Zeitdimension bezugnehmend auf Ergebnisse von kurzfristigen Prüfungen unter geplanter Umgebungsbedingung.

Bei diesen Verfahren besteht immer die Gefahr, dass durch Verschärfung der Einwirkungsintensität realitätsferne Aussagen zur Dauerhaftigkeit eines Bauprodukts prognostiziert werden.

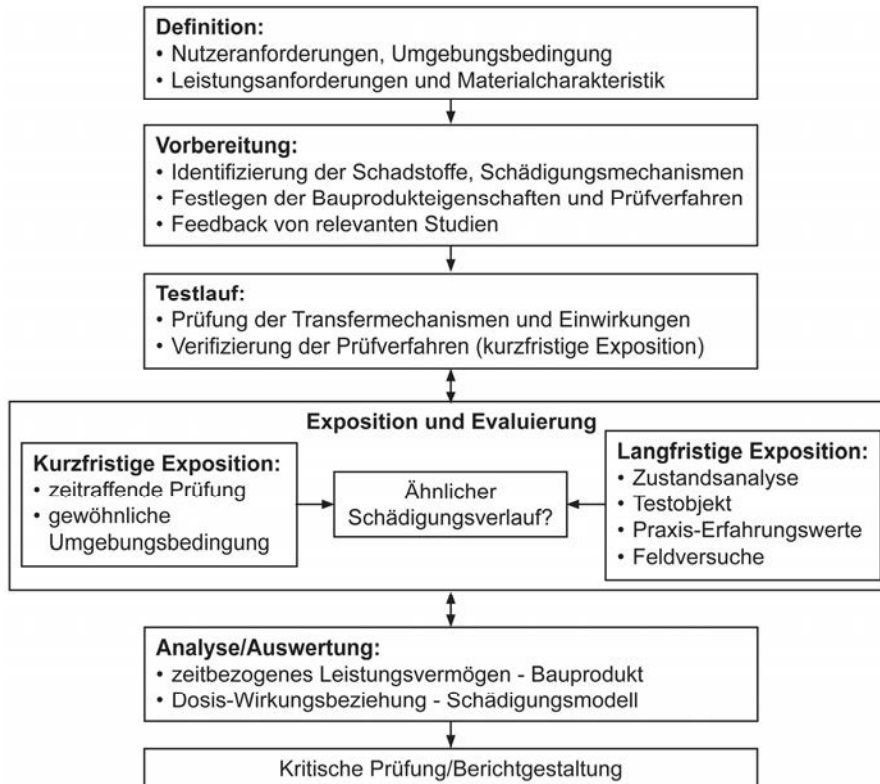


Abbildung 6 ISO 15686-Methodik zur Lebensdauerdatenermittlung nach [54], verändert

In der Abbildung 6 sind die wesentlichen Ablaufschritte zur Ermittlung von Lebensdauerdaten von Bauprodukten für definierte Umgebungsbedingungen dargestellt. Die Erfassung der Anforderungen an das Bauprodukt, Klassifizierung der möglichen Umwelteinwirkungen und die anschließende Identifikation der Schädigungsmechanismen sind notwendig, um das geeignete Prüfverfahren auswählen bzw. entwickeln zu können. Des Weiteren ist ein Abgleich zwischen labortechnisch ermittelten Kennwerten und langfristigen Erfahrungswerten (Zustandsanalysen etc.) hinsichtlich zuverlässiger Lebensdauerprognosen für ein Bauprodukt vorgesehen. Die Auswertung der Prüfergebnisse kann mittels Verteilungsfunktionen in Form von Erwartungswert und Standardabweichung oder als Einzelwert angegeben werden. ([54], Seite 4)

Vorteil dieser Vorgangsweise ist, dass die gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich der Dauerhaftigkeit eines Bauprodukts in einer definierten Umgebungsbedingung entweder vereinfacht als Expositionsklassen zur Bauproduktauswahl in normativen Regelwerken dargestellt oder in Form einer mathematischen Funktion zur Beschreibung des zeitlichen Schädigungsverlaufs als Eingangsparameter für probabilistische Zuverlässigkeitsanalysen herangezogen werden können.

### 2.3.6 Unterschied zwischen Lebens- und Nutzungsdauer

In der deutsch- sowie englischsprachigen Fachliteratur sind verschiedene Definitionen hinsichtlich des Begriffs „Lebensdauer“ bzw. „Nutzungsdauer“ in Gebrauch. Für die Dissertation wurde diese aus den relevanten normativen Regelwerken und Begleitdokumenten entnommen und zusammengestellt.

**Technische Lebensdauer:**

- Service life – ISO 15686-2 [54]: Jener Zeitraum, in dem ein Bauwerk, Bauteil oder Bauprodukt die definierten Grundanforderungen erfüllt. (siehe Abbildung 7)

**Geplante Nutzungsdauer des Bauwerks:**

- Design life – ISO 15686-2 [54]
- Target service life – Lifetime-Forschungsprojekt [90]

**Mindestnutzungsdauer des Bauprodukts:**

- Working life – Guidance Paper F [31] und ETAG [34]: Jener Zeitraum, in dem das Leistungsvermögen des Bauwerks oder Bauteils durch Instandhaltung die Grundanforderungen erfüllt. ([31], S.4)

**Wirtschaftlich angemessene Lebensdauer:**

- Economically reasonable working life – Bauprodukteverordnung [28]
- Economically reasonable working life – Interpretative Document No. 1. [30]: Jener Zeitraum, in dem das Leistungsvermögen des Bauprodukts auf ein Niveau instandgehalten wird, welches den geplanten Umweltbedingungen gerecht wird.

Die Auflistung zeigt, dass selbst in der Normung keine eindeutige Abgrenzung zwischen Lebensdauer und Nutzungsdauer existiert. Die Definition des Begriffs „service life“ der ISO 15686-2 [54] entspricht im Wesentlichen der Definition von „working life“ der ETAG 04 [34], dem Guidance Paper F [31] und der Bauprodukteverordnung [28].

Die Definition der ETAG mit Mindestnutzungsdauer wird im Gegensatz zum Eurocode auf das zu zertifizierende Bauprodukt und nicht auf das Bauwerk bezogen. Verständlicher wäre es, von der Nutzungsdauer im Zusammenhang mit dem Bauwerk bzw. Bauteil und von der Lebensdauer im Zusammenhang mit dem Bauprodukt zu sprechen. Grund ist, dass die Planung und Bemessung auf eine bestimmte Nutzungsdauer des Bauwerks ausgerichtet werden. Im Zusammenhang mit den Aspekten des nachhaltigen Bauens bedeutet dies, dass künftig auch eine Abstimmung der technischen Lebensdauer der Bauprodukte auf die geplante Nutzungsdauer des Bauteils oder Bauwerks anhand normativer Regelwerke möglich sein sollte.

Für die Arbeit wird zur Vermeidung von Begriffsverwirrungen zwischen **der technischen Lebensdauer bezogen auf Bauprodukte** und der wirtschaftlichen **Nutzungsdauer im Zusammenhang mit Bauteilen und Bauwerken** unterschieden.

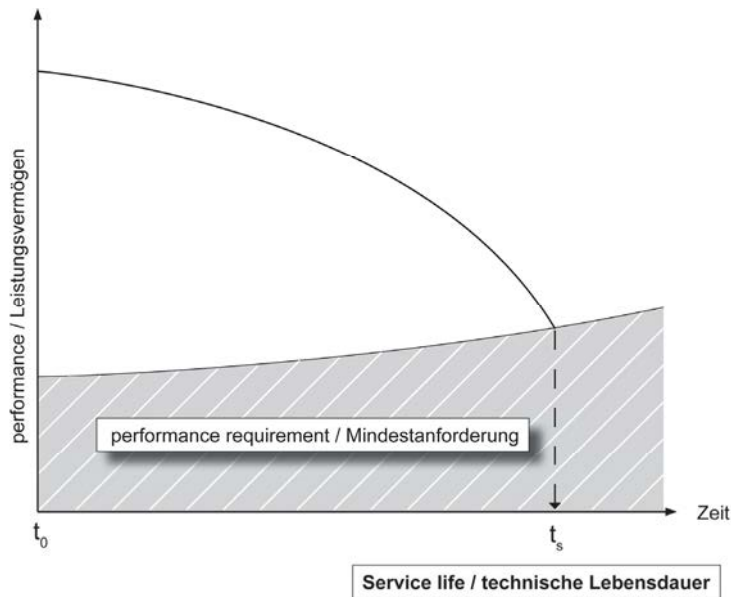


Abbildung 7 Technische Lebensdauer [55]

### 2.3.7 Grundlagen zur Faktormethode der ISO 15686

Die Faktormethode der ISO 15686-8 [56] ist für die Berechnung der voraussichtlichen Lebensdauer eines Bauprodukts oder eines Bauteils vorgesehen. Grundgedanke ist die Bestimmung einer voraussichtlichen Lebensdauer eines Bauprodukts oder Bauteils für eine definierte Umgebungsbedingung durch Anpassung einer bekannten Referenz-Lebensdauer mittels insgesamt sieben Erhöhungs- bzw. Abminderungsfaktoren. Der Wert der Erhöhungs- und Abminderungsfaktoren ist von der Differenz zwischen der geplanten und der zugrunde gelegten Referenz-Umgebungsbedingung abhängig. Dennoch wird angemerkt, dass die jeweiligen Erhöhungs- bzw. Abminderungsfaktoren idealerweise Werte zwischen 0,9 bis 1,1 aufweisen sollten, um mögliche Synergieeffekte aufgrund nicht-linearer Dosis-Wirkungs-Beziehungen ausschließen zu können. ([56], Seite 11).

Bei umfassender Erhebung von Referenz-Lebensdauern können auch statistische Bandbreiten ermittelt werden, die dann zur Berechnung der voraussichtlichen Lebensdauer mittels Faktormethode verwendet werden können. ([56], Seite 12)

#### 2.3.7.1 Beschreibung der Faktorklassen:

Die ISO 15686-8 gibt zur systematischen Erfassung von lebensdauerrelevanten Einflüssen sieben Faktorklassen vor, die nachfolgend beschrieben werden. ([12], Seite 13 ff)

**A - inherent performance level:** Einfluss der Bauproduktqualität auf die Lebensdauer (z.B. Stahlsorten)

**B - design level:** Einfluss der Planungsqualität auf die Intensität der potentiellen Einwirkungen auf ein Bauprodukt oder Bauteil, einschließlich aller geplanten Schutzmaßnahmen; wie beispielsweise Beschichtungen oder ein ausreichender Dachüberstand, der zu einer geringeren Schlagregenbeanspruchung des Mauerwerks führt.

**C - work execution level:** Einfluss der Ausführungsqualität, einschließlich aller begleitenden Qualitätssicherungsmaßnahmen;

**D - indoor environment:** Im Gebäude verursachte Einwirkungen auf ein Bauprodukt oder Bauteil (z.B. Wasserdampfbeanspruchung in Nasszellen etc.);

**E - outdoor environment:** Äußere Einwirkungen auf ein Bauprodukt oder Bauteil durch regionale und örtliche Umwelteinflüsse (z.B. Spritzwasser im Sockelbereich);

**F – usage conditions:** Ausmaß möglicher Nutzungsbeanspruchungen (z.B. erhöhte mechanische Beanspruchung aufgrund stark frequentierter Verkehrsflächen);

**G - maintenance level:** Ausmaß und die Häufigkeit geplanter bzw. durchgeführter Instandhaltungsmaßnahmen.

Da ein Großteil der erfassten Einflussfaktoren auch in normativen Regelwerken zur Bauprodukt-Auswahl erfasst wird, ist hinsichtlich der gestellten Anforderungen aus Sicht der Lebenszyklusbewertung nur mehr eine Ergänzung der bisher vernachlässigten Kriterien (z.B. Instandhaltung) vorzunehmen.

### 2.3.7.2 Probleme bei der Anwendung der Faktormethode

Eine zu große Abweichung der Erhöhungs- bzw. Abminderungsfaktoren vom Ausgangswert 1,0 soll vermieden werden, da die Multiplikation von insgesamt sieben Faktoren zu unrealistischen Lebensdauervorhersagen führen kann. Deshalb müssen die Ergebnisse aus einer Modellberechnung stets mit Erfahrungswerten abgeglichen werden. Die gegenseitige Abhängigkeit von einer Vielzahl von Einflüssen untereinander führt zu einem hohen Bearbeitungsaufwand. Zusätzlich erschwert die Struktur der Faktormethode (ähnlich einer Fehlerbaumanalyse) mit insgesamt sieben Gewichtungsfaktoren die Modellierung von Synergie-Effekten. [56]

### 2.3.7.3 Musterbeispiel - Holzfenster

In der ISO 15686-8 ([56], S. 11) wird die Faktormethode mittels einer Lebensdauervorhersage für ein Holzfenster erläutert. Die Referenz-Lebensdauer des Holzfensters wird mit 20 Jahren angenommen, unter der Voraussetzung einer geschützten Lage sowie einer gewöhnlichen Instandhaltung (alle 4 Jahre erfolgt eine Erneuerung des Deckanstrichs). Die Lebensdauervorhersage mittels der Faktormethode für ein Holzfenster in ungeschützter Lage mit hohem Instandhaltungsaufwand (kürzere Instandhaltungszyklen, siehe Tabelle 2-3) erfordert die Anwendung von Erhöhungs- bzw. Abminderungsfaktoren, da die tatsächliche Umgebungsbedingung von der Referenz-Umgebungsbedingung abweicht.

Tabelle 2-3 Beispiel - Faktormethode

Faktorklassen		Referenz-Umgebungsbedingung		geplante Umgebungsbedingung	
		Einflussfaktor	Faktor	Einflussfaktor	Faktor
Planungsqualität	B	geschützt	1,0	ungeschützt	0,8
Instandhaltungsniveau	G	gewöhnlich	1,0	hoch	1,4

**Rechenvorgang:** ([56]; Seite 11)

RSL = 20 Jahre...Referenz-Lebensdauer

ESL = RSL x B x G...voraussichtliche, rechnerische Lebensdauer

ESL = 20 x 0,8 x 1,4 = 22 Jahre

**Anmerkungen zum Musterbeispiel:**

Der negative Einfluss der höheren Bewitterung sowie der positive Einfluss durch einen erhöhten Instandhaltungsaufwand werden durch Abminderungs- bzw. Erhöhungsfaktoren berücksichtigt. Die

Erhöhungs- und Abminderungsfaktoren können entweder auf materialwissenschaftliche Untersuchungen, Feldstudien oder zumindestens auf Erfahrungswerten beruhen.

#### **2.3.7.4 Kritik an der Faktormethode**

##### **Mangelnde Akzeptanz in der Praxis**

Die Faktormethode ist weder in der Materialforschung noch in der Baupraxis weit verbreitet, obwohl die wesentlichen Elemente der Faktor-Methode bereits in den 80er Jahren am „Architectural Institute of Japan“ [5] entwickelt und Mitte der 90er Jahren in die ISO-Normung übernommen wurden. Die Praxistauglichkeit wird durch die kaum vorhandene Datenbasis von Referenz-Lebensdauern für unterschiedliche Umgebungsbedingungen, einschließlich der mangelhaften Kenntnis über die benötigten Abminderungs- und Aufwertungsfaktoren verhindert.

Die Anwendung der Faktormethode kann für Bauprodukte sowie für Bauteile gleichermaßen erfolgen. Je nach Anwendungszweck kann die Faktormethode beginnend von einer einfachen Checkliste bis hin zu komplexen Modellberechnungen reichen. Ebenso kann die Begrenzung der Lebensdauer eines mehrschichtigen Bauteils aufgrund eines Bauprodukts mit geringerer Lebensdauer modelliert werden. In der ISO 15686-8 [56] wird darauf hingewiesen, dass die Anwendung der Faktormethode besonders bei kombinierten Einwirkungen aufgrund der möglichen Synergieeffekte kritisch zu hinterfragen ist. ([56], Seite 10)

Rückblickend wurden unterschiedliche Ansätze über die Anwendung der Faktor-Methode publiziert:

- Sammlung einer großen Datenmenge und Anwendung von statistischen bzw. mathematischen Methoden (Monte-Carlo-Analyse, Fuzzy-Methode etc.) [41], [50], [69], [71]
- Anwendung von Bewertungsinstrumenten des Qualitätsmanagements (FMEA) [18], [58], [66]
- Bestimmung der Restlebensdauer durch Ermittlung der jeweiligen Zustandsklasse (meistens vier Klassen) für das betrachtete Bauteil bzw. Bauwerk [14], [40], [39], [41], [102]
- Entwicklung von materialwissenschaftlichen Schädigungsmodellen für ausgewählte Bauprodukte, zumeist ohne nähere Betrachtung des Schichtenaufbaus im eingebauten Zustand [8], [9], [45]

Der Hauptgrund für die geringe Anwendung der zuvor erwähnten Ansätze liegt darin, dass die erforderliche Datengrundlage nicht in der notwendigen Qualität existiert und eine detaillierte Erhebung aus Sicht der Baubeteiligten nicht zielführend bzw. unwirtschaftlich ist, da der langfristige Nutzen einer lebensdauerorientierten Planung mittels abgesicherter harmonisierter Lebensdauerdaten bisher nicht im vollen Umfang erkannt wird.

##### **Doppelgleisigkeiten mit Dauerhaftigkeitskonzept**

Für die Entwicklung einer hEN oder ETAG werden die möglichen planmäßigen Einflüsse auf ein Bauprodukt oder eine Systemlösung mit Hilfe der ISO 15686 - Faktorklassen systematisch erfasst. Anschließend erfolgt die Festlegung der kritischen Bauprodukteigenschaften und der dazugehörigen Prüfverfahren in Abhängigkeit von der jeweiligen Umgebungsbedingung.

Im Hinblick auf die künftige Anwendung der hEN oder ETAG in der Planungsphase muss eine Fokussierung auf die maßgebenden Umgebungsbedingungen erfolgen, um den Bearbeitungsaufwand gering zu halten und die Verwechslungsgefahr bei der Bauproduktauswahl aufgrund der großen Vielfalt zu reduzieren. Jedenfalls muss eine klare Unterscheidung zwischen einer einfachen Bauproduktauswahl nach Expositionsklassen und einer auf Schädigungsmodellen basierenden Zuverlässigkeitsanalyse gemacht werden.



Nachhaltiges Bauen bedingt eine Abstimmung der voraussichtlichen Lebensdauer der Bauprodukte und Bauteile auf die geplante Nutzungsdauer des Bauwerks. Dieser Aspekt wird auch in Eurocodes und europäischen Regelwerken berücksichtigt, wobei dieser nicht sofort ersichtlich ist.

Beispielsweise werden die in der ÖNORM B 1992-1-1 [86] angegebenen Mindestüberdeckungen für Betonstahl und Spannglieder auf eine geplante Nutzungsdauer von 50 Jahren und auf die Expositionsklassen der ÖNORM B 4710-1 [81] bezogen. Bei einer Erhöhung der geplanten Nutzungsdauer auf 100 Jahre muss die Mindestüberdeckung um 5 mm erhöht werden. Die Abstufung der geplanten Nutzungsdauer (50 bzw. 100 Jahre) entspricht wiederum der Klassifizierung der Nutzungsdauer in der ÖNORM EN 1990 [82].

Des Weiteren wird in der ÖNORM B 4710-1 [81] die Bauproduktqualität für die jeweilige Umgebungsbedingung anhand von Expositionsklassen definiert, wie beispielsweise der maximale W/B-Wert oder die empfohlene Zementsorte. Damit werden im Wesentlichen alle Klassen der ISO 15868-Faktormethode abgedeckt. Ausnahme ist die Beschreibung der Instandhaltungsmaßnahmen in den Regelwerken, wo nur generelle Aussagen ohne detaillierte Beschreibung des Aufwands gemacht werden.

Eine Lebensdauervorhersage mit Erhöhungs- und Abminderungsfaktoren, wie mit der Faktormethode beabsichtigt, ist nicht vorgesehen, da die Bauproduktqualität auf eine bzw. mehrere vorgegebene Nutzungsdauerklassen gemäß der ÖNORM EN 1990 [82] abgestimmt wird. Selbstverständlich können durch beispielsweise unterschiedliche hohe Feuchteeinwirkungen auf ein Bauwerk (Wetterseite) unterschiedlich lange Lebensdauern von Bauprodukten die Folge sein. In diesem Fall muss entweder eine Erhöhung der Bauproduktqualität mittels einer zusätzlichen Hydrophobierung erreicht oder die Alterung mit einem erhöhten Instandhaltungsaufwand verzögert werden. Die Einhaltung der geplanten Nutzungsdauer gemäß ÖNORM EN 1990 [82] ist zu gewährleisten.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass im Wesentlichen alle mittels Faktorklassen erfassten Einflüsse durch europäische und nationale Regelwerke berücksichtigt werden (siehe Tabelle 2-4). Es wird also vorausgesetzt, dass der Planer alle für eine konkrete Baumaßnahme relevanten Einflüsse, einschließlich der zugehörigen Einwirkintensität erhebt und danach anhand von Expositionsklassen die erforderliche Bauproduktqualität mittels normierten Bezeichnungen oder Kategorien festlegt. Unter Zugrundelegung einer dem Stand der Technik entsprechenden Ausführungsqualität kann die in den jeweiligen Regelwerken angegebene Nutzungsdauer vorausgesetzt werden. In den Bauproduktenormen wird bis auf wenige Ausnahmen (z.B. Abdichtungsbahnen) keine genauere Untergliederung nach Nutzungsdauerklassen vorgenommen, weshalb eine definitive Abstimmung zwischen der technischen Lebensdauer von Bauprodukten und der geplanten Nutzungsdauer eines Bauwerks verhindert wird. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass in der Erforschung und Entwicklung neuer Bauprodukte unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse stets eine Optimierung auf eine normativ festgelegte Nutzungsdauer erfolgt.

Diese Behauptung hinsichtlich der Doppelgleisigkeiten zwischen Faktorklassen und Normung kann beispielsweise anhand der ISO 12944-5 [85] untermauert werden, die für die Auswahl eines geeigneten Beschichtungssystems für Stahlbauten eine Erfassung der Umwelteinwirkungen, einschließlich der Festlegung einer geforderten Schutzdauer vorsieht (siehe Abbildung 8).

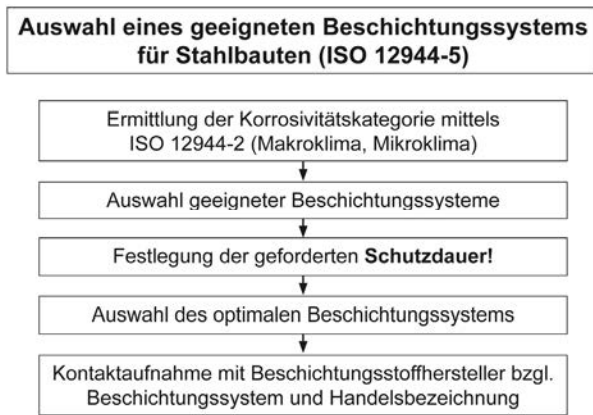


Abbildung 8 Bauproduktauswahl nach Umwelteinwirkungen und Schutzdauer nach [85]

Die Abnahme der materialbezogenen Widerstandsseite in der Nutzungsphase kann hingegen durch die Auswahl einer bestimmten Instandhaltungsstrategie des Eigentümers beeinflusst werden. In Regelwerken wird zwar ein Bezug zur Instandhaltungsphase getroffen, aber nur mit dem Hinweis auf eine ordnungsgemäße Instandhaltung.

Im Hinblick auf den künftigen Informationsbedarf zur Erstellung von Lebenszyklusanalysen ist eine genauere Beschreibung des Instandhaltungsaufwands und –zeitpunkts erforderlich, um Aussagen zur voraussichtlichen Lebensdauer von Bauprodukten und Bauteilen in Abhängigkeit von der Instandhaltungsstrategie treffen zu können.

Tabelle 2-4 Abdeckung der Faktorklassen in Regelwerken

factor classes - ISO 15686		Abdeckung durch Regelwerke	
inherent quality characteristics	A	inherent performance level	Angaben zur CE-Kennzeichnung
	B	design level	Generelle Vorgaben
	C	work execution level	
environment	D	indoor environment	Expositionsklassen
	E	outdoor environment	
operation conditions	F	usage conditions	Allgemeine Aussagen
	G	maintenance level	

Umfassende Zuverlässigkeitsanalysen entsprechend der ISO 13823 [55] zur Lebensdauervorhersage von Bauwerken sind aufgrund des hohen Bearbeitungsaufwands für Dauerhaftigkeitsanalysen von Bauwerken mit hohem Gefährdungspotential sinnvoll, da die Widerstandsseite mittels Bauwerks-Monitoring laufend kontrolliert wird und die möglichen Veränderungen auf der Einwirkungsseite erhoben werden. Für Lebenszyklusanalysen im Rahmen einer Gebäudezertifizierung ist jedoch aufgrund des zugrunde gelegten Sicherheitsniveaus für Wohn- und Bürogebäude eine einfachere Methode ausreichend.

## 2.4 Gegenüberstellung publizierter Lebensdauermodelle

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Ansätzen zur Abschätzung der Lebensdauer. Die Bandbreite reicht von einfachen Lebensdauerkatalogen mit Jahresangaben, über Alterungskurven mit Zustandsklassen bis hin zu probabilistischen Zuverlässigkeitsanalysen. Im Folgenden wird ein Überblick über gängige Lebensdauermodelle gemacht, wobei die Unterschiede in der Bewertung und Detailtiefe aufgezeigt werden, um daraus Rückschlüsse für die Entwicklung eines generellen

Lebensdauermodells für Lebenszyklusbewertungen im Rahmen einer Ökobilanz oder Gebäudezertifizierung ziehen zu können.

### 2.4.1 Überblick über Modelle zur Lebensdauervorhersage

**ISO 15686 / ISO 13823:** Auf die Prinzipien der ISO 15686 [56] und der ISO 13823 [55] hinsichtlich der Lebensdauervorhersage von Bauprodukten, Bauteilen und Bauwerken wurde bereits in den Kapiteln 2.2, S. 29 und 2.3, S. 33 ausführlich eingegangen, weshalb auf eine neuerliche Kurzbeschreibung verzichtet wird.

**Lebensdauer- bzw. Nutzungsdauerkataloge:** Diese weisen gesammelte Erfahrungswerte von Sachverständigen und Gebäudebewirtschaftern hinsichtlich der Lebensdauer von Bauprodukten und Nutzungsdauer von Bauteilen aus, ohne jedoch nähere Angaben über lebensdauerrelevante Einflussfaktoren zu machen (z.B. Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“ [11], Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau [6], Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile [46]).

Im Gegensatz zu oben genannten Literaturquellen wurden die Daten des Lebensdauerkatalogs „Predicted lifetimes of metallic building components [16]“ mittels einer Delphi-Befragung im Expertenkreis erhoben. Es wurde eine umfassende Kategorisierung der Lebensdauerdaten von unterschiedlichen metallischen Bauprodukten (Aluminium, verzinkter Stahl, Kupfer etc.) nach Gebäudenutzung (kommerziell oder privat), Einsatzgebiet (Wandverkleidung, Fenster etc.), Umgebungsbedingung (Meeresnähe, Industrie und mildes Klima) und Ausmaß der Instandhaltungsmaßnahmen vorgenommen. Folglich kann eine präzisere Bandbreite der Lebensdauer angegeben werden, wobei anzumerken ist, dass die angegebenen Lebensdauern für die klimatischen Bedingungen in Australien gelten.

Grundsätzlich stellen Lebensdauerkataloge aufgrund der gesammelten Erfahrungswerte wertvolle Aussagen zur Lebensdauer von Bauprodukten und Bauteilen dar. Zu hinterfragen ist, ob eine Vergleichbarkeit zwischen der derzeitigen und damaligen Bauproduktqualität und Verarbeitungstechnik gegeben ist. So kann beispielsweise eine vergleichsweise längere Lebensdauer durch innovative Produktentwicklungen (z.B. Hydrophobierung von Putz) erreicht werden.

Problematisch ist die Vermischung zwischen der technischen Lebensdauer und der wirtschaftlichen Nutzungsdauer von Bauprodukten bzw. Bauteilen, da mit den derzeit publizierten Lebensdauerkatalogen nicht eindeutig nachvollziehbar ist, ob ein Rückbau oder Austausch durch fehlende Funktionstüchtigkeit oder durch wirtschaftliche Überlegungen bzw. Modernisierungsanforderungen initiiert wird.

Ebenso erschweren die fehlenden Angaben zur Instandhaltungsstrategie eine Präzisierung der angegebenen Lebensdauer-Bandbreiten des jeweiligen Bauprodukts oder Bauteils. Gerade diese Angaben sind aber für eine effiziente Durchführung von Lebenszyklusanalysen notwendig, um aussagekräftige Szenarien in Anhängigkeit von der jeweiligen Instandhaltungsstrategie machen zu können.

**EPIQR:** Mit Hilfe des Softwareprogramms EPIQR - Abkürzung für Energie (Energy Performance), Wohnraumqualität (Indoor Environment Quality), Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen (Retrofit) an bewohnten Altbauten - kann der Instandhaltungsbedarf von Gebäuden durch eine bauteilweise Erfassung des Istzustands ermittelt werden. Zusätzlich können Budgetplanungen mittels Szenarioanalysen für unterschiedliche Instandhaltungsvarianten durchgeführt werden. [15]

**MEDIC:** Basierend auf einer bauteilweisen Zustandsanalyse mittels des Softwareprogramms EPIQR [15] werden Wahrscheinlichkeitsbereiche für vier mögliche Zustandsklassen ermittelt. Die

Restlebensdauer kann durch die Kenntnis des Zustands sowie des Bauteilalters abgeschätzt werden. Dieses Modell ist ähnlich wie EPIQR zur Erlangung eines Überblicks über einen großen Gebäudebestand und dessen Zustand konzipiert worden, um anschließend den künftigen Instandhaltungsaufwand ableiten zu können. [39]

Nachteilig ist die fehlende strukturierte Erhebung der Einflussfaktoren gemäß ISO 15686, wodurch keine neuen Erkenntnisse für die künftigen Planungs- und Bauprozesse strukturiert erhoben und bereitgestellt werden können. Außerdem kann, wie mit dem Software-Programm EPIQR [15], erst nach Kalibrierung der Alterungskurve mittels der erhobenen Istzustandsklasse die voraussichtliche Restlebensdauer präziser abgeschätzt werden. Für Lebenszyklusanalysen von in Planung befindlichen Bauwerken können aufgrund fehlender Zustandsanalysen nur auf die üblichen publizierten Lebensdauerkataloge zurückgegriffen werden.

**TOBUS:** ist eine Bewertungsmethode, die speziell für Lebensdauervorhersagen für Bürogebäude konzipiert wurde. Sie stellt eine Weiterentwicklung der MEDIC-Methode [39] um die Kriterien „Energistandard, Innenraumqualität und Überalterung“ dar. Es steht nicht die systematische Erhebung von Lebensdauerdaten als Grundlage für Lebenszyklusanalysen im Vordergrund, sondern die Evaluierung des Sanierungsaufwands für ein definiertes Bürogebäude aufgrund eines geänderten Anforderungsprofils (z.B. verbesserter Schallschutz, erhöhter Energistandard). [34]

**IPB:** Im „Impulsprogramm IP Bau“ sind für einige ausgewählte Bauprodukte bzw. Bauteile Lebensdauerkurven mit Minimum-, Durchschnitts- und Maximalwerten erstellt worden. Entsprechend der Vorgangsweise von EPIQR [15] und MEDIC [39] müssen zur präziseren Restlebensdauervorhersage das Alter und der Zustand des Bauteils bekannt sein. In geringem Ausmaß werden Angaben zur Umgebungsbedingung gemacht, wodurch auf die voraussichtliche Lebensdauer des jeweiligen Bauproduktes oder Bauteils rückgeschlossen werden kann. [72]

Die Anwendung der Alterungskurven ist für die Restlebensdauervorhersage von Bestandsbauwerken aufgrund der Zustandsanalyse geeignet. Eine Lebensdauervorhersage für Neubauten ist aber aufgrund der lückenhaften Berücksichtigung aller lebensdauerrelevanten Einflussfaktoren erschwert. Außerdem ist eine Verkürzung der Lebensdauer von Außenputz aufgrund einer thermischen Sanierung bilanziert worden, obwohl dieser nicht vom Bauwerk entfernt wurde. D.h., das Ende der Lebensdauer für den Außenputz wurde mit dem Ende der Funktion als Regen- und Feuchteschutz gleichgesetzt. Dieser Aspekt ist ohne vertiefende Einarbeitung für den Anwender nicht sofort ersichtlich, weshalb eine durchschnittlich niedrigere Lebensdauer eines Außenputzes in einer Ökobilanz zugrunde gelegt wird.

**Duracrete:** Modelle zur Beschreibung physikalischer und chemischer Gesetzmäßigkeiten im Beton, wie beispielsweise für Karbonatisierung oder Chlorideindringung, wurden im Rahmen des EU-Forschungsprogramms „Duracrete“ entwickelt. Die damit ermittelten Modellergebnisse können in weiterer Folge als Eingangsparameter für eine anschließende probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse genutzt werden. ([103], Seite 65 ff)

Prinzipiell kann diese Methode auch für die Planung von Neubauten verwendet werden, wobei eine laufende Kalibrierung der Modellergebnisse mit objektbezogenen Monitoring-Kenndaten erforderlich ist. Grundsätzlich erfordert diese Methode einen hohen Bewertungsaufwand (Bestimmung des Bauwerkszustands sowie relevanter Materialparameter, rechenintensive Zuverlässigkeitsanalysen etc.) und kann deshalb aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur für Lebenszyklusanalysen von Bauwerken mit hohem Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt in Betracht gezogen werden.

**Lifetime:** Das EU-Forschungsprojekt „Lifetime“ zielt auf die Evaluierung und Modellierung der künftigen Anforderungen hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte ab, um daraus

einen Kriterienkatalog für die Auswahl von Bauprodukten unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus formulieren zu können. In weiterer Folge wurde die optimale Planungsvariante mittels multikriterieller Methoden ermittelt. Mit dem Lifetime-Projekt wird jedenfalls ein umfassendes Handbuch zur Etablierung eines Life Cycle Management Systems im Bauwesen, speziell für Infrastrukturprojekte bereitstellt. [90]

Mit Lifetime wurde ein lebenszyklusorientierter Planungsablauf für Infrastrukturbauten in umfassender Weise erläutert. Es wird die Umsetzung vom Groben bis ins Detail aufgezeigt, wie beispielsweise die Schnittstellen zwischen Schädigungsmodellen auf Materialebene und Zuverlässigkeitsanalysen auf Bauwerksebene. Der Bearbeitungsaufwand ist beachtlich, entspricht aber im Wesentlichen den Prinzipien der ISO 13823 [55], ISO 2394 [52] und ISO 15686-Normenreihe [56] hinsichtlich einer lebenszyklusorientierten Planung. In der Praxis wird diese Vorgangsweise eher für Bauwerke mit hohem Gefährdungspotential, wie beispielsweise Kunstbauten, zur Anwendung kommen und weniger für Lebenszyklusanalysen im Rahmen einer Gebäudezertifizierung.

### 2.4.2 Eignung für Lebenszyklusanalysen – CEN/TC 350

Die zuvor erläuterten Lebensdauermodelle sind für eine Lebenszyklusanalyse zur intergrierten Bewertung von Gebäuden nach CEN/TC 350 – „Sustainability of construction works“ oder für eine Gebäudezertifizierung entweder zu aufwendig oder grundsätzlich nur für die Restlebensdauerabschätzung von Bestandsgebäuden geeignet. Einige Modelle weisen auch eine geringe Durchdringung in der Materialwissenschaft bzw. Baupraxis auf oder sind für eine praktikable Anwendung ungenügend aufbereitet, wobei eine zu geringe Datenqualität das größte Hindernis darstellt. Des Weiteren wird oft der Konnex zum Dauerhaftigkeitskonzept der Bauprodukteverordnung vernachlässigt, weshalb wichtige Synergien hinsichtlich einer weit verbreiteten Anwendung von Lebensdauermodellen in der Baupraxis ungenützt bleiben.

In der Tabelle 2-5 werden die unterschiedlichen Methoden zur Lebensdauervorhersage hinsichtlich ihrer Anforderungen, Bewertungsaufwand, Eignung und Bezug zur Bauproduktenrichtlinie (BPR) und Bauprodukteverordnung (BPV) vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 2-5 Gegenüberstellung publizierter Lebensdauermodelle

		ISO 15686	ISO 13823	Lebensdauer-kataloge	EPIQR	MEDIC	TOBUS	IPB Bau	Duracrete	Lifetime
Daten-basis	Erfahrungswerte	x	x	x	x	x	x	x		
	Materialkennwerte	x	x						x	x
Aufwand	keine Bauwerksdiagnostik	x	x	x						x
	visuelle Beurteilung des Bestands				x	x	x	x		
	Bauwerksdiagnostik	x	x						x	x
Eignung	Bewertung - Neubau	x	x	x				x	x	x
	Bewertung - Bestandsbauwerk	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Zuverlässigkeitsanalyse			x						x	x
Bezug zur BPR/BPV		Ja	Ja	indirekt	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja
Eignung - Lebenszyklusanalyse CEN/TC 350		Ja	Ja	bedingt	Nein	Nein	Nein	bedingt	Nein	Nein

Für eine praxisbezogene Anwendung der Lebensdauerdaten für Lebenszyklusanalysen ist künftig die Bereitstellung von Informationen in kompakter, übersichtlicher Form seitens der Bauprodukte-Erzeuger erforderlich. Fraglich ist, ob die Bauprodukten-Erzeuger durch den Punkt 7 „Nachhaltige Nutzung von natürlichen Ressourcen“ der neuen Bauprodukteverordnung künftig zur Angabe der voraussichtlichen Lebensdauer verpflichtet sind. Jedenfalls werden die Bauprodukte-Erzeuger sich in Zukunft Gedanken machen müssen, wie sie Informationen über das Leistungsvermögen ihres

Bauprodukts bezogen auf den gesamten Lebenszyklus, einschließlich der Eignung zur Kreislaufführung bereitstellen.

Für die vorliegende Dissertation wird aufgrund der aktuellen Datenlage auf das generelle Alterungsmodell „Nachhaltig massiv AP 02 – Lebensdauer von Bauprodukten und Bauteilen“ [94] zurückgegriffen und eine Anpassung an die Anforderungen hinsichtlich der angestrebten Ökobilanzierung der Bauteilaufbauten des österreichischen Gebäudebestands vorgenommen. Die relevanten Arbeitsschritte und Festlegungen werden im nachfolgenden Kapitel behandelt.

## 2.5 Entwicklung eines Modells zur Lebensdauervorhersage

### 2.5.1 Bewertungsmethodik – Modell „Nachhaltigkeit massiv“

Im Rahmen der Forschungsinitiative „Nachhaltigkeit massiv“ wurde am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie durch den Verfasser ein Modell zur Lebensdauervorhersage entwickelt. Dieses Modell basiert auf den Prinzipien der Faktormethode der ISO 15686 [56]. Neu ist die Anwendung eines Schichtenmodells, das eine Anpassung der Lebensdauer der eingebauten Bauprodukte in Abhängigkeit von der angewandten Füge­technik ermöglicht. Die wesentlichen Arbeitsschritte des generellen Alterungsmodells sind in der Abbildung 4 dargestellt.

Die Auswahl der Abminderungsfaktoren wurde mit Bezug auf die in der Literatur angegebenen Lebensdauerbandbreiten festgelegt, wodurch die Ermittlung unrealistischer Lebensdauern aufgrund der Potenzierung von einer großen Anzahl von Abminderungsfaktoren (ca. 20 Kriterien) vermieden wird.

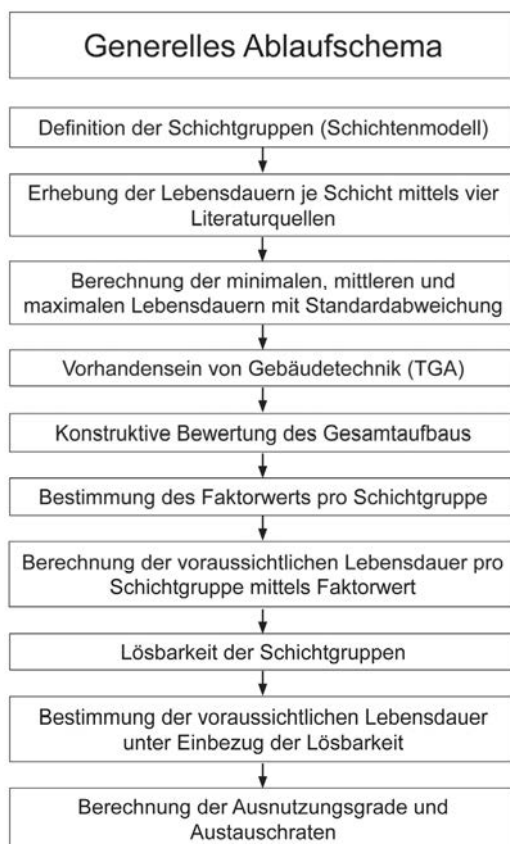


Abbildung 9 Generelles Ablaufschema des Alterungsmodells – Nachhaltigkeit massiv [94]

## 2.5.2 Modifikation des Modells - „Nachhaltigkeit massiv“

Die Anwendbarkeit des Modells ist durch die Vielzahl an Abminderungsfaktoren erschwert, da bei der Entwicklung des Modells Bezug zur Faktormethode der ISO 15686 [56] genommen wurde, weshalb für alle Faktorklassen (Bauproduktqualität, Planung- und Ausführungsqualität; Instandhaltungsqualität etc.) Auswahlkriterien erarbeitet wurden.

Positiv ist die Verknüpfung der wesentlichen Auswahlkriterien mit gängigen Normbezeichnungen bzw. –klassifizierungen, wodurch ein Bezug zur Bauproduktauswahl in der Praxis geschaffen wurde. Der Bewertungsablauf des generellen Alterungsmodells erfasst aber auch jene Kriterien, die bei einer Bauproduktauswahl mit Hilfe von normativen Regelwerken bereits behandelt werden, beispielsweise die potentiellen äußeren Umwelteinwirkungen durch Frost-Tausalzangriff auf Beton.

Bei genauer Betrachtung der maßgebenden Normen wird deutlich, dass im Wesentlichen zu allen Faktorklassen der ISO 15686 Bezug genommen wird (siehe Tabelle 2-6).

Tabelle 2-6 Konnex zwischen ISO 15686-Faktorklassen und Regelwerke

factor classes - ISO 15686		Einflussfaktoren	Abdeckung durch Regelwerke
inherent quality characteristics	A	inherent performance level	- Bauproduktqualität Angaben zur CE-Kennzeichnung
	B	design level	- Planungsqualität - Lage der Bauteile - Exponiertheit - Reparierbarkeit Generelle Vorgaben Expositionsklassen Generelle Vorgaben
	C	work execution level	- Ausführungsqualität Generelle Vorgaben
environment	D	indoor environment	- Chemische Einflüsse - Biologische Einflüsse Expositionsklassen
	E	outdoor environment	- Klima- bzw. Witterungseinflüsse - Chemische Einflüsse - Biologische Einflüsse - mechanische Einwirkung Expositionsklassen
operation conditions	F	usage conditions	- Nutzungsart - Nutzungsintensität - Nutzerverhalten Expositionsklassen
	G	maintenance level	- Wartung - Inspektion - Instandsetzung - Verbesserung - Instandhaltungsstrategien Allgemeine Aussagen

Um den Grundgedanken erkennen zu können, der hinter den Regelwerken steckt, bedarf es eines Rückblicks bis Anfang der 90er Jahre. In diesem Zeitraum wurde die Umsetzung der Dauerhaftigkeit in der Normung von der internationalen Organisation für Normung (ISO) unter Mithilfe der technischen Komitees von CIB (International Council for Building) und RILEM (**R**éunion **I**nternationale des **L**aboratoires et **E**xperts des **M**atériaux, systèmes de construction et ouvrages / International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) behandelt. Die daraus entstandene ISO 15686 Normenreihe [56] soll die Prinzipien für den Einbezug der Dauerhaftigkeit in der Normung darstellen.

Auf europäischer Ebene wird dies bei der Betrachtung des EOTA-Guidance Document 003 [33] deutlich, wo gefordert wird, dass die Prinzipien der ISO 15686 [56] für die Entwicklung einer neuen Richtlinie zu berücksichtigen sind.

Nachfolgend werden die aus der Literaturrecherche gewonnen Erkenntnisse, untergliedert nach den jeweiligen lebensdauerrelevanten Einflussfaktoren zusammengefasst und als Argumente für die Vereinfachung des generellen Alterungsmodells der „Nachhaltig massiv“ Forschungsinitiative [94] herangezogen.

### **2.5.2.1 Bauproduktauswahl nach EN-Normung**

In europäischen Regelwerken sind zur Bewertung der Dauerhaftigkeit von Bauprodukten direkte bzw. indirekte genormte Prüfverfahren vorgesehen. Der europäische Ansatz in der Bauproduktenrichtlinie bedingt, dass für Dauerhaftigkeitsvergleiche nur jene Kriterien herangezogen werden dürfen, die im Rahmen der CE-Kennzeichnung von Bauprodukten gemäß ZA-Anhang der jeweiligen Bauproduktnorm zu deklarieren sind. Seit 24. April 2011 wird die Bauproduktenrichtlinie durch die Bauprodukteverordnung ersetzt. Bezugnehmend auf den zuvor erwähnten Dauerhaftigkeitsvergleich sind nun jene Kriterien heranzuziehen, die in der Leistungserklärung (Declaration of performance, gemäß Artikel 4) zu deklarieren sind.

Von [48] wird dazu angemerkt, dass eine CE-Kennzeichnung nicht mehr automatisch die sogenannte „Konformitätsvermutung“ auslöst. Unter Konformitätsvermutung wird nach [48] Folgendes verstanden: *„dass ein CE-gekennzeichnetes Produkt der zugrundeliegenden harmonisierten Norm entspricht und die Brauchbarkeit und Verwendbarkeit eines derartigen Produktes damit automatisch gegeben ist.“* Der Planer ist künftig für die Auswahl eines Bauprodukts hinsichtlich der Eignung eines Bauprodukts für die jeweilige Anwendung verantwortlich, wobei zusätzlich die Einhaltung der deklarierten Werte in der Leistungserklärung des jeweiligen Bauproduktenerzeugers hinsichtlich der geforderten Werte zu überprüfen ist [48].

### **2.5.2.2 Planungsqualität**

Aus Sicht der Normung sind für die Bauproduktauswahl alle wesentlichen Kriterien hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Bauprodukten zu berücksichtigen. D.h., wird ein Bauprodukt vom Planer unter Berücksichtigung der zu erwartenden Einwirkungen ausgewählt, dann kann die erfahrungsgemäße Lebensdauer bzw. die in der Normung zugrunde gelegte Lebensdauer bei ordnungsgemäßer Instandhaltung vorausgesetzt werden.

In der ÖNORM EN 1990 [82] wird eine Klassifizierung der Nutzungsdauer für Tragwerke als Planungsgröße vorgegeben, wobei für gewöhnliche Gebäude eine Nutzungsdauer von 50 Jahren zugrunde gelegt wird.

Eine Ausnahme bilden Monumentalbauten (z.B. Brücken), für die eine Lebensdauer von 100 Jahre angegeben wird. Beispielweise wird bei Betontragwerken eine geplante Lebensdauer von 100 Jahre durch eine größere Überdeckung, spezielle Betonrezepturen sowie ein aufwendigeres Qualitätsmanagement für Planung und Ausführung sichergestellt. Trotzdem muss das Brückentragwerk in der Nutzungsphase überwacht und bei Bedarf instandgesetzt werden, um das geforderte Sicherheitsniveau gewährleisten zu können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die in der Normung existierenden Dauerhaftigkeitsbewertungen bzw. –klassifizierungen in einem Modell zur Abschätzung der Lebensdauer kein zweites Mal berücksichtigt werden müssen, da diese bereits bei der Auswahl eines Bauprodukts anhand von Regelwerken (z.B. Expositionsclassen) behandelt werden.

### **2.5.2.3 Ausführungsqualität**

Nationale Regelwerke (ÖNORM B, RVS etc.) beinhalten Anforderungen hinsichtlich des Einbaus eines Bauprodukts nach dem aktuellen Stand der Technik, wie beispielsweise Mindestschichtdicken, Einbautemperatur oder die technischen Voraussetzungen an den Untergrund. Eine Bewertung von potentiellen Abweichungen von diesen Norm-Anforderungen kann nicht Ziel eines Lebensdauermodells sein, da eine normgerechte Ausführung vorausgesetzt werden muss. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit wäre es jedoch sinnvoll, ein Qualitätsmanagement in der



Ausführungsphase zu etablieren, das Qualitätsregelkreise für erfahrungsgemäß kritische Bereiche vorsieht, wie beispielsweise Anschlüsse oder Durchdringungen bei WDVS.

Falls in der Praxis dennoch Abweichungen in Form von Baumängeln bzw. –schäden auftreten, muss vorausgesetzt werden, dass wesentliche Mängel, die zu einer bedeutenden Beeinträchtigung der geplanten Lebensdauer führen, ehest behoben werden, bevor ein größerer Folgeschaden entsteht. Mit dieser Herangehensweise erspart man sich eine neuerliche Bewertung im Rahmen eines Modells zur Lebensdauervorhersage für Lebenszyklusanalysen.

### **Qualität der Bauwerkssanierung**

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Erhebung im EU-Forschungsprojekt CON REP NET ([9], S. 4) hinsichtlich der Qualität von Betoninstandsetzungen, wonach 25 % der Instandsetzungen erhebliche Mängel aufweisen und umfangreiche Nachbesserungen erfordern. Weitere 25 % weisen kleinere Mängel auf und bedürfen keiner Nachbesserung. Außerdem wurde angemerkt, dass bereits nach 5 Jahren noch ca. 80 % der Instandsetzungsmaßnahmen den gestellten Anforderungen entsprachen. 10 Jahre nach der Instandsetzung waren nur mehr 30 % und nach 25 Jahren geringfügige 10 % der durchgeführten Maßnahmen intakt. Wesentliche Ursachen sind laut der CON REP NET-Studie ([9], S. 4) unter anderem die fehlerhafte Erhebung der ursprünglichen Schadensursache, die mangelhafte Planung der Instandsetzung, die ungeeignete Auswahl der Bauprodukte sowie die mangelhafte Ausführung.

Grundsätzlich kann man erkennen, mit welchen Unsicherheiten im Fall einer Lebensdauervorhersage von Sanierungsmaßnahmen aufgrund unterschiedlicher Risiken zu rechnen ist. Eine Anhebung der Sanierungsqualität durch eine Gebäudezertifizierung kann nur dann eintreten, wenn noch zeitgerecht auf Mängel in der Planung und Ausführung reagiert werden kann. Die logische Konsequenz ist die Etablierung und konsequente Umsetzung eines lebenszyklusorientierten Qualitätsmanagementsystems in der Baupraxis, um einerseits die geforderte Dauerhaftigkeit von Bauwerken durch qualitativ hochwertige Sanierungen zu gewährleisten sowie andererseits die gestellten Nutzeranforderungen mit minimalen ökologischen und ökonomischen Aufwand zu erfüllen. Ein wesentlicher Bestandteil wird die umfassende, strukturierte Zustandsbeurteilung des zu sanierenden Bauwerks, einschließlich der Ableitung der erforderlichen Sanierungsmaßnahmen sein.

#### **2.5.2.4 Nutzungsbedingungen**

Eine Bewertung der Nutzungsbedingungen in einem Modell zur Lebensdauervorhersage ist nicht zielführend, da die erwartenden Einwirkungen bereits bei der Bauproduktauswahl zu berücksichtigen werden. Der Einwurf, dass ein Nutzerfehlverhalten (z.B. Schimmelbildung durch falsches Lüftungsverhalten) sehr wohl zu einer Verkürzung der Lebensdauer führt, kann entgegengesetzt werden, dass es sich in diesem Fall um eine nicht planmäßige Nutzung handelt.

Falls es zu einer Umnutzung des Bauwerks kommt, muss der Zustand des Bestands erhoben werden, und gegebenenfalls eine bautechnische Anpassung an die künftigen Anforderungen vorgenommen werden. Die Berücksichtigung einer möglichen künftigen Umnutzung ist grundsätzlich nicht möglich, da einerseits der Zeitpunkt des Eintritts und andererseits die Art der Umnutzung schon in der Planungsphase bekannt sein müssten, um die Lebensdauer der Bauprodukte sowie die geforderten Produkteigenschaften auf die künftigen geänderten Anforderungen abstimmen zu können.

#### **2.5.2.5 Innere und äußere Umwelteinwirkungen**

Innere sowie äußere Umwelteinwirkungen müssen vom Planer erhoben und bei der Bauproduktauswahl berücksichtigt werden. Grundsätzlich werden die Ergebnisse der Material-

forschung sowie Erfahrungswerte in einer für den Planer verständlichen Form (zumeist tabellarisch; Bsp. Expositionsclassen von Beton) dargestellt, um eine treffsichere Bauproduktauswahl zu ermöglichen. Solche Tabellen zur Bauproduktauswahl können als Schnittstelle zwischen den Forschungsergebnissen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Bauprodukten und die Umsetzung dieses Wissens in der Praxis aufgefasst werden.

Das bedeutet, dass eine noch genauere Erfassung der Lebensdauerdaten für eine Vielzahl von ähnlichen Einbaubedingungen zu einem enormen Anstieg der Bauproduktpalette führen würde, wodurch die Verwechslungsgefahr in Planung und Ausführung zunimmt. Genauso würde eine Abstimmung der Lebensdauer des Bauprodukts auf die geplante Nutzungsdauer die Produktpalette erweitern, da die Bauprodukteigenschaften auf die jeweiligen Anforderungen abzustimmen sind. Falls aber eine klare Unterscheidung zwischen den jeweiligen Nutzungsdauerklassen der EN 1990 im jeweiligen Regelwerk getroffen wird, dann dürfte die Verwechslungsgefahr gering sein. Eine Aufbewahrung der Planungsunterlagen (Gebäudedokumentation) ist jedoch für eine präzise Abschätzung der Restlebensdauer und des Sanierungsaufwands im Instandsetzungsfall notwendig.

Die tatsächliche Einsparung an Stoff- und Energieressourcen durch die Auswahlmöglichkeit nach unterschiedlichen Nutzungsdauerklassen muss für jede Aufgabenstellung kritisch hinterfragt werden. Wenn beispielsweise ein Bauherr sein Betriebsgebäude mit befestigten Flächen 30 Jahre nutzen möchte, dann würde ein Planer jene Betonqualität auswählen, mit der die geforderte Nutzungsdauer gewährleistet werden kann. Verkauft nun der Bauherr in 30 Jahren sein Betriebsgebäude weiter, dann müsste er mittels Gebäudedokumentation darlegen, dass die Bauteile auf eine Nutzungsdauer von 30 Jahren abgestimmt sind, wodurch ein niedriger Restwert aufgrund eines höheren Instandsetzungsaufwands bzw. notwendigen Rückbaus anzusetzen ist.

Problematisch wird von Bauprodukt-Erzeugern die Angabe von Nutzungsdauern in Regelwerken gesehen, da diese rechtlich möglicherweise als Garantie aufgefasst werden können. Auf mögliche Szenarien bezüglich der Veränderung der Rechtslage durch Angabe von Lebensdauerklassen in Regelwerken wurde bereits im Aachener Bausachverständigentagung [26] eingegangen. Für die Lebensdauervorhersage im Rahmen einer Gebäudezertifizierung ist die rechtliche Seite irrelevant, weshalb darauf nicht näher eingegangen wird.

### **2.5.2.6 Instandhaltungsstrategie**

Das einzige verbliebene Kriterium, das auch in der Konzeptionsphase definierbar ist und Einfluss auf die Alterungskurve hat, ist die zugrunde gelegte Instandhaltungsstrategie. Grundsätzlich werden in Regelwerken nur generelle Aussagen über die Instandhaltung gemacht. Eine detaillierte Erläuterung des Instandhaltungsaufwands in Abhängigkeit von der gewählten Instandhaltungsstrategie ist aber für die Lebenszyklusbewertung unabdingbar.

In [63] werden folgende Strategien zur Gebäude-Erhaltung erwähnt, die den Einfluss der zugrunde gelegten Instandhaltungsstrategie auf die voraussichtliche Lebensdauer von Bauprodukten und Nutzungsdauer von Bauteilen aufzeigt:

#### **I. Abbruchstrategie**

Der Nutzwert eines Gebäudes nimmt aufgrund fehlender Instandhaltung und durch Zunahme von Folgeschäden nach einer langsamen Anfangsalterung relativ schnell ab. Dies führt folglich auch zu einer Verkürzung der Lebensdauer von Bauprodukten. [63]

## II. Abnutzungsstrategie

Die Abnahme des Nutzwerts eines Gebäudes über die Zeit wird durch laufende Wartungsarbeiten an Bauteilen verzögert. Die Folge ist eine Verflachung der Alterungskurve und im Vergleich zur Abbruchstrategie zu einer Verlängerung der Bauproduktlebensdauer. Eine weitere Nutzung des Gebäudes ist nicht vorgesehen, weshalb keine Instandsetzungsmaßnahmen zur Anwendung kommen. [63]

Für Bauprodukte des Bauwerk-Ausbaus und der Bauwerk-Technik bedeutet dies, dass die maximale Lebensdauer ausgenutzt wird. Für Bauprodukte des Rohbaus kann es jedoch zu einer Verkürzung der Lebensdauer kommen, wenn die Nutzung des Gebäudes durch den Ausfall von Bauprodukten des Bauwerk-Ausbaus und der Bauwerk-Technik beendet wird.

## III. Werterhaltungsstrategie

Ziel ist die Wahrung der Gebrauchstauglichkeit auf dem Anfangsniveau, einschließlich der Beibehaltung der ursprünglichen Nutzung. Ergänzend zu Instandhaltungsmaßnahmen kommen auch Instandsetzungsmaßnahmen zum Einsatz, um die Funktions- und Gebrauchstauglichkeit wiederherzustellen. Dies spiegelt sich in Form eines sägezahnartigen Verlaufs der Alterungskurve wider. Trotzdem kommt es aufgrund gestiegener Nutzeranforderungen zu einer Absenkung des Nutzwerts eines Gebäudes. [63]

Für Bauprodukte des Bauwerk-Ausbaus und der Bauwerk-Technik kann dies bedeuten, dass aufgrund von Instandsetzungsmaßnahmen die maximale Lebensdauer wegen fehlender Lösbarkeit der betroffenen Bauteilschichten im Instandsetzungsfall nicht voll ausgenutzt wird. Die Lebensdauer des Rohbaus wird aufgrund der verlängerten Nutzungsphase jedoch maximal ausgenutzt.

## IV. Werterhöhungsstrategie

Der Nutzwert des Gebäudes soll durch laufende Instandhaltungs-, Modernisierungs- und Umbaumaßnahmen gesteigert werden.

Nach [62] werden Modernisierungs- und Umbaumaßnahmen im Gegensatz zu Instandhaltungsmaßnahmen unabhängig vom vorhandenen Abnutzungsvorrat eines Gebäudes oder Bauteils initiiert ([62], Seite 26 ff). Folglich wird es zu einer Verkürzung der Lebensdauer von Bauprodukten des Bauwerk-Ausbaus und der Bauwerk-Technik aufgrund des vorzeitigen Rückbaus wegen geänderter Nutzeranforderungen kommen. Im Gegensatz dazu werden Bauprodukte des Rohbaus hinsichtlich der technischen Lebensdauer maximal ausgenutzt, wenn keine bedeutenden Veränderungen im Grundriss vorgenommen werden.

Der Zeitpunkt von Modernisierungs- und Umbaumaßnahmen wird durch die Dringlichkeit hinsichtlich des Anpassungsbedarfs an die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bestimmt. Je kürzer die Modernisierungs- und Umbauzyklen sind, desto „kreislauffähiger“ müssen die anfallenden Baurestmassen sein, um die ökologischen Auswirkungen gering zu halten.

### 2.5.2.7 Sonstige dauerhaftigkeitsrelevante Aspekte

Nachfolgend werden weitere lebensdauerrelevante Einflussfaktoren beschrieben, die von den Faktorklassen der ISO 15686 [56] derzeit nicht erfasst werden.

### Künftiger Anstieg der Mindestanforderungen – performance requirements

Ein künftiger Anstieg der Mindestanforderungen führt nach den Prinzipien der ISO 13823 [55] bzw. ISO 15686 [53] theoretisch zu einer Verkürzung der voraussichtlichen Lebensdauer. Ob in der Praxis

ein frühzeitiger Eingriff aufgrund erhöhter Mindestanforderungen (z.B. weitere Absenkung der Mindest-U-Werte etc.) bei Bestandsbauten eintritt, hängt im Wesentlichen von wirtschaftlichen Gesichtspunkten ab (z.B. Vermietbarkeit, Miethöhe etc.). Eine Ausnahme stellt die Unterschreitung von stand- und nutzungssicherheitsrelevanten Mindest-Anforderungen dar, die aufgrund der Gefährdung der menschlichen Gesundheit einen raschen Eingriff erfordert. Jedenfalls können zum Zeitpunkt einer Gebäudezertifizierung eines neugebauten oder sanierten Bauwerks keine Aussagen über die künftige Veränderung der Mindestanforderungen und einer damit zusammenhängenden Verkürzung der technischen Lebensdauer gemacht werden.

### **Einflussfaktor - Robustheit**

Ein oft vernachlässigter Aspekt ist die Robustheit eines Aufbaus gegenüber außerplanmäßiger Einwirkungen, welche für die voraussichtliche Lebensdauer der zusammengefügteten Bauprodukte von Bedeutung sein kann.

Eine außerplanmäßige Einwirkung kann beispielsweise eine Beschädigung der Dampfsperre einer Innendämmung durch Installationsarbeiten in der Ausbauphase bzw. in der Nutzungsphase sein. Der genaue Eintritt wird nie genau vorhersagbar sein, trotzdem sollte bereits in der Planungsphase daran gedacht werden, nur jene Aufbauten zu wählen, die gegenüber außerplanmäßigen Einwirkungen ausreichend robust sind.

Für die Bewertung der Robustheit kann beispielsweise die FMEA-Methode herangezogen werden. Dabei wird zuerst eine Gliederung von außerplanmäßigen Einwirkungen für einen definierten Aufbau unter einer gegebenen Einbaubedingung erstellt. Anschließend wird subjektiv die Häufigkeit des Eintritts, das Schadensausmaß und die Priorität für die Funktionserfüllung hinsichtlich der gestellten Anforderungen festgelegt und die Risikoprioritätszahl ermittelt. Mit Hilfe der Risikoprioritätszahl können so in übersichtlicher und strukturierter Form jene außerplanmäßigen Einwirkungen identifiziert werden, die das größte Potential zur Verkürzung der Lebensdauer eines Aufbaus aufweisen. Danach können in der Planung noch rechtzeitig konstruktive Gegenmaßnahmen gesetzt werden, um die Risikoprioritätszahl unter einen definierten Grenzwert zu senken. Der zu definierende Grenzwert ist vom zugrunde gelegten Sicherheitsniveau abhängig und muss vom Anwender selbst festgelegt werden.

In der ÖVE/ÖNORM EN 60812 [83] ist der Konnex zwischen Risikoprioritätszahl und Eintrittswahrscheinlichkeit dargestellt. Mit der erläuterten Vorgangsweise kann im Anschluss ein Variantenvergleich für eine definierte Einbaubedingung durchgeführt werden und der optimale Aufbau ausgewählt werden.

### **2.5.3 Ermittlung der Austauschraten und Ausnutzungsgrade**

Für eine Lebenszyklusbewertung müssen die Austauschraten für eine definierte Nutzungsdauer bekannt sein, um die Einsparpotentiale an CO<sub>2</sub> und Energie berechnen zu können. Die Austauschrate und der Ausnutzungsgrad für die jeweilige Bauteilschicht können nach Ermittlung der voraussichtlichen Lebensdauer bestimmt werden. Die Austauschrate wird durch Division der voraussichtlichen Lebensdauer des Tragwerks (Beispiel 100 Jahre) mit der voraussichtlichen Lebensdauer des jeweiligen Bauprodukts bzw. der jeweiligen Schichtgruppe (40 Jahre) abzüglich des Aufwands zur Gebäudeerrichtung (-1) berechnet. [94]

Zum besseren Verständnis werden die möglichen Berechnungsvorgänge beispielhaft anhand eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) erläutert. Es wird eine Lebensdauer des Tragwerks von 100 Jahren und des Wärmedämmverbundsystems (WDVS) von 40 Jahren angenommen. Die Austauschrate des WDVS wird mittels Division der Lebensdauer des Tragwerks (100 Jahre) durch die

Lebensdauer des WDVS (40 Jahre) abzüglich des Errichtungsaufwands (-1) berechnet. Rechenvorgang:  $(100/40)-1 = 1,5$  Austauschraten (siehe Abbildung 10, S. 54).

Folgende Aspekte sind bei nicht ganzzahligen Austauschraten zu berücksichtigen: [94]

Der Einfluss des Auf- oder Abrundens der Austauschraten auf die kalkulatorische Lebensdauer des Tragwerks ist wesentlich, weshalb im Folgenden die möglichen Varianten mit ihren Vor- und Nachteilen kurz erläutert werden.

Bei **Verzicht auf Auf- bzw. Abrunden** nicht ganzzahliger Austauschraten ist keine umfassende Analyse der gegenseitigen Abhängigkeiten von Bauprodukten des Rohbaus und Ausbaus erforderlich, weshalb der Bearbeitungsaufwand zur Lebenszyklusbewertung deutlich reduziert wird. Folglich ist dieser Ansatz für jene Lebenszyklusanalysen geeignet, die nur auf eine Bewertung der geplanten Sanierungsmaßnahmen abzielen. [94]

Das **Aufrunden der Austauschraten auf ganze Zahlen** ermöglicht eine einfache Berechnung, da alle Austauschraten auf die kalkulatorische Lebensdauer des Tragwerks bezogen werden. Aufgrund der geringen Restlebensdauer des Tragwerks ist unbedingt auf die Wirtschaftlichkeit der geplanten Instandsetzung zu achten. Der letzte Instandsetzungszyklus kommt nur dann in Frage, wenn auch eine Verlängerung der Restlebensdauer des Tragwerks mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand durchführbar ist. Die Entscheidung ob Neubau oder Sanierung kann erst nach einer umfassenden Gebäuediagnostik getroffen werden, d.h. eine Bewertung kann nicht zum Zeitpunkt der Gebäudeerrichtung sondern erst beim Anstehen des letzten Instandsetzungszyklus erfolgen. Dies entspricht dem Lösungsweg: „Aufrunden auf ganze Zahlen“ in der Abbildung 10. [94]

Eine weitere Möglichkeit ist das **mathematische Runden** der Austauschraten, wodurch die kalkulatorische Lebensdauer des Tragwerks durch die kalkulatorische Lebensdauer einer kritischen Bauteilschicht (z.B. WDVS) begrenzt wird. Für das Anschauungsbeispiel bedeutet dies, dass die Lebensdauer des Tragwerks durch die in Summe kürzere Lebensdauer des WDVS (2 x 40 Jahre) auf 80 Jahre begrenzt wird (siehe „Lösung: Mathematische Rundung“ in Abbildung 10). [94]

Die Berechnung der Austauschraten wird durch die fehlende Kenntnis hinsichtlich der Lebensdauer der künftigen Instandsetzungsmaßnahmen erschwert. In der Abbildung 10 ist unter „**Bewertungsproblem – technischer Fortschritt**“ eine um 10 Jahre längere Lebensdauer des „WDVS neu“ (50 Jahre) beispielhaft dargestellt, wodurch im Fall einer mathematischen Rundung der Austauschraten eine Verlängerung der kalkulatorischen Lebensdauer des Tragwerks um 10 Jahre eintritt. [94]

Der Know-How-Plus-Studie [93] sowie der vorliegenden Dissertation wurde aufgrund der Vielzahl von zu bewertenden Aufbauten ein praktikables Lebensdauermodell zugrunde gelegt, das einerseits eine Bandbreite der publizierten Lebensdauerangaben angibt und andererseits eine Anpassung der jeweiligen Bauprodukt-Lebensdauern mittels eines Schichtenmodells ermöglicht, wodurch der Einfluss der Lösbarkeit der auszutauschenden Bauteilschichten berücksichtigt werden kann. Des Weiteren wird mit nicht ganzzahligen Austauschraten bilanziert, da der Schwerpunkt auf die Lebenszyklusbewertung von thermischen Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle und energetischen Modernisierungsmaßnahmen (PV, Lüftung, Solarthermie etc.) gelegt wird und eine ausreichend lange technische Rest-Lebensdauer des Tragwerks vorausgesetzt wird.

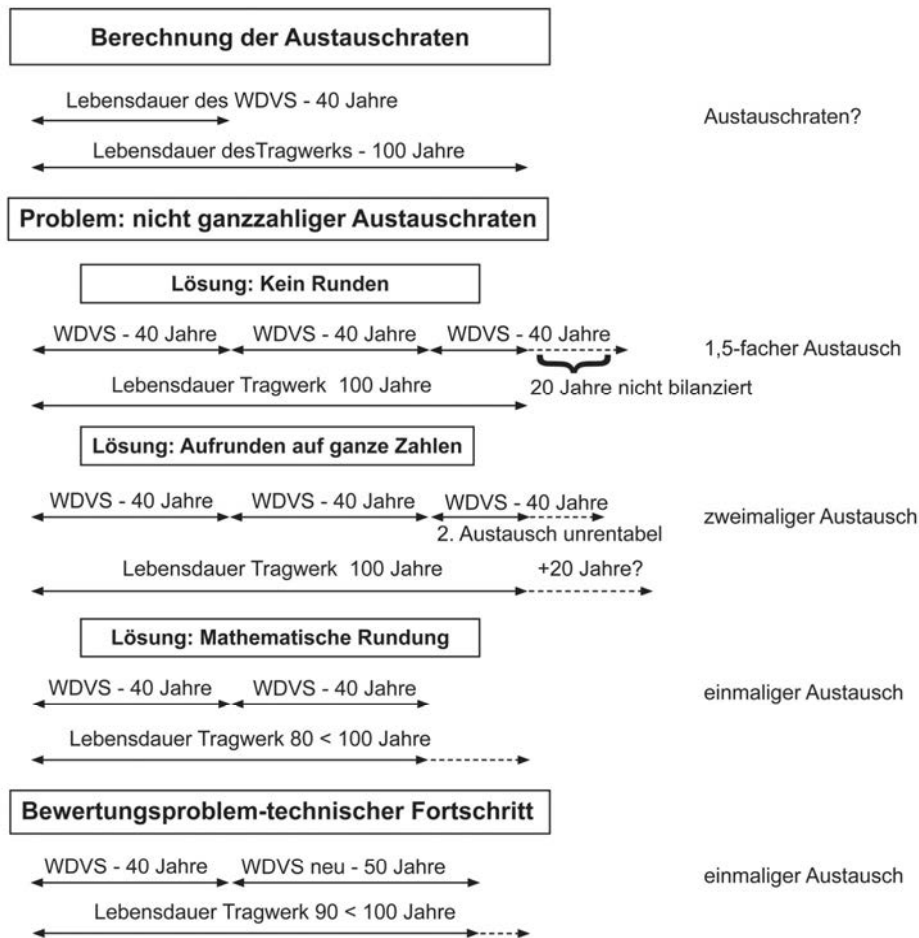


Abbildung 10 Problemstellungen bei der Berechnung der Austauschraten [94]

## 2.6 Ausblick - lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl

Um das Ziel von ökoeffizienten Bauwerken zu erreichen, sind als Entscheidungsgrundlage die Ergebnisse einer Lebenszyklusbewertung in ökologischer und ökonomischer Hinsicht heranzuziehen. Zur Bilanzierung werden aber umfassende Informationen über die voraussichtliche Lebensdauer, die Kreislauffähigkeit und den Instandhaltungsauswand benötigt. Um eine genauere Abstimmung der Lebensdauer von Bauprodukten auf eine definierte Nutzungsdauer eines Bauwerks zu ermöglichen, bedarf es einer Erweiterung der Regelwerke hinsichtlich einer Bauproduktauswahl nach unterschiedlich langen Nutzungsdauern. In diesem Zusammenhang wird auf jene Entwicklungen eingegangen, die auf die Bereitstellung von Lebenszyklusdaten abzielt und welche Probleme bei der Umsetzung hinsichtlich der Datensammlung und Anwendung in der Praxis auftreten können.

### 2.6.1 Künftiger Informationsbedarf für Lebenszyklusbewertungen

Die Bauproduktenrichtlinie wurde im April 2011 durch die Bauprodukteverordnung ersetzt. Eine bedeutende Erneuerung stellt die Erweiterung der Grundanforderungen um den Punkt 7. „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ der Bauprodukteverordnung dar. In der Bauprodukteverordnung [28] wird gefordert, dass ein Bauwerk so geplant, errichtet und abgerissen werden muss, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden können. Der Schwerpunkt wird auf die Recyclingfähigkeit, Dauerhaftigkeit und den Einsatz von umweltfreundlichen Sekundärbaustoffen gelegt.

Wünschenswert wären bauproduktsspezifische Herstellerangaben hinsichtlich der voraussichtlichen Lebensdauer und Kreislauffähigkeit in Abhängigkeit von der Umgebungsbedingung und vom Instandhaltungsniveau. Diese Angaben können als Grundlage für Lebenszyklusbewertungen vom Planer bzw. Gebäudezertifizierer herangezogen werden, wodurch die Gefahr von Fehlinterpretation hinsichtlich der Lebensdauer, voraussichtlichen Instandhaltungsaufwand, Lösbarkeit und Kreislauffähigkeit reduziert wird. Ein möglicher Ablauf zur Bereitstellung harmonisierter Lebensdauerdaten für die Gebäudezertifizierung ist in der Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11 Vorschlag zur Bereitstellung harmonisierter Lebensdauerdaten

In europäischen Regelwerken kann bis auf wenige Ausnahmen eine Bauproduktauswahl in Abhängigkeit von unterschiedlich langen Nutzungsdauern vorgenommen werden. Folglich muss ein Großteil der europäischen Regelwerke um eine weitere Kategorie, nämlich der geplanten Nutzungsdauer erweitert werden, um dem Planer die Möglichkeit zu geben, eine Abstimmung der voraussichtlichen Lebensdauer der Bauprodukte auf die geplante Nutzungsdauer des Bauwerks vornehmen zu können. Dieser Vorteil einer lebensdaueroptimierten Planung führt aber auch zu einem Anstieg der Produktvielfalt, wodurch die Anforderungen an den Planer hinsichtlich einer treffsicheren Auswahl der Bauprodukte dementsprechend erhöht wird, einschließlich einer eindeutigen und umfassenden Ausschreibung der zu erbringenden Bauleistungen.

Ein anschauliches Beispiel zur Problematik hinsichtlich der Produktvielfalt stellt die Normenreihe EN 1504 [84] zur Bauproduktauswahl für Instandsetzungsmaßnahmen von Betontragwerken dar. In der Normenreihe werden Leistungsmerkmale an Bauprodukte auf Basis unterschiedlicher Instandsetzungsprinzipien und den dazugehörigen Instandsetzungsmethoden definiert. Dies führt nach [89] zu einer immensen Produktvielfalt.

Der Vorteil des Performance-Konzepts der EN 1504 [84] ist nach [89] die Bauproduktauswahl nach einem exakt abgestimmten Leistungsprofil, womit auch Sonderlösungen mittels vorgegebenen Leistungsmerkmalen definierbar sind. Die Nachteile des Performance-Konzepts der EN 1504 [84] sind nach [89] der höhere Bearbeitungsaufwand und eine möglicherweise mangelhafte Festlegung der erforderlichen Leistungen, besonders bei komplexen Aufgabenstellungen.

Um die Produktauswahl einzugrenzen, wurde durch den zuständigen deutschen Spiegelausschuss DIN NA 005-07-06 festgelegt, dass für die Verwendung der Produkte nach EN 1504 [84] bestehende nationale Regelwerke (RL-SIB, ZTV-ING, DIN V) heranzuziehen bzw. durch Zulassungen zu regeln

sind. D.h., Planung, Ausführung und Produktspezifizierung erfolgt über nationale Regelwerke und Richtlinien, wobei ein Konnex zur maßgebenden Normenreihe EN 1504 mit Hilfe der sogenannten Restnormen gemacht wurde. Nationale Umsetzungsdokumente regeln die Verwendung von CE-gekennzeichneten Bauprodukten im jeweiligen EU-Land. ([89], S. 11 ff)

### 2.6.2 Erhebungsbedarf von Lebensdauerdaten

Das größte Hindernis für eine einfache und effiziente Durchführung von Lebenszyklusbewertungen ist die lückenhafte Datenlage und die oft zeitaufwendige Sammlung der erforderlichen Lebenszyklusdaten von Bauprodukten für eine definierte Umgebungsbedingung.

Folgende Aspekte stehen in der Baupraxis einer detaillierten Erfassung der Lebensdauer eines Bauprodukts für unterschiedliche Einbaubedingungen entgegen:

- Die Erhebung der Daten ist aus Sicht der Bauprodukten-Erzeuger möglicherweise zu zeit- und kostenaufwendig und ein sichtbarer Nutzen ist derzeit nicht erkennbar;
- Die Gefahr von Fehlinterpretationen durch den Anwender ist bei einer großen Datensatzauswahl zwangsläufig gegeben;
- Eine frei zugängliche Softwarelösungen muss zur raschen Abfrage von harmonisierten Lebenszyklusdaten entwickelt und gewartet werden;
- Problematisch können Lebenszyklusangaben über innovative Produktentwicklungen aufgrund geringer Erfahrungswerte sein.

Dem gegenüber stehen die Vorteile einer umfassenden Erhebung der Lebensdauer von Bauprodukten im eingebauten Zustand:

- Die Möglichkeit für einer Bauproduktauswahl anhand unterschiedlicher Nutzungsdauer-Klassen wird geschaffen;
- Die Bereitstellung harmonisierter und qualitätsgesicherter Lebenszyklusdaten seitens der Bauprodukten-Erzeuger verhindert die Fehleinschätzungen bei Lebenszyklusbewertungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und Kreislauffähigkeit von Bauprodukten für definierte Umgebungs- und Einbaubedingungen;
- Ein direkter Vergleich zwischen unterschiedlichen Systemlösungen bzw. Aufbauten nach funktionalen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten ist möglich;
- Der Einfluss der zur Auswahl stehenden Instandhaltungsstrategie auf die voraussichtliche Lebensdauer des Bauprodukts kann nachvollziehbar aufgezeigt werden, einschließlich des dazu erforderlichen Instandhaltungsaufwands und des voraussichtlichen Instandsetzungszeitpunkts;
- Interdisziplinäre Systementwicklungen führen zu einer Verbesserung der Ökoeffizienz, da fächerübergreifende Schnittstellenprobleme bereits in der Entwicklungsphase behandelt werden können, wie beispielsweise die Lösbarkeit und Trennbarkeit der zusammengefügt Bauprodukte im Instandsetzungsfall.

Beim kritischen Vergleich der Vor- und Nachteile ist der Nutzen hinsichtlich der Planung und Auswahl von lebenszyklusoptimierten Bauprodukten und Systemlösungen größer als der dafür erforderliche Bearbeitungsaufwand. Um eine hohe Akzeptanz in der Praxis erreichen zu können, müssen die Lebenszyklusdaten im Konnex zu den bauprodukt-spezifischen Regelwerken bereitgestellt werden. So können Doppelgleisigkeiten bei der Modellentwicklung zur Lebensdauervorhersage vermieden werden, da bereits ein Großteil der lebensdauerrelevanten Einflussfaktoren im Zuge einer Bauproduktauswahl mittels Regelwerken behandelt wird. Folglich sollten normative Regelwerke künftig eine Bauproduktauswahl nach unterschiedlichen Nutzungsdauerklassen ermöglichen und Aussagen über die Kreislauffähigkeit, Robustheit gegenüber außerplanmäßigen Einwirkungen (z.B. Hagel, Starkregen etc.) sowie über den Instandhaltungsaufwand in Abhängigkeit von der



Instandhaltungsstrategie beinhalten. Bei Umsetzung dieser Vorschläge können in Zukunft zuverlässige Lebenszyklusoptimierungen in ökonomischer und ökologischer Hinsicht durchgeführt werden, wodurch der Mehrwert von ressourcen-, energie- und kosteneffizienten Konstruktionen aufgezeigt werden kann.

### **3 Lebenszyklusbewertung von Sanierungsmaßnahmen**

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse der Literaturrecherche hinsichtlich der Bestandsaufbauten erläutert und eine Zuordnung der möglichen Sanierungsmaßnahmen für die jeweilige Bauepoche durchgeführt. Im Anschluss wird der entwickelte Bewertungsraster erläutert, welcher alle relevanten Informationen für die Lebenszyklusbewertung in übersichtlicher Form beinhaltet. Diese Tätigkeiten wurden im Rahmen der Know-How-Plus-Studie vom Verfasser [93] durchgeführt und werden zum besseren Verständnis der darauf aufbauenden Potentialanalysen in Kurzform wiedergegeben. Für die Dissertation wurde zusätzlich eine umfassende bauteilspezifische Auswertung der Ergebnisse in Abhängigkeit von der jeweiligen Bauepoche vorgenommen, um detaillierte bauproduktspezifische Aussagen zur Ökoeffizienz ausarbeiten zu können.

#### **3.1 Erhebung – Bestandsaufbauten**

Es wurde eine Literaturrecherche hinsichtlich der Aufbauten der thermischen Gebäudehülle bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand durchgeführt, um den erforderlichen Sanierungs- und Modernisierungsaufwand unter Berücksichtigung bautechnischer Randbedingungen besser abschätzen zu können. Der vom Zentrum für Umweltbewußtes Bauen [60] publizierte Katalog „regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten“ war für die Übersicht über Bestandsaufbauten des österreichischen Gebäudebestands ausreichend. Eine Anpassung an österreichische Randbedingungen wurde mittels österreichischer Literaturquellen ([47, 68, 106]) vorgenommen. Relevante Einflussfaktoren wurden im baukonstruktionsorientierten Leitfaden der Know-How-Plus-Studie [93] aufgenommen und bei der Modellbildung dementsprechend berücksichtigt.

#### **3.2 Erhebung – Gebäudespezifischer Sanierungsaufwand**

Eine Übersicht über gängige und innovative Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen wurde mit einer umfassenden Literaturrecherche zusammengestellt, wobei der Schwerpunkt auf Veröffentlichungen aus dem Programm „Haus der Zukunft“ gelegt wurde. Diese Informationen wurden vom Know-How-Plus-Projektteam als Grundlage für die Entwicklung von bauepochenspezifischen Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen verwendet. Für diesen Arbeitsschritt mussten auch bauteilspezifische Ziel-U-Werte festgelegt werden (siehe Abbildung 12). Der bauphysikalische Nachweis der ausgewählten Sanierungsmaßnahmen wurde vom Projektteam der AEE INTEC im Rahmen der Know-How-Plus-Studie mit ArchiPHYSIK [4] durchgeführt und der HWB-Berechnung zugrunde gelegt.

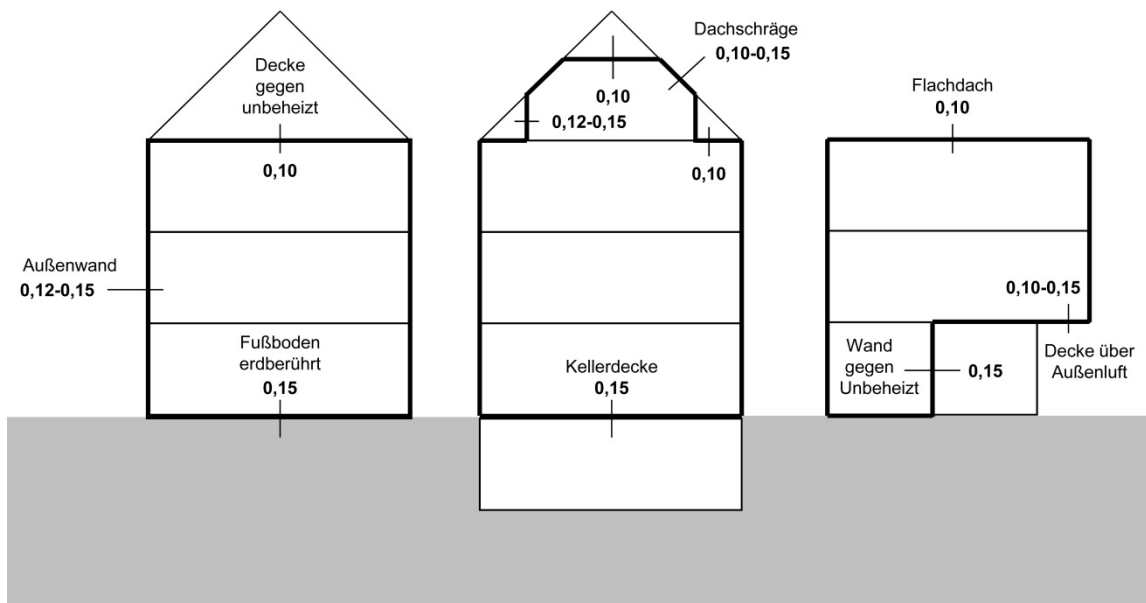


Abbildung 12 Angestrebte Ziel-U-Wert (AEE INTEC - Geier 2012), abgebildet in [93]

In Ausnahmefällen konnten die angestrebten Ziel-Werte aus bauphysikalischen oder sonstigen Gründen (Denkmalschutz etc.) nicht erreicht werden. Die höheren U-Werte wurden je Bauepoche und Bauteil vermerkt und bei der HWB-Berechnung für die jeweiligen Referenz-Gebäude (z.B. Gründerzeithäuser) berücksichtigt. Der erforderliche Sanierungs- und Modernisierungsaufwand und die bauprodukt-spezifischen Kennwerte wurden mit Herstellerinformationen (Produktdatenblätter, Hersteller-Richtlinie etc.), Forschungsberichten und ähnlichem ermittelt.

In Abbildung 13 ist ein Datenblatt über den Bestandsaufbau, einschließlich der möglichen Sanierungsvarianten exemplarisch dargestellt. Zur besseren Übersicht wurden jene Bauteilschichten des Bestands grau unterlegt, wenn diese auch nach der Sanierung am Bauwerk verbleiben. Des Weiteren wurde festgelegt, dass die Lebensdauer einer Bauteilschicht vom Bestand verlängert wird, wenn diese durch eine thermische Sanierungsmaßnahme nachträglich geschützt wird. So wird zum Beispiel eine längere Lebensdauer für einen Außenputz eines Altbaus bilanziert, wenn dieser durch die Anbringung eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) vor äußeren Umwelteinwirkungen geschützt wird.



Abbildung 13 Auszug aus dem baukonstruktionsorientierten Leitfaden – Übersicht über unterschiedliche Sanierungsvarianten, einschließlich bauphysikalischer Kennwerte [93]

### 3.3 Lebenszyklusbewertung - Vorgangsweise

Die qualitative und quantitative Lebenszyklusbewertung von mehr als 180 Aufbauten erforderte die Entwicklung eines Bewertungsrasters (Excel-Berechnungsformular), der eine rasche und problemlose Auswahl und Aktualisierung der bauproduktspezifischen Kennwerte bzw. Ökobilanz-Kennwerte ermöglicht. Der Bewertungsraster beinhaltet alle relevanten Eingabe- und Ausgabedaten für die Lebenszyklusbewertung. Die festgelegte Systemgrenze umfasst die Bauprodukterzeugung, Montage, Wartung bzw. Betrieb von Solarthermie- bzw. PV-Anlagen und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, Instandhaltung und die Entsorgung der Baurestmassen, einschließlich aller Transportwege.

#### 3.3.1 Ablauf der Lebenszyklusbewertung

Der in Abbildung 14 exemplarisch dargestellte Bewertungsraster beinhaltet zum einen alle zur Lebenszyklusanalyse relevanten Eingabeparameter (Lebensdauer mit Bandbreiten; prozentuale Verteilung hinsichtlich Recycling, Deponierung und thermischer Verwertung; bauphysikalische Kennwerte; Masseninput; Lösbarkeit/Trennbarkeit; Referenz-Nutzungsdauer des Bauwerks) und zum anderen die Ergebnisse der Lebenszyklusbewertung, untergliedert nach Best, Base und Worst Case-Szenarien.

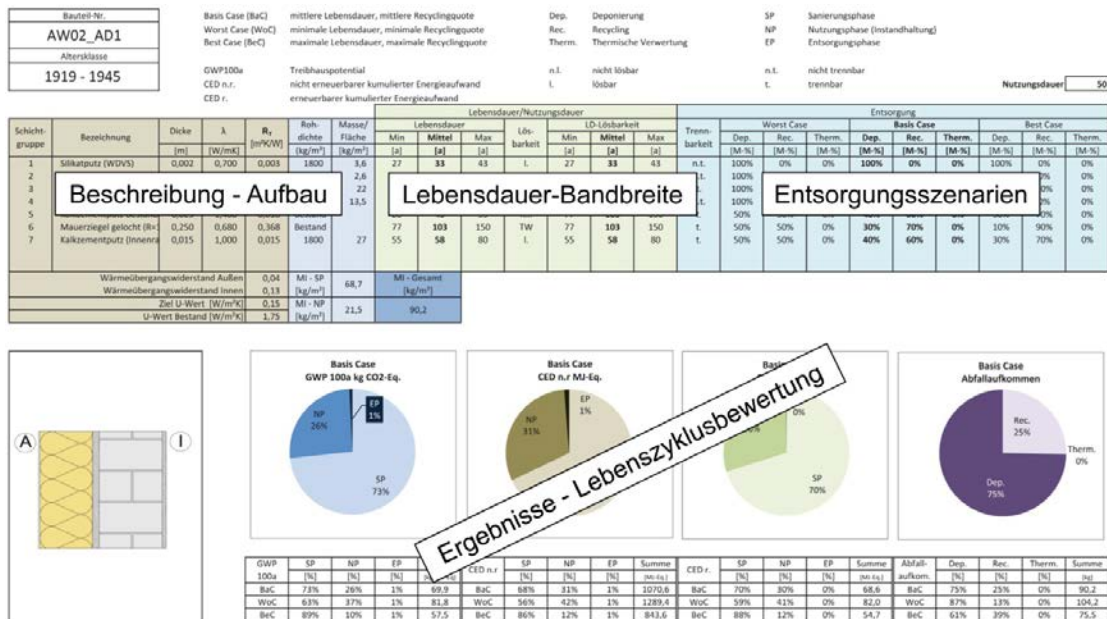


Abbildung 14 Bewertungsraster für Lebenszyklusbewertungen [93]

### 3.3.2 Verwendete Ökobilanz-Indikatoren

Zur Berechnung der Ökobilanz-Kennwerte wurde der bauepochenspezifische Sanierungs- und Modernisierungsaufwand mit den Datensätzen der Ecoinvent-Datenbank [23] verknüpft. Für die Dissertation wurde das Treibhauspotential (GWP), der kumulierte Energiebedarf aus nicht erneuerbarer und erneuerbarer Energie (CED n.r. und CED r.) und das Abfallaufkommen als Indikatoren festgelegt. Der Einfluss der unterschiedlichen Lebensdauern wurde mittels Bandbreiten bei der Berechnung berücksichtigt. Die folgenden vier voneinander unabhängigen Studien wurden für die Berechnung der Lebensdauer-Bandbreite von Bauprodukten herangezogen: Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“ [11], Nutzungsdauerkatalog der allgemein beiedeten und gerichtlich zertifizierten Sachverständigen Österreichs [46], Zwischenauswertung vom Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen – Deutschland [13] und Bund technischer Experten - BTS [10].

#### 3.3.2.1 Einfluss der Lösbarkeit auf die Bauprodukt-Lebensdauer

Der Einfluss der konstruktiven Durchbildung hinsichtlich der Lösbarkeit und Trennbarkeit der zusammengefügt Bauprodukte wurde im Bewertungsablauf berücksichtigt. Im Instandsetzungsfall führt eine ungenügende Lösbarkeit der zusammengefügt Bauprodukte zu einer Verkürzung der Lebensdauer. Die Folge ist ein höherer stofflicher und energetischer Instandsetzungsaufwand innerhalb der bilanzierten Bauwerks-Nutzungsdauer von 50 Jahren. Im Bewertungsablauf wurde zuerst die jeweilige Lebensdauerbandbreite der eingesetzten Bauprodukte mittels Literaturrecherche erhoben. Anschließend wurde die zusammengefügt Bauteilschichten hinsichtlich ihrer Lösbarkeit im Instandsetzungsfall bewertet und in der Spalte „Lösbarkeit“ das Kürzel „l.“ für lösbar, das Kürzel „b.l.“ für „bedingt lösbar“ und das Kürzel „n.l.“ für „nicht lösbar“ eingetragen (siehe Tabelle 3-1). Danach wurde im Fall von nicht lösbar zusammengefügt Bauteilschichten die Lebensdauer an die kritische Bauprodukt-Lebensdauer angepasst. Die festgelegten Lebensdauern sind im Bewertungsablauf unter der Kategorie „Lebensdauer-Lösbarkeit“ dargestellt. Im Anschluss konnten die Austauschraten und der Instandhaltungsaufwand bezogen auf eine Bauwerksnutzungsdauer von 50 Jahren ermittelt werden.

Tabelle 3-1 Definition der Lösbarkeit von Bauteilschichten nach [85]

Lösbarkeit	Beschreibung
lösbar	schadhafte Bauteilschicht <b>ohne Beschädigung intakter Bauteilschichten</b> austauschbar
bedingt lösbar	lösbar, aber nur mit <b>Zerstörung von Verbindungsmittel</b> (z.B. nicht demontierbare Verschraubung)
nicht lösbar	schadhafte Bauteilschicht nur durch <b>Zerstörung intakter Bauteilschichten</b> austauschbar

Beispielsweise werden in der Literatur für Dampfsperren deutlich kürzere Lebensdauern angegeben als für die angrenzenden Bauteilschichten. Hier ist kritisch zu hinterfragen, ob es dadurch tatsächlich zu einer Verkürzung der in der Literatur angegebenen Lebensdauern des gesamten Aufbaus kommt. Für die Studie wurde nur dann eine kürzere Lebensdauer zugrunde gelegt, wenn keine konstruktiven Maßnahmen lt. [95] getroffen wurden, die eine leichte Beschädigung der Dampfsperre in der Nutzungsphase verhindern, wie beispielsweise eine zusätzliche Installationsebene oder eine Beplankung mit Gipskartonplatten. Folglich wurde die Robustheit des Aufbaus gegenüber außerplanmäßigen Einwirkungen zumindestens ansatzweise berücksichtigt.

### 3.3.2 Einfluss der Trennbarkeit auf die Kreislauffähigkeit der Baurestmassen

Für die Bewertung der Kreislauffähigkeit der anfallenden Baurestmassen wurde die Kategorie „Trennbarkeit“ eingeführt. Nicht trennbare Baurestmassen (z.B. Putzsysteme von Wärmedämmverbundsystemen) wurden mit dem Kürzel „n,t“ markiert und aufgrund der hohen stofflichen Verunreinigung mit einem Deponieanteil von 100 % bilanziert. Für trennbare Baurestmassen wurde aufgrund der hohen Sortenreinheit eine vergleichsweise hohe Recyclingquote zugewiesen und in der Spalte „Trennbarkeit“ mit dem Kürzel „t“ gekennzeichnet.

### 3.3.3 Modellierung der Verwertungswege

Für die Festlegung der prozentualen Verteilung der möglichen Verwertungswege (Recycling, Deponie und thermische Verwertung) von Baurestmassen wurden als Ausgangsbasis (Base Case) der Bundesabfallwirtschaftsplan [12] und einschlägige Fachliteratur [73] herangezogen. Der Abänderung des Allokationsschlüssels für den Best bzw. Worst Case wurde mittels Benchmark-Vergleiche mit anderen EU-Mitgliedsländern durchgeführt. Der Benchmark-Vergleich zeigte auch, dass in Österreich ein vergleichsweise hoher Deponieanteil die Praxis ist (z.B. Gipskartonplatten). Folglich besteht hier noch ein Verbesserungspotential hinsichtlich der Anwendung innovativer Aufbereitungstechnologien. Außerdem müssen die gesetzlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für Recycling-Bauprodukte verbessert werden, um die Nachfrage zu steigern und natürliche Ressourcen zu schonen. In Zukunft sollte jedoch der Deponie-Anteil von Baurestmassen aufgrund der Aktivitäten auf EU-Ebene (Bauproduktverordnung Punkt 7 [28]; Abfall-Rahmenrichtlinie der EU [27]) rückläufig sein.

In der Ecoinvent-Datenbank [23] wird eine nahezu vollständige Wiederverwertung von PV-Paneelen vorausgesetzt. Diese Festlegung wird durch andere Studien hinsichtlich der Recyclingfähigkeit von PV-Modulen bestätigt (z.B. BINE Informationsdienst [44]). Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass im Fall einer großflächigen Anwendung der PV-Technologie auch umweltschonende Recyclinganlagen im industriellen Maßstab notwendig sind. Gegenwärtig wird laut PV-Recycling [88] für SI-Module eine Recycling-Quote von 80% erreicht. Bis zum Jahr 2020 muss aufgrund der WEEE-Richtlinie [29] die

Quote auf mindestens 85 % erhöht werden, wodurch die in Ecoinvent [23] zugrunde gelegte Recycling-Quote fast erreicht wird.

### 3.3.4 Baukonstruktionsorientierter Leitfaden

Die Ergebnisse der Lebenszyklusbewertungen sowie die umfassende Beschreibung der zur Verfügung stehenden Sanierungs- und Modernisierungsvarianten wurden in einem baukonstruktionsorientierten Leitfaden zusammengefasst. Er kann über die Haus der Zukunft-Homepage (Link: [www.hausderzukunft.at/results.html/id5991](http://www.hausderzukunft.at/results.html/id5991)) abgerufen werden, weshalb auf einen Anhang verzichtet wird. Die im Leitfaden gesammelten bauepochen- und gebäudespezifischen Randbedingungen wurden jedoch bei der weiterführenden Modellberechnung berücksichtigt. Im Gegensatz zur Know-How-Plus Studie [93] wurden jedoch nicht nur ein sondern vier unterschiedliche Gebäude-Energiestandards ausgewertet.

Mit dem baukonstruktionsorientierten Leitfaden wird eine direkte Schnittstelle zwischen den LCA-Ergebnissen auf Bauteil-Ebene und den Ergebnissen der Potentialanalyse bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand geschaffen. Dadurch kann aufgezeigt werden, welcher Sanierungsaufwand für einen definierten bauepochenspezifischen Gebäudetyp (z.B. Einfamilienhaus mit Baujahr 1960) geleistet werden muss, um die angestrebten Ziele hinsichtlich Klimaschutz und Energieeinsparung erreichen zu können.

Für die Modellberechnung wurden folgende Informationen aus dem baukonstruktionsorientierten Leitfaden der „Know-How-Plus“-Studie [93] entnommen:

- der erforderliche stoffliche Aufwand für die thermische Sanierung und energetische Modernisierung des Gebäudebestands wurde der Modell-Berechnung zugrunde gelegt;
- das entwickelte Modell des österreichischen Gebäudebestands wurde hinsichtlich der Bilanzierung von vier unterschiedlichen Gebäude-Energiestandards dementsprechend angepasst und ausgewertet;
- die bauphysikalischen Kennwerte der sanierten Aufbauten wurden für die HWB-Berechnung der jeweiligen Referenzgebäude herangezogen.

## 3.4 Ergebnisse - bauepochenspezifischer Ökobilanz-Vergleich

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Erkenntnisse erläutert, die aus dem bauepochenspezifischen Vergleich der Ökobilanz-Kennwerte der jeweiligen Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen gewonnen wurden. Im Folgenden werden aufgrund des großen Bewertungsumfanges nur die wichtigsten Ergebnisse des bauepochenspezifischen Ökobilanz-Vergleichs der bilanzierten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen erläutert. Die Detailergebnisse können im Anhang A nachgelesen werden.

### 3.4.1 Einfluss der Bauproduktwahl

Die Verwendung von erneuerbaren Energieträgern als Bauprodukte (Holzfaserdämmplatte etc.) ist hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Speicherung und thermischen Verwertbarkeit von Vorteil.

Bei vergleichbarer Dämmwirkung weisen thermische Sanierungsvarianten bessere Ökobilanz-Werte (CED, GWP) auf, wenn Dämmstoffe mit vergleichsweise niedrigerer Rohdichte eingesetzt werden können (Bsp. hinterlüftete Fassade). Grund ist der dominante Einfluss der Dämmstoffe auf die Ökobilanz der thermischen Sanierungsmaßnahme, weshalb eine Reduktion des Materialinputs von

Dämmstoffen bei vergleichbarer Dämmwirkung zu einer deutlichen Verbesserung der Ökobilanz-Kennzahlen des Aufbaus führt.

Die Ökobilanz-Kennwerte einer Steinwolle-Dämmung sind im Vergleich zu einer Glaswolle-Dämmung trotz gleicher funktionaler Einheit (Wärmeleitfähigkeit) niedriger. Dadurch wird aufgezeigt, dass auch auf Bauprodukt-Ebene durch die Auswahl von funktional gleichwertigen Bauprodukten mittels harmonisierten Ökobilanz-Kennwerten (Umweltproduktdeklarationen - EPD) weitere Einsparungen möglich sind.

### **3.4.2 Einflussfaktoren auf Kreislauffähigkeit**

Die Relevanz der Lösbarkeit und Trennbarkeit der zusammengeführten Bauprodukte wird beim Vergleich der Ergebnisse der Lebenszyklusbewertung (LCA-Aufbauten) einerseits auf die Lebensdauer des Aufbaus und andererseits auf das Abfallaufkommen für den Best und Worst Case (siehe Ergebnisse im Anhang A) ersichtlich.

Negativ wirkt sich auch die mangelnde Lösbarkeit zusammengeführter Bauteilschichten im Instandsetzungsfall auf die Lebensdauer und folglich auch auf die betrachteten Ökobilanz-Kennwerte aufgrund des höheren Instandsetzungsaufwands aus. Der negative Einfluss der schlechteren Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen konnte durch eine Unterteilung des Indikators „Abfallaufkommen“ in die Kategorien „Deponie, Recycling und thermische Verwertung“ aufgezeigt werden (siehe LCA-Vergleiche im Anhang A).

### **3.4.3 Ökobilanzvergleich - Wandaufbauten**

Thermische Sanierungsmaßnahmen von Wandbauteilen weisen aufgrund der angewandten Fügetechnik (Kleben und Dübeln) grundsätzlich einen höheren Deponieanteil als beispielsweise jene von Dachgeschoßdecken auf. Eine hinterlüftete Fassade stellt hier eine positive Ausnahme dar, da diese aufgrund der guten Trennbarkeit wesentlich sortenreiner rückgebaut werden kann. Des Weiteren benötigen hinterlüftete Fassaden für die gleiche Dämmwirkung einen wesentlich geringeren Materialinput als die anderen bilanzierten Wärmedämmverbundsysteme. Zurückzuführen ist dies auf den Einsatz leichter Mineralwolle-Dämmungen ( $15 \text{ kg/m}^3$ ) und auf die um ca. 10 Jahre längere Lebensdauer (siehe Anhang A; Bsp. Außenwand AW05\_AD auf S. 157).

Die Ökobilanz-Kennwerte der untersuchten Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) aus Holzfaserdämmplatten, EPS und Mineralwolle zeigen nur geringfügige Unterschiede, obwohl durch die Verwendung von erneuerbaren Energieträgern (Holz) geringere Kennwerte erwartet wurden. Dieser Vorteil wird aber durch den vergleichsweise höheren Materialinput zur Erreichung des gleichen U-Werts aufgehoben. Nur beim Deponie-Abfallaufkommen schneidet ein WDVS mit Holzfaserdämmplatten aufgrund der thermischen Verwertbarkeit besser ab als ein WDVS mit Mineralwolle (siehe Anhang A; Bsp. Außenwand AW03\_AD auf S. 151).

Die bessere Ökobilanz eines Wärmedämmverbundsystems mit EPS-Dämmung im Vergleich zu einer mit Mineralwolle-Dämmung ist ebenfalls auf den geringeren Materialinput zurückzuführen. Der Vorteil des geringeren Materialinputs von thermischen Sanierungsmaßnahmen ist bei Wandaufbauten aufgrund der kürzeren Lebensdauer und folglich höheren Austauschrate größer als bei Dachgeschoßdecken.

### **3.4.4 Ökobilanzvergleich - Dachaufbauten**

Eine thermische Sanierung von Flachdächern mittels Schaumglas-Produkten (siehe Anhang A; Bsp. Flachdach FD01\_AD3 auf S. 178) führt trotz längerer Lebensdauer im Vergleich zu anderen thermischen Sanierungsvarianten mit EPS- oder Mineralwollendämmung zu keiner wesentlichen



Absenkung der Ökobilanz-Kennwerte. Dies ist auf die höheren Energieaufwendungen und Umweltwirkungen während der Herstellung zurückzuführen. Negativ ist auch der relativ hohe Deponieanteil, obwohl das gesamte Abfallaufkommen im Vergleich zu den beiden anderen Varianten deutlich niedriger ist.

Aufbauten mit EPS- oder Mineralwollendämmung schneiden aufgrund der guten Trennbarkeit hinsichtlich des anfallenden Deponieaufkommens im Vergleich zur Schaumglasvariante besser ab. Für die Modellberechnung wurden nur aufgeständerte PV- und Flachkollektorinstallationen aufgrund der nachträglichen Installation auf bestehende Dachflächen bilanziert, weshalb kein bauepochen-spezifischer Ökobilanz-Vergleich notwendig war.

### **3.4.5 Ökobilanzvergleich - Wandaufbauten mit PV- & Solarthermie**

Die bilanzierte PV-Warmfassade wird als Pfosten-Riegel-System ausgeführt und benötigt einen größeren Materialinput als eine PV-Kaltfassade (siehe Anhang A; Bsp. Außenwand AW06\_AD\_PV auf S. 162). Grund ist, dass statt dem Pfosten-Riegel-System eine punktweise Fixierung der PV-Paneele mit Edelstahlelementen vorgenommen wird. Der Vorteil der PV-Warmfassade ist jedoch ihre Eignung zur thermischen Sanierung von Skelettbauwerken (Nichtwohngebäude).

Die anfallenden Baurestmassen von Aufbauten mit integrierter PV- oder Solarthermie-Anlage weisen aufgrund der leichten Lösbarkeit und Trennbarkeit der zusammengefügtten Bauprodukte eine gute Kreislauffähigkeit und folglich einen geringeren Deponie-Anteil als Wärmedämmverbundsysteme (EPS, Mineralwolle) auf.

Die Lebensdauer der Unterkonstruktion zur Befestigung von PV- und Solarthermie-Anlagen kann mit der von einer hinterlüfteten Fassade gleichgesetzt werden, da es keinen wesentlichen Unterschied hinsichtlich des Aufbaus und der prinzipiellen Funktionsweise gibt. Folglich kann laut den zugrunde gelegten Lebensdauerkatalogen auch mit einer vergleichsweise längeren Lebensdauer der Unterkonstruktion gerechnet werden.

## 4 Energieverbrauch für Raumheizung – österreichischer Gebäudebestand

In diesem Kapitel wird zuerst die Vorgangsweise zur Modellierung des österreichischen Gebäudebestands stufenweise erläutert, die aufgrund der vorhandenen statistischen Datenlage möglich war. Anschließend wird der anhand ausgewählter Referenz-Gebäude ermittelte Nutzwärmeverbrauch bezogen auf den unsanierten und sanierten österreichischen Gebäudebestand, einschließlich aller erforderlichen Modellannahmen erklärt.

### 4.1 Modellierung des österreichischen Gebäudebestands

Die verfügbaren Statistik Austria-Daten [97] beinhalten keine Informationen über die Gebäudehüllflächen des österreichischen Gebäudebestands. Deshalb musste ein Modell aufbauend auf den bekannten bauepochenspezifischen Nutzflächen entwickelt werden, um den erforderlichen Sanierungsaufwand abschätzen zu können. Es wurde eine Literaturrecherche hinsichtlich einer Übersicht über die Struktur des österreichischen Gebäudebestands gemacht. Bis auf die IWU-Datenbank [20], basierend auf der IKARUS-Studie [37], wurden keine weiteren Quellen gefunden, die diesen Anforderungen entsprachen. Die IWU-Datenbank enthält alle wichtigen Informationen über den deutschen Gebäudebestand, die für die angestrebte Modellberechnung notwendig sind. Die Studie des Bremer Energie-Instituts [61] basierend auf der Ikarus-Studie [37] und die IWU-Datenbank [20] wurden für die Auswahl der Referenz-Gebäude für den österreichischen Wohngebäudebestands herangezogen.

Die Auswahl der Referenz-Gebäude wurde anhand der Statistik-Austria-Daten [97] über Wohnnutzflächen bzw. Gebäudeanzahl je Bauepoche, Gebäudetyp und Bundesland iterativ ermittelt (siehe Abbildung 15). Von der IWU-Datenbank [20] mussten grundsätzlich Wohngebäude mit den größten Nutzflächen ausgeschieden werden, um eine gute Übereinstimmung zwischen der berechneten Gebäudeanzahl und den aus der statistischen erhobenen Gebäudeanzahl [97] zu erreichen. Die angegebenen Referenz-Gebäude wurden mit Ausnahme der großvolumigen Wohngebäude für die Modellierung des österreichischen Gebäudebestands verwendet und als Eingangsparameter für die Berechnung des Energiebedarfs für Raumheizung bezogen auf den unsanierten und sanierten Gebäudebestand zugrunde gelegt.

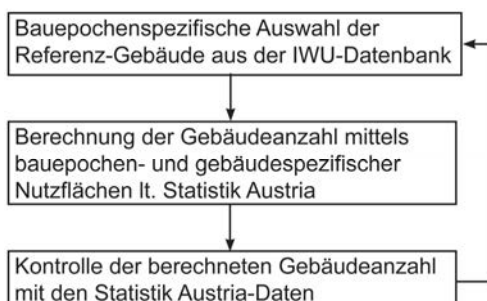


Abbildung 15 Auswahl der Referenzgebäude - Regelkreislauf

Für die Modellierung des Nichtwohngebäudebestands wurde die Ikarus-Studie [37] über den Bestand und Typologie beheizter Nichtwohngebäude in Westdeutschland [42] zur Definition der A/V, Bruttovolumen je Gebäudetyp und Bauepoche herangezogen. Die Modellierung des

Nichtwohngebäude-Bestands ist aufgrund der derzeitigen schlechten Datenlage nicht in dem Ausmaß möglich gewesen wie für Wohngebäude. Deswegen musste eine grobe Annäherung über die bekannten Nutzflächen und die Gebäudeanzahl vorgenommen werden, um dadurch ein passendes Referenz-Gebäude für die weitere Modellberechnung festlegen zu können. Die Abschätzung wurde mit den vorhandenen Statistik-Daten [97], [99] durchgeführt, um Plausibilitätsprüfungen mit anderen TOP-down-Studien zu ermöglichen. Nach Auskunft der Statistik Austria werden ab Juli 2013 die Registerdaten zusammengeführt, womit erstmalig detaillierte Informationen über den Nichtwohngebäudebestand verfügbar wären und eine präzisere Modellierung ermöglicht wird [100].

Weiters musste eine Allokation für Flach- und Steildächer sowie Gebäude mit und ohne Dachgeschoßausbau vorgenommen werden. Laut den Statistik-Austria-Daten [97] existieren 156.744 Dachgeschoßwohnungen. Für eine Abschätzung hinsichtlich der Gebäudeanzahl mit Dachgeschoßausbauten wurde vereinfachend angenommen, dass sich jeweils eine Wohnung im ausgebauten Dachgeschoß befindet, wodurch sich die Gebäudeanzahl mit Dachgeschoßausbau im Vergleich zur tatsächlichen, aber nicht bekannten Anzahl erhöht, da ein Dachgeschoßausbau in Mehrfamilienhäusern (MFH) vielfach mehr als eine Wohnung ergibt. Bei einem Wohngebäudebestand von ca. 1,8 Mio. Gebäuden entspricht dies einen Anteil von ungefähr 9 %. Der Flachdachanteil beträgt laut der Studie „Regenerative Energie in Österreich“ [59] ungefähr 155 km<sup>2</sup>. Dieser Anteil wurde auf diejenigen Dachflächen, die nach 1970 errichtet wurden, anteilmäßig umgelegt und bei der Modellberechnung hinsichtlich des thermischen Sanierungsaufwands und der erforderlichen PV-Unterkonstruktion berücksichtigt (siehe Abbildung 16).



Abbildung 16 Allokationsschlüssel – Flach- und Steildach mit und ohne Dachgeschoßausbau [93]

## 4.2 Berechnung – Heizwärmebedarf und Nutzwärmeverbrauch

Für die Berechnung des Heizwärmebedarfs (HWB) bzw. Nutzwärmeverbrauchs (NWW) wurde im Rahmen der Know-How-Plus-Studie [93] ein Modell entwickelt, das gebäude-, klima- und regionalspezifische Einflüsse berücksichtigt. Für die Dissertation wurde mit diesem Modell zusätzlich eine thermische Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten bilanziert, um einen Ökobilanz-Vergleich mit einer Sanierungsvariante mit Passivhaus-Komponenten durchführen zu können. Im Folgenden werden die Modellstruktur und die Ergebnisse bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand erläutert.

### 4.2.1 Modellstruktur für Berechnung - HWB und Nutzwärmeverbrauch

Eine Übersicht über die stufenweise Berechnung des Heizwärmebedarfs je Gebäude und des Nutzwärmeverbrauchs des thermisch sanierten österreichischen Gebäudebestands ist in Abbildung 17 dargestellt.

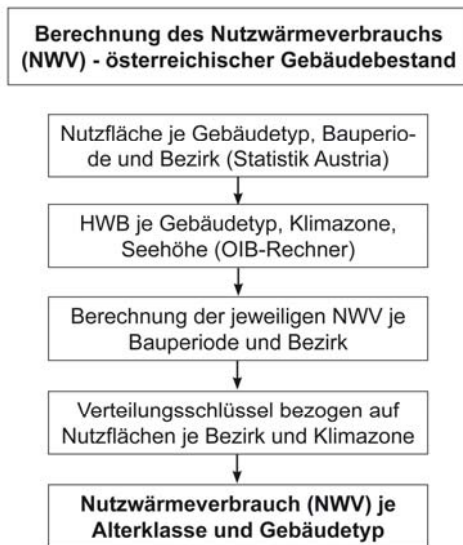


Abbildung 17 Ablauf – Heizwärmebedarf und Nutzwärmeverbrauch [93], verändert

Zur Abschätzung des Einsparpotentials hinsichtlich des Energieverbrauchs für Raumheizung wurden für die festgelegten Referenz-Gebäude der Heizwärmebedarf für den unsanierten (Basis: OIB-Default-U-Werte [78]) und sanierten Zustand mit dem Excel-Schulungs-Tool [87] ermittelt.

Das erforderliche Excel-Berechnungsmodell wurde im Rahmen einer Projektarbeit an der TU Graz [49] entwickelt, das eine rasche Berechnung von einer Vielzahl an Referenz-Gebäuden ermöglicht. Es wurde auch ein Abgleich mit anderen Software-Lösungen hinsichtlich der Treffsicherheit der berechneten HWB-Kennzahlen von einigen ausgewählten Gebäuden durchgeführt. Es können Abweichungen bis zu 30 % möglich sein, die unter anderem auf die wesentlich detaillierte Erfassung von geometrischen und stofflichen Wärmebrücken zurückzuführen sind. Diese genauere Berechnung konnte aber für die Potentialanalyse aufgrund des höheren Bearbeitungsaufwands nicht angewandt werden.

Auf die Gefahr einer Überschätzung der Einsparpotentiale hinsichtlich des Nutzwärmeverbrauchs wurde auch in der Veröffentlichung von [74] hingewiesen. Besonders bei Bestandsgebäuden mit hohem Wärmeverlust kann die Normberechnung (HWB) von der Realität (Nutzwärmeverbrauch - NWW) durch deutlich höhere Kennwerte abweichen. In [74] zeigt sich, dass die berechneten HWB-Kennzahlen mit dem im Betrieb gemessenen Nutzwärmeverbrauch gut übereinstimmen.

Deswegen wurde bei der Modellberechnung nur ein Abgleich des berechneten Nutzwärmeverbrauchs des unsanierten österreichischen Gebäudebestands für unsanierte Referenz-Gebäude des Gebäudebestands mit den Statistik Austria-Daten [98] (Nutzenergieeinsatz von 254 PJ/a für die Raumwärme und Trinkwarmwasser) aus dem Jahr 2006 durchgeführt, wodurch eine Überschätzung des Einsparpotentials vermieden wird (siehe Abbildung 18). Eine Allokation hinsichtlich der Raumwärme wurde laut Eckerle [21] durchgeführt, wodurch ca. 216 PJ/a der Raumwärme (85 % von 254 PJ/a) zugewiesen werden können.



Abbildung 18 Nutzwärmeverbrauch für Raumheizung – österreichischer Gebäudebestand

Der berechnete Nutzwärmeverbrauch nach einer thermischen Sanierung des Gebäudebestands brauchen aufgrund der Erkenntnisse der Studie „Szenarien der Gebäudesanierung in Österreich bis zum Jahr 2050“ [74] bzw. durch Kenntnis der definierten Ziel-U-Werte nicht weiter modifiziert werden.

Für Gründerzeitgebäude musste eine thermische Sanierung der denkmalgeschützten Vorderseite mittels Innendämmung und die Hoffassade mittels Außendämmung bilanziert werden. Diese Randbedingung wurde auch bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs (HWB) der betroffenen Referenz-Gebäude berücksichtigt, wobei ein Allokationsschlüssel von 1/3 Innendämmung und 2/3 Außendämmung festgelegt wurde. Dadurch soll der größere Anteil von denkmalgeschützten Fassadenflächen bei Eckhäusern und Gebäuden mit zweiseitig denkmalgeschützten Fassadenflächen erfasst werden. Für Aufbauten mit PV-Paneelen und Flachkollektoren wurde für die HWB-Berechnung vereinfachend der stationäre U-Wert herangezogen.

#### 4.2.2 Gebäudespezifische Einflussfaktoren

Für den auf die definierte Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)“ sanierten Wohngebäudebestand wurden dezentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (50%-iger Wirkungsgrad) und für den Nichtwohngebäudebestand eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (75%-iger Wirkungsgrad) zugrunde gelegt, da im verwendeten Excel-Schulungs-Tool [87] nur diese Varianten zur Auswahl standen. Für die definierte Variante „Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)“ wurde eine Lüftung über Fenster und nicht mit mechanischen Lüftungsanlagen bilanziert. Eine Sanierung der Fensterflächen erfolgt für beide Varianten (PH und NEH) durch einen Einbau von Fenstern mit einem U-Wert-Gesamt von 0,8 W/m<sup>2</sup>K, wobei Holz-, Holz/Alu-, Alu- oder PE-Fensterrahmen mit 3-fach Verglasung zur Auswahl standen. Dadurch konnte der Einfluss der bauepochenspezifischen Randbedingungen (Einschränkungen wegen Denkmalschutz, schlechteres A/V von Einfamilienhäusern etc.) auf den erreichbaren Heizwärmebedarf berücksichtigt werden.

#### 4.2.3 Topographische Einflussfaktoren

Im Excel-Schulungs-Tool können mittels sieben verschiedenen Klimazonen und durch die Eingabe der Seehöhe die topographischen Einflüsse auf den Heizwärmebedarf (HWB) berücksichtigt werden. Die Berechnung des Heizwärmebedarfs der unsanierten und thermisch sanierten Referenz-Gebäude erfolgte deshalb in Abhängigkeit von der Klimazone und der dazugehörigen mittleren Seehöhe (siehe Abbildung 19). Die klimazonenspezifischen Seehöhen wurden mit den Statistik-Austria-Daten [99] ermittelt, indem die Seehöhe je politischen Bezirk mit der jeweiligen Wohnnutzfläche multipliziert und auf die gesamte Wohnnutzfläche je Klimazone bezogen wurde.

$$\text{Mittlere Seehöhe}_{\text{Klimazone}} = \frac{\sum \text{Seehöhe je pol. Bezirk} \times \text{Wohnnutzfläche}}{\text{Gesamte Wohnnutzfläche je Klimazone}}$$

Klimazone	Mittlere Seehöhe je Klimazone						
	W	NF	ZA	SB	N	N/SO	S/SO
NAT [°C]	-11,7	-13,4	-13,8	-13,3	-13,1	-12,7	-11,9
Seehöhe [m]	453	472	653	504	240	255	342

NAT...Normaußentemperatur

Abbildung 19 Berechnungsergebnisse - mittlere Seehöhe je Klimazone [93]

#### 4.2.4 Einflussfaktor – Heizträgermix

Der bedeutende Einfluss des Heizträgermix auf die Kennwerte der Ökobilanz wurde bei der Modellberechnung mit Hilfe der Statistik-Austria-Daten [97] berücksichtigt. In der Abbildung 20 sind die wesentlichen Eingabe- und Ausgabeparameter dargestellt.

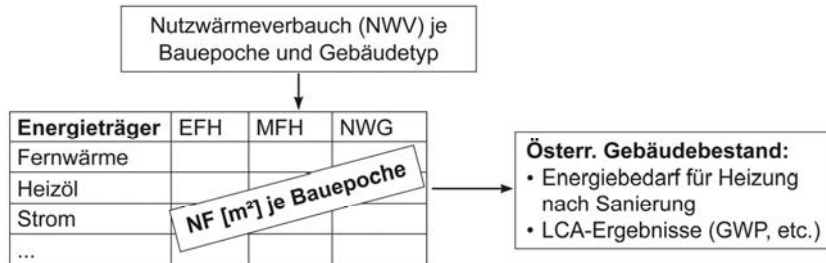


Abbildung 20 LCA-Kennwerte – Energieverbrauch für Raumheizung [93]

Die Nutzflächen des Wohngebäudebestands lt. Statistik-Austria [97] wurden mit den berechneten bauepochen- und gebäudespezifischen Nutzwärmeverbrauchs-Werten verknüpft und die Ökobilanz-Kennwerte (GWP, CED und Abfallaufkommen) ermittelt. Der mittels Ecoinvent-Datensätzen berechnete kumulierte Energieaufwand (CED) beinhaltet die gesamte Energiebereitstellungskette, einschließlich von Umwandlungs- und Leitungsverlusten. Er entspricht folglich dem Energieverbrauch für Raumheizung (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21 Energieverbrauch für Raumheizung – österreichischer Gebäudebestand

Für den Nichtwohngebäudebestand (NWG) lagen keine detaillierten Informationen vor, weshalb vereinfachend die Energieträgerverteilung des Wohngebäudebestands zugrunde gelegt wurde. In der Veröffentlichung „Ressourcenbezogene Kennwerte von Nichtwohngebäuden“ [43] wird auf einen vergleichsweise höheren Anteil von Gasheizungsanlagen bezogen auf den deutschen Nichtwohngebäudebestand hingewiesen. Falls diese Randbedingung auch auf den österreichischen Nichtwohngebäudebestand zutrifft, dann wurde das Einsparpotential durch den zugrunde gelegten Heizträgermix mit vergleichsweise höheren Umweltwirkungen unterschätzt.

Künftig könnte lt. Statistik Austria [100] eine präzisere Modellbildung durch die Zusammenführung von Registerdaten (Grundbuch, Finanzdatenbank etc.) durchgeführt werden. Grundsätzlich wurden für die Ökobilanzierung die Ecoinvent-Datenbank [23] verwendet. Die Ökobilanz-Daten für ein Fernwärme-Netz mussten jedoch von der Gemis-Datenbank [75] entnommen werden.

### 4.3 Ergebnisse - Nutzwärmeverbrauch

In diesem Kapitel werden zuerst die mittels Gewichtung von Heizwärmebedarf-Kennzahlen berechneten Nutzwärmeverbrauchs-Kennzahlen für die jeweiligen Referenz-Gebäude, untergliedert nach Bauepochen und definiertem Gebäude-Energiestandard dargestellt. Anschließend wird der

Nutzwärmeverbrauch des unsanierten österreichischen Gebäudebestands den beiden untersuchten Sanierungsvarianten mit Passivhaus- und Niedrigenergiehaus-Komponenten gegenübergestellt.

### 4.3.1 Gewichtete Nutzwärmeverbrauchs-Kennzahlen

In Tabelle 4-1 sind die ermittelten Nutzwärmeverbrauchs-Kennzahlen der ausgewählten Referenz-Gebäude für den Wohngebäudebestand und in der Tabelle 4-2 für den Nichtwohngebäudebestand dargestellt. Die Verteilungsschlüssel der Referenz-Gebäude je Gebäudtyp und Bauepoche wurde vom Modell des österreichischen Gebäudebestands übernommen und für die Berechnung des Nutzwärmeverbrauchs zugrunde gelegt. Beispielsweise beinhaltet der Gebäudtyp „EFH“ der Bauepoche „1961-1980“ einen Mix aus Einfamilienhäusern und Reihenhäusern mit maximal 2 Wohnungen. In der Spalte „NWV - unsaniert“ der Tabelle 4-1 wird der Nutzwärmeverbrauch der unsanierten Referenz-Gebäude dargestellt. Der für die Variante PH berechnete Nutzwärmeverbrauch ist in der Spalte „NWV – PH“ und der Nutzwärmeverbrauch für die Variante NEH in der Spalte „NWV – NEH“ dargestellt.

Des Weiteren wurde eine thermische Sanierung der Gebäudehülle nur für die folgenden Statistik-Austria-Kategorien des Nichtwohngebäudebestands bilanziert: Büro, Verwaltung und Großhandel, Hotels und Gebäude für Freizeit, Kultur und Bildung. Grund ist, dass für den Nichtwohngebäudebestand keine Unterteilung in beheizte und unbeheizte Nutzflächen gemacht wurde. Deswegen wurde für die Kategorien „Sonstige Gebäude“ und „Werkstätten, Industrie- und Lagerhallen“ unbeheizte Nutzflächen angenommen. Der durchgeführte Abgleich des ermittelten Nutzwärmeverbrauch für den unsanierten Gebäudebestand mit den Statistik Austria-Daten [98] bestätigt diese Annahme.

Tabelle 4-1 Übersicht über Nutzwärmeverbrauchs-Kennzahlen – Wohngebäude

Nutzwärmeverbrauch (NWV) von Wohngebäuden je Bauepoche & Gebäudtyp				
Gebäudtyp	Bauepoche	NWV - unsaniert	NWV - PH	NWV- NEH
EFH	vor 1919	216	29	40
MFH-K		121	18	28
MFH-G/GEM		87	13	24
Whg in NWG		161	20	30
EFH	1919 -1945	183	20	30
MFH-K		188	20	31
MFH-G/GEM		133	17	28
Whg in NWG		162	20	31
EFH	1946 - 1960	333	31	41
MFH-K		154	20	31
MFH-G/GEM		118	15	25
Whg in NWG		140	20	31
EFH	1961 - 1980	113	22	33
MFH-K		100	21	32
MFH-G/GEM		72	14	25
Whg in NWG		99	20	31
EFH	1981-1990	101	24	35
MFH-K		65	18	29
MFH-G/GEM		64	18	29
Whg in NWG		74	20	31
EFH	ab 1991	86	28	40
MFH-K		53	18	29
MFH-G/GEM		52	18	29
Whg in NWG		56	20	31

Tabelle 4-2 Übersicht über Nutzwärmeverbrauchs-Kennzahlen – Nichtwohngebäude (NWG)

Nutzwärmeverbrauch (NWW) von NWG je Bauepoche			
Bauepoche	NWW - unsaniert	NWW - PH	NWW - NEH
A vor 1919	161	15	31
B 1945 - 1960	140	15	31
C 1961 - 1980	99	15	31
D 1981 - 1990	74	15	31
E ab 1991	56	15	31

### 4.3.2 Nutzwärmeverbrauch - Einsparpotential

Nachfolgend wird ein Vergleich der berechneten Nutzwärmeverbrauch-Kennzahlen dem statistisch erhobenen Nutzwärmeverbrauch des österreichischen Gebäudebestands gegenübergestellt. Um einen direkten Vergleich mit der Studie "Regenerative Energie in Österreich" [59] zu ermöglichen, wurde der laut Statistik Austria [98] im Jahr 2006 benötigte Nutzenergieeinsatz von 254 PJ/a für die Raumwärme und Trinkwarmwasser herangezogen. Laut Eckerle [21] können ca. 216 PJ/a der Raumwärme (85 %) zugewiesen werden. Nach der thermischen Sanierung des gesamten Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten (PH) ist noch ein Nutzwärmeverbrauch von 35 PJ/a aufzuwenden. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 80 % im Vergleich zum Nutzwärmeverbrauch vom Jahr 2006 (siehe Abbildung 22). Von den 35 PJ/a können laut der Studie "Regenerative Energie in Österreich" [59] maximal 22 PJ/a solarthermisch erzeugt und in den Gebäudebestand integriert werden. Folglich sind noch 13 PJ/a mit dem österreichischen Heizträgermix abzudecken. Bei einer thermischen Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) wird ein Nutzwärmeverbrauch von 58 PJ/a nachgefragt, wodurch eine Absenkung um ca. 73 % erreicht wird. Eine Veränderung des Heizträgermix hinsichtlich einer Erhöhung des erneuerbaren Anteils (Biomasse etc.) wurde nicht berücksichtigt, da der Schwerpunkt in dieser Studie auf das erreichbare Einsparpotential durch thermische Sanierung und solare Energieerzeugung gelegt wurde.

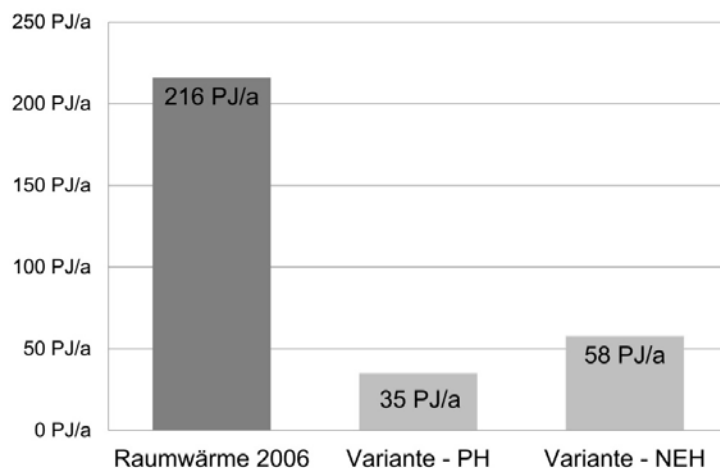


Abbildung 22 Gegenüberstellung – Nutzwärmeverbrauch vor und nach der Sanierung (Variante 3)



## 5 Solarurbanes und technisches Flächenpotential

In diesem Kapitel wird zuerst das entwickelte Modell zur Berechnung der solar nutzbaren Flächen, einschließlich der getroffenen Annahmen und Festlegungen beschrieben. Abschließend werden die Ergebnisse hinsichtlich der solar nutzbaren Flächenpotentiale und des PV-Stromerzeugungspotentials für die Variante 1 – Wohngebäudebestand und Variante 2 & 3 – Gesamter Gebäudebestand erläutert.

### 5.1 Modell zur Berechnung der solar nutzbaren Flächenpotentiale

Es wurde eine Literaturrecherche hinsichtlich publizierter Ansätze zur Abschätzung des Flächenpotentials durchgeführt. Am häufigsten wurde ein top-down-Ansatz gewählt, in dem das Flächenpotential grob mit einer Kennzahl bezogen auf die solar nutzbare Fläche pro m<sup>2</sup> Nutzfläche ermittelt wurde. Die ECOFYS-Studie [22] hingegen ermöglicht eine wesentlich differenzierte Berechnung der solar nutzbaren Flächen. Für die Know-How-Plus-Studie [93] und für die Dissertation konnte aufgrund der vorliegenden Informationen ein bottom-up-Ansatz gewählt werden. Das solarurbane bzw. technische Flächenpotential wurde mit dem entwickelten Gebäudemodell (Nutzflächen je Gebäudetyp und Bauepoche) basierend auf den Statistik-Austria-Daten [97], [99] und den bauepochen- und gebäudespezifischen Kennzahlen der ECOFYS-Studie [22] ermittelt (siehe Abbildung 23). Die Plausibilität der Ergebnisse wurde mit den top-down-Studien (Regenerative Energien in Österreich [59], IEA-Studie [51] und Defaix [19]) überprüft.

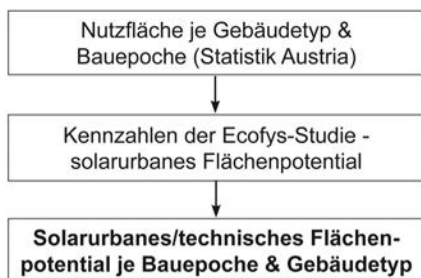


Abbildung 23 Modellberechnung – solarurbanes und technisches Flächenpotential [93]

Für den Wohngebäudebestand konnte aufgrund der vorhandenen statistischen Datenlage eine Abschätzung der solar nutzbaren Flächen je Bauepoche, Gebäudetyp und politischen Bezirk durchgeführt werden. Anschließend wurden die solar nutzbaren Dachflächen (ab Bauepoche 1970) entsprechend dem Allokationsschlüssel lt. der Studie „Regenerative Energien in Österreich zwischen Flachdach (24,5 %) und Steildach (75,5 %) aufgeteilt.

Das Flächenpotential für den Nichtwohngebäudebestand (NWG) konnte aufgrund der fehlenden Statistik-Daten nur hinsichtlich der unterschiedlichen Nutzungsarten (Büro, Handel, Industrie etc.) nicht aber für die jeweilige Bauepoche bestimmt werden. Für die grobe Abschätzung der “NWG-Flächen ohne Wohnnutzflächen” in Österreich wurden die Statistik-Austria Daten von der Probezählung 2006 [99] herangezogen, da diese zumindestens die Nutzflächen für Büro-, Verwaltungs- und Handelsgebäude in Österreich pauschal ausweisen. Die NWG-Flächen der restlichen NWG-Kategorien (Landwirtschaft, Infrastruktur etc.) wurden näherungsweise über die publizierte Gebäudeanzahl je Nutzungsart laut Statistik Austria [99] abgeschätzt.

## 5.2 Berechnungsannahmen – Solarthermie- und PV-Potential

### 5.2.1 Bautechnische Einflussfaktoren

Für die Allokation der solar nutzbaren Flächen hinsichtlich der Installation von Flachkollektoren und PV-Paneelen wurden die Einflussfaktoren, beginnend von der Bauteil-Ebene über die Gebäude-Ebene bis zur Ebene „Österreichischer Gebäudebestand“ erhoben und bei der Modellberechnung berücksichtigt. Auf Bauteil-Ebene und Gebäude-Ebene wurden die bauepochen- und gebäudespezifischen Randbedingungen berücksichtigt, welche im Leitfaden dokumentiert wurden (z.B. Voraussetzung für die Installation der Flachkollektoren).

Die Nutzung von Dachflächen für die Installation von Flachkollektoren können möglicherweise durch eine zu geringe Tragfähigkeit (Sparrenhöhe bis max. 16 cm) begrenzt werden. Diese Randbedingung konnte aber aufgrund der fehlenden Statistik-Daten nicht genauer modelliert werden, Eine Installation der vergleichsweise leichteren PV-Paneele sollte jedoch möglich sein, da das Flächengewicht der bilanzierten PV-Paneelen zwischen 8 bis 15 kg/m<sup>2</sup> und von Flachkollektoren über 30 kg/m<sup>2</sup> liegt.

### 5.2.2 Gebäude- und bauepochenspezifische Einflussfaktoren

Die gebäude- und bauepochenspezifischen Randbedingungen wurden mit Hilfe der Ecofys-Kennzahlen [22] berücksichtigt, wobei eine Unterteilung zwischen einem technischen und einem solarurbanen Flächenpotential für die Modellberechnung durchgeführt wurde. In der Ecofys-Studie [22] ist der Unterschied zwischen dem technischen und solarurbanen Flächenpotential wie folgt definiert:

Das **technische Flächenpotential** wird in der Ecofys-Studie [22] für 20 Stadtraumtypen (Wohngebäude, Industrie-, Gewerbebauten) unter Berücksichtigung von:

- Eigenverschattung,
- Ausrichtung und
- Nachbarbebauung

ermittelt.

Zusätzlich wurde in der Ecofys-Studie [22] ein **solarurbanes Flächenpotential** definiert, das im Wesentlichen dem technischen Flächenpotential unter Berücksichtigung folgender städtebaulicher Flächenvorbehalte entspricht:

- Grünanlagen oder
- Geschützte Gebäude und Strukturen (Denkmalschutz, Schutzzonen) oder
- Ausschlussflächen (aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen).

Für das solarurbane Flächenpotential wurden folgende Kriterien lt. der Ecofys-Studie [22] zugrunde gelegt:

- Alle nach Süden  $\pm$  45 Grad ausgerichteten Fassaden- und Dachflächen, welche am 21. Dezember (12:00) unverschattet bleiben sind potentiell nutzbar.
- Bei der Festlegung der Kennzahlen wurden die solar nutzbaren Flächen nach städtebaulichen Kriterien und auf ihre Eingriffsempfindlichkeit überprüft und berücksichtigt. Generell sind Fassaden für aktive Solarenergiesysteme aufgrund der vergleichsweise geringeren Einstrahlung weniger gut geeignet.
- Vorausgesetzt wird auch ein ausreichend großer Fensterflächenanteil, der eine passive Solarenergienutzung gewährleistet.

- Die mittels gebäude- und bauepochenspezifischen Kennzahlen ermittelten Flächen sind sowohl für die Installation von Flachkollektoren und PV-Paneelen geeignet.

Abschließend ist anzumerken, dass durch die Verwendung der Ecofys-Kennzahlen eine ausgewogene Nutzung der solar nutzbaren Gebäudehüllflächen zugrunde gelegt wird. Beispielsweise wird für ein Einfamilienhaus (Bauepoche 1980) mit einer Nutzfläche von 100 m<sup>2</sup> ein solarurbanes Flächenpotential für Dach- und Fassadenflächen von insgesamt 9 m<sup>2</sup> und bezogen auf das technische Flächenpotential von insgesamt 35 m<sup>2</sup> (Dach 27 m<sup>2</sup> und Fassade 8 m<sup>2</sup>) bilanziert. Im Anhang B sind die verwendeten Ecofys-Kennzahlen [22] zur Übersicht dargestellt.

### 5.2.3 Maximale integrierbare solar erzeugte Wärmemenge

Für die Festlegung der Bilanzgrenze bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand war die Aussage in der Studie "Regenerative Energien in Österreich" [59] hinsichtlich der maximal in den Gebäudebestand integrierbaren Solarthermie-Energie von 45 PJ/a von Bedeutung. Von den 45 PJ/a entfallen 33 PJ/a auf die Kategorie „Trinkwarmwasser und Raumwärme“ und 12 PJ/a auf die Kategorie „Prozesswärme“. Fehlende Gebäudezentralheizung (ca. 50% des Gebäudebestands) sowie die bautechnischen Grenzen hinsichtlich einer nachträglichen Integration von Niedertemperaturheizsystemen sind laut [59] die wesentlichen Begrenzungsfaktoren. Diese Kennzahlen aus der Studie [59] wurden als Randbedingung für die Berechnung der erforderlichen Flachkollektorflächen zugrunde gelegt. Die nach Abzug der Flachkollektorflächen übrig gebliebenen solar nutzbaren Flächen wurden für die Ermittlung des PV-Stromerzeugungspotentials herangezogen.

In Tabelle 5-1 sind die integrierbaren solar erzeugten Wärmemengen für die Variante 1 – Wohngebäudebestand und Variante 2 & 3 – Gesamter Gebäudebestand dargestellt.

Tabelle 5-1 Übersicht über die integrierbaren solar erzeugten Wärmemengen [93]

	Integrierbare solare Wärmemenge [PJ/a]			
	Gesamt	Raumwärme	Trinkwarmwasser	Prozesswärme
Variante 1	19,5	13	6,5	-
Variante 2&3	45	22	11	12

Eine Allokation der solar erzeugbaren Wärmemengen (Raumwärme, Trinkwarmwasser ohne Prozesswärme) wurde für die Variante 1 – Wohngebäudebestand im Verhältnis der beheizbaren Nutzflächen von Wohngebäuden zu Nichtwohngebäuden vorgenommen (Verteilungsschlüssel: 59% Wohnen und 41 % NWG). Die Variante 2 bildet den gesamten österreichischen Gebäudebestand ab, wobei ein Transport der solar erzeugten Wärmemengen zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden angenommen wird. Diese Annahme wirkt sich auf die prozentuale Verteilung der solar nutzbaren Flächen für PV und Solarthermie aus. Um diesen Einfluss aufzeigen zu können, wurde zusätzlich die Variante 3 bilanziert. Bei dieser wird angenommen, dass die benötigte Wärmemenge vom Nachfrager selbst erzeugt wird.

### 5.2.4 Übersicht über Kennzahlen von Solarthermie- und PV-Anlagen

Folgende Vorgangsweise wurde für die Modellberechnung gewählt:

- Die solar nutzbaren Dachflächen werden aufgrund der höheren solaren Einstrahlungsintensität für PV-Paneele reserviert. Die erforderlichen Flachkollektorflächen für die Erzeugung der 45 PJ/a wurden vorrangig mit den solar nutzbaren Fassadenflächen abgedeckt.

- Die Nennleistungen der bilanzierten PV-Anlagen wurden von der Ecoinvent-Datenbank [23] übernommen (siehe Abbildung 24). Der in Ecoinvent [23] bilanzierte spezifische jährliche Ertrag basiert auf Monitoringdaten, wodurch Abweichungen von der optimalen Ausrichtung und idealen Betriebsbedingungen sowie der zeitabhängige Abfall des Wirkungsgrades der PV-Paneele in der Nutzungsphase berücksichtigt werden.

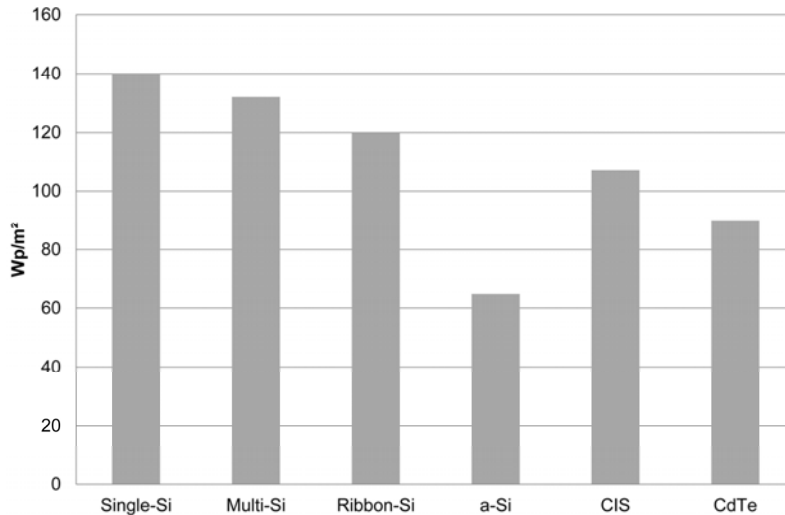


Abbildung 24 Vergleich – Nennleistungen der PV-Anlagen [93]

Die Kennzahlen der betrachteten Solarthermie-Anlagen (EFH und MFH) wurden von der Studie "Regenerative Energie in Österreich" [59] übernommen. Die Lebensdauer der Flachkollektoren wurde entsprechend der Ecoinvent-Datenbank [23] mit 25 Jahren bilanziert. Aufgrund unterschiedlicher Kollektorenergieeinträge wurden Bandbreiten in Form von maximalen, durchschnittlichen und minimalen Kennwerten für den Wohngebäudebestand (Variante 1) und für den gesamten österreichischen Gebäudebestand (Variante 2 & 3) ermittelt. Für die solarthermische Erzeugung der zugrunde gelegten 45 PJ/a wurde aufgrund der unterschiedlich solar nutzbaren Flächenpotentiale (solarurban vs. technisch) ein dementsprechend modifizierter Allokationsschlüssel verwendet. Kleinanlagen mit 4 m<sup>2</sup> Flachkollektorflächen wurden nicht berücksichtigt, da in den zugrunde gelegten 45 PJ/a auch Anteile der nachgefragten Raumwärme inkludiert sind. Für Einfamilienhäuser (EFH) standen 3 Varianten von Solarthermie-Anlagen mit je 25 m<sup>2</sup> Kollektorfläche zur Warmwasserbereitstellung und Heizungsunterstützung zur Auswahl. Für Einfamilienhäuser mit einer solar nutzbaren Fläche von weniger als 25 m<sup>2</sup> wurde vereinfachend eine Nutzung mittels PV bilanziert. Für die Statistik-Austria Kategorie „Mehrfamilienhäuser (MFH) - klein“ wurde eine Solarthermie-Anlage mit einer Flachkollektorfläche von 30 m<sup>2</sup> und für die Kategorie „Mehrfamilienhäuser – groß“ eine 60 m<sup>2</sup> große Flachkollektorfläche zugrunde gelegt.

Die in Tabelle 5-2 dargestellten spezifischen jahresmittleren Kollektorenergieeinträge beinhalten auch Speicherverlusten sowie den Stromverbrauch der Pumpe.

Tabelle 5-2 Bandbreite – Kollektorenergieeinträge lt. [93], in Anlehnung an [59]

	EFH			MFH/NWG		
	MIN	MW	MAX	MIN	MW	MAX
Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]	25	25	25	30	45	60
spez. Kollektortrag-Dach [MJ/m <sup>2</sup> a]	742	857	976	1.512	1.512	1.512
spez. Kollektortrag-Fassade [MJ/m <sup>2</sup> a]	560	647	737	1.141	1.141	1.141
<b>nutzbare solare Wärme - Dach [MJ/m<sup>2</sup>a]</b>	<b>481</b>	<b>607</b>	<b>735</b>	<b>1.272</b>	<b>1.302</b>	<b>1.332</b>
<b>nutzbare solare Wärme - Fassade [MJ/m<sup>2</sup>a]</b>	<b>363</b>	<b>458</b>	<b>555</b>	<b>960</b>	<b>983</b>	<b>1.005</b>

## 5.3 Solar nutzbares Flächenpotential

In diesem Kapitel werden zuerst die berechneten solar nutzbaren Flächen erläutert und eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt. Anschließend werden das solarurbane und das technische Flächenpotential für die jeweilige Variante dargestellt. Des Weiteren werden die Ergebnisse hinsichtlich der Flachkollektor- und PV-Flächen je Variante erläutert, wobei zusätzlich eine Untergliederung nach Dach- und Fassadenflächen sowie zwischen solarurbanen und technischen Flächenpotential vorgenommen wurde. Die folgenden Ergebnisse wurden zur Nachvollziehbarkeit der darauf aufbauenden Potentialanalyse für die vier definierten Gebäude-Energiestandards von der Know-How-Plus-Studie [93] übernommen.

### 5.3.1 Ergebnis – solar nutzbares Flächenpotential

In der Tabelle 5-3 sind die berechneten Flächen für die jeweilige Variante bezogen auf das solarurbane und technische Flächenpotential dargestellt. Die relativ niedrigen Flächenkennzahlen der Variante 1 sind auf die gewählte Systemgrenze zurückzuführen, die nur den Wohngebäudebestand berücksichtigt. Die Systemgrenze der Variante 2 und 3 beinhaltet hingegen den gesamten österreichischen Gebäudebestand. Auf dieser Ebene ist noch kein Unterschied zwischen der Variante 2 und 3 erkennbar, der auf die unterschiedliche Bilanzierung der solar erzeugten Wärmemengen zwischen Erzeuger und Verbraucher zurückzuführen ist. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass der Unterschied zwischen solarurbanem und technischem Flächenpotential der Variante 1 - Wohngebäudebestand deutlich größer ist, als für die Variante 2 & 3 – Gesamter Gebäudebestand. Dies ist im Wesentlichen auf die Restriktionen hinsichtlich städtebaulicher Gesichtspunkte (Denkmalschutz etc.) zurückzuführen.

Des Weiteren ist die Abnahme der nutzflächenbezogenen Ecofys-Kennzahlen [22] zur Berechnung der solar nutzbaren Dachflächen für Bauepochen ab 1960 auf die Zunahme des Flachdachanteils zurückzuführen, die im Vergleich zu Steildächern einen geringeren Anteil an solar nutzbaren Flächen je m<sup>2</sup> Nutzfläche aufweisen.

*Tabelle 5-3 Übersicht – Flächenpotential je Variante [93]*

	Gesamt solar nutzbare Flächen			
	solarurbanes Flächenpotential		technisches Flächenpotential	
	Dach [km <sup>2</sup> ]	Fassade [km <sup>2</sup> ]	Dach [km <sup>2</sup> ]	Fassade [km <sup>2</sup> ]
Variante 1	34	10	50	42
Variante 2	145	55	129	88
Variante 3	145	55	129	88

Die berechneten solar nutzbaren Flächenpotentiale wurden mit anderen top-down-Studien [19], [51] und der Studie "Regenerative Energie in Österreich" [59] auf Plausibilität überprüft. Die Tabelle 5-4 zeigt, dass die mittels bottom-up-Ansatz ermittelten Flächen in der Bandbreite der publizierten Flächenpotentiale liegen.

Tabelle 5-4 Übersicht über solar nutzbare Dach- und Fassadenflächen [93]

Solar nutzbare Dach- und Fassadenflächen		
Eigene Recherchen:	Dachflächen [km <sup>2</sup> ]	Fassadenflächen [km <sup>2</sup> ]
Solarurbanes Flächenpotential - Know How Plus	145	55
Technisches Flächenpotential - Know How Plus	129	88
Technisches Flächenpotential - (Kaltschmitt & Streicher 2009)	114	52
The potential for solar electricity production - (Defaix P.R. 2009)	68	47
Potential for Building Integrated Photovoltaics - (IEA 2002)	140	50

### 5.3.2 Ergebnisse - technisches Flächenpotential

Die Ergebnisse für das **technische Flächenpotential** werden als Bandbreiten (Kategorie „MIN“, „MW“ und „MAX“) angegeben, die auf die unterschiedlichen Wirkungsgrade der bilanzierten Solarthermie-Anlagen zurückzuführen sind. Für alle drei Varianten gilt, dass die Fassadenflächen zur solarthermischen Erzeugung der festgelegten Wärmemengen (19,5 bzw. 45 PJ/a) ausreichen (siehe Tabelle 5-5). Es verbleiben sogar noch Fassadenflächen, die für die PV-Stromerzeugung genutzt werden können. Nach der Ermittlung der erforderlichen Flachkollektorflächen wurden die restlichen solar nutzbaren Dach- und Fassadenflächen des österreichischen Gebäudebestands bezogen auf das solarurbane und technische Flächenpotential berechnet.

Tabelle 5-5 Übersicht über technische Flächen für PV & Solarthermie [93]

	technisches Flächenpotential			
	PV		Solarthermie	
	Dach [km <sup>2</sup> ]	Fassade [km <sup>2</sup> ]	Dach [km <sup>2</sup> ]	Fassade [km <sup>2</sup> ]
Variante 1 - MIN	50	10	0	32
Variante 1 - MW	50	12	0	30
Variante 1 - MAX	50	14	0	28
Variante 2 - MIN	129	32	0	56
Variante 2 - MW	129	34	0	54
Variante 2 - MAX	129	37	0	51
Variante 3 - MIN	129	29	0	59
Variante 3 - MW	129	32	0	56
Variante 3 - MAX	129	35	0	53

### 5.3.3 Ergebnisse - solarurbanes Flächenpotential

Das **solarurbane Flächenpotential** bezogen auf Fassaden ist im Vergleich zum technischen Flächenpotential um 23 km<sup>2</sup> niedriger, weshalb für die solarthermische Erzeugung der zugrunde gelegten Wärmemengen (19,5 für Variante 1 bzw. 45 PJ/a für Variante 2 & 3) auch Dachflächen herangezogen werden müssen (siehe Tabelle 5-6). Die Ausnahme stellt nur die Variante 2 aufgrund des angenommenen Transports der solar erzeugten Wärmemengen zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden dar.

Tabelle 5-6 Übersicht über solarurbanes Flächenpotential für PV & Solarthermie [93]

	solarurbanes Flächenpotential			
	PV		Solarthermie	
	Dach [km <sup>2</sup> ]	Fassade [km <sup>2</sup> ]	Dach [km <sup>2</sup> ]	Fassade [km <sup>2</sup> ]
Variante 1 - MIN	21	0	13	10
Variante 1 - MW	23	0	11	10
Variante 1 - MAX	24	0	10	10
Variante 2 - MIN	145	7	0	48
Variante 2 - MW	145	8	0	47
Variante 2 - MAX	145	10	0	45
Variante 3 - MIN	132	19	13	36
Variante 3 - MW	134	19	11	36
Variante 3 - MAX	135	20	10	35

## 5.4 PV-Stromerzeugungspotential

In diesem Kapitel wird das PV-Stromerzeugungspotential bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand basierend auf der Know-How-Plus-Studie [93] aufgezeigt, um eine Übersicht über die zur Potentialanalyse zugrunde gelegten Modellparameter zu erhalten. Das PV-Stromerzeugungspotential wurde für drei Varianten mit den in Kapitel 5.3 dargestellten Kennzahlen hinsichtlich der solar nutzbaren Flächen und den in der Ecoinvent-Datenbank [23] verfügbaren PV-Anlagentypen berechnet.

### 5.4.1 Solarurbanes Flächenpotential - Variante 1 - Wohngebäudebestand

Für die Variante 1 – Wohngebäudebestand wird ein getrennte Darstellung der Ergebnisse für das technische und dem solarurbane Flächenpotential vorgenommen, um den Einfluss unterschiedlicher spezifischer jahresmittlerer Kollektorenergieeinträge einschließlich Speicherverluste aufzeigen zu können. Die ermittelten Bandbreiten für die Variante 1 bezogen auf das solarurbane Flächenpotential sind in der Abbildung 25 dargestellt. Der Einfluss der unterschiedlichen Wirkungsgrade der sechs PV-Anlagentypen auf das Stromerzeugungspotential ist deutlich erkennbar. Das Maximum der PV-Stromerzeugung von 2,8 TWh/a wird mit Single-Si-Paneelen erlangt, während das Minimum von 1,1 TWh/a durch den Einsatz von a-Si-Paneelen erreicht wird.

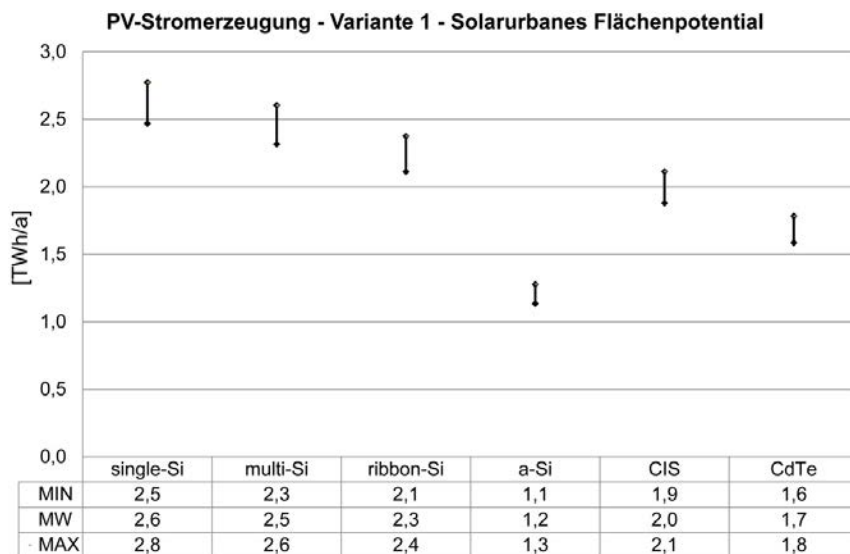


Abbildung 25 PV-Stromerzeugungspotential – solarurbanes Flächenpotential - Variante 1 – Wohngebäudebestand [93]

### 5.4.2 Technisches Flächenpotential - Variante 1 - Wohngebäudebestand

Das PV-Stromerzeugungspotential der Variante 1 – technisches Flächenpotential ist im Vergleich zur Variante 1 - solarurbanes Flächenpotential um den Faktor 2 bis 3 höher (siehe Abbildung 26). Dies ist hauptsächlich auf den wesentlich größeren Anteil an solar nutzbaren Fassaden- (um 32 km<sup>2</sup> höher) und Dachflächen (um 16 km<sup>2</sup> höher) der Variante 1 - technisches Flächenpotential zurückzuführen. Außerdem müssen für die Variante 1 – solarurbanes Flächenpotential auch Flachkollektoren auf Dachflächen installiert werden.

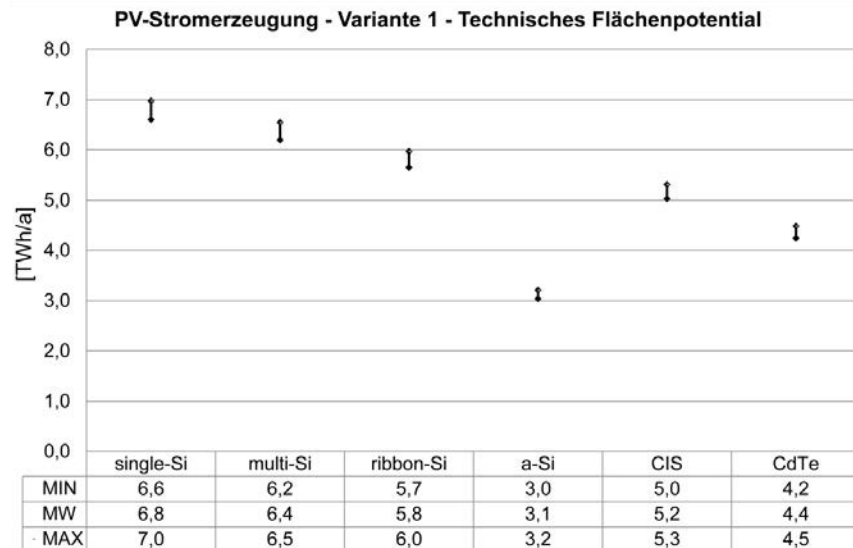


Abbildung 26 PV-Stromerzeugungspotential – technisches Flächenpotential - Variante 1 – Wohngebäudebestand [93]

### 5.4.3 PV-Stromerzeugungspotential - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

Die Systemgrenze der Variante 2 beinhaltet den gesamten österreichischen Gebäudebestand, einschließlich eines Transports der solarthermisch erzeugten Wärmemenge zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden. Da der Einfluss städtebaulicher Restriktionen nicht so dominant ist, wurde auf eine getrennte Darstellung der Bandbreiten für das solarurbane und technische Flächenpotential verzichtet (siehe Abbildung 27). Im Vergleich zur Variante 1 - Wohngebäudebestand ist der Einfluss von unterschiedlichen spezifischen jahresmittleren Kollektorenergieeinträgen, einschließlich der Berücksichtigung von Speicherverlusten vergleichsweise gering. Das Maximum von 17,9 TWh/a wird mit dem Einsatz von Single-Si-Paneelen und das Minimum von 8,0 TWh/a mittels a-Si-Paneelen erreicht.



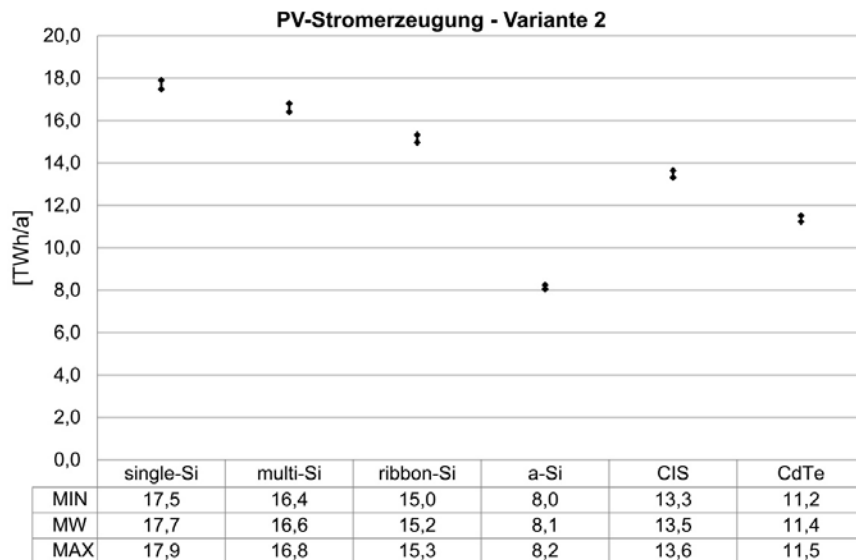


Abbildung 27 PV-Stromerzeugungspotential - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand [93]

#### 5.4.4 PV-Stromerzeugungspotential - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

Im Vergleich zu Variante 2 ist die Bandbreite aufgrund des unterschiedlichen spezifischen jahresmittleren Kollektorenergieeintrags, einschließlich von Speicherverlusten größer (siehe Abbildung 28). Grund ist, dass kein Wärmetransport zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden bilanziert wurde, weshalb neben Fassadenflächen auch Dachflächen zur solarthermischen Warmwassererzeugung herangezogen wurden. Das Maximum liegt bei 17,7 TWh/a (Single-SI-Paneele) und das Minimum bei 8,0 TWh/a (a-SI-Paneele).

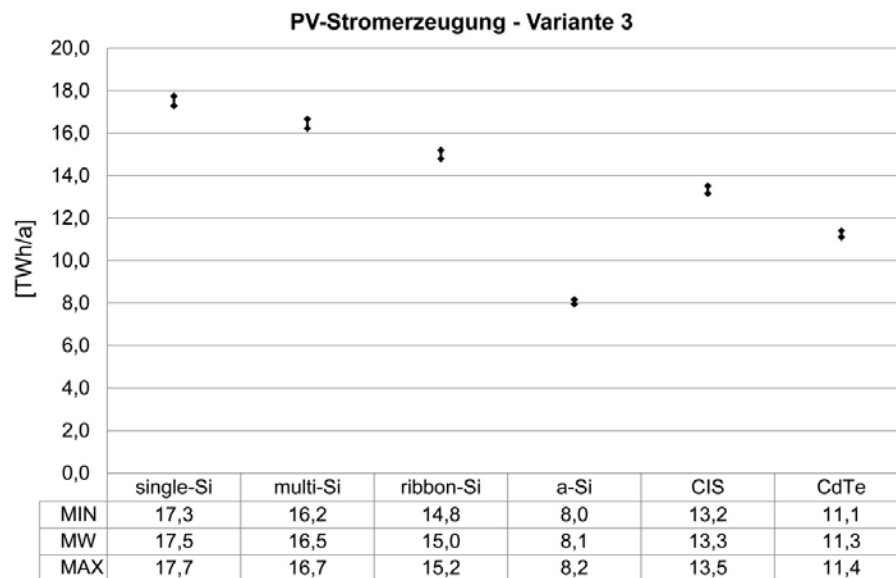


Abbildung 28 PV-Stromerzeugungspotential für Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand [93]

## 6 Einsparpotential- und Dominanzanalyse

In diesem Kapitel wird zuerst die gewählte Vorgangsweise für die Modellberechnung bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand, einschließlich der Definition der vier bilanzierten Gebäude-Energiestandards erläutert. Des Weiteren werden die notwendigen Festlegungen für die Ökobilanzierung erklärt. Anschließend wird die gewählte Form der Ergebnisdarstellung erläutert, um den Unterschied zwischen den Best und Worst Case-Szenarien unmissverständlich aufzeigen zu können. Danach werden die Ergebnisse hinsichtlich des erreichbaren Einsparpotentials für vier unterschiedliche Gebäude-Energiestandards dargestellt. Abschließend werden die Ergebnisse der Dominanzanalysen hinsichtlich der maßgebenden Einflussfaktoren ausgewertet.

### 6.1 Gewählte Vorgangsweise - Modellberechnung

Es wurden alle erforderlichen Stoff- und Energieflüsse für eine thermische Sanierung und energetische Modernisierung des österreichischen Gebäudebestands auf unterschiedliche Energiestandards, einschließlich der erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen für eine geplante Nutzungsdauer von 50 Jahren bilanziert. Die bauepochenspezifischen LCA-Ergebnisse der Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen auf Bauteil-Ebene wurden mit den dazugehörigen Flächen der thermischen Gebäudehülle verknüpft und die Ökobilanz-Kennwerte bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand berechnet. Das Ergebnis wurde in der Kategorie „LCA“ zusammengefasst und bei den weiterführenden Potentialanalysen bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand berücksichtigt. Zur Identifizierung der Ökoeffizienz der thermischen Sanierungs- und energetischen Modernisierungsmöglichkeiten wurde eine Unterteilung in vier verschiedene Gebäude-Energiestandards durchgeführt.

Es wurden Potentialanalysen mittels Ökobilanzen für die folgenden vier Gebäude-Energiestandards vorgenommen:

- Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)
- Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (NEH+)
- Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)
- Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+)

*Tabelle 6-1 Definition – Gebäude-Energiestandards*

Kurzbezeichnung -Energiestandard	Thermische Sanierung	Lüftung	Solarthermie	Photovoltaik (PV)
NEH	✓			
NEH+	✓		✓	✓
PH	✓	✓		
PH+	✓	✓	✓	✓

## 6.2 Festlegungen für die Ökobilanzierung

### 6.2.1 Ökobilanzierung mittels Ecoinvent

Eine Anpassung der Ecoinvent-Datensätze [23] (Schweiz!) an österreichische Randbedingungen (solare Einstrahlung auf Dach- und Fassadeflächen) wurde durchgeführt. Die Berücksichtigung der geringeren solaren Einstrahlung in Österreich im Vergleich zur Schweiz hat zur Folge, dass die Ökobilanz-Kennwerte pro erzeugter kWh höher sind. Der jährliche Output bezogen auf Dachflächen mit 906 kWh/kWp wurde auf 833 korrigiert. Der jährliche Output bezogen auf Fassadenflächen mit 598 kWh/kWp wurde auf 550 kWh/kWp korrigiert. Entsprechend der Ecoinvent-Vorgangsweise wurde der Wirkungsgrad der PV-Anlage mit einem Abminderungsfaktor von 0,92 lt. Ecoinvent Report 12 [23] bilanziert. Dieser mittels Monitoring-Daten bestimmte Abminderungsfaktor beinhaltet negative Einflüsse, wie beispielsweise Alterungseffekte oder eine weniger optimale Orientierung der PV-Paneele.

Der erforderliche Installationsaufwand von Solarthermie- oder PV-Anlagen auf Dach- und Fassadenflächen ist in den Ecoinvent-Datensätzen [23] berücksichtigt. Ebenfalls inkludiert sind der Reinigungsaufwand und die benötigte Betriebsenergie.

Die Ecoinvent-Datensätze [23] beinhalten die zur Installation von PV-Paneelen und Flachkollektoren erforderlichen Unterkonstruktionen, untergliedert nach Flachdach- und Steildachvarianten. Eine Zuordnung der Ecoinvent-Datensätze [23] zu den solar nutzbaren Flächen wurde bei der Berechnung des Einsparpotentials dementsprechend berücksichtigt.

Für Dachflächen musste jedoch aufgrund der Ecoinvent-Datenschutzrichtlinie [23] eine andere Vorgangsweise gewählt werden. Die Lebenszyklusbewertungen für Steildach- und Flachdach-Aufbauten mit PV oder Solarthermie mussten global berechnet werden, da sonst die Ökobilanz-Kennzahlen der Ecoinvent-Datensätze [23] für die jeweiligen PV- und Solarthermie-Anlagen direkt ersichtlich sind.

Eine Anpassung der Ecoinvent-Datensätze [23] an den geänderten Stromerzeugungsmix wurde aufgrund des Bearbeitungsaufwands nicht durchgeführt. Dabei wäre auch ein Zuwachs der PV-Stromerzeugung von jenen Staaten zu berücksichtigen, die in den jeweiligen bilanzierten Strommix der Ecoinvent-Datenbank [23] erfasst werden. Der positive Einfluss durch Ausbau von erneuerbaren Energieträgern auf die Ökobilanz-Kennwerte von energieintensiven Bauprodukten konnte deswegen auch nicht abgebildet werden.

### 6.2.2 Einsparpotential - Bilanzierung mittels Gutschriften

Für die Berechnung des Einsparpotentials mussten Gutschriften für den eingesparten Energieverbrauch für Raumheizung und der solar erzeugten Energien (PV und Solarthermie) vergeben werden. Folglich wird die Höhe der Gutschrift von den zugrunde gelegten Ökobilanz-Datensätzen dominiert. Deswegen werden nachfolgend alle wesentlichen Annahmen und Festlegungen zur Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse beschrieben.

#### 6.2.2.1 Einfluss des Heizträgermix auf das Einsparpotential

Die Erträge der solar erzeugten Energien für Trinkwarmwasser und Raumwärme sowie der eingesparte Energieverbrauch für Raumheizung infolge einer thermischen Sanierung wurden mit dem zugrunde gelegten Heizträgermix lt. Statistik Austria [97] gutgeschrieben. Da in der Ecoinvent-Datenbank [23] kein Datensatz für einen Fernwärme-Produzenten zur Verfügung stand, musste dieser ausnahmsweise mit der Gemis-Datenbank [75] bilanziert werden. Der Wechsel auf andere

erneuerbare Energieträger (Biomasse, Wind, etc.) wurde für diese Modellberechnung nicht berücksichtigt, da der Mehrwert von thermischen Gebäudesanierungen, einschließlich einer energetischen Modernisierung (PV und Solarthermie) unmissverständlich aufgezeigt werden soll. Außerdem wurden diese Aspekte bereits in der Studie "Regenerative Energie in Österreich" [59] ausführlich behandelt und das Potential für Österreich aufgezeigt.

### 6.2.2.2 Einfluss des Strommix auf das Einsparpotential

Für die Berechnung des Einsparpotentials müssen für den erzeugten PV-Strom Gutschriften vergeben werden. Da die Auswahl des substituierten Energieerzeugers auf die Höhe der Gutschrift wesentlich ist, wird einleitend ein Vergleich der für die Gutschrift herangezogenen Stromerzeuger dargestellt. Für die **Ökobilanzierung des PV-erzeugten Stroms in Form einer Stromgutschrift wird die Substitution eines Stromerzeugers mit nicht erneuerbaren Energieträgern vorausgesetzt**. D.h., es wurde nicht der österreichische Strommix für die Berechnung des Einsparpotentials zugrundegelegt, da dieser auch erneuerbare Energieträger (z.B. Wasserkraft) mit einem Anteil von ca. 60 % beinhaltet. Dadurch wird verhindert, dass eine Substitution von bereits in Betrieb befindlichen erneuerbaren Energieerzeugungs-Systemen durch den PV-erzeugten Strom bilanziert wird. Dadurch erklärt sich auch, dass das berechnete Einsparpotential möglicherweise größer sein kann, wie der statistisch erhobene kumulierte Energieaufwand bzw. CO<sub>2</sub>-Ausstoß, der sich auf den österreichischen Strom-Mix für das jeweilige Bilanzierungsjahr bezieht..

Der nicht zu vernachlässigende Einfluss von unterschiedlichen Stromerzeugungssystemen wird durch die Gegenüberstellung in Abbildung 29 für den Indikator „Treibhauspotential – GWP“ und in Abbildung 30 für den „kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.)“ ersichtlich. Für die Berechnung der PV-Stromgutschrift bezogen auf das Treibhauspotential (GWP) wird für den Worst Case der UCTE (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity)-Mix (100 %) und für den Best Case ein Braunkohlekraftwerk (176 %) herangezogen.

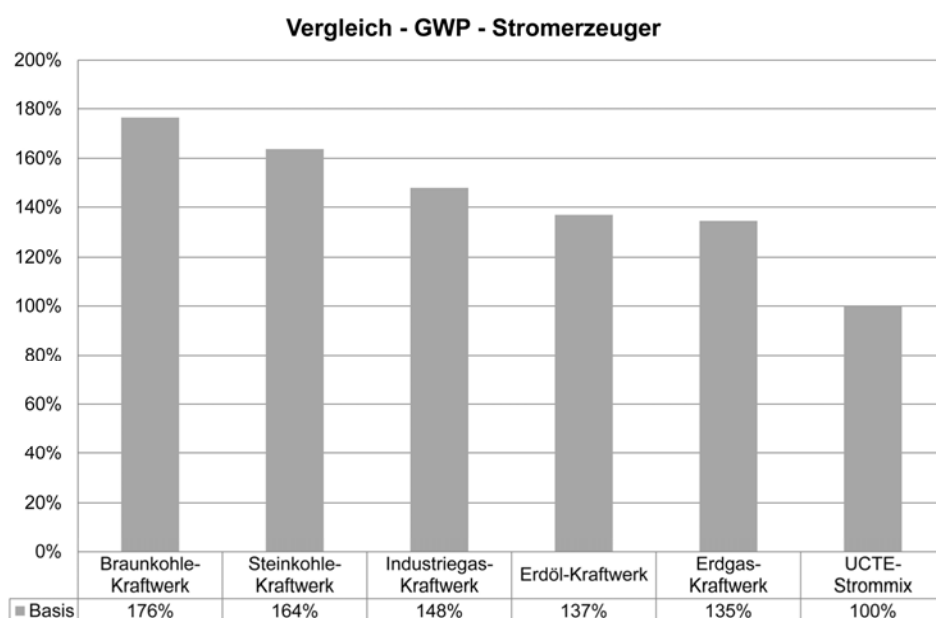


Abbildung 29 Vergleich Stromerzeuger – GWP [93]

Bei Betrachtung des kumulierten Energieaufwands – nicht erneuerbar (CED n.r.) schneidet das Braunkohle-Kraftwerk (100 %; Worst Case) am günstigsten und ein Industrie-Gaskraftwerk (188 %, Best Case) am schlechtesten ab. Anschließend wurden damit die Bandbreite der PV-Gutschrift bezogen auf den kumulierten Energieaufwand (CED n.r.) ermittelt.

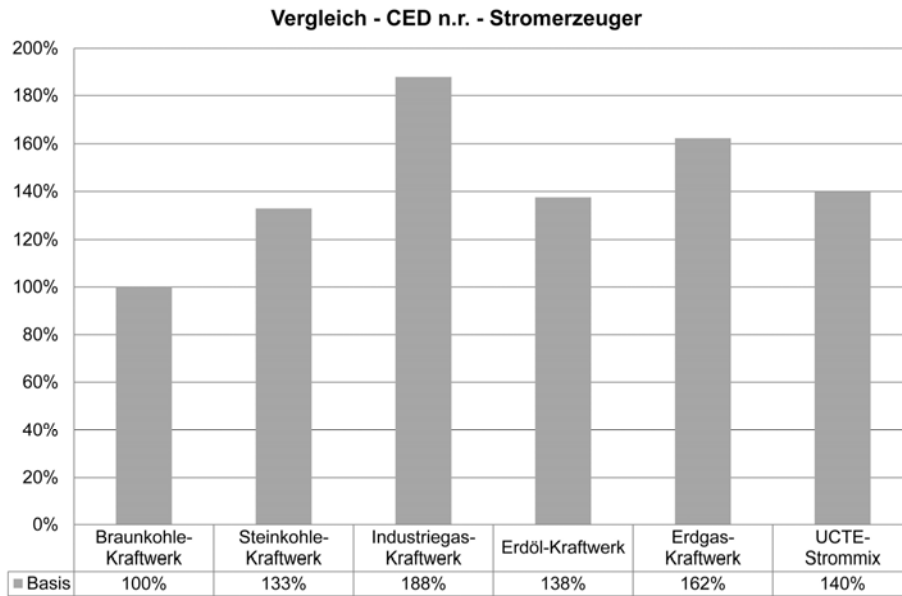


Abbildung 30 Vergleich Stromerzeuger – CED n.r. [93]

Auf eine Gegenüberstellung der jeweiligen Energieerzeuger hinsichtlich der Indikatoren „kumulierter Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) und „Abfallaufkommen“ wurde aufgrund des unbedeutenden Einflusses auf die Höhe der Gutschrift verzichtet.

### 6.2.3 Festlegungen – Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG)

Für den Wohngebäudebestand wurden nur dezentrale Lüftungsanlagen mit 50%-iger Wärmerückgewinnung bilanziert, da die nachträgliche Installation von Steigleitung im Wohngebäudebestand in der Praxis nur schwer realisierbar ist. Für den Nichtwohngebäude-Bestand wird jedoch eine nachträgliche Installation aufgrund der Gebäudegeometrie (Raumhöhe >2,5m) vorausgesetzt und als zentrale Lüftungsanlagen mit 75%-iger Wärmerückgewinnung bilanziert, wobei lt. Ecoinvent [23] ein ganzjähriger Betrieb aus Komfortgründen angenommen wird. Mit Hilfe der Ecoinvent-Datenbank [23] konnte eine Variante mit Stahl- und eine mit PE-Verrohrungen bilanziert werden. Die Ecoinvent-Datensätze [23] beinhalten bereits sämtliche Aufwendungen für Produktion, Errichtung, Instandhaltung, Betrieb und Entsorgung der zentralen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.

### 6.2.4 Festlegungen – Thermische Sanierung von Fenstern

Die Fensterflächen wurden wie die thermisch zu sanierenden Flächen der thermischen Gebäudehülle mit den zugrunde gelegten Referenz-Gebäuden abgeschätzt. Für die Modellberechnung wurde ein Austausch mit dreifach-verglasten Fenstern mit einem U-Wert von 0,8 W/m<sup>2</sup>K angenommen. Es wurden alle vier in der Ecoinvent-Datenbank [23] zur Auswahl stehenden Fenster-Rahmentypen (Alu, Holz, Holz-Alu und Kunststoff) bilanziert. Für Holz und Kunststoffrahmen wird in der Ecoinvent-Datenbank [23] eine thermische Verwertung angenommen und für Alu-Rahmen ein 100%-iges Recycling.

## 6.3 Darstellung der Ökobilanz-Ergebnisse

Zur Vergleichbarkeit mit statistischen Kennzahlen wurden die Ergebnisse der Lebenszyklusbewertung auf ein Jahr normiert. Die stofflichen und energetischen Aufwendungen der thermischen Sanierung und energetischen Modernisierung auf den jeweiligen Gebäude-Energiestandard werden unter dem

Begriff „LCA“ zusammengefasst und mit den Erträgen durch solarthermische Warmwassererzeugung (Kategorie „ST“), PV-Stromerzeugung (Kategorie „PV“) und durch den eingesparten Energieverbrauch für Raumheizung infolge thermischer Sanierung (Kategorie „HWB“) gegenübergestellt.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt aufgrund der vielen Einflussfaktoren in Form von Bandbreiten, welche durch den jeweiligen szenarioabhängigen Best und Worst Case begrenzt werden. Folgende **Einflussfaktoren** wurden dabei berücksichtigt:

- Die unterschiedliche Effizienz der zur Auswahl stehenden PV-Anlagen wurde mittels der in Ecoinvent [23] angegebenen Kennzahlen berücksichtigt.
- Die Effizienz von Solarthermie-Anlagen und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung wurden auf den jeweiligen Gebäudetyp (EFH, MFH, NWG) abgestimmt.
- Zur Berechnung des Einsparpotentials wurden Gutschriften für den erzeugten PV-Strom in Abhängigkeit vom jeweiligen substituierten nicht erneuerbaren Energieträger (Erdöl, Erdgas,...) vergeben.
- Das Einsparpotential durch die solarthermisch erzeugten Wärmemengen wurde mit dem Energieträgermix zur Raumwärmebereitstellung lt. Statistik Austria [97] gutgeschrieben.
- Die Vielzahl von Einflüssen (Lebensdauer; Wirkungsgrad etc.) beginnend von der Bauteil-Ebene über Gebäude-Ebene bis zur Ebene „Österreichischer Gebäudebestand“ wurden erfasst, weshalb die Darstellung der Ergebnisse in Form von Bandbreiten erfolgt.
- Aufgrund der besseren Datenlage wurde eine getrennte Auswertung für den Wohngebäudebestand (Variante 1) vorgenommen.

### **Für den Best Case wurden folgende Punkte festgelegt:**

- Der Best Case stellt mit Ausnahme des Indikators „Abfallaufkommen“ stets die obere Grenze der Bandbreite dar. Das Maximum der PV-Stromerzeugung wird mit dem Einsatz von Single-SI-Paneelen bezogen auf das Maximum an solar nutzbaren Flächen (technisches Flächenpotential) erlangt.
- Für die Bilanzierung des erforderlichen Sanierungsaufwands wurden die Aufbauten mit den geringsten Umweltwirkungen zugrunde gelegt. Eine Ausnahme stellt dabei die Single-SI-Paneele dar, die lt. Ecoinvent [23] die höchsten produktionsbedingten Umweltwirkungen verursacht, aber im Gegenzug den höchsten Wirkungsgrad aufweist.
- Für die thermische Sanierung von Fensterflächen wurden dreifach verglaste Holzfenster zugrunde gelegt, da diese lt. Ecoinvent [23] die geringsten Umweltwirkungen aufweisen.
- Für Wohngebäude wurden dezentrale Lüftungen mit einer Wärmerückgewinnung (WRG) von 50 % und für Nichtwohngebäude eine PE-verrohrte Lüftungsanlage mit einer Wärmerückgewinnung von 75 % bilanziert.
- Für die Berechnung des Einsparpotentials mittels PV-Stromerzeugung wurde eine Substitution eines Stromerzeugungssystems mit nicht erneuerbaren Energieträgern und den höchsten Umweltwirkungen je Leistungseinheit angenommen.

### **Für den Worst Case wurden folgende Punkte festgelegt:**

- Der Worst Case stellt bis auf den Indikator „Abfallaufkommen“ stets die untere Grenze der Bandbreite dar. Das Minimum der PV-Stromerzeugung wird mit dem Einsatz von aSI-Paneelen (geringster Wirkungsgrad) bezogen auf das Minimum an solar nutzbaren Flächen (solarnutzbare Flächenpotential) erlangt.
- Für die Bilanzierung des erforderlichen Sanierungsaufwands wurden die Aufbauten mit den höchsten Umweltwirkungen zugrunde gelegt.

- Die thermische Sanierung von Fensterflächen erfolgt mit dreifach verglasten Alufenstern, da diese lt. Ecoinvent [23] die höchsten Umweltwirkungen aufweisen.
- Der Wirkungsgrad der Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung bleibt im Vergleich zum Best Case unverändert. Der Unterschied ist der Einsatz von Rohrleitungen aus Stahl statt aus PE.
- Für die Berechnung der PV-Gutschrift wird eine Substitution eines Stromerzeugungssystems mit nicht erneuerbaren Energieträgern und den niedrigsten Umweltwirkungen je Leistungseinheit durch einen mittels PV-erzeugten Strom angenommen.

In der Tabelle 6-2 sind die generellen Festlegungen für eine Szenario-Analyse vereinfacht dargestellt.

Tabelle 6-2 Szenario – Rahmenbedingungen [93]

	Szenario/Rahmenbedingungen	
	Best-Case (BEC)	Worst-Case (WOC)
Therm. Sanierung Gebäudehülle	Minimale Umweltauswirkungen	Maximale Umweltauswirkungen
Energieerzeugung mittels PV	Maximaler Wirkungsgrad	Minimaler Wirkungsgrad
Energieerzeugung mittels Solarthermie	Wirkungsgrad derzeitiger Stand der Technik	
Heizträgermix	Bestehender Heizträgermix zur Abdeckung des Bedarfs nach Sanierung	

## 6.4 Einsparpotentialanalyse

Die Auswertung der Varianten wurde als Differenz zwischen den erforderlichen energetischen und stofflichen Aufwendungen zur thermischen Sanierung und energetischen Modernisierung auf einen der vier definierten Gebäude-Energiestandards und den potentiellen Erträgen durch solare Energiegewinne und Einsparungen aufgrund einer Absenkung des Energieverbrauchs für Raumheizung ermittelt (siehe Abbildung 31).

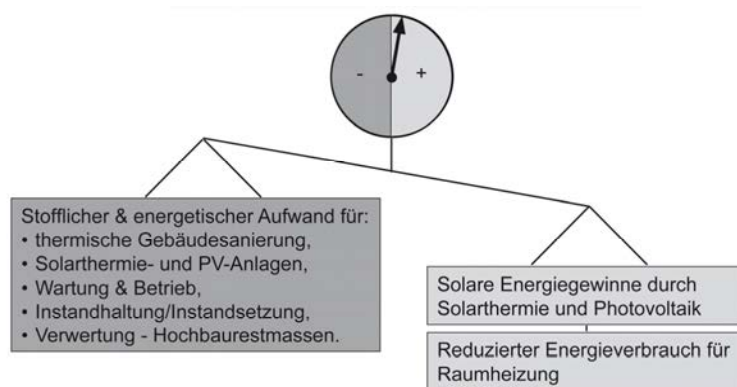


Abbildung 31 Bilanzierung des Einsparpotentials

### 6.4.1 Einsparpotential – Variante 1 - Wohngebäudebestand

In diesem Kapitel wird das Einsparpotential für die vier unterschiedlichen Gebäude-Energiestandards in Form von Bandbreiten für den jeweiligen Indikator dargestellt. Die obere Grenze stellt den Worst Case und die untere Grenze den Best Case dar. Eine genauere Analyse hinsichtlich der dominanten Einflussfaktoren erfolgt in den Kapitel 6.5 bis 6.8.

### 6.4.1.1 Treibhausgasbilanz – GWP - Variante 1

Die größte Einsparung an Treibhausgasen wird im Best Case der Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+)“ mit 14,7 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und die geringste Einsparung im Worst Case der Variante „Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)“ mit 5,2 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr erreicht (siehe Abbildung 32). Der Unterschied zwischen einer Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) und mit Passivhaus-Komponenten (PH) bezogen auf das Treibhauspotential (GWP) beträgt ungefähr 0,5 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Der Unterschied ergibt sich durch den positiven Effekt der eingebauten Lüftungen mit Wärmerückgewinnung (Wohngebäude mit 50 % und NWG mit 75 % bilanziert). Die große Bandbreite des Einsparpotentials eines mit PV- und Solarthermie-Anlagen modernisierten Gebäudebestands ist aufgrund unterschiedlicher PV-Wirkungsgrade sowie vom jeweiligen zugrunde gelegten Strommix für die PV-Stromgutschriften erklärt. Jedenfalls kann durch Solarthermie und PV-Stromerzeugung das Einsparpotential im Vergleich zur Variante NEH von 5,2 Mio.°t auf 14,7 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr gesteigert werden. Wesentlich geringere Effekte werden beim Einsatz von PV-Anlagen mit dem geringsten Wirkungsgrad (aSI-Paneele) und der Vergabe einer Strom-Gutschrift mit UCTE-Strommix erreicht. Der UCTE-Strommix weist im Vergleich zu anderen nicht erneuerbaren Stromerzeugern die niedrigsten Umweltwirkungen je kWh auf, da auch erneuerbare Energieträger (z.B. Wasserkraft) anteilmäßig berücksichtigt werden. Bemerkenswert ist, dass der Best Case der Variante NEH fast mit dem Worst Case der Variante NEH+, einschließlich der Installation von aSI-PV-Anlagen und Solarthermie-Anlagen übereinstimmt. D.h., die solaren Energiegewinne werden durch die Auswahl von wenig ökoefizienten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen fast vollständig aufgebraucht. Dies unterstreicht die Relevanz einer ökoefizienten Bauproduktauswahl mittels aussagekräftigen Umweltproduktdeklarationen (EPD) sowie die Berücksichtigung von kreislaufwirtschaftlichen Aspekten (Lösbarkeit etc.) in der Planungsphase.

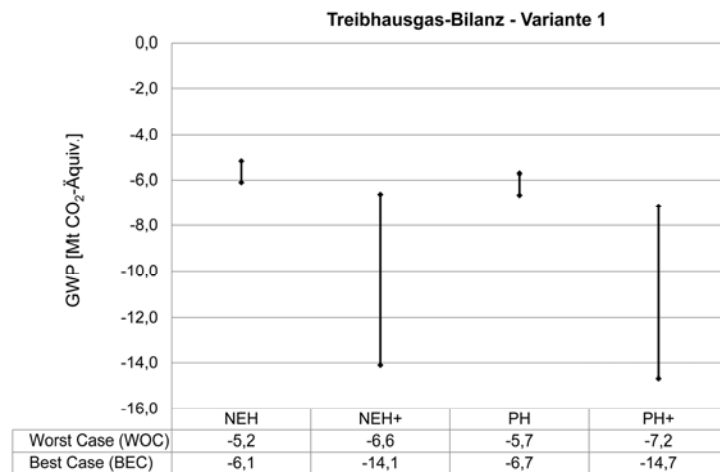


Abbildung 32 Treibhausgas-Bilanz – Variante 1 - Wohngebäudebestand

### 6.4.1.2 Energiebilanz – CED n.r. - Variante 1

Beim Vergleich der vier Varianten bezogen auf den Indikator „kumulierter Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.)“ ist zwischen der Variante NEH und der Variante PH kein markanter Unterschied erkennbar (siehe Abbildung 33). Dies trifft auch beim Vergleich zwischen der Variante NEH+ und PH+ zu. Die Einsparung an nicht erneuerbaren Energieträgern liegt je nach Variante zwischen 68,0 PJ/a (Minimum) und 202 PJ/a (Maximum), wobei der deutliche Unterschied durch den Einsatz von PV- und Solarthermie-Anlagen verursacht wird. Eine thermische Sanierung des



österreichischen Wohngebäudebestands mit Niedrigenergiehaus- statt mit Passivhaus-Komponenten ist im Vergleich zu den anderen energetischen Modernisierungsmaßnahmen (PV, Solarthermie) von untergeordneter Bedeutung. Grund ist, dass der kumulierte Energieaufwand für die Wärmeerzeugung pro Leistungseinheit (Nutzenergie) deutlich niedriger ist, als für die Stromerzeugung.

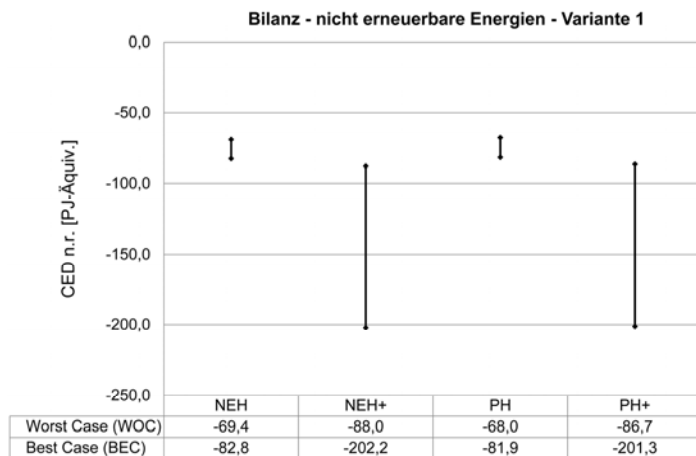


Abbildung 33 Energiebilanz – CED n.r. – Variante 1 - Wohngebäudebestand

### 6.4.1.3 Energiebilanz – CED r.- Variante 1

Ähnlich wie beim Indikator CED n.r. ist beim Vergleich der Variante NEH und PH kein markanter Unterschied erkennbar (siehe Abbildung 34). Dies trifft auch beim Vergleich zwischen der Variante NEH+ und PH+ zu, welche zusätzlich eine energetische Modernisierung mittels PV und Solarthermie-Anlagen beinhalten. Die Einsparung an erneuerbaren Energieträgern liegt je nach Variante zwischen 36,8 PJ/a (Minimum) und 49,9 PJ/a (Maximum). Der im Vergleich zum kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) deutlich geringere Unterschied zwischen den vier untersuchten Varianten wird durch den zugrunde gelegten Strommix für die PV-Gutschrift verursacht. Dieser beinhaltet im Wesentlichen nur nicht erneuerbare Energieträger, weshalb der Einfluss auf den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) gering ist.

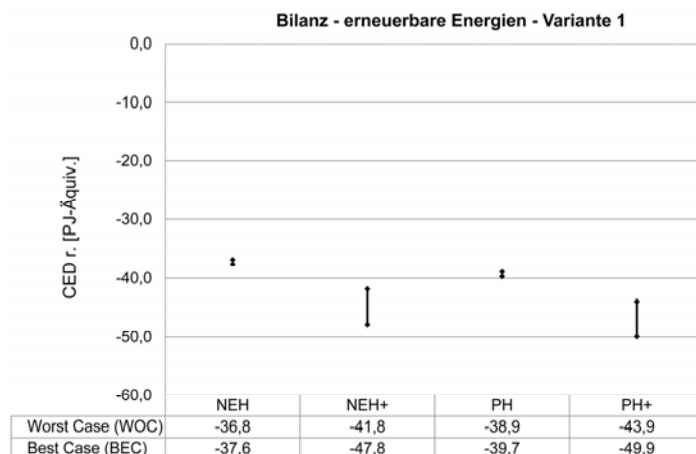


Abbildung 34 Energiebilanz – CED r. – Variante 1 - Wohngebäudebestand

### 6.4.1.4 Abfallbilanz – Variante 1

Beim Vergleich des Abfallaufkommens der vier Varianten ist ein maximaler Unterschied von 0,7 Mio. t pro Jahr zwischen den jeweiligen Worst und Best Case vorhanden (siehe Abbildung 35). Das wesentlich höhere Einsparpotential infolge einer zusätzlichen energetischen Modernisierung (PV,

Solarthermie) wird mit einem geringfügig höheren Abfallaufkommen erreicht (max. 0,2 Mio.°t pro Jahr, entspricht der Differenz zwischen dem Best Case der Variante NEH und PH+. Dies ist auf den geringeren erforderlichen Materialinput und auf die lange Lebensdauer der mit PV-Paneelen und Flachkollektoren ausgestatteten Aufbauten zurückzuführen. Die ermittelte Bandbreite von ca. 0,7 bis 0,8 Mio.°t Abfall pro Jahr zeigt, dass eine lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl und Planung zu einem wesentlich geringeren Abfallaufkommen beitragen kann.

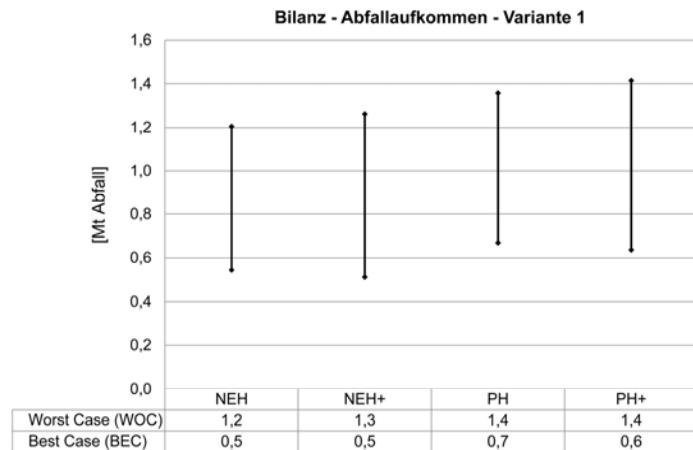


Abbildung 35 Abfallaufkommen – Variante 1 - Wohngebäudebestand

## 6.4.2 Einsparpotential – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.4.2.1 Treibhausgasbilanz – GWP - Variante 2

Für die Variante 2 wurde eine thermische Sanierung und energetische Modernisierung des gesamten Gebäudebestands bilanziert, wobei zusätzlich ein Netzverbund für den Warmwassertransport zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden angenommen wurde. Dadurch können mehr Dachflächen mit PV-Paneelen ausgestattet werden, da die 45 PJ/a vorrangig mit Flachkollektoren auf Fassadenflächen erzeugt werden. Die größte Einsparung an Treibhausgasen wird im Best Case der Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+)“ mit 30,8 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und die geringste Einsparung im Worst Case der Variante NEH mit 9,0 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr erreicht (siehe Abbildung 36).

Im Vergleich zur Variante 1 – Wohngebäudebestand ist ein Unterschied zwischen dem Best Case der Variante NEH und der Variante NEH+ deutlich erkennbar. Dies ist auf die geringeren Restriktionen des Nichtwohngebäudebestands hinsichtlich solar nutzbarer Flächen sowie auf den höheren Anteil von hinterlüfteten Fassadenflächen (Anmerkung: hohe Ökoeffizienz) zurückzuführen.

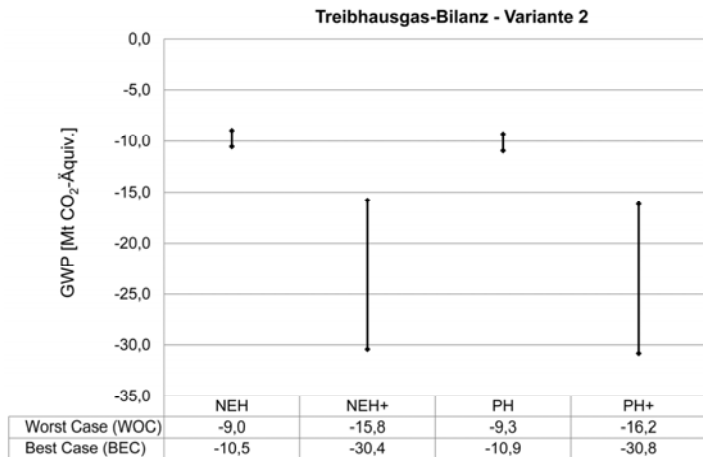


Abbildung 36 Treibhausgas-Bilanz – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.4.2.2 Energiebilanz – CED n.r. - Variante 2

Beim Vergleich des kumulierten Energieaufwands - nicht erneuerbar (CED n.r.) der vier bilanzierten Varianten ist das bedeutende Einsparpotential durch die großflächige Installation von PV- und Solarthermie-Anlagen erkennbar (siehe Abbildung 37). Im Worst Case können mit aSI-PV-Paneelen und Flachkollektoren ca. 206 PJ/a (Min-Variante PH+) und im Best Case mit Single-SI-Paneelen ca. 440 PJ/a (MAX-Variante NEH+) eingespart werden. Das Einsparpotential durch eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands beträgt 111 PJ/a im Worst Case der Variante PH und 143 PJ/a im Best Case der Variante NEH. Die Bandbreite von 23 PJ/a zeigt den Einfluss bilanzierter Sanierungs- und Modernisierungsvarianten auf. Im Vergleich dazu ist der Unterschied einer thermischen Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) statt mit Passivhaus-Komponenten (PH) eher von untergeordneter Bedeutung (ca. 9,0 PJ/a). Auffällig ist auch, dass bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) die Variante PH ein etwas geringeres Einsparpotential als die Variante NEH aufweist. D.h., der höhere Aufwand für die Installation der zentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung in Nichtwohngebäuden und dezentralen in Wohngebäuden verhindert trotz eines geringeren Energieverbrauchs für Raumheizung eine weitere Absenkung des kumulierten Energieaufwands.

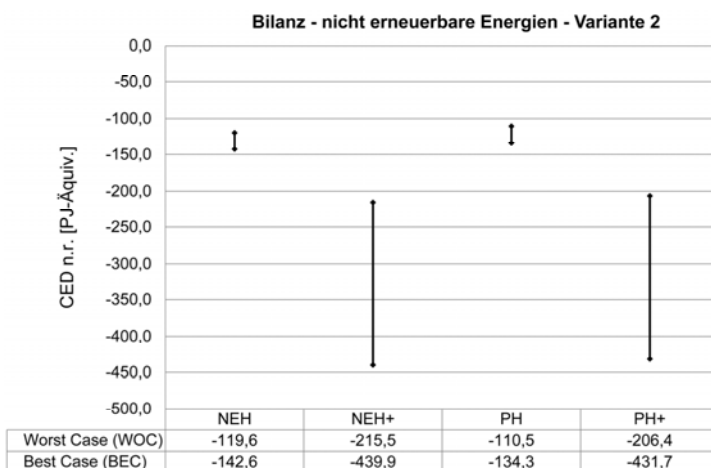


Abbildung 37 Energie-Bilanz – CED n.r. – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.4.2.3 Energiebilanz – CED r. - Variante 2

Das Einsparpotential bezogen auf den kumulierten Energieaufwand - erneuerbar (CED r.) ist im Vergleich zum kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) grundsätzlich um den

Faktor 2 bis 3 niedriger. Beim Vergleich zwischen der Variante NEH+ bzw. PH+ mit den Varianten NEH bzw. PH ist das bedeutende Einsparpotential durch die großflächige Installation von PV- und Solarthermie-Anlagen erkennbar (siehe Abbildung 38). Im Worst Case können mit aSI-PV-Paneelen und Flachkollektoren ca. 58,4 PJ/a und im Best Case mit Single-SI-Paneelen ca. 75,2 PJ/a eingespart werden. Das Einsparpotential durch eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands beträgt 50,8 PJ/a im Worst Case der Variante NEH und 52,1 PJ/a im Best Case der Variante PH. Die Bandbreite der Variante NEH bzw. PH von ca. 2 PJ/a zeigt, dass nur ein geringes Einsparpotential durch eine lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl und Planung erreichbar ist. Grund ist die geringe Nutzung von erneuerbaren Energieträgern als Bauprodukt (z.B. Holz), weshalb der Einfluss auf den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) dementsprechend gering ist. Die wesentlich größere Bandbreite der Variante PH+ bzw. NEH+ ist auf die unterschiedlichen Wirkungsgrade der bilanzierten PV-Anlagen zurückzuführen. Das Einsparpotential bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) sollte in der Praxis jedoch nicht bei den erneuerbaren sondern bei den nicht erneuerbaren Energieträgern genutzt werden.

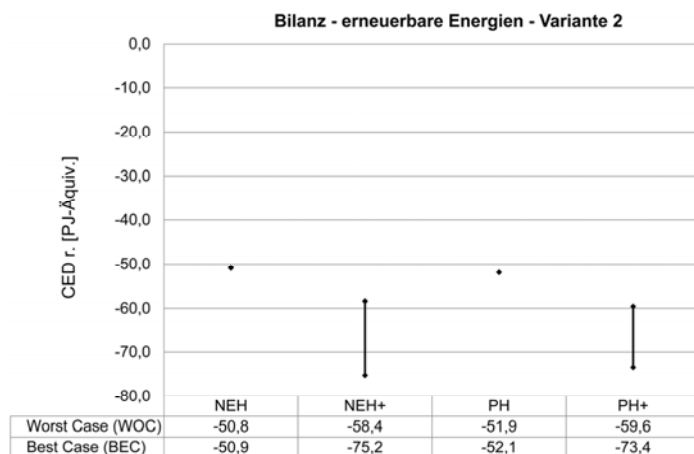


Abbildung 38 Energie-Bilanz – CED r. – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

#### 6.4.2.4 Abfallbilanz – Variante 2

Beim Vergleich des jährlichen Abfallaufkommens der vier Varianten ist ein maximaler Unterschied von 0,4 Mio.°t zwischen dem jeweiligen Best und Worst Case der Variante NEH und PH+ erkennbar (siehe Abbildung 39). Folglich verursacht eine zusätzlich energetische Modernisierung des österreichischen Gebäudebestands (Variante PH+ und NEH+) nur unwesentlich mehr Abfall als eine rein thermische Sanierung (Variante PH und NEH). Dies ist auf den verhältnismäßig geringeren Materialinput der bilanzierten Aufbauten, einschließlich der Installation von PV-Paneelen und Flachkollektoren zurückzuführen. Die ermittelte Bandbreite zeigt, dass durch eine lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl und Planung ein um 1,2 bis 1,5 Mio.°t pro Jahr geringeres Abfallaufkommen verursacht wird, um das gleiche Einsparpotential an Treibhausgasen und Energie zu erreichen.

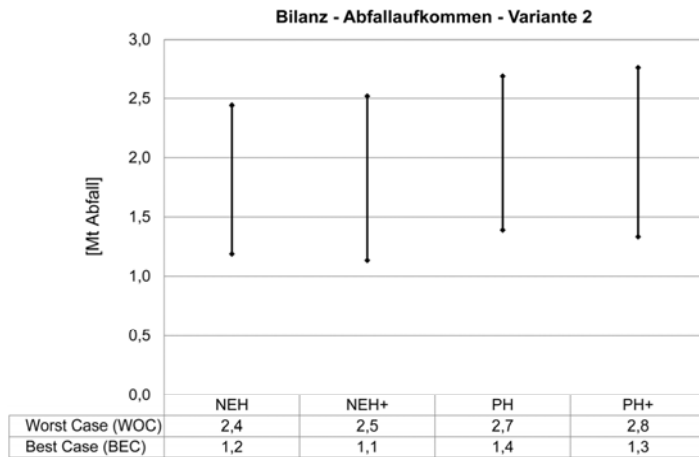


Abbildung 39 Abfallaufkommen – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.4.3 Einsparpotential – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

Die Variante 3 unterscheidet sich von der Variante 2 darin, dass kein Netzverbund für den Warmwassertransport zwischen dem Nichtwohngebäudebestand und Wohngebäudebestand bilanziert wurde. Diese Randbedingung führt zu einem höheren Flachkollektoranteil auf Dachflächen, um die zugrunde gelegten 45 PJ/a erzeugen zu können. Für eine leichtere Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse der Variante NEH bzw. PH mitabgebildet, obwohl die geänderte Systemgrenze keine Auswirkung auf die Ergebnisse hat.

#### 6.4.3.1 Treibhausgasbilanz – GWP - Variante 3

Die größte Einsparung an Treibhausgasen wird im Best Case der Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+)“ mit 30,8 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und im Worst Case der Variante NEH+ mit 9,0 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr erreicht (siehe Abbildung 40).

Im Vergleich zur Variante 2 ist ein etwas geringeres Einsparpotential bezogen auf den Worst Case der Variante NEH+ und PH+ erkennbar. Der jeweilige Best Case ist in der betrachteten Größenordnung zufälligerweise gleich hoch wie jener der Variante 2. Dies ist trotz der um 0,2 TWH/a niedrigen PV-Stromproduktion auf die unterschiedliche flächenbezogene Allokation der bilanzierten Aufbauten (LCA) und auf den zugrunde gelegten österreichischen Strom- und Heizträgermix zurückzuführen. Die veränderte Flächenaufteilung der Aufbauten mit PV-Paneelen und Flachkollektoren wirkt sich jedenfalls nur geringfügig auf die Ökobilanz-Kennwerte des Worst Case aus.

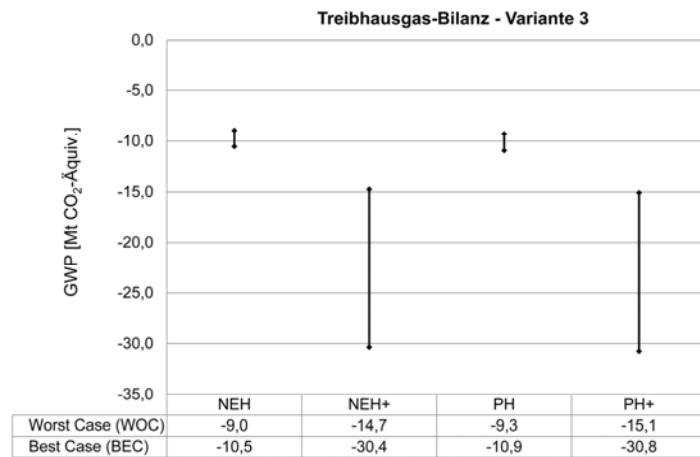


Abbildung 40 Treibhausgas-Bilanz – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.4.3.2 Energiebilanz – CED n.r. - Variante 3

Die größte Einsparung an nicht erneuerbarer Energie von 439 PJ/a würde bei einer thermischen Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH+), einschließlich der Installation von Single-SI-Paneelen und Flachkollektoren, erreicht werden (siehe Abbildung 41). Die Variante PH+ schneidet nur bei diesem Indikator geringfügig schlechter ab. D.h., trotz der höheren Einsparungen beim des Energieverbrauchs für Raumheizung wird aufgrund des höheren Materialinputs (Lüftungsschächte etc.) ein um 8 PJ/a geringeres Einsparpotential hinsichtlich nicht erneuerbarer Energieträger erreicht. Im Worst Case der Variante PH+ können mit aSI-PV-Paneelen und Flachkollektoren ca. 189 PJ/a eingespart werden. Das Einsparpotential durch eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands beträgt 111 PJ/a im Worst Case der Variante PH und 143 PJ/a im Best Case der Variante NEH.

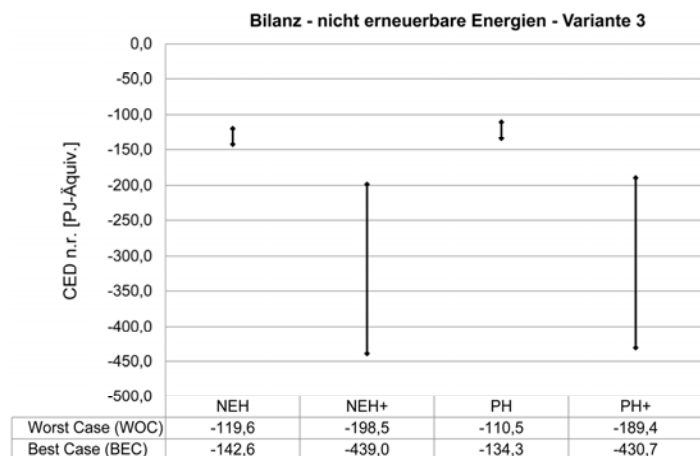


Abbildung 41 Energie-Bilanz – CED n.r. – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.4.3.3 Energiebilanz – CED r. - Variante 3

Eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands auf Niedrighausstandard (NEH) würde zu einer Absenkung des kumulierten Energieaufwands – erneuerbar (CED r.) um ca. 51 PJ/a und bei einer Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) um ca. 52 PJ/a führen (siehe Abbildung 42). Der Vergleich zwischen der Variante NEH+ und PH+ und zwischen der Variante NEH und PH zeigt das bedeutende Einsparpotential durch solare Energieerzeugung mittels PV und Solarthermie auf. Im Worst Case können mit aSI-PV-Paneelen und Flachkollektoren ca. 58,7 PJ/a und im Best Case mit Single-SI-Paneele ca. 73,5 PJ/a eingespart werden. Die Bandbreite der Variante NEH bzw.

PH von ca. 2 PJ/a zeigt, dass nur ein geringes Einsparpotential durch die Auswahl von ökoeffizienten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen erreichbar ist. Die geringe Auswirkung auf den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) ist auf die geringe Nutzung von erneuerbaren Energieträgern als Bauprodukt (Holzfaserdämmplatten etc.) zurückzuführen. Die wesentlich größere Bandbreite der Variante PH+ bzw. NEH+ wird durch die unterschiedlichen Wirkungsgrade der bilanzierten PV-Anlagen verursacht.

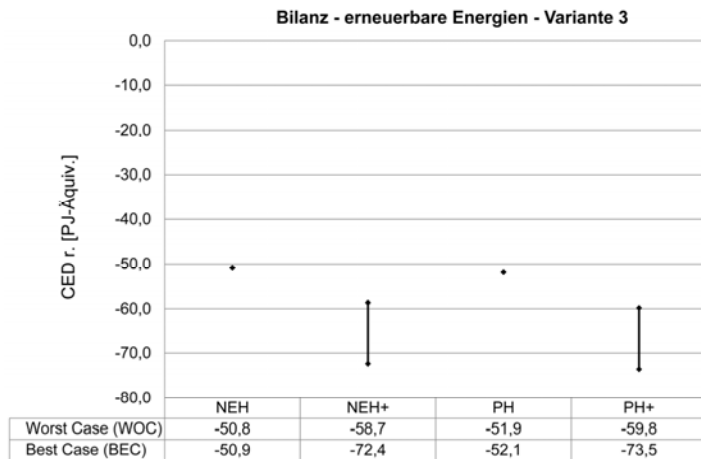


Abbildung 42 Energie-Bilanz – CED r. – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

#### 6.4.3.4 Abfallbilanz – Variante 3

Beim Vergleich des jährlichen Abfallaufkommens der vier Varianten ist ein maximaler Unterschied von 0,5 Mio.°t zwischen dem jeweiligen Best und Worst Case der Variante NEH und PH+ erkennbar. (siehe Abbildung 43). Folglich verursacht eine zusätzlich energetische Modernisierung des österreichischen Gebäudebestands nur unwesentlich mehr Abfall als eine rein thermische Sanierung. Dies ist auf den verhältnismäßig geringeren Materialinput der bilanzierten Aufbauten, einschließlich der Installation von PV-Paneelen und Flachkollektoren zurückzuführen. Die ermittelte Bandbreite zeigt, dass durch eine lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl und Planung ein deutlich geringeres Abfallaufkommen von ca. 1,2 bis 1,5 Mio.°t pro Jahr verursacht wird, um das gleiche Einsparpotential an Treibhausgasen und Energie zu erlangen.

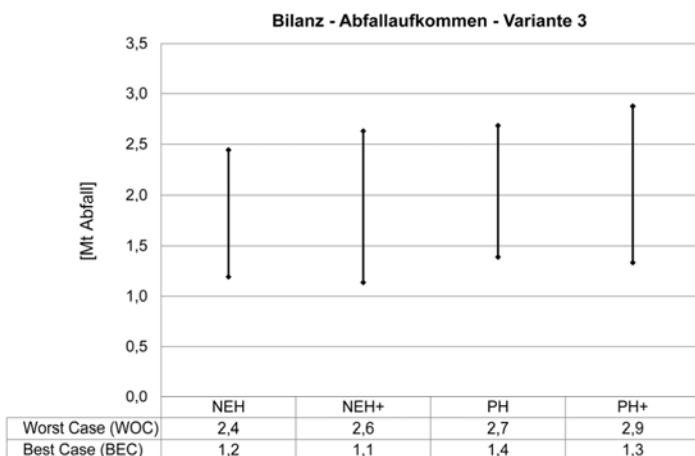


Abbildung 43 Abfallaufkommen – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

## **6.5 Dominanzanalyse – Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+)**

Das zuvor in Form von Bandbreiten aufgezeigte Einsparpotential von thermischen Sanierungsmaßnahmen und energetischen Modernisierungsmaßnahmen wird im Folgenden mittels Dominanzanalysen hinsichtlich der wesentlichen Einflussfaktoren für vier unterschiedliche Gebäude-Energiestandards näher analysiert. Die Abbildungen zeigen den Aufwand für die thermische Sanierung und energetische Modernisierung der Bestandsgebäude (positive Werte) im Vergleich zu den Erträgen (negative Werte, da Einsparung). Die Ergebnisse werden in Abhängigkeit von den vier definierten Gebäude-Energiestandards nacheinander erläutert.

### **6.5.1 Dominanzanalyse - Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) – Variante 1**

Das Einsparpotential durch Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) bezogen auf den österreichischen Wohngebäudebestand – Variante 1 wird im Nachfolgenden für die ausgewählten Indikatoren dargestellt.

#### **6.5.1.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 1**

In Abbildung 44 a ist für den Indikator – Treibhauspotential (GWP) eine Gegenüberstellung zwischen dem Worst und Best Case der Variante 1 – Wohngebäudebestand ersichtlich. Für den Worst Case bedeutet dies, dass durchschnittlich ca. 2,5 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr durch die Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) aufgewendet werden müssen, um im Gegenzug ca. 9,8 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr einsparen zu können. Der erkennbare Unterschied zwischen dem Worst Case (Variante 1 - WOC) und dem Best Case (Variante 1 - BEC) wird durch die unterschiedlichen Wirkungsgrade der PV-Anlagen (Single-Si im Vergleich zu aSI-Paneele) und der substituierten Stromerzeugungssysteme mit nicht erneuerbaren Energieträgern verursacht. Die höheren Umweltwirkungen bei der Produktion der Single-Si-Paneele können durch die Auswahl von Sanierungsvarianten mit geringeren ökologischen Umweltwirkungen (Kategorie „LCA“) kompensiert werden. Deswegen müssen im Vergleich zum Worst Case nur 1,7 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr für die Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) aufgewendet werden, um ein Einsparpotential von 16,4 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr nutzen zu können. Damit wird die Sinnhaftigkeit von qualitativ hochwertigen Gebäudesanierungen, einschließlich einer lebenszyklusorientierten Bauproduktauswahl und der Berücksichtigung von kreislaufwirtschaftlichen Aspekten in der Planung aufgezeigt.

#### **6.5.1.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 1**

Das Einsparpotential hinsichtlich nicht erneuerbarer Energieträger ist beim Vergleich des Worst Case mit dem Best Case ersichtlich (siehe Abbildung 44 b). Das größte Einsparpotential ist für beide Fälle durch den deutlich reduzierten Energieverbrauch für Raumheizung (110 PJ/a) gegeben. Beim Best Case ist die Einsparung an nicht erneuerbaren Energieträgern durch eine PV-Stromerzeugung (Single-Si-Paneele) anstatt einer Stromproduktion mittels Erdgaskraftwerken deutlich erkennbar. Für den Worst Case ist das Einsparpotential aufgrund der weniger effizienten aSI-Paneele und der Substitution von Braunkohlekraftwerken merkbar geringer. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:2,9 und für den Best Case 1:6,8.



### 6.5.1.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 1

Das Einsparpotential an erneuerbaren Energieträgern (Wasserkraft, Biomasse etc.) ist um den Faktor 2 bis 4 niedriger, als jenes für nicht erneuerbare Energieträger (siehe Abbildung 44 c). Beim Vergleich zwischen dem Worst und Best Case zeigt sich kein bedeutend großer Unterschied. Die großen Abweichungen bezogen auf die Kategorie „PV Stromgutschrift“ sind auf die unterschiedlichen PV-Anlagen-Effizienzen und den bilanzierten Strommix zurückzuführen. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:6,4 und für den Best Case 1:6,8.

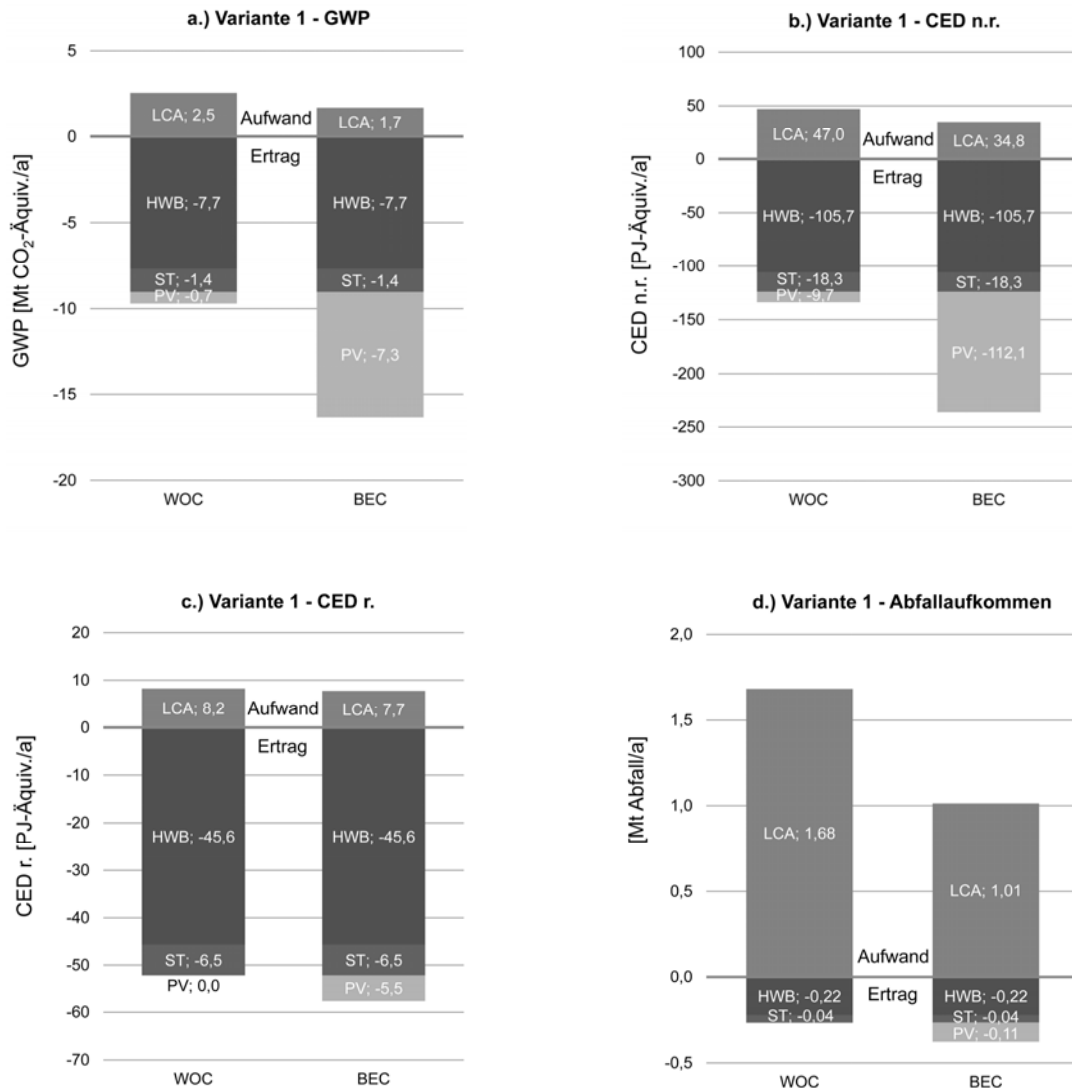


Abbildung 44 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH+) - Variante 1 - Wohngebäudebestand

### 6.5.1.4 Dominanzanalyse - Abfallaufkommen - Variante 1

Das für die Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) verursachte jährliche Abfallaufkommen beträgt für den Worst Case ca. 1,7 Mio.°t und für den Best Case ca. 1,0 Mio.°t (siehe Abbildung 44 d). Das niedrigere Abfallaufkommen ist durch die Auswahl von Aufbauten mit leicht lösbaren und trennbaren Bauteilschichten begründet. Der negative, also vermiedene Abfall wird durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung des sanierten Wohngebäudebestands und durch die Substitution von nicht erneuerbaren Energieträgern mittels PV und Solarthermie erlangt. Jedenfalls zeigt sich, dass bei der Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) nicht nur ökoeffiziente sondern auch abfallarme

und kreislauffähige Aufbauten forciert werden sollten, um das künftig zu deponierende Abfallaufkommen, einschließlich der negativen Umweltwirkungen (Verlust von natürlichen Lebensraum, Schonung von Deponievolumen etc.) so gering wie möglich zu halten.

### **6.5.2 Dominanzanalyse - Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) – Variante 2**

Das Einsparpotential durch Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) bezogen auf den gesamten österreichischen Gebäudebestand wird im Folgenden für die Indikatoren Treibhauspotential (GWP), nicht erneuerbarer kumulierter Energieaufwand (CED n.r.), erneuerbarer kumulierter Energieaufwand (CED r.) und für das gesamte Abfallaufkommen dargestellt. Im Vergleich zur Variante 3 wurde ein Netzverbund für den Warmwassertransport zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden bilanziert, wodurch mehr Dachflächen für die Installation von PV-Anlagen zur Verfügung standen.

#### **6.5.2.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 2**

In Abbildung 45 a sind für den Indikator – Treibhauspotential (GWP) die Ergebnisse des Worst Case mit jenen des Best Case der Variante 2 gegenübergestellt. Die stofflichen und energetischen Aufwendungen der Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) (Kategorie „LCA“) des Worst Case steht mit den dazugehörigen Erträgen in einem Verhältnis 1:3,9. Für den Best Case kann sogar ein Aufwand-Ertrag-Verhältnis von 1:8,1 erreicht werden. Die Stromgutschrift trägt dazu maßgebend bei, wobei ein mit Braunkohlekraftwerken erzeugter Strom (höchste Umweltwirkungen je kWh) durch einen mittels Single-Si-Paneelen erzeugten PV-Strom (höchster Wirkungsgrad) substituiert wird.

#### **6.5.2.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 2**

Das Einsparpotential hinsichtlich nicht erneuerbarer Energieträger ist in der Abbildung 45 b für den Worst Case (-29,4 PJ/a) und Best Case (-51,5 PJ/a) ersichtlich. Das größte Einsparpotential ist im Worst Case durch die Reduktion des Heizwärme-Bedarfs gegeben. Für den Best Case wird dies hingegen durch die PV-Stromgutschrift erreicht. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:3,5 und für den Best Case 1:6,8.

#### **6.5.2.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 2**

Das Einsparpotential hinsichtlich erneuerbarer Energieträger ist in der Abbildung 45 c für den Worst Case (-7,6 PJ/a) und den Best Case (-9,0 PJ/a) ersichtlich, wobei der Unterschied zwischen den beiden Varianten vergleichsweise geringfügig ausfällt. Das größte Einsparpotential ist für den Worst Case und für den Best Case durch die Reduktion des Heizwärme-Bedarfs gegeben. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:5,9 und für den Best Case 1:5,6. Das vergleichsweise schlechtere Aufwand-Ertrag-Verhältnis des Best Case ist durch den vermehrten stofflichen Einsatz von erneuerbaren Energieträgern (Holzwolledämmplatten etc.) bei der Bestandssanierung begründet, was auch hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Speicherung von Vorteil ist.

#### **6.5.2.4 Dominanzanalyse - Abfallaufkommen - Variante 2**

Die Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) verursacht im Worst Case ein jährliches Abfallaufkommen von 3,2 Mio. t und für den Best Case ein deutlich geringeres Abfallaufkommen von 2,1 Mio. t (siehe Abbildung 45 d). Im Gegenzug wird durch die Einsparung des Energieverbrauchs für Raumheizung (Kürzel „HWB“) und durch die Substitution von nicht erneuerbaren Energieerzeugungssystemen

mittels Solarthermie und PV ein negatives Abfallaufkommen von ca. 0,5 Mio. t für den Worst Case und für den Best Case von 0,7 Mio. t erreicht. Der Einfluss der längeren Lebensdauer, aber auch der besseren Lösbarkeit und Trennbarkeit der zusammengesetzten Bauprodukte ist beim Vergleich des Abfallaufkommens zwischen Best und Worst Case ersichtlich.

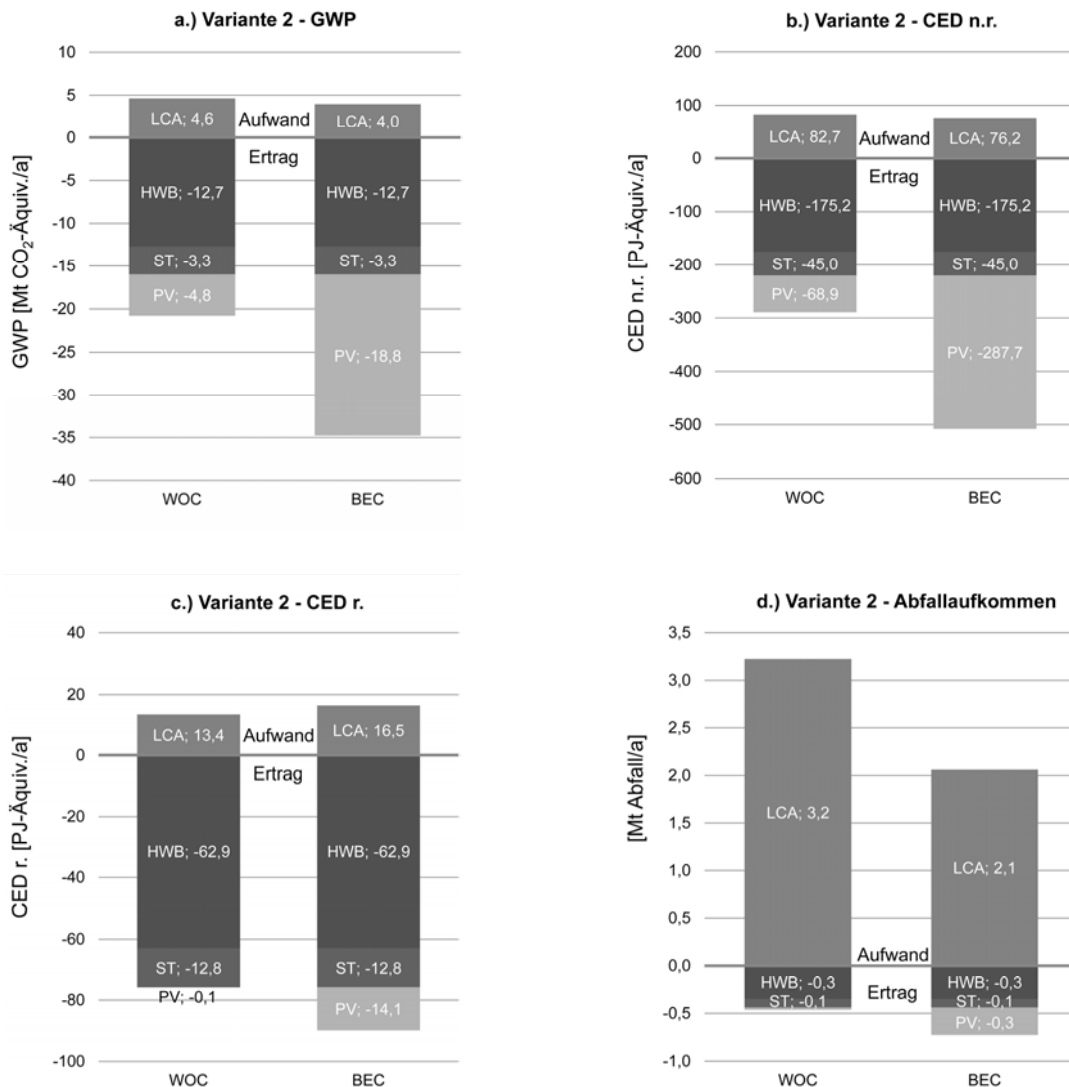


Abbildung 45 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH+) – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.5.3 Dominanzanalyse – Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) - Variante 3

Das Einsparpotential durch Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) bezogen auf den gesamten österreichischen Gebäudebestand – Variante 3 wird im Nachfolgenden für die ausgewählten Indikatoren dargestellt.

#### 6.5.3.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 3

In Abbildung 46 a ist für den Indikator – Treibhauspotential (GWP) eine Gegenüberstellung zwischen dem Worst und Best Case der Variante 3 ersichtlich. Die stofflichen und energetischen Aufwendungen der Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) (5,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr) stehen im Vergleich mit den Erträgen in einem Verhältnis von 1:3,3, also etwas schlechter wie für die Variante 2 (1:3,9). Grund ist die für die Variante 3 gewählte

Systemgrenze, die keinen Wärmetransport zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden bilanziert. Deswegen müssen mehr Dachflächen für die solarthermische Erzeugung der zugrunde gelegten 45 PJ/a herangezogen werden, als für die Variante 2. Für den Best Case bedeutet dies, dass durchschnittlich ca. 3,9 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr durch die Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) aufgewendet werden müssen, um ca. 32,3 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr einsparen zu können (Aufwand-Ertrag-Verhältnis 1:8,3).

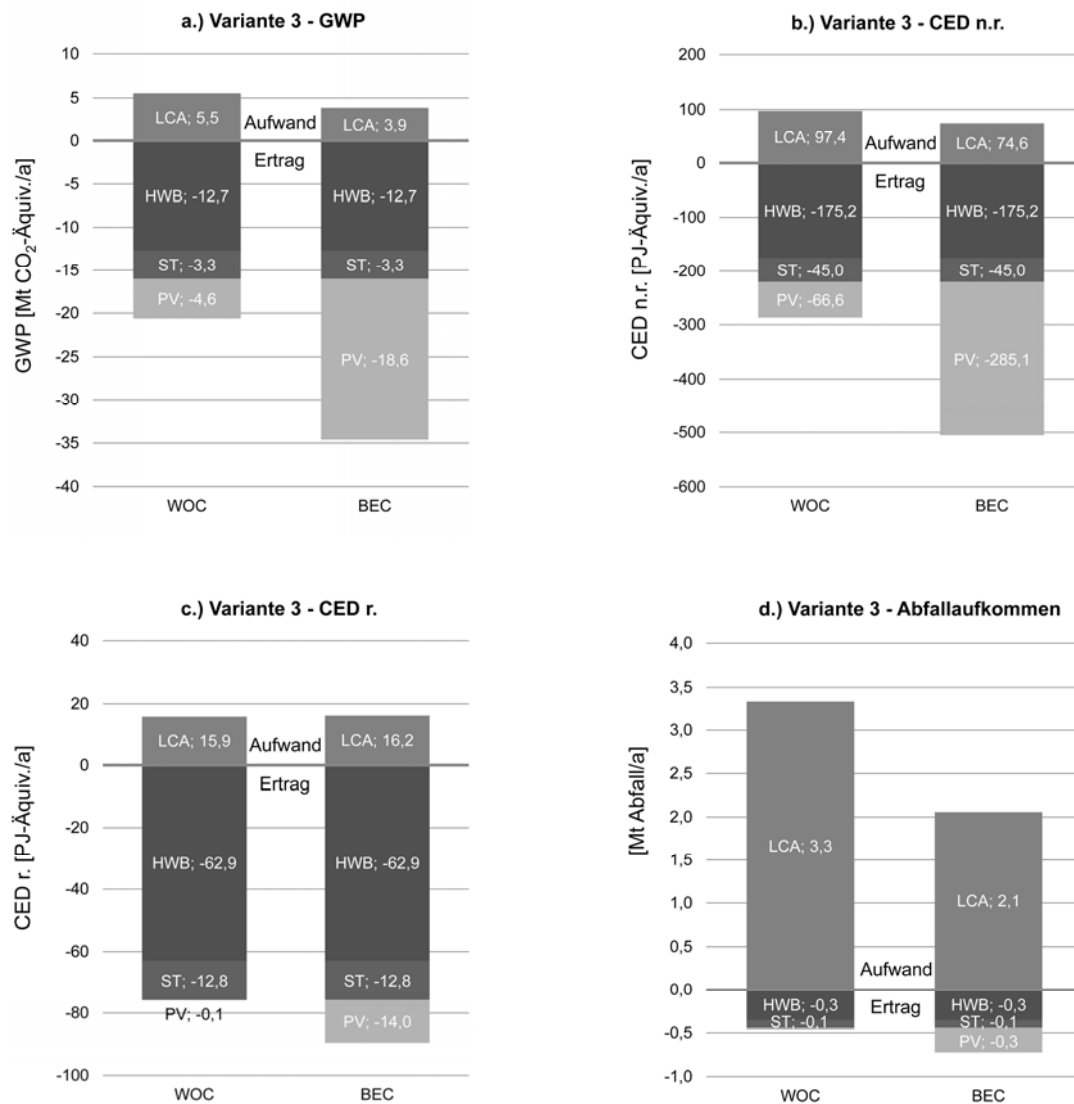


Abbildung 46 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH+) - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.5.3.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 3

Durch die Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) kann ein jährliches Einsparpotential bezogen auf den kumulierten Energieaufwand - nicht erneuerbarer Energieträger im Worst Case von 29,2 PJ-Äquivalente und im Best Case 51,5 PJ-Äquivalente erreicht werden (siehe Abbildung 46 b). Das größte Einsparpotential wird im Worst Case durch die Reduktion des Heizwärme-Bedarfs und im Best Case durch die PV-Stromgutschrift erreicht. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:3,0 und für den Best Case 1:6,9. Maßgeblichen Einfluss haben die unterschiedlichen Wirkungsgrade der PV-Anlagen, was beim Vergleich der Kategorie „PV-Gutschriften“ zwischen Best und Worst Case deutlich wird.

### 6.5.3.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 3

In der Abbildung 46 c ist das jährliche Einsparpotential hinsichtlich erneuerbarer Energieträger für den Worst Case (-7,6 PJ-Äquivalente) und für den Best Case (-9,0 PJ-Äquivalente) ersichtlich. Das größte Einsparpotential wird für beide Varianten durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung erreicht. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:4,8 und für den Best Case 1:5,6. Der Unterschied zur bereits erläuterten Variante 2 ergibt sich durch die unterschiedliche Bilanzierung des Transports von solarthermisch erzeugten Warmwasser zwischen Erzeuger und Verbraucher. Falls das ermittelte PV-Stromerzeugungspotential voll ausgeschöpft wird, dann hat dies auch positive Auswirkungen auf den berechneten kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar, der für die Bauprodukt-Herstellung (Kategorie „LCA“) eingesetzt werden muss. Dies trifft insbesondere auf jene Bauprodukte zu, die mit einem hohen Stromaufwand erzeugt werden. Dieser positive Effekt einer progressiven Verbesserung der Ökobilanz-Kennzahlen wurde aber in dieser Bilanzierung aufgrund des enormen Bearbeitungsaufwands nicht berücksichtigt, weil dafür eine iterative Berechnung der Ökobilanz-Kennwerte notwendig wäre.

### 6.5.3.4 Dominanzanalyse - Abfallaufkommen - Variante 3

Die Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) verursacht im Worst Case ein jährliches Abfallaufkommen von 3,3 Mio.°t und für den Best Case ein wesentlich geringeres Abfallaufkommen von 2,1 Mio.°t (siehe Abbildung 46 d). Dafür werden durch die Einsparung des Energieverbrauchs für Raumheizung (Kürzel „HWB“) und Energieerzeugung mittels Solarthermie und PV ein negatives Abfallaufkommen von ca. 0,5 Mio.°t/a für den Worst Case und für den Best Case von 0,7 Mio.°t/a erreicht. D.h., es wird durch die Auswahl von thermischen Sanierungsvarianten mit geringen ökologischen Umweltwirkungen und von ökoeffizienten energetischen Modernisierungsmaßnahmen (PV-Anlagen mit Single-SI-Paneelen) deutlich weniger Abfall verursacht bzw. bei Betrachtung des negativen Abfallaufkommens mehr eingespart. Deutlicher wird dies, wenn vom berechneten Abfallaufkommen, welches durch die Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) verursacht wird, das negative Abfallaufkommen abgezogen wird. Für den Worst Case berechnet sich ein jährliches Abfallaufkommen von 2,8 Mio.°t (3,3 Mio.°t abzgl. 0,5 Mio.°t) und für den Best Case von 1,4 Mio.°t (2,1 Mio.°t abzgl. 0,7 Mio.°t). Dies entspricht einer Differenz von 50 % bezogen auf den Worst Case und 100 % bezogen auf den Best Case!

## 6.6 Dominanzanalyse – Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)

In diesem Kapitel wird das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag von Sanierungen mit Passivhaus-Komponenten (PH) analysiert. Die stofflichen und energetischen Aufwendungen der thermischen Sanierung werden wie zuvor unter dem Begriff „LCA“ zusammengefasst und mit den Erträgen aus der Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung gegenübergestellt (Kategorie „HWB“). Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den stofflichen und energetischen Aufwand für die Bestandssanierung (positive Werte) mit Passivhaus-Komponenten im Vergleich zu den Erträgen (negative Werte, da Einsparung).

### 6.6.1 Dominanzanalyse – Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) - Variante 1

Das Einsparpotential durch Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) bezogen auf den österreichischen Wohngebäudebestand – Variante 1 wird im Nachfolgenden für die ausgewählten Indikatoren dargestellt.

#### 6.6.1.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 1

In Abbildung 47 a sind die Indikatorergebnisse – Treibhauspotential (GWP) der Variante 1 - Wohngebäudebestand für den Worst Case im Vergleich zum Best Case dargestellt. Für den Best Case bedeutet dies, dass für eine vollständige thermische Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands durchschnittlich ca. 1,0 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr aufgewendet werden müssen, um im Gegenzug ca. 7,7 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung einsparen zu können. Im Worst Case ist für die Erreichung des gleich hohen Einsparpotentials ein fast doppelt so hoher Aufwand nötig (1,9 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr). Dadurch wird deutlich, dass durch die Auswahl von lebenszyklusoptimierten Sanierungsvarianten ein weiteres Einsparpotential von ca. 0,9 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr genutzt werden kann.

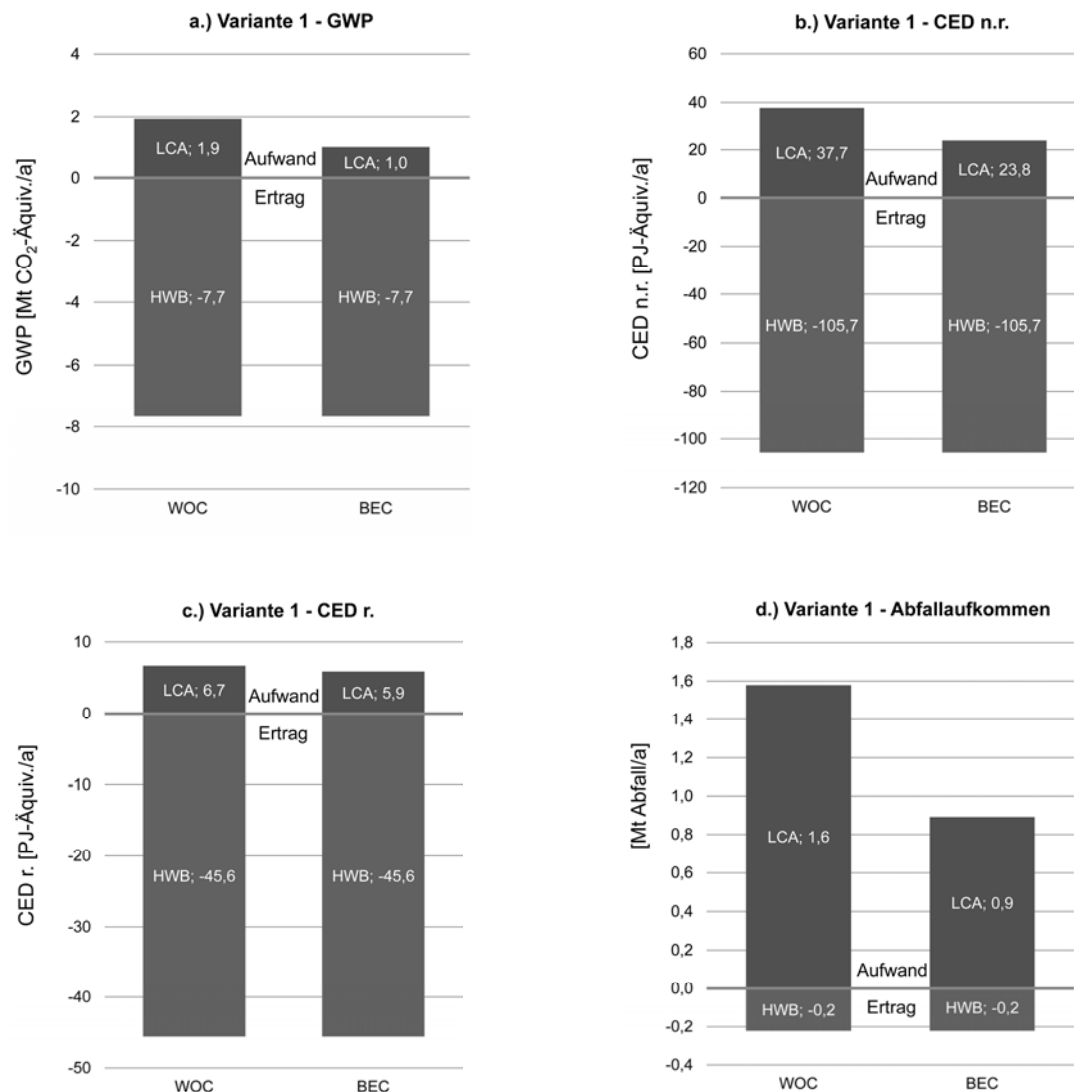


Abbildung 47 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH)- Variante 1 – Wohngebäudebestand

### 6.6.1.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 1

Eine Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten (PH) würde eine Einsparung von 110 PJ-Äquivalente pro Jahr bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) bringen (siehe Abbildung 47 b). Bei Anwendung von ökoeffizienten thermischen Sanierungsmaßnahmen (Best Case) ist ein Aufwand von 24 PJ-Äquivalente pro Jahr erforderlich. Im Gegensatz zum Worst Case ist für den gleichen Einspareffekt ein vergleichsweise höherer Aufwand von 38 PJ-Äquivalente pro Jahr notwendig. Im Vergleich zum Best Case ist der Aufwand um ca. 60 % höher. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:2,9 und für den Best Case 1:4,6.

### 6.6.1.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 1

In der Abbildung 47 c sind die Indikatorergebnisse für den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) dargestellt. Zur thermischen Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten (PH) ist im Best Case ein Aufwand von 5,9 PJ-Äquivalente pro Jahr und im Worst Case von 6,7 PJ-Äquivalente pro Jahr erforderlich. Der prozentuale Unterschied zwischen dem Best und Wort Case beträgt ca. 14 %. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:6,9 und für den Best Case 1:7,8.

### 6.6.1.4 Dominanzanalyse – Abfallaufkommen – Variante 1

Die thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten ist mit einem jährlichen Abfallaufkommen von 1,6 Mio.°t im Worst Case und 0,9 Mio.°t im Best Case verbunden (siehe Abbildung 47 d). Durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung muss folglich weniger Energie bereitgestellt werden. Dies führt aufgrund der geringeren Energieerzeugung wiederum zu einer Absenkung des Abfallaufkommens von 0,2 Mio.°t pro Jahr. Jedenfalls ist erkennbar, dass das Abfallaufkommen durch überlegtes Zusammenfügen der Bauprodukte unter Berücksichtigung der Lösbarkeit und Trennbarkeit deutlich geringer ausfällt. Des Weiteren müssen die Recycling-Quoten von bestimmten Baurestmassen (z.B. Gipskartonplatte) in der Praxis erhöht werden. Ein Vergleich nach [73] hinsichtlich der Recycling-Quoten mit anderen EU-Mitgliedsländern zeigt, dass hier noch ein deutliches Verbesserungspotentials vorhanden ist.

## 6.6.2 Dominanzanalyse – Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) – Variante 2 & 3

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Dominanzanalyse bei einer Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten (PH) für die Variante 2 & 3 dargestellt.

### 6.6.2.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 2 & 3

Im Folgenden wird das Einsparpotential hinsichtlich einer thermischen Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten (PH) dargestellt (siehe Abbildung 48 a). Die Indikatorergebnisse – Treibhauspotential (GWP) der Variante 2 zeigen, dass ein Einsparpotential von 13 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr durch eine thermische Sanierung mit Passivhaus-Komponenten erreicht werden kann. Im Best Case muss für eine vollständige thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands durchschnittlich ca. 1,8 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr aufgewendet werden. Im Worst Case ist ein um fast 90 % höherer Aufwand nötig (3,4 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr). Folglich kann durch die Auswahl von lebenszyklusoptimierten Sanierungsvarianten ein weiteres Einsparpotential von ca. 1,6 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr

genutzt werden. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:3,8 und für den Best Case 1:7,2.

#### **6.6.2.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 2 & 3**

Eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten (PH) würde eine Einsparung von 180 PJ-Äquivalente pro Jahr bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) bringen (siehe Abbildung 48 b). Bei Anwendung von ökoeffizienten thermischen Sanierungsmaßnahmen (Best Case) ist ein Aufwand von 41 PJ-Äquivalente pro Jahr erforderlich. Im Gegensatz zum Worst Case ist für die Erreichung des gleichen Einsparpotentials ein vergleichsweise höherer Aufwand von insgesamt 65 PJ-Äquivalente pro Jahr notwendig. Im Vergleich zum Best Case ist der Aufwand zur Erlangung des gleich hohen Einsparpotentials um ca. 60 % höher. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:2,8 und für den Best Case 1:4,4.

#### **6.6.2.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 2 & 3**

In der Abbildung 48 c sind die Indikatorergebnisse für den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) dargestellt. Zur thermischen Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten ist für den Best und Worst Case ein Aufwand von ca. 11 PJ-Äquivalente pro Jahr erforderlich, um eine Einsparung von 63 PJ-Äquivalente pro Jahr zu erreichen. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case und Best Case jeweils 1:5,7.

#### **6.6.2.4 Dominanzanalyse – Abfallaufkommen - Variante 2 & 3**

Die thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten ist mit einem jährlichen Abfallaufkommen von 3,0 Mio.°t im Worst Case und 1,7 Mio.°t im Best Case verbunden (siehe Abbildung 48 d). Durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung muss deutlich weniger Energie bereitgestellt werden, was auch zu einer weiteren Einsparung an Abfall von 0,4 Mio.°t pro Jahr führt. Die bessere Lösbarkeit und Trennbarkeit der für den Best Case ausgewählten Aufbauten haben zur Folge, dass das Abfallaufkommen um 1,3 Mio.°t pro Jahr (Einsparung von ca. 40 %) geringer ausfällt.



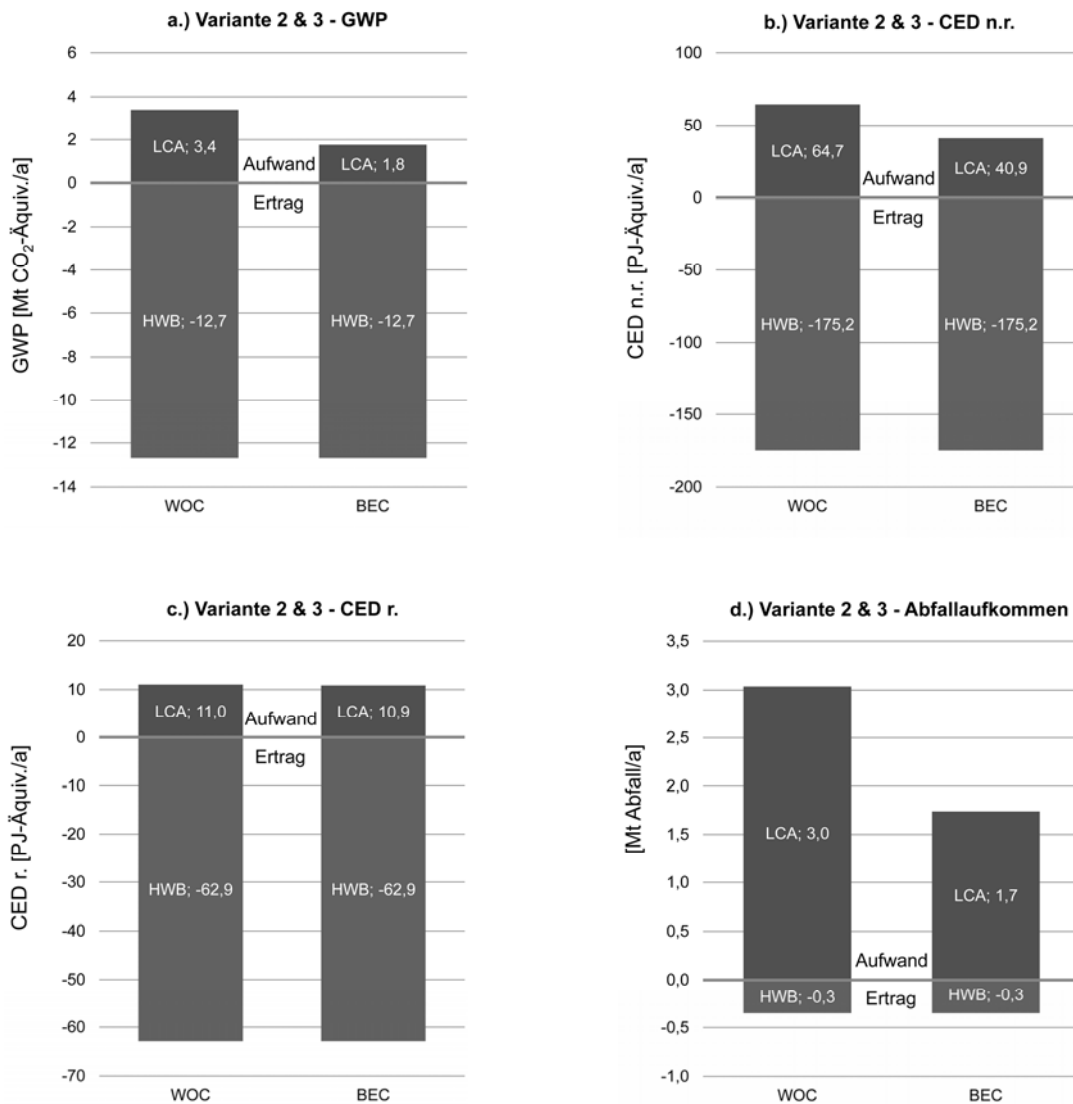


Abbildung 48 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH) – Variante 2 & 3 –Gesamter Gebäudebestand

## 6.7 Dominanzanalyse – Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (NEH+)

In diesem Kapitel wird das Aufwand-Ertrag-Verhältnis von thermischen Sanierungsmaßnahmen mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH+), einschließlich der Nutzung von solarthermischen Anlagen und PV erläutert. Der stoffliche und energetische Aufwand für die Bestandssanierung werden als positive Werte und die Erträge aus solarer Energiegewinnung und der Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung als negative Werte dargestellt.

### 6.7.1 Dominanzanalyse - Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (NEH+) – Variante 1

Das Einsparpotential durch Bestandssanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, einschließlich der Nutzung von PV- und Solarthermie-Anlagen (NEH+) bezogen auf den österreichischen

Wohngebäudebestand – Variante 1 wird im Nachfolgenden für die ausgewählten Indikatoren dargestellt.

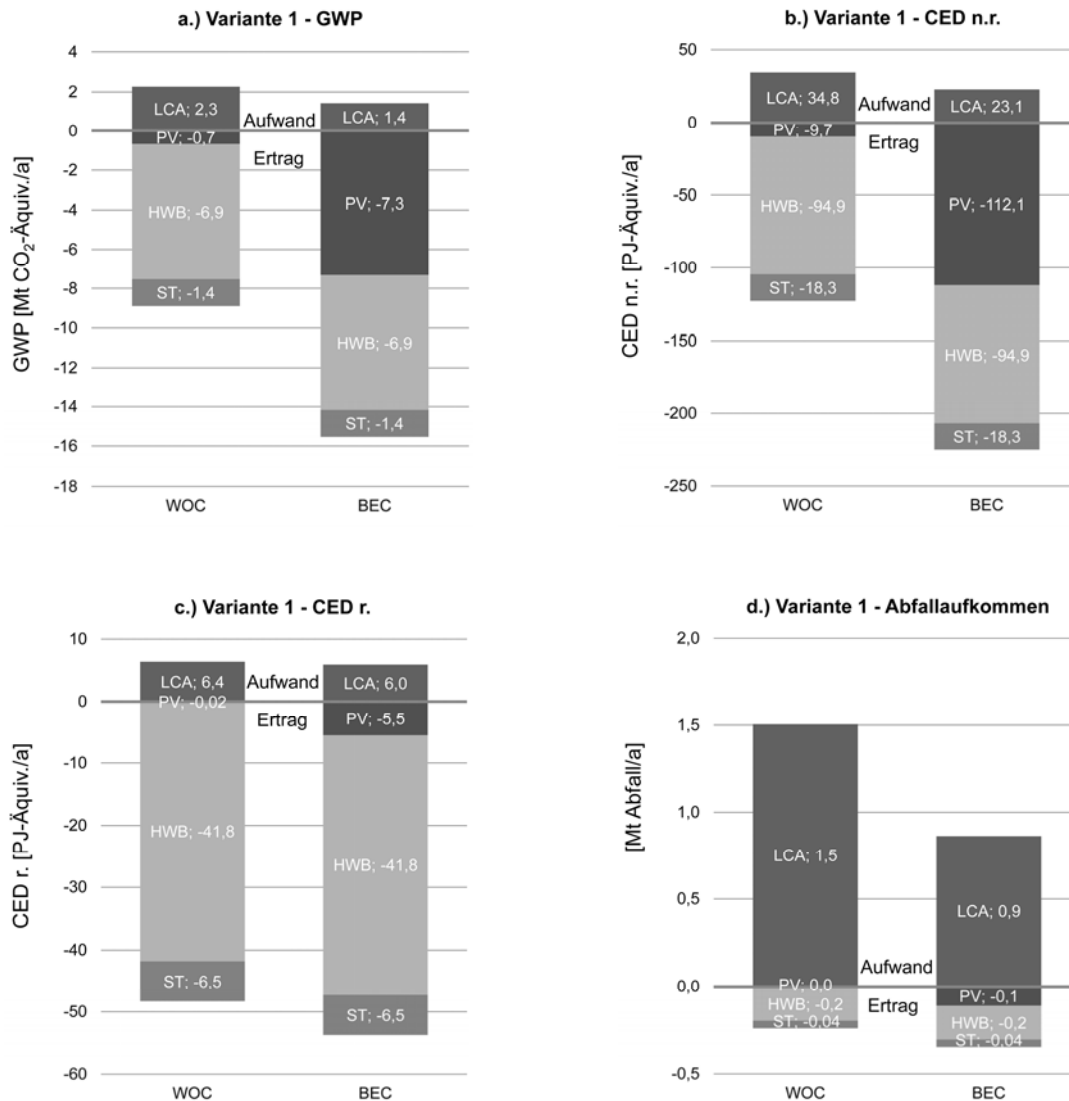


Abbildung 49 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH+) – Variante 1 – Wohngebäudebestand

### 6.7.1.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 1

In Abbildung 49 a) werden die Indikatorergebnisse – Treibhauspotential (GWP) der Variante 1 (nur Wohngebäudebestand) für den Best und Worst Case gegenübergestellt. Für den Worst Case bedeutet dies, dass für eine vollständige thermische Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands durchschnittlich ca. 2,3 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr aufgewendet werden müssen, um im Gegenzug ca. 9,0 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung sowie durch solare Energieerzeugung einsparen zu können. Im Best Case ist ein Aufwand von 1,4 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr nötig, um eine Einsparung von 12,4 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr zu erlangen (Aufwand zu Ertrag 1:8,9). Dadurch wird deutlich, dass durch die Auswahl von lebenszyklusoptimierten Sanierungsvarianten ein weiteres Einsparpotential von ca. 0,9 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr genutzt werden könnte. Der bedeutende Einfluss des Wirkungsgrads der bilanzierten PV-Anlagen ist beim Kennwert-Vergleich bezogen auf die

Kategorie „PV“ zwischen dem Best und Worst Case ersichtlich. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt im Worst Case 1:3,9 und im Best Case 1:8,9, also eine um den Faktor 2,3 höhere Ökoeffizienz.

#### **6.7.1.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 1**

Eine Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH+“ benötigt im Worst Case einen kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) von 35 PJ-Äquivalente pro Jahr um eine Einsparung von ca. 123 PJ-Äquivalente pro Jahr zu erreichen (siehe Abbildung 49 b). Im Best Case kann eine Einsparung von 173 PJ-Äquivalente pro Jahr erreicht werden, wobei ein Aufwand von 23 PJ-Äquivalente pro Jahr erforderlich ist. Folglich ist durch den Einsatz von ökoeffizienten Sanierungslösungen einerseits ein um 12 PJ-Äquivalente pro Jahr (ca. 34 %) niedriger Aufwand nötig, um andererseits eine um 50 PJ-Äquivalente pro Jahr höhere Einsparung zu erlangen. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt im Worst Case 1:3,5 und im Best Case 1:7,5 und ist ähnlich, wie beim Indikator Treibhauspotential (GWP) um den Faktor 2,1 höher.

#### **6.7.1.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 1**

In der Abbildung 49 c sind die Indikatorergebnisse für den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) dargestellt. Zur thermischen Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH+“ ist im Best Case ein Aufwand von 6,0 PJ-Äquivalente pro Jahr und im Worst Case von 6,4 PJ-Äquivalente pro Jahr erforderlich, um eine jährliche Einsparung von ca. 49 PJ-Äquivalente zu erreichen. Die relativ hohe Einsparung an erneuerbaren Energieträgern ist auf den zugrunde gelegten österreichischen Heizträgermix lt. Statistik Austria [97] zurückzuführen. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt im Worst Case 1:7,7 und im Best Case 1:8,2.

#### **6.7.1.4 Dominanzanalyse – Abfallaufkommen - Variante 1**

Das für die Bestandssanierung mit „Niedrigenergiehaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (NEH+)“ verursachte jährliche Abfallaufkommen beträgt für den Worst Case ca. 1,5 Mio.°t und für den Best Case ca. 0,9 Mio.°t (siehe Abbildung 49 d). Das niedrigere Abfallaufkommen wird mit Aufbauten erreicht, die eine gute Lösbarkeit der zusammengeführten Bauprodukte und Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen aufweisen. Der negative, also vermiedene Abfall in der Höhe von ca. 0,3 Mio.°t pro Jahr wird durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung des sanierten Wohngebäudebestands und durch die solare Energieerzeugung mittels PV und Solarthermie erlangt. Jedenfalls zeigt sich, dass bei einer qualitativ hochwertigen Gebäudesanierungen nicht nur auf die Energieeffizienz, sondern auch auf die Kreislauffähigkeit der zur Auswahl stehenden Sanierungs- und Modernisierungslösungen zu achten ist. Dadurch soll verhindert werden, dass Sanierungs- und Modernisierungstechnologien zwar wesentlich zum Erreichen der Klimaschutz- und Energieziele beitragen, aber im Gegenzug zu einem Deponieproblem führen können.

### **6.7.2 Dominanzanalyse – Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (NEH+) – Variante 2**

Das Einsparpotential durch Bestandssanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, einschließlich der Nutzung von PV & und Solarthermie (NEH+) bezogen auf den gesamten österreichischen Gebäudebestand – Variante 2 wird im Nachfolgenden für die ausgewählten Indikatoren dargestellt.

### 6.7.2.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 2

Das Einsparpotential an Treibhausgasen durch eine thermische Sanierung und energetische Modernisierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH+“ ist in Abbildung 50 a dargestellt. Die Indikatorergebnisse – Treibhauspotential (GWP) der Variante 2 zeigen, dass ein Einsparpotential von ca. 20 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr im Worst Case und ca. 34 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Best Case durch eine Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (NEH+), einschließlich der Installation von PV- und Solarthermie-Anlagen erreicht werden kann. Im Best Case muss für eine vollständige thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands durchschnittlich ca. 3,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr aufgewendet werden. Im Worst Case ist ein um fast 20 % höherer Aufwand (ca. 4,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr) nötig. Der im Vergleich zur Variante 1 – Wohngebäudebestand geringere Unterschied zwischen dem Worst und Best Case ist auf den hohen Anteil an hinterlüfteten Fassadenkonstruktionen bezogen auf den Nichtwohngebäudebestand zurückzuführen. Diese sind aufgrund des geringeren Materialinputs energieeffizienter, als ein funktional gleichwertiges Wärmedämmverbundsystem (WDVS). Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt im Worst Case 1:4,8 und im Best Case 1:9,5.

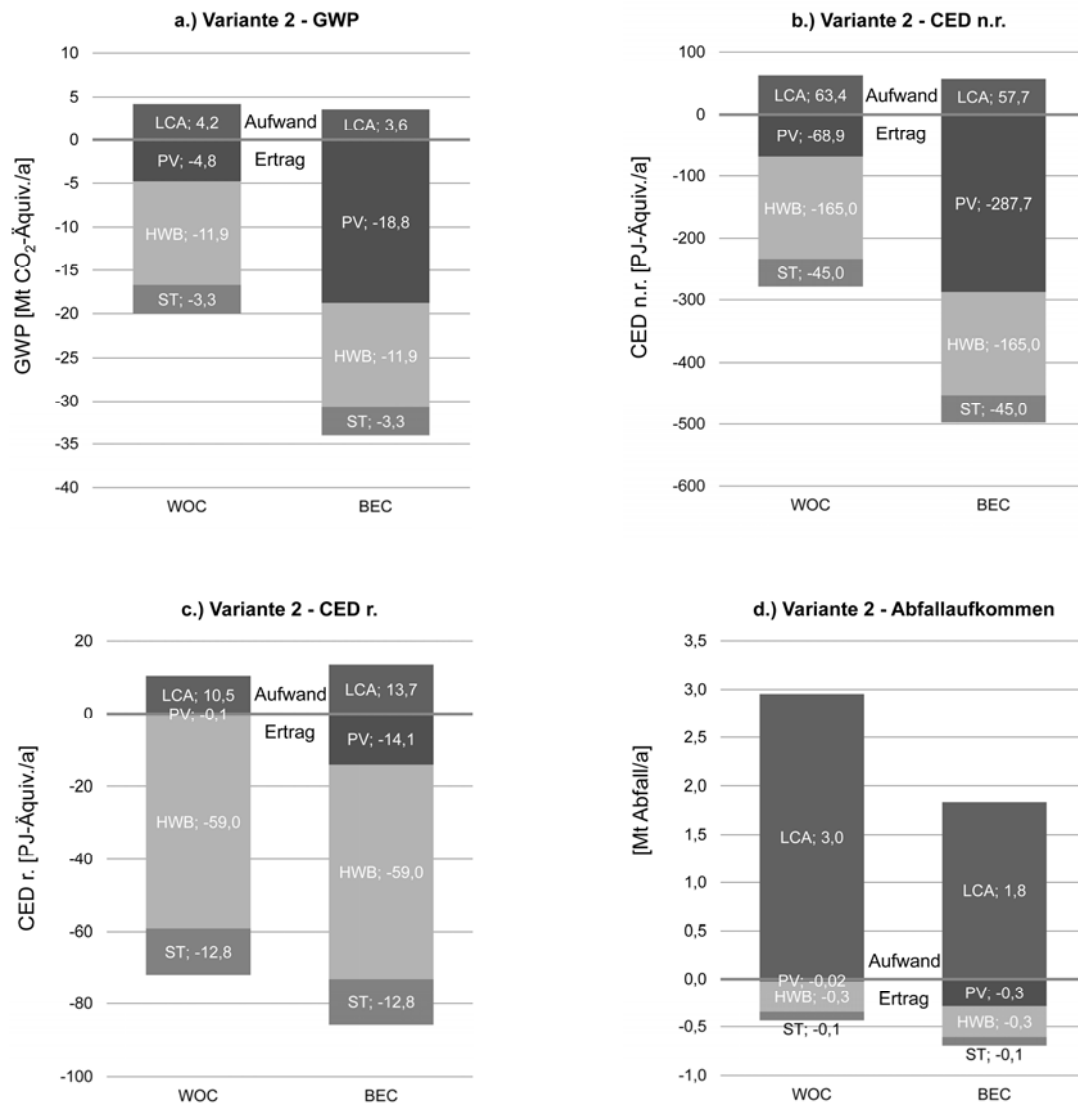


Abbildung 50 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH+) – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.7.2.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 2

Das Einsparpotential hinsichtlich nicht erneuerbarer Energieträger durch eine Sanierung des österreichischen Gebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH+“ beträgt für den Worst Case ca. 279 PJ-Äquivalente pro Jahr und für den Best Case ca. 498 PJ-Äquivalente pro Jahr (siehe Abbildung 50 b). Das größte Einsparpotential ist im Worst und Best Case durch die Reduktion des Heizwärme-Bedarfs gegeben. Im Best Case wird mittels solarer Stromerzeugung ein annähernd gleich hohes Einsparpotential erreicht, da Single-SI-Paneele mit dem höchsten Wirkungsgrad bilanziert wurden. Für den Best Case müssen ca. 58 PJ-Äquivalente pro Jahr und für den Worst Case ca. 63 PJ-Äquivalente pro Jahr aufgewendet werden. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:4,4 und für den Best Case 1:8,6.

Folglich können durch Auswahl von ökoeffizienten thermischen Sanierungsmaßnahmen (Best Case) jährlich weitere 5 PJ-Äquivalente eingespart werden. Der Unterschied zwischen dem Best und Worst Case ist im Vergleich zur Variante 1 – Wohngebäudebestand eher gering. Dies ist auf die höheren Anteil von ökoeffizienten Sanierungsmaßnahmen bezogen auf den Nichtwohngebäudebestand zurückzuführen, wie beispielsweise der Einsatz von hinterlüfteten Fassaden anstatt von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS).

### 6.7.2.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 2

Das Einsparpotential hinsichtlich erneuerbarer Energieträger beträgt für den Worst Case ca. 72 PJ-Äquivalente pro Jahr und für den Best Case ca. 86 PJ-Äquivalente pro Jahr (siehe Abbildung 50 c). Der Aufwand ist für den Worst Case etwas geringer (10,5 PJ-Äquivalente pro Jahr), als für den Best Case (13,7 PJ-Äquivalente pro Jahr). Das größte Einsparpotential ist für den Worst und Best Case durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung (59 PJ-Äquivalente pro Jahr) gegeben. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:6,8 und für den Best Case 1:6,3. Das vergleichsweise schlechtere Aufwand-Ertrag-Verhältnis des Best Case ist durch den vermehrten stofflichen Einsatz von erneuerbaren Energieträgern (Holzfaserdämmplatten etc.) bei der Bestandssanierung begründet. Dies ist jedoch hinsichtlich der Nutzung von erneuerbaren Ressourcen und der CO<sub>2</sub>-Speichereffekte positiv zu werten.

### 6.7.2.4 Dominanzanalyse – Abfallaufkommen - Variante 2

Die Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH+“ verursacht im Worst Case ein jährliches Abfallaufkommen von ca. 3,0 Mio.°t und für den Best Case ein wesentlich geringeres Abfallaufkommen von 1,8 Mio.°t (siehe Abbildung 50 d). Dafür wird ein negatives Abfallaufkommen von 0,4 bis 0,5 Mio.°t/a einerseits durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung und andererseits durch die Energieerzeugung mittels Photovoltaik und Solarthermie in beiden Szenarien erreicht. D.h., es wird durch eine Auswahl von thermischen Sanierungsvarianten und energetischen Modernisierungsmaßnahmen (Single-SI-Paneele) mit guter Lösbarkeit und Trennbarkeit deutlich weniger Abfall verursacht. Verdeutlicht wird dies, wenn vom berechneten Abfallaufkommen, welches durch die Sanierung des österreichischen Gebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH+“ verursacht wird, das negative Abfallaufkommen abgezogen wird. Für den Worst Case berechnet sich ein Abfallaufkommen von 2,6 Mio.°t/a (3,0 Mio.°t/a abzgl. 0,4 Mio.°t/a) und für den Best Case von 1,3 Mio.°t/a (1,8 Mio.°t/a abzgl. 0,5 Mio.°t/a). Dies entspricht einer Differenz von 50 % bezogen auf den Worst Case und 100 % bezogen auf den Best Case!

### **6.7.3 Dominanzanalyse – Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (NEH+) - Variante 3**

Das Einsparpotential durch Bestandssanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, einschließlich der Nutzung von PV & und Solarthermie (NEH+) bezogen auf den gesamten österreichischen Gebäudebestand – Variante 3 wird im Nachfolgenden für die ausgewählten Indikatoren dargestellt.

#### **6.7.3.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 3**

Das Einsparpotential an Treibhausgasen durch eine thermische Sanierung und energetische Modernisierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH+“ ist in Abbildung 51 a für die Variante 3 dargestellt. Die Indikatorergebnisse – Treibhauspotential (GWP) der Variante 3 zeigen, dass ein jährliches Einsparpotential von ca. 34 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Best Case und ca. 20 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Worst Case erreicht werden kann. Im Best Case müssen dafür ca. 3,5 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und im Worst Case ca. 5,1 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr aufgewendet werden. Dies entspricht einem Mehraufwand von 1,6 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr, der durch den Einsatz von weniger ökoeffizienten Sanierungslösungen verursacht wird. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Best Case 1:9,7 und für den Worst Case 1:3,9. Dies macht deutlich, dass durch die Auswahl von PV-Paneelen mit hohem Wirkungsgrad und ökoeffizienten thermischen Sanierungsmaßnahmen ein wesentlich höheres Einsparpotential erlangt werden kann.

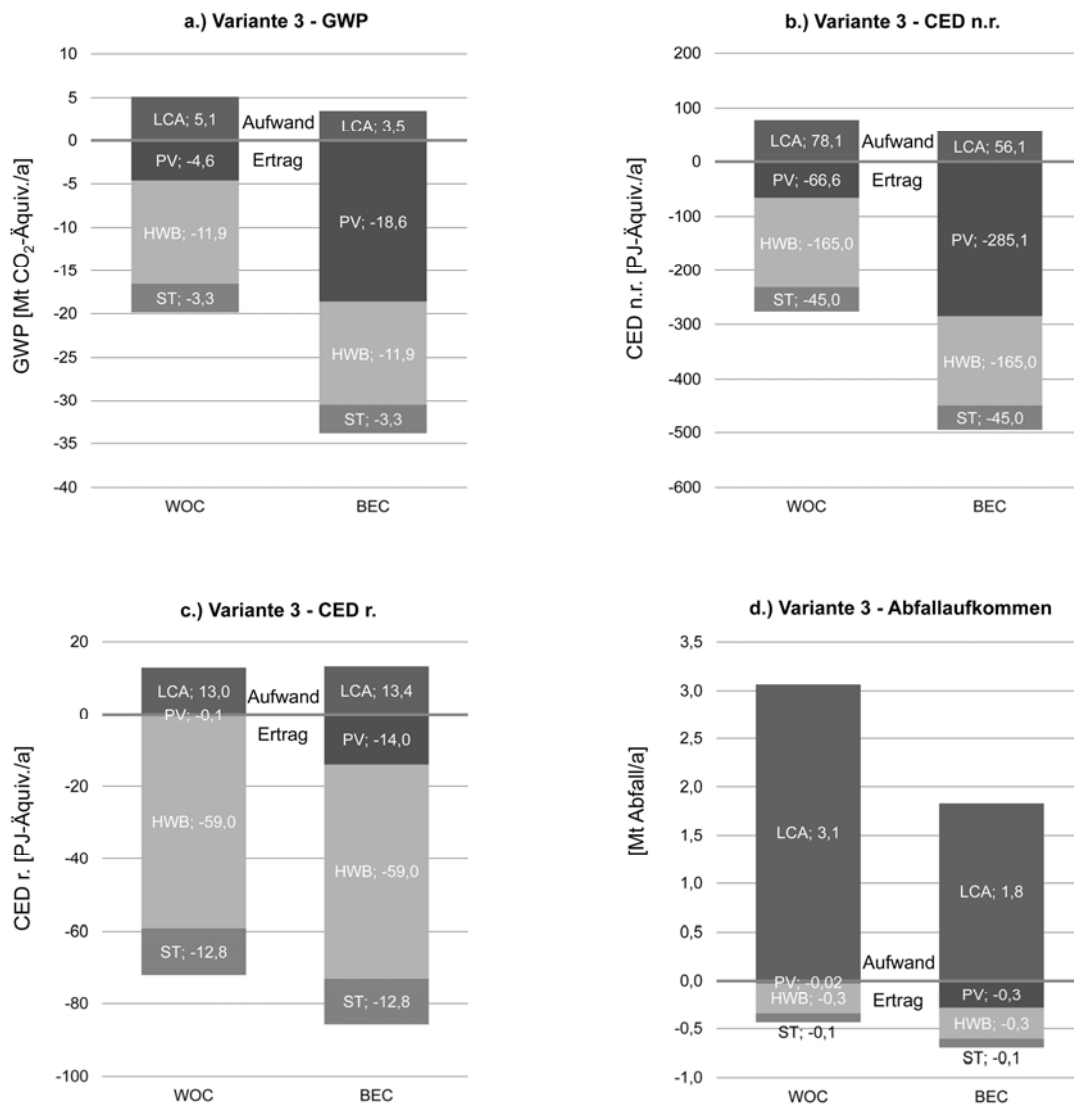


Abbildung 51 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH+) – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.7.3.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 3

Für die Variante 3 wurde ein jährliches Einsparpotential hinsichtlich nicht erneuerbarer Energieträger von ca. 277 PJ-Äquivalente für den Worst Case und ca. 495 PJ-Äquivalente für den Best Case ermittelt (siehe Abbildung 51 b). Das größte Einsparpotential ist im Worst und Best Case durch die Reduktion des Heizwärme-Bedarfs gegeben. Für den Best Case trägt die Stromerzeugung mittels Single-SI-Paneelen noch wesentlich zum Einsparpotential bei. Für den Best Case müssen 56 PJ-Äquivalente pro Jahr und für den Worst Case ca. 78 PJ-Äquivalente pro Jahr aufgewendet werden. D.h., es können durch Auswahl von ökoefizienten thermischen Sanierungsmaßnahmen und energetischen Modernisierungsmaßnahmen weitere 22 PJ-Äquivalente pro Jahr eingespart werden. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:3,5 und für den Best Case 1:8,8.

### **6.7.3.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 3**

Das Einsparpotential hinsichtlich erneuerbarer Energieträger beträgt für den Worst Case ca. 72 PJ-Äquivalente pro Jahr und für den Best Case ca. 86 PJ-Äquivalente pro Jahr (siehe Abbildung 51 c). Der Aufwand ist für den Worst Case etwas geringer (13,0 PJ-Äquivalente pro Jahr), als für den Best Case (13,4 PJ-Äquivalente pro Jahr). Das größte Einsparpotential wird mit einer Reduzierung des Energieverbrauchs für Raumheizung (59,0 PJ-Äquivalente pro Jahr) erreicht. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt für den Worst Case 1:5,5 und für den Best Case 1:6,4.

### **6.7.3.4 Dominanzanalyse – Abfallaufkommen - Variante 3**

Die Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH+“ verursacht im Worst Case ein jährliches Abfallaufkommen von ca. 3,1 Mio.°t und im Best Case ein wesentlich geringeres Abfallaufkommen von 1,8 Mio.°t (siehe Abbildung 51 d). Im Gegenzug wird durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung sowie durch die solare Energieerzeugung mittels Solarthermie und PV ein negatives Abfallaufkommen von 0,4 bis 0,5 Mio.°t/a in beiden Szenarien erreicht. Für den Worst Case berechnet sich ein Abfallaufkommen von 2,7 Mio.°t/a (3,1 Mio.°t/a abzgl. 0,4 Mio.°t/a) und für den Best Case von 1,3 Mio.°t/a (1,8 Mio.°t/a abzgl. 0,5 Mio.°t/a). Dies entspricht einer Differenz von ca. 50 % bezogen auf den Worst Case und ca. 100 % bezogen auf den Best Case. Damit konnte aufgezeigt werden, dass die Auswahl von thermischen Sanierungsvarianten mit geringen ökologischen Umweltwirkungen sowie von ökoeffizienten Modernisierungsmaßnahmen (PV-Anlage mit Single-SI-Paneelen) hinsichtlich des künftigen Abfallaufkommens entscheidend ist.

## **6.8 Dominanzanalyse – Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)**

In diesem Kapitel wird das Aufwand-Ertrag-Verhältnis von thermischen Sanierungsmaßnahmen mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) erläutert. Die stofflichen und energetischen Aufwendungen der thermischen Sanierung werden wie zuvor unter dem Begriff „LCA“ zusammengefasst und mit den Erträgen aus der Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung gegenübergestellt (Kategorie „HWB“). Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den stofflichen und energetischen Aufwand (positive Werte) für die Bestandssanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten im Vergleich zu den Erträgen durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung (negative Werte).



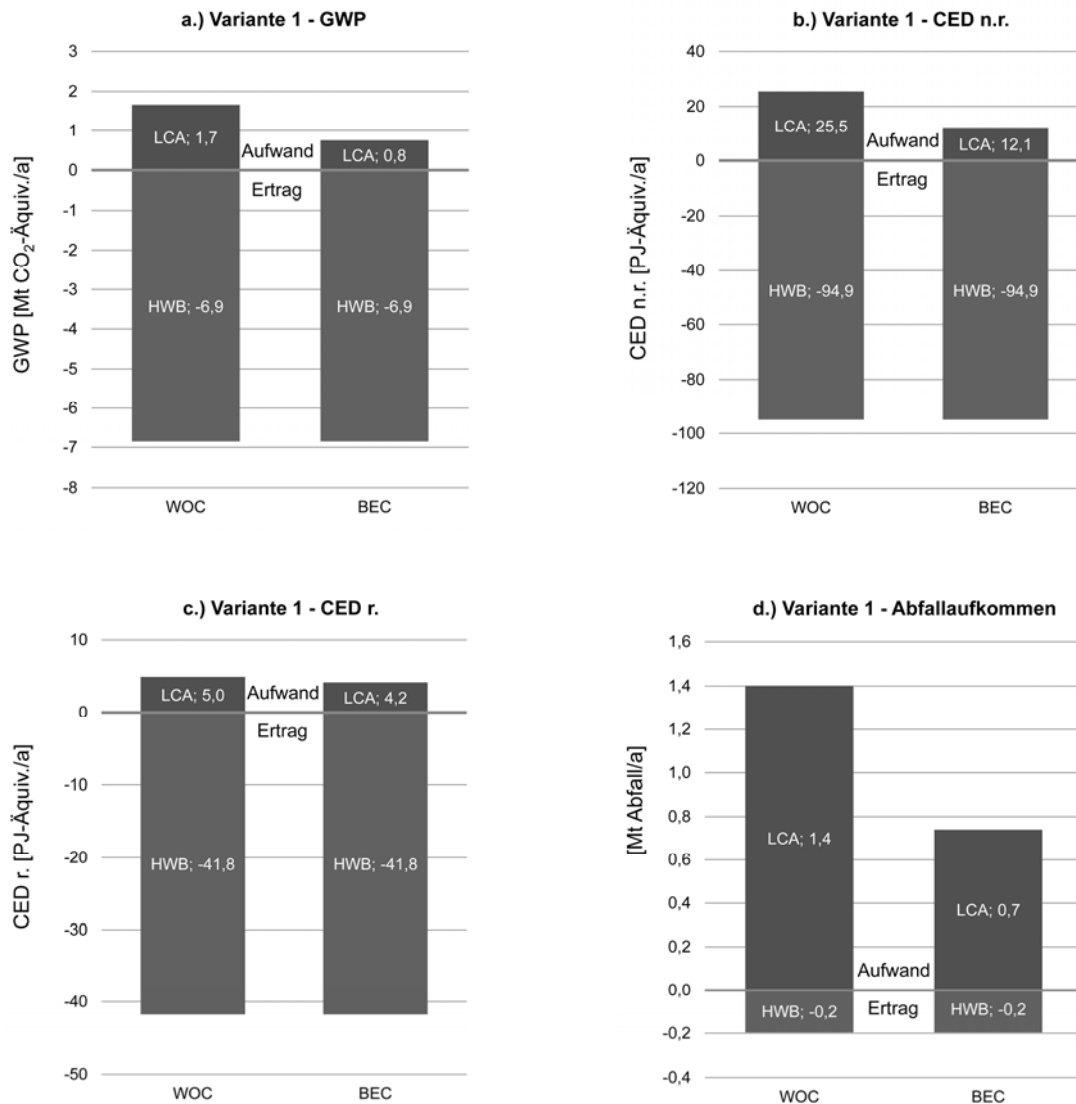


Abbildung 52 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH) – Variante 1 – Wohngebäudebestand

## 6.8.1 Dominanzanalyse - Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten - Variante 1

Das Einsparpotential durch Bestandssanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) bezogen auf den österreichischen Wohngebäudebestand – Variante 1 wird im Nachfolgenden für die ausgewählten Indikatoren dargestellt.

### 6.8.1.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 1

Das Einsparpotential an Treibhausgasen ist für beide Szenarien der Variante 1 – Wohngebäudebestand gleich hoch, nämlich 6,9 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr (siehe Abbildung 52 a). Im Worst Case werden 1,7 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr durch thermische Sanierungsmaßnahmen verursacht. Im Best Case werden jedoch nur 0,75 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr durch die thermische Sanierung des Wohngebäudebestands verursacht. Dadurch wird deutlich, dass durch die Auswahl von lebenszyklusoptimierten Sanierungsvarianten ein weiteres Einsparpotential von ca. 0,9 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr genutzt werden kann. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt im Worst Case 1:4,1 und im Best Case 1:9,2.

### **6.8.1.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 1**

Mit einer thermischen Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands mit mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) könnte eine Einsparung von 95 PJ-Äquivalente pro Jahr bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) erreicht werden (siehe Abbildung 52 b). Bei Anwendung von ökoeffizienten thermischen Sanierungsmaßnahmen (Best Case) ist ein Aufwand von 12 PJ-Äquivalente pro Jahr erforderlich. Im Worst Case ist für den gleichen Einspareffekt ein wesentlich höherer Aufwand von 26 PJ-Äquivalente pro Jahr notwendig. Im Vergleich zum Best Case ist der Aufwand um ca. 117 % höher. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag beträgt im Worst Case 1:3,7 und im Best Case 1:7,9. Auch hier spiegelt sich der Nutzen von ökoeffizienten Sanierungslösungen mit langer Lebensdauer wider.

### **6.8.1.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 1**

In der Abbildung 52 c sind die Indikatorergebnisse für den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) der Variante 1 (Wohngebäudebestand) dargestellt. Zur thermischen Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands mit Niedrigenergiehaus-Komponenten ist im Best Case ein Aufwand von 4,2 PJ-Äquivalente pro Jahr und im Worst Case von 5,0 PJ-Äquivalente pro Jahr erforderlich, um ein jährliches Einsparpotential von 42 PJ-Äquivalente nutzen zu können. Das Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen beträgt für den Worst Case 1:8,4 und für den Best Case 1:10.

### **6.8.1.4 Dominanzanalyse – Abfallaufkommen – Variante 1**

Die thermische Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) verursacht ein jährliches Abfallaufkommen von 1,4 Mio.°t im Worst Case und 0,7 Mio.°t im Best Case (siehe Abbildung 52 d). Der geringere Heizwärmebedarf des sanierten Wohngebäudebestands führt zu einer Absenkung des Abfallaufkommens um 0,2 Mio.°t pro Jahr. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lösbarkeit der zusammengeführten Bauprodukte hinsichtlich des Instandsetzungsaufwands und die Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen hinsichtlich der Höhe des künftigen Abfallaufkommens wesentlich sind.

## **6.8.2 Dominanzanalyse – Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) - Variante 2 & 3**

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Dominanzanalyse bei einer Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) für die Variante 2 & 3 dargestellt.

### **6.8.2.1 Dominanzanalyse – GWP- Variante 2 & 3**

Das Einsparpotential infolge einer thermischen Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) ist in der Abbildung 53 a dargestellt. Die Indikatorergebnisse – Treibhauspotential (GWP) der Variante 2 zeigen, dass ein Einsparpotential von 12 Mio.°t. CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr durch eine thermische Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten erreicht werden kann. Im Best Case muss für eine vollständige thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands durchschnittlich ca. 1,4 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr aufgewendet werden. Im Worst Case werden jedoch 3,0 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr verursacht. D.h. für den gleichen Einspareffekt ist ein im Vergleich zum Best Case um 114 % höherer CO<sub>2</sub>-Ausstoß die Folge, wodurch die Relevanz von lebenszyklusoptimierten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen aufgezeigt wird.

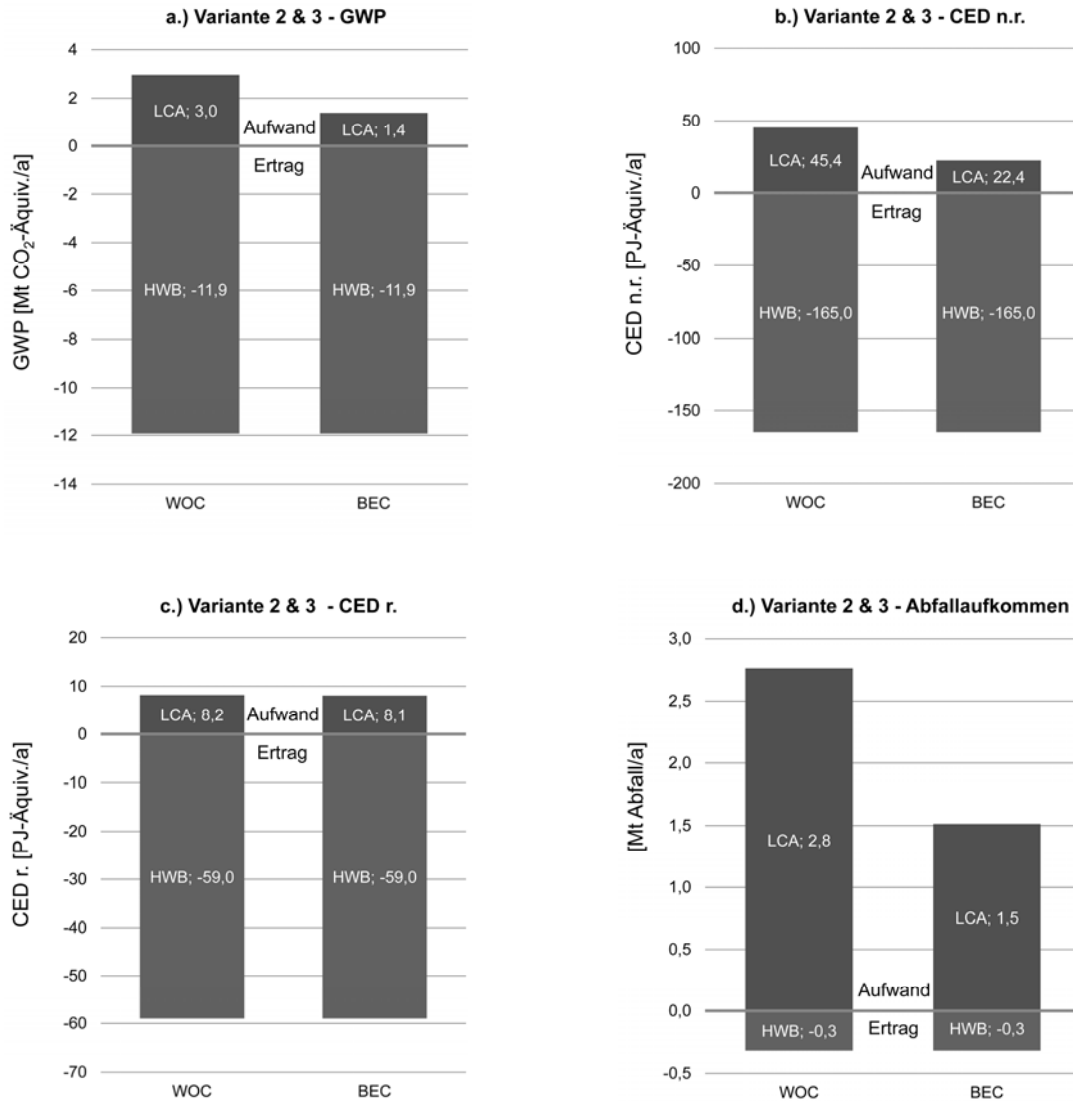


Abbildung 53 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH) – Variante 2 & 3 – Gesamter Gebäudebestand

### 6.8.2.2 Dominanzanalyse – CED n.r. - Variante 2 & 3

Eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) würde zu einer Einsparung von 160 PJ-Äquivalente pro Jahr bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) führen (siehe Abbildung 53 b). Durch die Auswahl von ökoeffizienten thermischen Sanierungsmaßnahmen (Best Case) kann der erforderliche Sanierungsaufwand auf 22 PJ-Äquivalente pro Jahr beschränkt werden. Im Worst Case ist hingegen ein wesentlich höherer Aufwand von 45 PJ-Äquivalente pro Jahr erforderlich. Im Vergleich zum Best Case ist der Aufwand zur Erlangung des gleich hohen Einsparpotentials um ca. 104 % höher. Dadurch wird die Relevanz von funktional gleichwertigen Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen mit hoher Ökoeffizienz sowie langer Lebensdauer aufgezeigt.

### 6.8.2.3 Dominanzanalyse – CED r. - Variante 2 & 3

In der Abbildung 53 c sind die Indikatorergebnisse für den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) dargestellt. Zur thermischen Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH“ ist ein Aufwand zwischen 8,1 und 8,2 PJ-Äquivalente pro Jahr für beide Szenarien erforderlich, um eine Einsparung von ca. 59 PJ-Äquivalente

pro Jahr zu erreichen. Die relativ hohe Einsparung an erneuerbaren Energieträgern ist auf den bilanzierten österreichischen Heizträgermix lt. Statistik Austria [97] zurückzuführen, der anteilig erneuerbare Energieträger beinhaltet (z.B. Holz, Fernwärme etc.). Dieses Einsparpotential sollte jedoch für die Substitution von nicht erneuerbaren Energieträgern (Erdöl, Erdgas etc.) genutzt werden.

#### **6.8.2.4 Dominanzanalyse – Abfallaufkommen - Variante 2 & 3**

Die Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH“ verursacht im Worst Case ein jährliches Abfallaufkommen von ca. 2,8 Mio.°t und im Best Case ein wesentlich geringeres Abfallaufkommen von 1,5 Mio.°t (siehe Abbildung 52 d). Des Weiteren wird durch die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung ein negatives Abfallaufkommen von 0,3 Mio.°t/a in beiden Szenarien erreicht. D.h., es kann durch die Auswahl von kreislauffähigen Sanierungsvarianten mit langer Lebensdauer der Anstieg des künftigen Abfallaufkommens deutlich eingedämmt werden. Verdeutlicht wird dies, wenn vom berechneten Abfallaufkommen, welches durch die Sanierung des österreichischen Gebäudebestands auf den definierten Gebäude-Energiestandard „NEH“ verursacht wird, das negative Abfallaufkommen abgezogen wird. Für den Worst Case berechnet sich ein Abfallaufkommen von 2,5 Mio.°t/a (2,8 Mio.°t/a abzgl. 0,3 Mio.°t/a) und für den Best Case von 1,2 Mio.°t/a (1,5 Mio.°t/a abzgl. 0,3 Mio.°t/a). Dies entspricht einer Differenz von 48 % bezogen auf den Worst Case und 108 % bezogen auf den Best Case!

## 7 Analyse des Restpotentials

In diesem Kapitel wird das Restpotential nach einer thermischen Sanierung und energetischen Modernisierung des österreichischen Gebäudebestands mittels Niedrigenergie- oder Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie dargestellt. Das ermittelte Restpotential kann für weitere alternative Maßnahmen hinsichtlich der Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz genutzt werden, wie beispielsweise durch einen Wechsel von nicht erneuerbare auf erneuerbare Energieträger (Biomasse statt fossile Brennstoffe, Windkraft etc., aber ohne Photovoltaik und Solarthermie bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand, da dieses Potential bereits in dieser Arbeit berücksichtigt wurde).

Vorteil dieser Bilanzierung ist, dass keine Gutschriften für die solar erzeugten Energien zu vergeben sind, weshalb der Einfluss des substituierten Energieträgermix von untergeordneter Bedeutung ist. Diese Form der Bilanzierung ermöglicht auch, die Fragestellungen hinsichtlich des restlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bzw. Energiebedarfs nach einer umfassenden Bestandssanierung zu beantworten. Zuerst werden die variantenabhängigen Stromverbrauchs-Kennzahlen und der jeweilige Nutzenergiebedarf hinsichtlich der Warmwasserbereitstellung erläutert. Des Weiteren wird das Restpotential für die jeweilige Variante anhand der zugrunde gelegten Ökobilanz-Indikatoren aufgezeigt. Abschließend erfolgt noch ein Vergleich des Abfallaufkommens hinsichtlich der Höhe und prozentualen Verteilung der möglichen Verwertungswege.

### 7.1 Bilanzierung des Restpotentials

In diesem Kapitel wird zuerst das Restpotential hinsichtlich des Strombedarfs aufgezeigt, welcher nach einer energetischen Modernisierung des österreichischen Gebäudebestands mit Photovoltaik-Anlagen trotzdem noch mit dem derzeitigen österreichischen Stromerzeuger-Mix zu decken ist. Anschließend der variantenabhängige Nutzenergiebedarf für die vier bilanzierten Gebäude-Energiestandards dargestellt.

#### 7.1.1 Restpotential - Strombedarf

Für die Bilanzierung wurde der lt. E-Control [25] erhobene Stromverbrauch für das Jahr 2006 mit ca. 62 TWh/a Strom (Endverbrauch) zugrunde gelegt, wodurch eine Schnittstelle zwischen der Dissertation und der Studie „Regenerative Energie in Österreich“ [59] geschaffen wird. In der Tabelle 7-1 sind die Stromverbrauchs-Kennzahlen nach einer energetischen Modernisierung des Gebäudebestands für die Variante 1 – Wohngebäudebestand und für die Variante 2 & 3 – Gesamter Gebäudebestand dargestellt. Die Spalte „AT – 2006“ zeigt den Stromverbrauch in Österreich im Jahr 2006. In der Spalte „Variante 1“ wurde nur der Stromverbrauch der privaten Haushalte (16,1 TWh/a) bilanziert, da für diese Variante nur der Wohngebäudebestand betrachtet wurde. Für die Variante 2 & 3 wurde hingegen der gesamte Gebäudebestand erfasst, weshalb mit Ausnahme der nicht gebäudenutzungsbezogenen Kategorien „Verkehr“ und „Industrie“ der gesamte Stromverbrauch von 29,7 TWh/a bilanziert wurde.

Tabelle 7-1 Variantenabhängige Stromverbrauchs-Kennzahlen [93]

	Energiebedarf - Endverbrauch [TWh/a]		
	AT - 2006	Variante 1	Variante 2 & 3
Private Haushalte	16,1	16,1	16,1
Öffentliche Gebäude	12,4	-	12,4
Landwirtschaft	1,2	-	1,2
Industrie	28,5	-	-
Verkehr	3,7	-	-
Gesamt	62,0	16,1	29,7

Für die Berechnung des Restpotentials hinsichtlich des Strombedarfs wurde von den variantenabhängigen Stromverbrauchs-kennzahlen das maximale bzw. minimale PV-Potential in Abzug gebracht (siehe Tabelle 7-2). Das jeweilige Ergebnis ist in der Spalte „Rest“ dargestellt. Die positiven Werte zeigen, dass trotz einer umfassenden energetischen Modernisierung des Gebäudebestands mittels PV kein Energieüberschuss erreicht werden kann. Der ermittelte Restbedarf ist weiterhin mit dem österreichischen Strommix abzudecken. Der österreichische Strommix wird deshalb für die Ökobilanzierung hinsichtlich des Restpotentials zugrunde gelegt. Eine weitere Substitution von nicht erneuerbaren Energieträgern mit erneuerbaren Energieträgern (Wasser- und Windkraft, Biomasse etc.) wurde für diese Dissertation nicht weiter behandelt, da der Schwerpunkt auf die thermische Sanierung und energetische Modernisierung des Gebäudebestands gelegt wurde.

Tabelle 7-2 Variantenabhängige Verteilung bzgl. PV-Strom und österreichischer Strommix [93]

	Energiebedarf - Endverbrauch [TWh/a]		
	Gesamt	PV-Strom	Rest
Variante 1 - Max	16,1	7,0	9,1
Variante 1 - Min	16,1	1,1	15,0
Variante 2 & 3 - Max	29,7	17,9	11,8
Variante 2 & 3 - Min	29,7	7,8	21,9

## 7.1.2 Restpotential – Nutzenergiebedarf

In diesem Kapitel wird das Restpotential hinsichtlich Heizwärme, Trinkwarmwasser und Prozessenergien unter 100°C bezogen auf den sanierten österreichischen Wohngebäudebestand (Variante 1) und gesamten Gebäudebestand (Variante 2 & 3) erläutert. Das dargestellte Restpotential kann folglich durch weitere alternative Energieeffizienz-Maßnahmen (Gebäudesteuerung, Effizienz-Steigerung von Heiz-Systemen etc.) genutzt werden, d.h., das Einspar-Potential durch thermische Sanierung mittels Niedrigenergie- und Passivhaus-Komponenten ist bereits genutzt worden.

### 7.1.2.1 Nutzenergiebedarf – Variante 1 - Wohngebäudebestand

Nachfolgend wird der restliche Bedarf an Heizwärme und Trinkwarmwasser bezogen auf den sanierten österreichischen Wohngebäudebestand (Variante 1) dargestellt. Prozessenergien unter 100°C werden nur dem Nichtwohngebäudebestand aufgrund der kommerziellen und gewerblichen Nutzung zugewiesen und folglich nicht für die Variante 1 – Wohngebäudebestand bilanziert. In der Tabelle 7-3 ist der restliche Nutzenergiebedarf für die vier definierten Gebäude-Energiestandards (NEH, NEH+, PH und PH+) dargestellt. In der Spalte „unsaniert“ wurden die statistisch erhobenen Verbrauchskennzahlen vom Jahr 2006 herangezogen und eine Allokation der nachgefragten Wärmemengen für Raumwärme und Trinkwarmwasser nach den beheizten Nutzflächen des Wohn- und Nichtwohngebäudebestands wurde durchgeführt.

Tabelle 7-3 Nutzenergiebedarf – Variante 1 - Wohngebäudebestand

Restlicher Bedarf an:	Variante 1 - Nutzenergie [PJ/a]				
	unsaniert	NEH	NEH+	PH	PH+
Heizwärme	114	35	22	23	10
Trinkwarmwasser	22	22	16	22	16
Prozessenergie <100°C	0	0	0	0	0
Gesamt	136	57	38	46	26

Das bedeutende Einsparpotential ist beim Vergleich der Kennzahlen der Spalte „unsaniert“ mit den vier bilanzierten Gebäude-Energiestandards ersichtlich. In der Zeile „Heizwärme“ und „Trinkwarmwasser“ sind beim Kennzahlen-Vergleich zwischen der Variante NEH und NEH+ sowie PH und PH+ das Ausmaß des Solarthermie-Potentials hinsichtlich Heizungsunterstützung (13 PJ/a) und Warmwasserbereitstellung (6 PJ/a) erkennbar.

Der geringste Nutzenergiebedarf wird nach einer thermischen Sanierung und energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) erreicht. Die Variante „Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)“ weist im Vergleich dazu einen um den Faktor 2,2 größeren Nutzenergiebedarf auf.

### 7.1.2.2 Nutzenergiebedarf – Variante 2 & 3 – Gesamter Gebäudebestand

Im Vergleich zur Variante 1 wird der restliche Bedarf an Heizwärme, Trinkwarmwasser und Prozessenergien unter 100°C bezogen auf den gesamten österreichischen Gebäudebestand (Variante 2 & 3) bilanziert. Eine Übersicht über den Nutzenergiebedarf für die Warmwasserbereitstellung ist in Tabelle 7-4 für die Varianten 2 & 3 ersichtlich. In der Studie „Regenerative Energie in Österreich“ [59] wurde angemerkt, dass mittels Solarthermie nur Prozessenergien unter 120°C substituierbar sind. Da höhere Prozessenergie-Temperaturen grundsätzlich für die Produktion und nicht für die Gebäudenutzung notwendig sind, wird bei der nachfolgenden Bilanzierung nur der Energiebedarf von Prozessenergien unter 100°C berücksichtigt.

Tabelle 7-4 Nutzenergiebedarf – Variante 2 &amp; 3 – Gesamter Gebäudebestand

Restlicher Bedarf an:	Variante 2 & 3 - Nutzenergie [PJ/a]				
	unsaniert	NEH	NEH+	PH	PH+
Heizwärme	216	58	36	35	13
Trinkwarmwasser	38	38	27	38	27
Prozessenergie <100°C	28	28	16	28	16
Gesamt	282	124	79	101	56

## 7.2 Restpotential – Variante 1 – Wohngebäudebestand

Nachfolgend wird das Restpotential für die Variante 1 – Wohngebäudebestand für den Ökobilanz-Indikator Treibhauspotential (GWP), den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) und den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) in Abhängigkeit von den vier definierten Gebäude-Energiestandards erläutert.

### 7.2.1 Restpotential – GWP - Variante 1 - Wohngebäudebestand

In der Abbildung 54 sind die Ökobilanz-Kennwerte des Indikators „Treibhauspotential (GWP)“ für den sanierten österreichischen Wohngebäudebestand in Abhängigkeit von den vier definierten Gebäude-Energiestandards dargestellt. Die Bandbreiten werden durch die Best und Worst Case-Szenarien begrenzt. Die wesentlich größeren Bandbreiten der Varianten NEH+ und PH+ sind auf die unterschiedlichen Wirkungsgrade der PV-Anlagen zurückzuführen. Es zeigt sich, dass nach umfassender thermischer Sanierung und energetischer Modernisierung ein CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 7,6

Mio.°t pro Jahr im Best Case und 11,5 Mio.°t pro Jahr im Worst Case verursacht wird. Für eine weitere Reduktion des Treibhausgaspotentials (GWP) müsste einerseits der Anteil der erneuerbaren Energieträger zur Abdeckung des restlichen Energiebedarfs durch verstärkte Nutzung von Biomasse, Windkraft oder sonstigen alternativen erneuerbaren Energieerzeugungssystemen erhöht werden. Andererseits kann durch eine Verbesserung des Wirkungsgrads der energetischen Modernisierungsmaßnahmen (besonders von PV-Anlagen), aber auch durch eine Verbesserung der Ökoeffizienz der erforderlichen Bauprodukte ein noch höheres Einsparpotential erreicht werden. Zusätzlich sind weitere verbraucherseitige Einsparmaßnahmen notwendig, wie beispielsweise der breite Einsatz von energieeffizienten Geräten und Beleuchtungskörpern oder nutzerabhängige Gebäudesteuerungssysteme. Diese Einflussfaktoren wurden für die Dissertation aber nicht weiter berücksichtigt.

Der Unterschied zwischen dem jeweiligen Best und Worst Case der Variante NEH und der Variante PH beträgt ca. 0,6 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr. Im Vergleich zum Best Case der Varianten NEH+ und PH+ ist dieser Beitrag eher gering, d.h., eine Stromerzeugung mittels Single-SI-Paneelen ist in diesem Fall deutlich ökoeffizienter. Außerdem darf nicht auf die deutlich höheren Anforderungen an Planer, Ausführende und Nutzer bei einer Sanierung auf Passivhausniveau vergessen werden. Dies betrifft u.a. die erhöhten Anforderungen an die Luftdichtheit der Gebäudehülle oder die Umstellung des Nutzerverhaltens (keine Fensterlüftung).

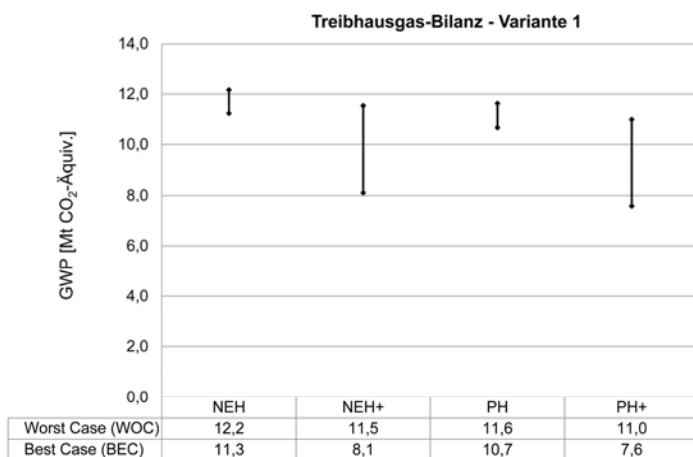


Abbildung 54 Restpotential – GWP - Variante 1 - Wohngebäudebestand

## 7.2.2 Restpotential – CED n.r. - Variante 1– Wohngebäudebestand

Der Vergleich des Energiebedarfs von nicht erneuerbaren Energieträgern nach einer thermischen Sanierung und energetischen Modernisierung des österreichischen Wohngebäudebestands zeigt, dass zwischen einer Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) und einer Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) kaum ein Unterschied besteht (siehe Abbildung 55). Ein deutliche Reduktion des kumulierten Energieaufwands – nicht erneuerbar (CED n.r.) wird durch die Energieerzeugung mittels PV- und Solarthermie-Anlagen erreicht. Im Best Case beträgt die Reduktion ca. 45 PJ/a und im Worst Case ca. 8 PJ/a (Differenz zwischen dem jeweiligen Best und Worst Case der Variante PH und PH+).



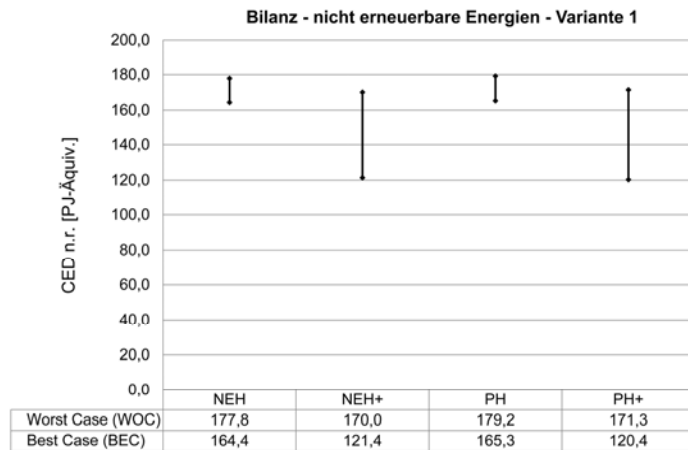


Abbildung 55 Restpotential – CED n.r. - Variante 1 – Wohngebäudebestand

### 7.2.3 Restpotential – CED r. - Variante 1 – Wohngebäudebestand

In der Abbildung 56 ist der restliche Energiebedarf des sanierten Wohngebäudebestands an erneuerbaren Energieträgern in Abhängigkeit vom definierten Gebäude-Energiestandard dargestellt. Die größere Bandbreite der Varianten NEH+ und PH+ wird maßgeblich durch die unterschiedlichen Wirkungsgrade der bilanzierten PV-Anlagen verursacht. Der höchste Kennwert von 60,9 PJ/a wurde für den Worst Case der Variante NEH ermittelt. Der geringste Energiebedarf von 39,5 PJ/a wird nach einer Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) erreicht. Der Unterschied zwischen einer Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) und einer Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) beträgt ca. 2 PJ/a, der unter anderem durch den zusätzlichen Einsatz von dezentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung erlangt werden kann.

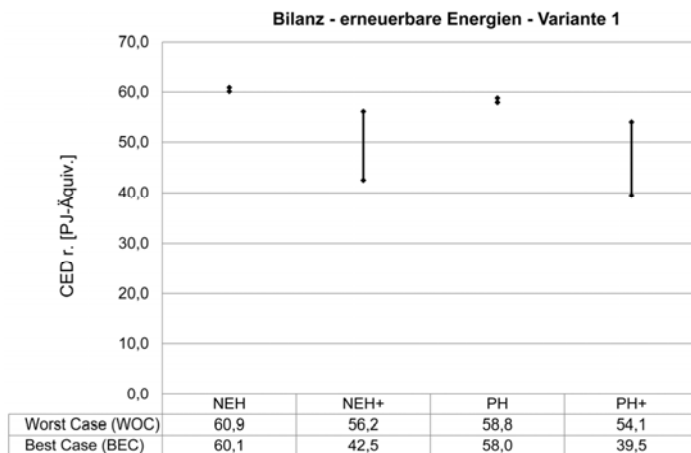


Abbildung 56 Restpotential – CED r. - Variante 1 – Wohngebäudebestand

## 7.3 Restpotential – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

Im Folgenden wird das Restpotential für die Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand für den Ökobilanz-Indikator Treibhauspotential (GWP), den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) und den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) in Abhängigkeit von den vier definierten Gebäude-Energiestandards aufgezeigt. Für die Variante 2 wurde ein Netzverbund für den Warmwassertransport zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden bilanziert. Die Folge ist

eine im Vergleich zur Variante 3 unterschiedliche Aufteilung der PV- und Flachkollektorflächen bezogen auf die solar nutzbaren Dach- und Fassadenflächen. Zur Ermittlung der Relevanz dieses Einflussfaktors wurden deshalb zwei Varianten (2 & 3) berechnet und miteinander verglichen.

### 7.3.1 Restpotential – GWP - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

Die Treibhausgasbilanz nach einer Sanierung des österreichischen Gebäudebestands ist in der Abbildung 57 für die vier definierten Gebäude-Energiestandards dargestellt. Das Minimum von 13,3 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr wird bei einer Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) erreicht (siehe Best Case der Variante PH+). Das Maximum von 25,1 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr wurde für den Worst Case der Variante „Niedrigenergiehaus (NEH)“ ermittelt, d.h. im Vergleich zum Minimum ein fast doppelt so hoher Wert. Der Unterschied zwischen der Variante „Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)“ und „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)“ beträgt zwischen 1,2 bis 1,4 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr.

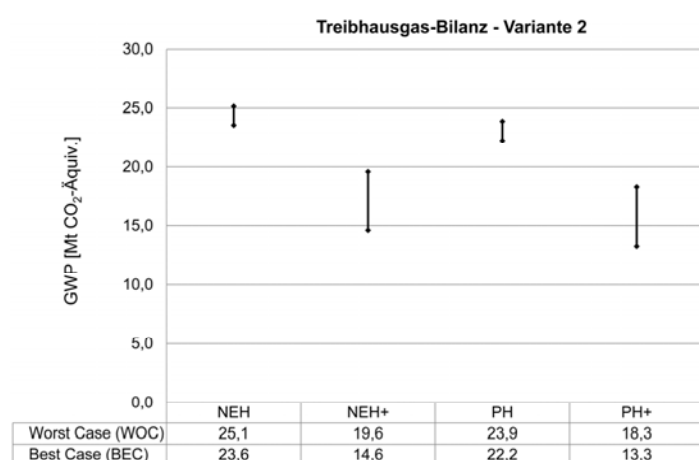


Abbildung 57 Restpotential – GWP - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

### 7.3.2 Restpotential – CED n.r. - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

Eine Gegenüberstellung der Kennwerte der vier definierten Gebäude-Energiestandards zeigt, dass der größte Einspareffekt durch die Nutzung von PV- und Solarthermie-Anlagen mit hohem Wirkungsgrad erreicht wird (siehe Abbildung 58). Das Maximum des kumulierten Energieaufwands – nicht erneuerbar (CED n.r.) stellt der Worst Case der Variante NEH mit 365 PJ/a dar. Der geringste Bedarf an nicht erneuerbarer Energie von 211 PJ/a wurde für den Best Case der Variante PH+ berechnet, d.h. ein um 154 PJ/a geringerer Energiebedarf. Der Unterschied zwischen der Variante NEH und PH beträgt ca. 4 PJ/a. Dies ist im Vergleich zum Einsparpotential durch solare Energieerzeugung verschwindend gering. Durch die Auswahl von ökoefizienten thermischen Sanierungsmaßnahmen können zusätzlich 23 PJ/a eingespart werden. Dies entspricht der Bandbreite der Variante NEH und PH. Die wesentlich größere Bandbreite (72 PJ/a) der beiden anderen Varianten „NEH+ und PH+“ wird durch die unterschiedlichen Wirkungsgrade der bilanzierten PV-Anlagen verursacht.

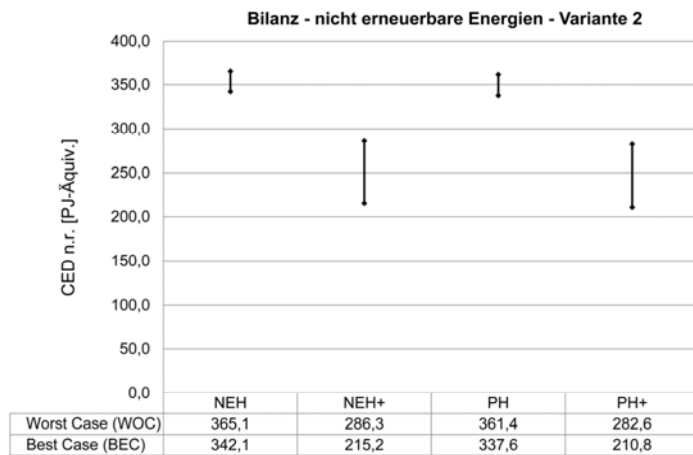


Abbildung 58 Restpotential – CED n.r. - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

### 7.3.3 Restpotential – CED r. - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

Beim Vergleich der Kennwerte der vier definierten Gebäude-Energiestandards in der Abbildung 59 zeigt sich ein ähnliches Bild wie zuvor. Das Maximum des kumulierten Energieaufwands – erneuerbar (CED r.) stellt der Worst Case der Variante NEH mit 118 PJ/a dar. Der geringste Bedarf an erneuerbarer Energie von 62,1 PJ/a wird im Best Case der Variante PH+ erreicht. Der Einsatz von zentralen und dezentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung führt zu einer Einsparung von ca. 4 PJ/a. Dies ist beim Kennwert-Vergleich zwischen dem jeweiligen Best und Worst Case der Variante NEH und PH ersichtlich. Im Vergleich zum maximalen Einsparpotential (ca. 52 PJ/a; Differenz zwischen Worst Case der Variante PH und dem Best Case der Variante PH+) durch solare Energieerzeugung und ökoefiziente Bauproduktauswahl ist dieser Beitrag als geringfügig anzusehen.

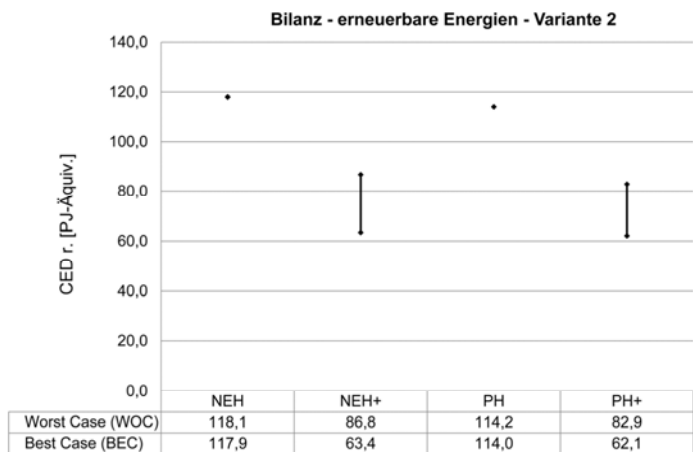


Abbildung 59 Restpotential – CED r. - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand

### 7.4 Restpotential – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

In diesem Kapitel wird das Restpotential für die Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand für den Ökobilanz-Indikator Treibhauspotential (GWP), den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) und den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) dargestellt. Für die Variante 3 wurde kein Netzverbund für den Warmwassertransport zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden bilanziert, wodurch ein geringerer Dachflächenanteil für die Installation von PV-Paneeelen im Vergleich zur Variante 2 zur Verfügung stand.

### 7.4.1 Restpotential – GWP - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

Die im Vergleich zur Variante 2 abgeänderte Bilanzierung des Wärmetransports zwischen Wohn- und Nichtwohngebäude hatte Auswirkungen auf die Allokation der solar nutzbaren Gebäudeflächen für PV und Solarthermie und in weiterer Folge auf die Ökobilanz-Kennwerte der Varianten NEH+ und PH+. Die treibhausgasbezogenen Indikatorwerte sind in der Abbildung 60 in Abhängigkeit von den vier definierten Gebäude-Energiestandards dargestellt. Der Worst Case der Variante NEH+ mit 14,6 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und jener der Variante PH+ mit 13,2 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr unterscheidet sich nur unwesentlich von der Variante 2. Der Best Case der Variante NEH+ bzw. PH+ ist mit 20,6 Mio.°t bzw. 19,3 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr um ca. eine Million höher als jener von der Variante 2. Dies ist auf den geringeren Anteil von solarnutzbaren Dachflächen für die PV-Stromerzeugung zurückzuführen. Das Minimum von 13,2 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr kann mit einer Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten, Solarthermie und Single-SI-Paneelen (PH+) erreicht werden (Best Case der Variante PH+). Der im Vergleich zur Variante 2 um 0,1 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr niedrigere Kennwert ist trotz der um 0,2 TWH/a niedrigen PV-Stromproduktion auf die unterschiedliche flächenbezogene Allokation der bilanzierten Aufbauten (LCA) und auf den zugrunde gelegten österreichischen Strom- und Heizträgermix zurückzuführen.

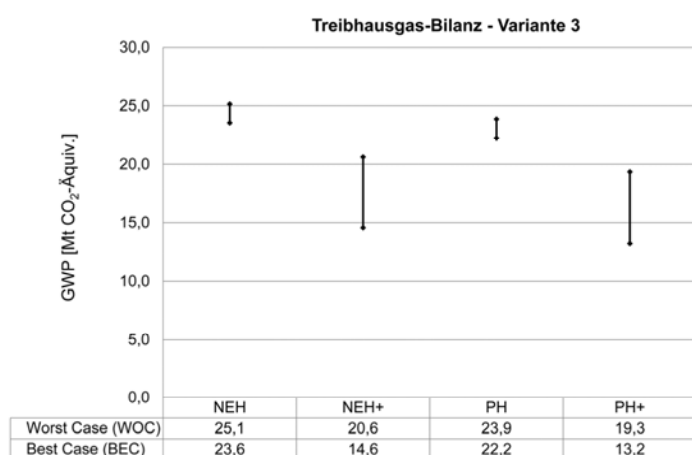


Abbildung 60 Restpotential – GWP - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

### 7.4.2 Restpotential – CED n.r. - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

Beim Vergleich der Kennwerte der vier definierten Gebäude-Energiestandards in der Abbildung 61 zeigt sich, dass der geringste kumulierte Energieaufwand - nicht erneuerbar (CED n.r.) von 210 PJ/a bei einer Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) erreicht werden kann. Im Vergleich zum Maximum von 365 PJ/a (Worst Case der Variante NEH) ein um 155 PJ/a niedriger Energiebedarf. Der Einsatz von zentralen und dezentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung bringt zusätzlich 5 PJ/a. Dies ist beim Vergleich zwischen der Variante NEH+ und PH+ ersichtlich. Durch die Auswahl von dauerhaften und ökoeffizienten Sanierungsmaßnahmen wird jedoch ein wesentlich größeres Einsparpotential von 23 PJ/a erreicht werden. Dies entspricht der Bandbreite der Variante NEH und PH. Die wesentlich größere Bandbreite (ca. 89 PJ/a) der beiden anderen Gebäudestandards NEH+ und PH+ wird maßgeblich durch die unterschiedlichen Wirkungsgrade der bilanzierten PV-Anlagen verursacht. Trotz des vergleichsweise höheren Herstellungsaufwands für Single-SI-Paneele wird dieser in der Nutzungsphase durch eine wesentlich höhere Stromproduktion übertroffen und folglich eine bessere Ökoeffizienz über den gesamten Lebenszyklus im Vergleich zu anderen PV-Anlagentypen erreicht.

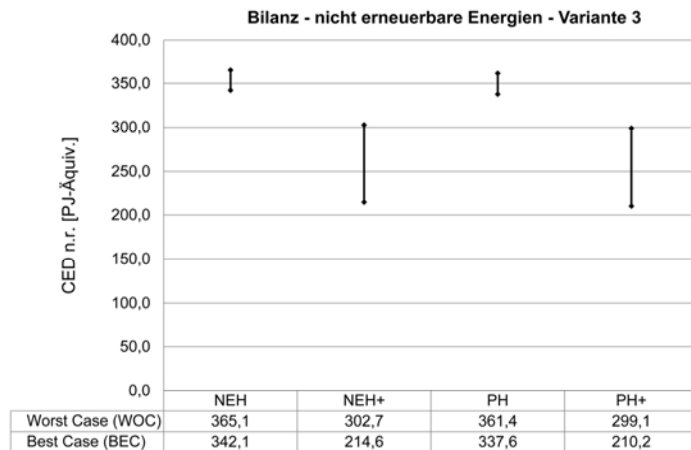


Abbildung 61 Restpotential – CED n.r. - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

### 7.4.3 Restpotential – CED r. – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

Eine Gegenüberstellung der Kennwerte der vier definierten Gebäude-Energiestandards in der Abbildung 62 zeigt ein ähnliches Bild wie für den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.), wobei die Größenordnung um den Faktor 3 niedriger ist. Das Maximum des kumulierten Energieaufwands – erneuerbar (CED r.) stellt der Worst Case der Variante NEH mit 118PJ/a dar. Der geringste Bedarf an erneuerbarer Energie von 62,3 PJ/a wurde für den Best Case der Variante PH+ berechnet. Der Einfluss der zentralen und dezentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ist beim Kennwert-Vergleich zwischen der Variante NEH und PH ersichtlich, mit einer Differenz von ca. 4 PJ/a. Dies ist im Vergleich zum maximalen Einsparpotential (ca. 52 PJ/a) durch solare Energieerzeugung verschwindend gering. Die Auswahl von ökoefizienten Sanierungsmöglichkeiten führt zu keiner nennenswerten Veränderung der berechneten Kennwerte (ca. 0,12 PJ/a). Dies ist beispielsweise beim Vergleich des Best und Worst Case der Variante NEH anhand der fehlenden Bandbreite ersichtlich. Gründe sind der vergleichsweise geringe Einsatz von erneuerbaren Energieträgern einerseits als Bauprodukt (Holz etc.) und andererseits für die Bereitstellung der erforderlichen Prozessenergien für die Bauprodukt-Herstellung.

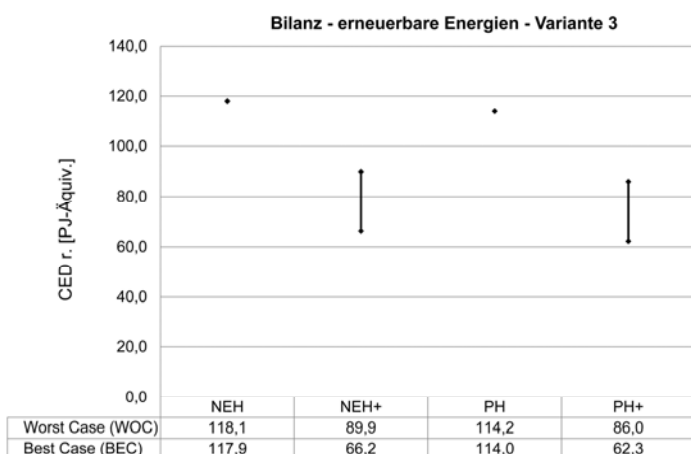


Abbildung 62 Restpotential – CED r. - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand

## 7.5 Abfallaufkommen – Variantenvergleich

Nachfolgend wird für die jeweilige Variante das Abfallaufkommen in Abhängigkeit von den vier bilanzierten Gebäude-Energiestandards erläutert. Zusätzlich wurde eine Unterteilung hinsichtlich der möglichen Verwertungswege (Recycling etc.) durchgeführt, um Aussagen zur Kreislauffähigkeit der anfallenden Baurestmassen machen zu können.

### 7.5.1 Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+)

In der Abbildung 63 sind für die Variante PH+ jeweils der Worst und der Best Case, einschließlich einer Untergliederung nach den möglichen Verwertungswegen dargestellt. Der Best und Worst Case wurde für alle drei bilanzierten Varianten in der Abbildung 63 gegenübergestellt und unterscheidet sich nicht nur in der Höhe sondern auch in der prozentualen Verteilung der anfallenden Baurestmassen hinsichtlich ihrer Verwertungsmöglichkeiten. Der Best Case weist grundsätzlich ein deutlich niedrigeres Abfallaufkommen sowie einen niedrigeren Deponie-Anteil aus. Eine Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands (Variante 1) würde ein Abfallaufkommen im Worst Case von 1,7 Mio. t pro Jahr und im Best Case von 1,0 Mio. t pro Jahr verursachen. Dementsprechend höher ist das Abfallaufkommen für die Variante 2 und 3, wo eine Sanierung des gesamten österreichischen Gebäudebestands bilanziert wurde. Das Maximum liegt bei 3,3 Mio. t pro Jahr und das Minimum bei 2,1 Mio. t pro Jahr. Jedenfalls wird deutlich, dass die Auswahl der Bauprodukte und die konstruktive Durchbildung (Fügetechnik) für das künftige Abfallaufkommen und dessen Kreislauffähigkeit von Bedeutung sind. Vorteilhaft sind leicht lös- und trennbare Aufbauten, die einerseits einen geringeren Instandsetzungsaufwand aufweisen und andererseits in der Rückbauphase zu sortenreineren Baurestmassen mit vergleichsweise hoher Recyclingquote führen. Eine nachhaltige Sanierung des österreichischen Gebäudebestands erfordert deshalb den Einsatz von ökoeffizienten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen mit geringem Abfallaufkommen und hoher Kreislauffähigkeit.

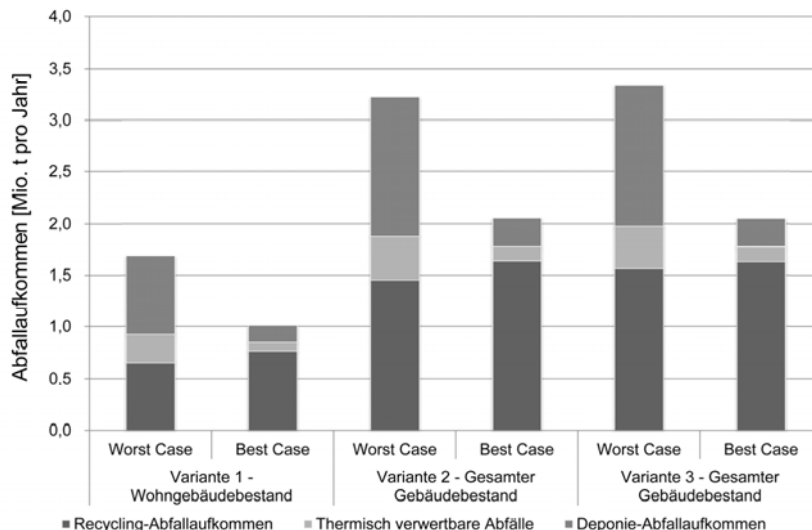


Abbildung 63 Übersicht - Abfallaufkommen – Variante PH+

### 7.5.2 Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)

In der Abbildung 64 ist für die Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)“ jeweils der Worst und der Best Case für die drei bilanzierten Varianten dargestellt. Eine Untergliederung nach Art der Abfallverwertung bzw. Entsorgung wurde vorgenommen. Der Verzicht auf energetische Modernisierungsmaßnahmen mittels PV- und Solarthermie reduziert nur geringfügig das

Abfallaufkommen der Variante 1 – Wohngebäudebestand auf 1,7 Mio.°t pro Jahr im Worst Case und 0,9 Mio.°t pro Jahr im Best Case. Das Abfallaufkommen der Variante 2 und 3 – Gesamter Gebäudebestand reduziert sich um ca. 0,3 Mio.°t pro Jahr. Grund der geringen Absenkung des Abfallaufkommens ist die lange Lebensdauer und der geringe Materialinput der PV- und Solarthermie-Anlagen sowie die Substitution von Bauprodukten für die Feuchteschutzfunktion von Fassaden. Ein weiterer Vorteil ist der vergleichsweise höhere Widerstand von PV- und Solarthermie-Anlagen gegenüber außerplanmäßigen Einwirkungen (z.B. Hagel), der in weiterer Folge zu einem geringeren Instandsetzungsaufwand beim Eintritt des Extremfalls führen würde. Eine Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands (Variante 1) mit Passivhaus-Komponenten (PH) würde ein Abfallaufkommen im Worst Case von 1,6 Mio.°t pro Jahr und im Best Case von 0,9 Mio.°t pro Jahr verursachen. Eine Sanierung des gesamten Gebäudebestands (Variante 2 und 3) würde hingegen ein jährliches Abfallaufkommen von maximal 3,0 Mio.°t im Worst Case und 1,7 Mio.°t im Best Case verursachen.

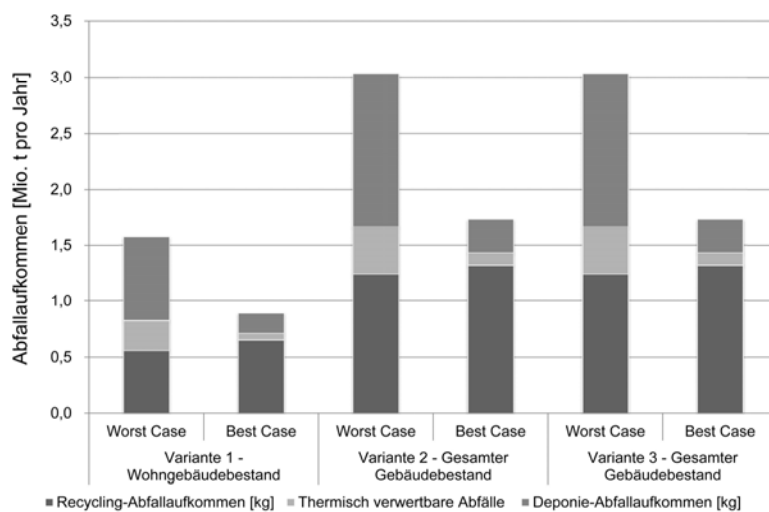


Abbildung 64 Übersicht - Abfallaufkommen – Variante PH

### 7.5.3 Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, PV und ST (NEH+)

In der Abbildung 65 ist das jährliche Abfallaufkommen eines mit Niedrigenergiehaus-Komponenten sanierten Gebäudebestands, einschließlich der Nutzung von PV- und Solarthermie (NEH+) dargestellt. Der Best Case aller drei Varianten weist grundsätzlich ein deutlich niedrigeres Abfallaufkommen sowie einen niedrigeren Deponie-Anteil auf. Eine Sanierung des österreichischen Wohngebäudebestands (Variante 1) auf den definierten Gebäude-Energiestandard NEH+ würde ein jährliches Abfallaufkommen im Worst Case von 1,5 Mio.°t und im Best Case von 0,9 Mio.°t verursachen. Eine Sanierung des österreichischen Gebäudebestands (Variante 2 und 3) würde zu einem Anstieg des jährlichen Abfallaufkommens von 1,8 Mio.°t im Best Case und 3,1 Mio.°t im Worst Case führen. Im Vergleich zu einer Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) wird ein geringfügig höheres Abfallaufkommen verursacht, aber im Gegenzug wird durch die solare Energieproduktion ein bedeutend größeres Einsparpotential hinsichtlich nicht erneuerbarer Energieträger und Treibhausgase erlangt.

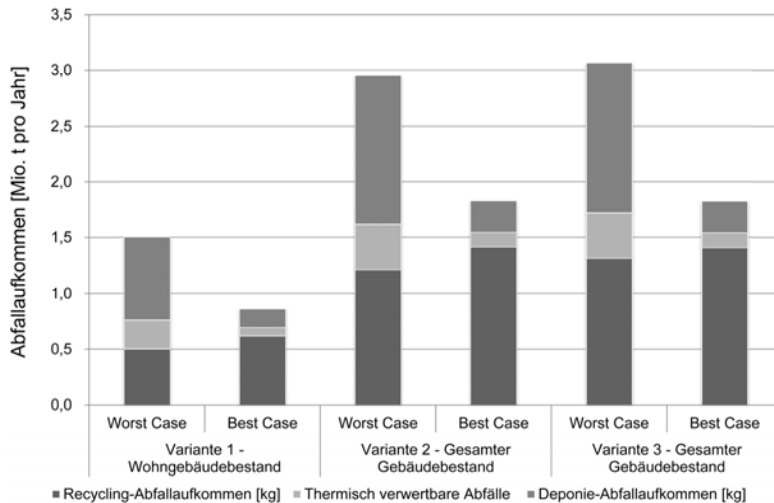


Abbildung 65 Übersicht - Abfallaufkommen – Variante NEH+

### 7.5.4 Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)

In der Abbildung 66 ist für die Variante NEH jeweils der Worst und der Best Case bezogen auf das Abfallaufkommen für die drei bilanzierten Varianten dargestellt. Der Verzicht auf energetische Modernisierungsmaßnahmen (Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, PV und Solarthermie) führt nur zu einer vergleichsweise geringen Absenkung des jährlichen Abfallaufkommens der Variante 1 – Wohngebäudebestand auf 1,4 Mio.°t pro Jahr im Worst Case und 0,7 Mio.°t pro Jahr im Best Case. Das jährliche Abfallaufkommen der Variante 2 und 3 – Gesamter Gebäudebestand beträgt im Worst Case ca. 2,8 Mio.°t und im Best Case ca. 1,5 Mio.°t. Im Vergleich zur Variante PH+ ist das Abfallaufkommen zwischen 0,3 und 0,5 Mio.°t niedriger. Der verhältnismäßig geringe Unterschied ist einerseits auf den geringen jährlichen Materialinput der PV- und Solarthermie-Anlagen sowie auf die Substitution von Bauprodukten zurückzuführen, die für die Feuchtschutzfunktion erforderlich sind.

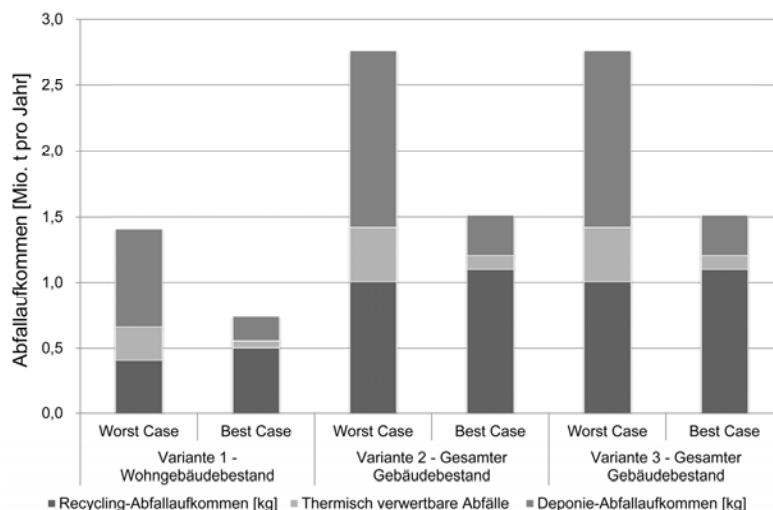


Abbildung 66 Übersicht - Abfallaufkommen – Variante NEH



## 8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse, basierend auf den Ergebnissen der Lebenszyklusbewertungen (LCA) und der Potentialanalyse bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand zusammengefasst.

Zuerst werden die wichtigsten Ergebnisse des bauepochen- und bauteilspezifischen Ökobilanz-Vergleichs erläutert und die relevanten Einflussfaktoren aufgezeigt. Anschließend wird der zur Modellierung des österreichischen Gebäudebestands verwendete bottom-up-Ansatz erklärt, der eine Durchführung von Potentialanalysen bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand ermöglichte.

Des Weiteren wird das erreichbare PV-Stromerzeugungspotential für die drei bilanzierten Varianten mittels Bandbreiten dargestellt, wodurch der bedeutende Einfluss der unterschiedlichen Wirkungsgrade aufgezeigt wird.

Im Anschluss werden die Ergebnisse der Potentialanalyse für eine nachhaltige Sanierung bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand in Form von Einsparpotential-, Dominanz- und Rest-Potential-Analysen erläutert und die Ökoeffizienz der bilanzierten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen aufgezeigt.

Zum Abschluss wird die Relevanz der Kreislauffähigkeit im Hinblick auf die künftig anfallenden Baurestmassen infolge einer umfassenden Bestandssanierung erläutert.

### 8.1 Lebenszyklusbewertung von Sanierungsmaßnahmen

Für den bauteil- und bauepochenspezifischen Vergleich wurden die Ökobilanz-Ergebnisse von über 180 Aufbauten von der Studie „Know-How-Plus“ [93] übernommen und gegenübergestellt, um die Stärken und Schwächen der bilanzierten thermischen Sanierungs- und energetischen Modernisierungsmöglichkeiten erkennen zu können. Der Einfluss der voraussichtlichen Lebensdauern der jeweiligen Bauprodukte sowie der angewandten Füge-technik (Lösbarkeit und Trennbarkeit) auf die Ökobilanz-Kennwerte, insbesondere auf die Höhe des Deponie-Abfallaufkommens wurde durch Anpassung der Bauprodukt-Lebensdauern an die jeweilige Einbausituation und durch die Festlegung des Allokationsschlüssels hinsichtlich der möglichen Verwertungswege berücksichtigt. Die berechneten Bandbreiten der Ökobilanz-Kennwerte zeigen, dass hier ein bedeutendes Einsparpotential durch die Auswahl von ökoeffizienten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen mit langer Lebensdauer vorhanden ist (siehe Anhang A).

Die Ökobilanz-Ergebnisse von thermischen Sanierungsmaßnahmen werden vom verwendeten Dämmstoff dominiert, weshalb der Einsatz von Dämmstoffen mit niedriger Rohdichte bei vergleichbarer Dämmwirkung zu einer wesentlichen Verbesserung der Ökobilanz-Ergebnisse führt. Thermische Sanierungsmaßnahmen von Fassaden verursachen aufgrund der schlechten Trennbarkeit von verklebten Bauprodukten ein vergleichsweise höheres Deponieabfallaufkommen, als beispielsweise thermische Sanierungsmaßnahmen von Dachgeschoßdecken. Nur hinterlüftete Fassaden sind aufgrund des geringen Materialinputs und der vergleichsweise längeren Lebensdauer hinsichtlich der Ökoeffizienz vorteilhafter. Des Weiteren ist die Kreislauffähigkeit aufgrund der guten Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen besser.

Die Ökobilanz-Kennwerte der bilanzierten Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) mit Holzfaserdämmplatten, EPS oder Mineralwolle unterscheiden sich nur geringfügig, obwohl durch den

Einsatz von erneuerbaren Energieträgern (Holzfaser) geringere Kennwerte erwartet wurden. Grund ist, dass zur Erreichung einer vergleichbaren Dämmwirkung ein deutlich höherer Materialinput erforderlich ist. Des Weiteren sind laut der Ecoinvent-Datenbank [23] die Ökobilanz-Kennwerte einer Steinwolle-Dämmung im Vergleich zu einer Glaswolle-Dämmung bei gleicher funktionaler Einheit (Wärmeleitfähigkeit) merkbar niedriger. Folglich kann ein weiteres Einsparpotential in ökologischer Hinsicht durch die Auswahl von funktional gleichwertigen Bauprodukten mittels harmonisierten Ökobilanz-Kennwerten (Umweltproduktdeklarationen - EPD) genutzt werden.

## 8.2 Modell - österreichischer Gebäudebestand

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Eckpunkte der gewählten methodischen Vorgangsweise zur Abschätzung des Einsparpotentials durch Bestandssanierung auf einen der vier bilanzierten Gebäude-Energiestandards zusammengefasst. Aufbauend auf vorhandenen Statistik-Daten [97], [99] über den österreichischen Gebäudebestand wurde ein Gebäudemodell mittels einer größeren Anzahl von Referenzgebäuden erstellt (bottom-up-Ansatz). In der Abbildung 67 ist ein Referenz-Gebäude mit den jeweiligen Eingabeparametern, einschließlich der verwendeten Literaturquellen (siehe Kapitel 4.1) dargestellt.

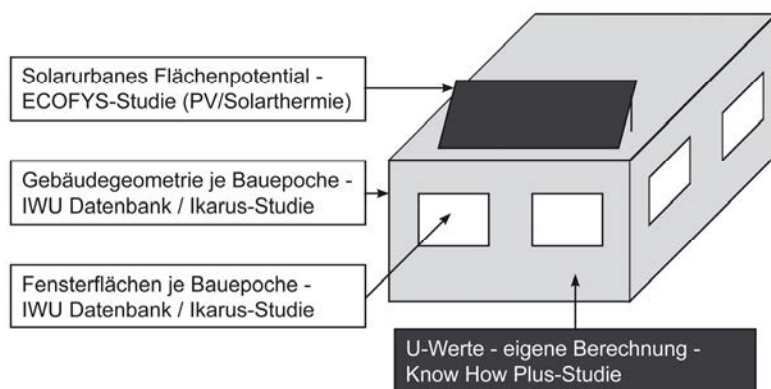


Abbildung 67 Modellierung – Referenzgebäude [93]

Die Modellierung des österreichischen Gebäudebestands mittels Referenz-Gebäuden erfolgte in iterativen Schritten, um eine gute Übereinstimmung zwischen den statistisch erhobenen und den berechneten Gebäudenutzflächen bzw. der Gebäudeanzahl zu erreichen (siehe Abbildung 68). Erst durch diese Vorgangsweise konnten die zu sanierenden Gebäudehüllflächen sowie das solar nutzbare Flächenpotential für die jeweilige Bauepoche und den jeweiligen Gebäudetyp abgeschätzt werden. Ein weiterer Vorteil war die genauere Ermittlung des Heizwärmebedarfs (HWB) nach einer thermischen Sanierung der ausgewählten Referenz-Gebäude, einschließlich der Berücksichtigung potentieller Einschränkungen durch beispielsweise Denkmalschutz oder bauphysikalische Randbedingungen. Eine generelle Absenkung des Heizwärmebedarfs mit den zur Auswahl gestandenen Sanierungsmaßnahmen (siehe baukonstruktionsorientierter Leitfadens der Know-How-Plus-Studie [93]) auf Passivhausstandard für alle Bauepochen und Gebäudetypen kann einerseits durch baukulturelle Aspekte (z.B. Innendämmung wegen Denkmalschutzes) sowie andererseits durch das schlechtere A/V-Verhältnis von Einfamilienhäusern nicht erreicht werden. Im Best Case ist durch eine umfassende Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) ein jährlicher Energieverbrauch für Raumheizung von 35 PJ/a erreichbar. Im Vergleich zum unsanierten Gebäudebestand entspricht dies einer Absenkung um ca. 80 %. In das Energiesystem können lt. der Studie „Regenerative Energie in Österreich“ [59] maximal 45 PJ/a an solar thermisch erzeugte

Warmwassermengen integriert werden. Im Vergleich zum Einsparpotential durch eine thermische Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten (Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung von ca. 181 PJ/a) ist das Einsparpotential durch solarthermische Warmwassererzeugung deutlich begrenzt.

Das entwickelte Gebäudemodell wurde auch für die Abschätzung der solar nutzbaren Flächen mittels der gebäude- und bauepochenspezifischen Kennzahlen der Ecofys-Studie [22] herangezogen. Im Anschluss konnte mit den berechneten Eingangsparametern das Einsparpotential und das Restpotential ermittelt werden.

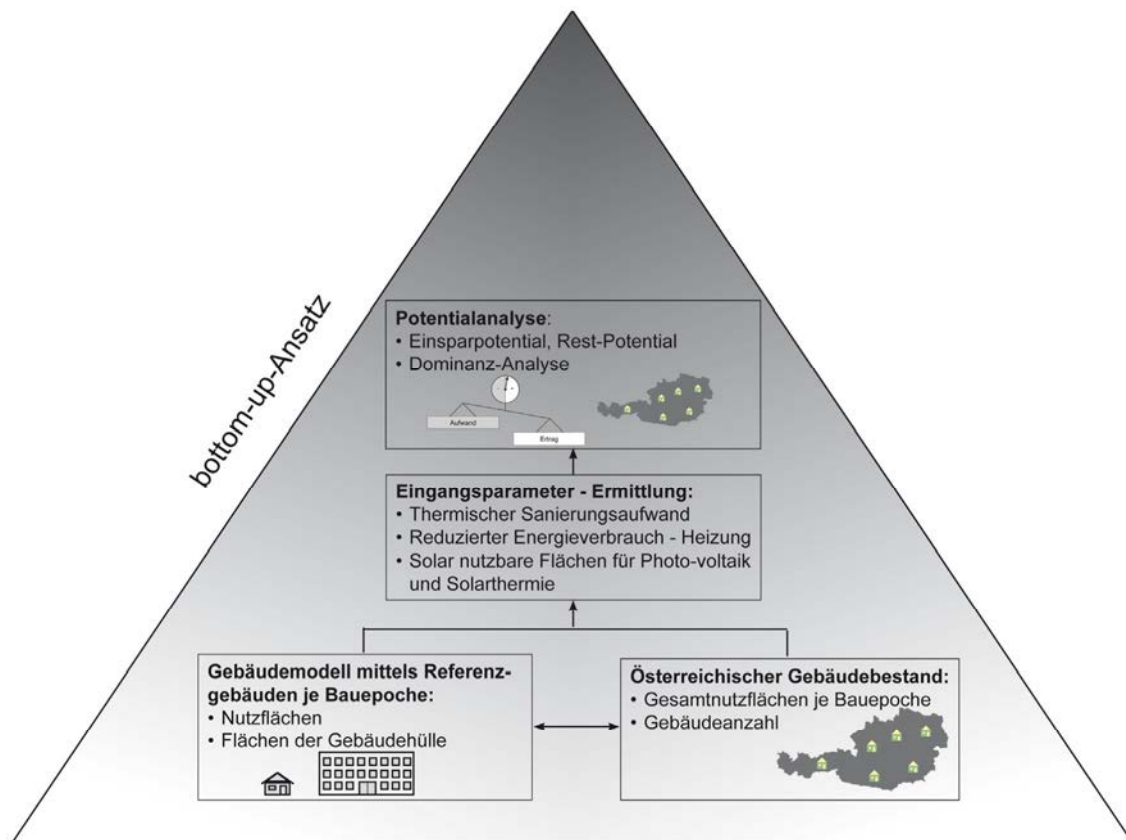


Abbildung 68 Zusammenfassung - Methodische Vorgangsweise (bottom-up-Ansatz)

### 8.3 PV-Stromerzeugungspotential

Die ermittelten PV-Stromerzeugungspotentiale sind hauptsächlich von der zugrunde gelegten Effizienz der in der Ecoinvent-Datenbank [23] bilanzierten PV-Anlagen abhängig (Anmerkung: Single-, Multi- und Ribbon-SI Paneele sind sehr effizient; CIS- und CdTe-Paneele mäßig effizient und a-SI-Paneele am wenigsten effizient). Für die Variante 1 - Wohngebäude ist aber auch der Einfluss der Solarthermie-Anlagen hinsichtlich unterschiedlicher spezifischer jahresmittlerer Kollektorenergieeinträge einschließlich Speicherverlusten anhand der ermittelten Bandbreite von ca. 10 % deutlich erkennbar (siehe Kapitel 5.4.1). Ebenso zeigt sich, dass das solarurbane Flächenpotential bezogen auf den Wohngebäudebestand durch städtetypische Aspekte merkbar größeren Restriktionen unterworfen ist. Dies ist beim Vergleich zwischen dem technischen (92 km<sup>2</sup>) und solarurbanen Flächenpotential (48 km<sup>2</sup>) der Variante 1 – Wohngebäudebestand mit einer Differenz von insgesamt 48 km<sup>2</sup> ersichtlich (siehe Kapitel 5.4.1). Der Unterschied zwischen dem solarurbanen Flächenpotential

(200 km<sup>2</sup>) der Varianten 2 und 3 - Gesamter Gebäudebestand und dem technischen Flächenpotential (217 km<sup>2</sup>) ist hingegen wesentlich geringer.

Das Maximum der PV-Stromerzeugung bezogen auf den gesamten österreichischen Gebäudebestand liegt bei 17,9 TWh/a (Single-SI-Paneele) und das Minimum bei 8,0 TWh/a (a-SI-Paneele). Laut E-Control [25] betrug im Jahr 2006 die Bruttostromerzeugung 64,5 TWh/a, wovon 38,0 TWh durch Wasserkraftwerke, 24,7 TWh durch Wärmekraftwerke und lediglich 1,8 TWh durch erneuerbare Energieerzeuger (zu 99 % Windkraft; Rest durch PV und Geothermie) erzeugt wurden. Das ermittelte maximale PV-Stromerzeugungspotential von 17,9 TWh/a (Variante 2 – MAX) entspricht fast 50 Prozent der im Jahr 2006 mittels Wasserkraft erzeugten Stromaufbringung (37,3 TWh/a). In der Abbildung 69 ist die Verteilung der Stromerzeuger, basierend auf der statistischen Erhebung der E-Control 2006 [25] mit jener nach einer Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) für die „Variante 2 – Max“ gegenübergestellt. Im Jahr 2006 betrug der Anteil der Stromerzeuger mittels Wind, PV und Geothermie nur 3 %. Nach einer energetischen Modernisierung des österreichischen Gebäudebestands mittels PV würde der Anteil auf 30 % ansteigen. Für die Darstellung der prozentualen Verteilung des Strommix nach der energetischen Modernisierung wurde vereinfachend angenommen, dass der mittels PV erzeugte Strom jenen von thermischen Kraftwerken substituiert.

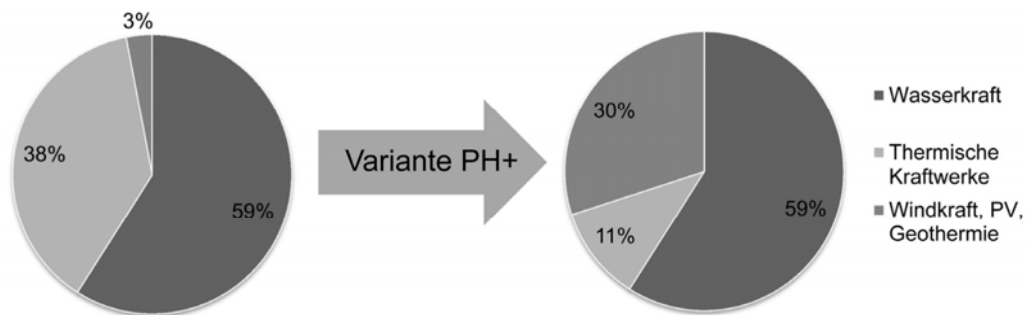


Abbildung 69 Veränderung des Strommix infolge Modernisierung des Bestands mit PV (Variante PH+)

## 8.4 Zusammenfassung – Einsparpotential

Die Ergebnisse zeigen das enorme Einsparpotential an Energie und Treibhausgasen durch thermische Gebäudesanierungen und solare Energieerzeugung beim Vergleich mit den Treibhausgas-Emissionen in Österreich im Jahr 2009 auf (siehe Abbildung 70). Dabei ist zu beachten, dass nicht der österreichische Strom-Mix für die Berechnung des Einsparpotentials zugrundegelegt wurde, da dieser auch erneuerbare Energieträger (z.B. Wasserkraft) mit einem Anteil von ca. 60 % beinhaltet. Grund ist, dass eine Substitution von bereits in Betrieb befindlichen erneuerbaren Energieerzeugungssystemen durch den PV-erzeugten Strom verhindert werden soll. Deswegen kann das berechnete Einsparpotential möglicherweise größer sein, wie der statistisch erhobene kumulierte Energieaufwand bzw. CO<sub>2</sub>-Austoß, der sich auf den österreichischen Strom-Mix für das jeweilige Bilanzierungsjahr bezieht. Die Einsparungen an Treibhausgasen betragen bei einer Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) im Best Case ca. 31,4 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr (-39 %) und im Worst Case der Variante NEH+ immerhin noch ca. 15,4 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr (-18 %) (siehe Abbildung 70, links). Das im Vergleich zum Worst Case der Variante NEH+ um 52 % höhere Einsparpotential wird einerseits durch die Installation von PV-Anlagen mit den höchsten Wirkungsgrad und andererseits durch die Auswahl von ökoefizienten

Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen erreicht. In beiden Fällen wird das angestrebte Kyoto-Ziel von Österreich mit 68,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten deutlich unterschritten.

Eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten (PH) würde zu einer Absenkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf 69,2 Mio. t pro Jahr (-13 %) führen (siehe Abbildung 70, rechts). Bei einer thermischen Bestandssanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) wird ein geringfügig höherer CO<sub>2</sub>-Austoss von 71,1 Mio. t pro Jahr (-11 %) verursacht. Des Weiteren zeigt sich, dass der Unterschied beim Einsparpotential zwischen einer thermischen Sanierung mit Passivhaus (PH)- bzw. mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) im Vergleich zum Einsparpotential durch solare Energieerzeugung (PV und Solarthermie) von geringer Bedeutung ist.

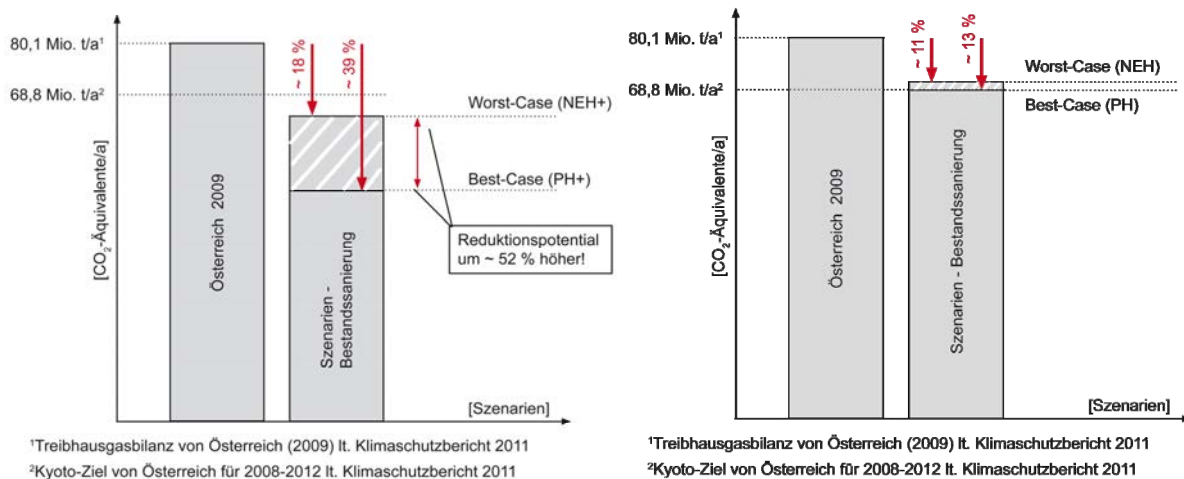


Abbildung 70 Einsparpotential durch Bestandssanierung auf vier unterschiedliche Gebäude-Energiestandards

Eine hohe Ökoeffizienz wird jedenfalls durch eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands zumindestens mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, einschließlich der Installation von PV- und Solarthermie-Anlagen erreicht. Die Relevanz einer Auswahl von ökoeffizienten Bauprodukten mit langer Lebensdauer wird am Beispiel der Variante 2 – Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) mit einem Einsparpotential von 23 PJ/a bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) ersichtlich, das im Vergleich zum Einsparpotential durch eine thermische Verbesserung des Gebäudebestands mit Passivhaus-Komponenten (PH) statt mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) von 9 PJ/a deutlich größer ist (siehe Kapitel 6.4.2.2).

Eine weitere Verbesserung der Ökoeffizienz kann beispielsweise durch den Einsatz von Gebäudesteuerungskomponenten (z.B. Absenkung der Innentemperatur bei Pendlerhaushalten, Tageslichtsteuerung etc.) sowie durch die Berücksichtigung der Anforderungen hinsichtlich solaren Bauens erreicht werden. Diese Einflussfaktoren wurden aber in dieser Dissertation nicht näher berücksichtigt.

## 8.5 Zusammenfassung – Dominanzanalyse

Beim Vergleich der jeweiligen Best Case (BEC) und Worst Case (WOC)-Szenarien für die jeweiligen Gebäude-Energiestandards anhand des kumulierten Energieaufwands – nicht erneuerbar (CED n.r.) zeigt sich, dass die Reduktion des Energieverbrauchs für Raumheizung (Kürzel „EV-Raumheizung“) durch eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands um 165 bis 175 PJ/a sowie

das Einsparpotential durch solare Energieerzeugung mittels PV (Single-SI-Paneele) von 287,7 PJ/a die dominanten Einflussfaktoren sind (siehe Abbildung 71). Der Unterschied zwischen den beiden Varianten „Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)“ und „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)“ hinsichtlich des Energieverbrauchs für Raumheizung ist bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar gering (10 PJ/a). Der erforderliche Sanierungs- und Modernisierungsaufwand (siehe Kategorie „LCA“) ist bei der Variante PH jedoch um fast 20 PJ/a höher, als für die Variante NEH. Dies ist einerseits auf den höheren stofflichen Aufwand für die Installation von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sowie andererseits auf den zugrunde gelegten österreichischen Heizträgermix für die Gutschrift des eingesparten Energieverbrauchs für Raumheizung (Kürzel „EV-Raumheizung“) zurückzuführen. Der österreichische Heizträgermix bilanziert nicht erneuerbare (CED n.r) und erneuerbare Energieträger (CED r.), weshalb das Einsparpotential bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) infolge einer thermischen Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) geringer ausfällt, als für die Variante NEH.

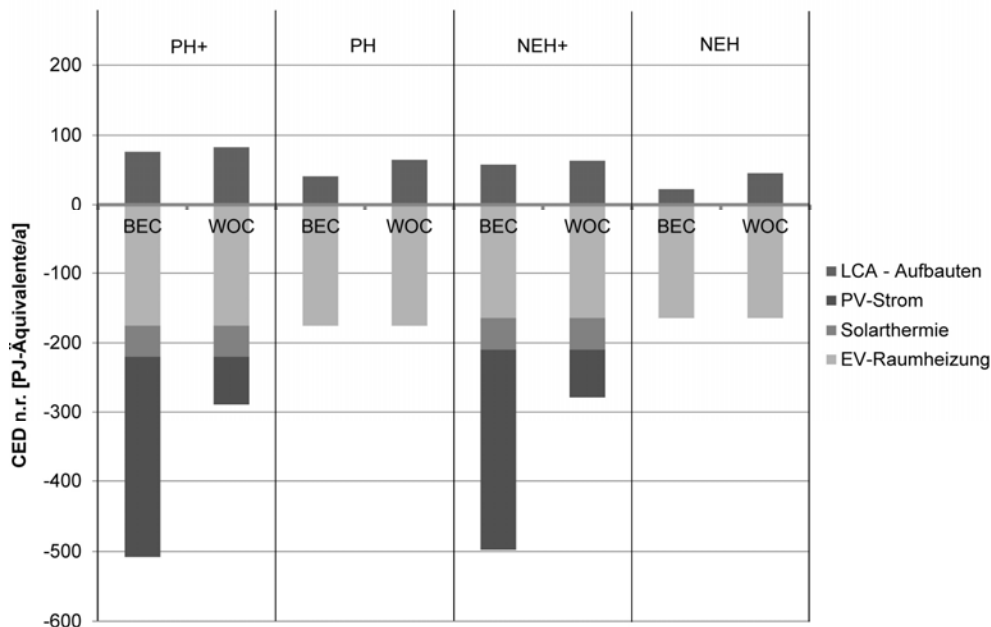


Abbildung 71 Dominanz-Analyse – CED n.r. – Gesamter Gebäudebestand (Variante 2)

Beim Varianten-Vergleich in der Abbildung 72 bezogen auf den Indikator „Treibhauspotential (GWP)“ ist hingegen das Einsparpotential der Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)“ größer als für die Variante NEH. Die größte Einsparung an Treibhausgasen wird durch die PV-Stromerzeugung (Single-SI-Paneele) von 18,8 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr sowie durch die Absenkung des Energieverbrauchs für Raumheizung (Kürzel „EV-Raumheizung“) von maximal 12,7 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr erreicht. Im Vergleich dazu ist das Einsparpotential durch solarthermische Warmwasser-Erzeugung von 3,3 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr sowie durch eine PV-Stromerzeugung mittels aSI-Paneelen (Worst Case - WOC) von 4,8 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr deutlich geringer.

Die Bedeutung von ökoefizienten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen wird beim Vergleich zwischen dem Best und Worst Case der untersuchten Varianten bezogen auf die Kategorie „LCA-Aufbauten“ ersichtlich. Beispielsweise muss im Best Case der Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten (PH)“ für eine vollständige thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands durchschnittlich ca. 1,8 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr aufgewendet werden, um im Gegenzug ca. 12,7 Mio.°t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr durch die Reduktion des Energieverbrauchs

für Raumheizung einsparen zu können. Im Worst Case ist für den gleich hohen Einspareffekt ein um fast 90 % höherer Aufwand erforderlich (3,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr). Das bedeutet, dass durch die Auswahl von ökoeffizienten Sanierungsvarianten ein zusätzliches Einsparpotential von ca. 1,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr erreichbar ist. Der wesentlich geringere Unterschied (Kategorie „LCA-Aufbauten“) zwischen dem Best und Worst Case der Variante PH+ bzw. NEH+ von 0,6 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr ist auf die ökoeffizienten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen (z.B. hinterlüftete Fassade mit PV-Installation) zurückzuführen.

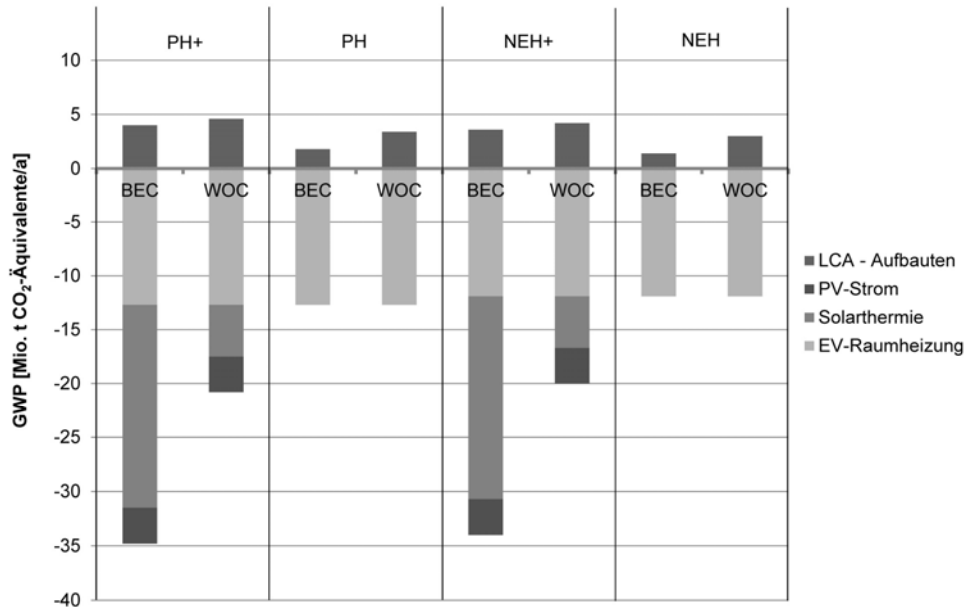


Abbildung 72 Dominanz-Analyse – GWP – Gesamter Gebäudebestand (Variante 2)

## 8.6 Zusammenfassung – Restpotential

Die Verbrauchskennzahlen vom Jahr 2006 wurden aus der Studie „Regenerative Energien in Österreich“ [59] übernommen und der Abschätzung des Rest-Potentials zugrunde gelegt, welches nach einer Sanierung des österreichischen Gebäudebestands mit Niedrigenergie- oder Passivhaus-Komponenten und energetischen Modernisierung mittels Photovoltaik und Solarthermie noch durch andere alternative Maßnahmen zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz genutzt werden kann. In der Tabelle 8-1 ist der restliche Nutzenergiebedarf nach einer Sanierung des österreichischen Gebäudebestands auf eine der vier definierten Energie-Standards dargestellt. Es zeigt sich, dass für keine der vier bilanzierten Varianten ein saniertes Gebäudebestand mit Energieüberschuss erreicht wird. Die Vorteile der solaren Energieerzeugung mittels Flachkollektoren wird beim Vergleich des Nutzenergiebedarfs zwischen der Variante „Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, PV und Solarthermie (NEH+)“ von 79 PJ/a und der Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+)“ von 56 PJ/a ersichtlich, die zu einer Absenkung des Nutzenergiebedarfs bezogen auf Heizwärme, Trinkwarmwasser und Prozessenergie unter 100 °C führt.

Tabelle 8-1 Nutzenergiebedarf nach Sanierung des österreichischen Gebäudebestands

Restlicher Bedarf an:	Nutzenergie [PJ/a] nach Bestandssanierung				
	unsaniert	NEH	NEH+	PH	PH+
Heizwärme	216	58	36	35	13
Trinkwarmwasser	38	38	27	38	27
Prozessenergie <100°C	28	28	16	28	16
Gesamt	282	124	79	101	56

Für die Bilanzierung wurde der lt. E-Control [25] erhobene Stromverbrauch für das Jahr 2006 mit ca. 62 TWh/a Strom (Endverbrauch) zugrunde gelegt, wobei eine Abgrenzung hinsichtlich des gebäudenutzungsbezogenen Stromverbrauchs durchgeführt wurde. Es wurde der Strombedarf für private Haushalte, öffentliche Gebäude und Landwirtschaft von insgesamt 29,7 TWh/a bilanziert. Im Best Case können durch großflächige Installation von PV-Anlagen (single-SI) mit hohem Wirkungsgrad ca. 17,9 TWh/a und im Worst ca. 7,8 TWh/a (aSI; niedrigster Wirkungsgrad) erzeugt werden. In der Tabelle 8-2 ist das Rest-Potential nach einer Modernisierung des Gebäudebestands mit PV-Anlagen im Best Case von 11,8 TWh/a und Worst Case von 21,9 TWh/a dargestellt. Folglich muss der Rest-Bedarf noch mit anderen Stromerzeugungssystemen abgedeckt werden, wobei dieser mit erneuerbare Energieträger (Biomasse, Windkraft etc. aber ohne Photovoltaik bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand, da dieses Potential bereits in dieser Arbeit berücksichtigt wurde). Sinnvoll ist auch eine Absenkung des Verbrauchs durch energieeffiziente Geräte sowie eine Erhöhung des Wirkungsgrads von PV-Anlagen.

Tabelle 8-2 Strombedarf nach Sanierung des österreichischen Gebäudebestands

	Strombedarf - Endverbrauch [TWh/a]		
	Gesamt (2006)	PV-Strom	Rest-Potential
Best Case (single-SI)	29,7	17,9	11,8
Worst Case (aSI)	29,7	7,8	21,9

## 8.7 Relevanz der Kreislaufwirtschaft

Die Ergebnisse der Potentialanalyse in Kapitel 7.5 zeigen das bedeutende Einsparpotential an Energie und Treibhausgasen durch eine umfassende Bestandssanierung auf, aber auch eine damit verbundene Erhöhung des Abfallaufkommens. In diesem Zusammenhang ist besonders auf die Verwendung von kreislauffähigen Bauprodukten und leicht demontierbaren und wartungsfreundlichen Konstruktionen für die Sanierung der thermischen Gebäudehülle zu achten, um den Instandhaltungsaufwand und Deponieanteil so gering wie möglich halten. Die Optimierung der thermisch-energetischen Gebäudequalität sollte im Hinblick auf eine vorgegebene Nutzungsdauer erfolgen, wobei die Auswahl von ökoeffizienten Bauprodukten und die konstruktive Durchbildung (Fügetechnik) von Bedeutung sind.

Die erforderlichen thermischen Sanierungs- und energetischen Modernisierungsmaßnahmen zur Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie (PH+) werden das künftige Aufkommen an Baurestmassen zwischen 2,1 Mio. t (Best Case - BEC) und 3,3 Mio. t (Worst Case - WOC) erhöhen (siehe Abbildung 73). Das geringste Abfallaufkommen von ca. 1,5 Mio. t bis 2,8 Mio. t pro Jahr wurde für die Variante „Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH)“ ermittelt, das im Wesentlichen auf die unterbliebene Nutzung von PV- und Solarthermie-Anlagen sowie von Lüftungen mit Wärmerückgewinnung zurückzuführen ist. Beim Indikator „Abfallaufkommen“ sind die Lösbarkeit der zusammengeführten Bauprodukte hinsichtlich des künftigen Instandsetzungsaufwands und die Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen hinsichtlich der Sortenreinheit maßgebend. Dadurch können das Abfallaufkommen und insbesondere das Deponie-



Abfallaufkommen deutlich reduziert werden. Dies wird beim Vergleich des jeweiligen Worst und Best Case der untersuchten Varianten in der Abbildung 73 ersichtlich.

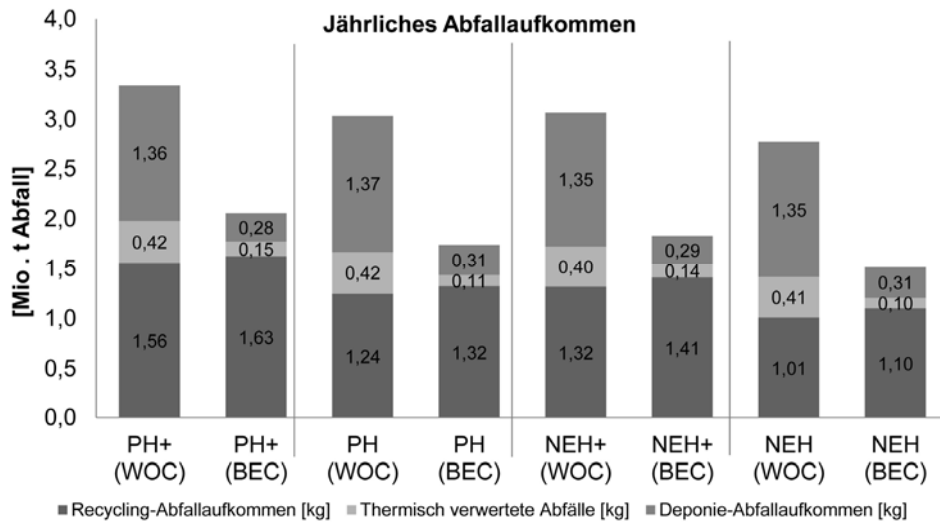


Abbildung 73 Abfallaufkommen infolge Bestandssanierung

Der Vergleich des jährlichen Abfallaufkommens zeigt, dass eine rein energiewirtschaftliche Herangehensweise zur Erreichung der Klimaschutz- und energiepolitischen Ziele im Bauwesen zu wenig ist, da gerade das Bauwesen für sein hohes Abfallaufkommen bekannt ist. Im Bundesabfallwirtschaftsplan 2011 [12] wurde für die Kategorie „Abfälle aus dem Bauwesen“ ein Abfallaufkommen für das Jahr 2009 von 9,87 Mio. t. ausgewiesen. Bei einer Gegenüberstellung der jeweiligen Abfallaufkommen infolge einer Bestandssanierung sind Steigerungsraten von 22 % bei einer thermischen Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten (NEH) im Best Case (BEC) bis 48 % bei einer Bestandssanierung mit Passivhaus-Komponenten, PV und Solarthermie (PH+) im Worst Case (WOC) möglich (siehe Abbildung 74).

Folglich müssen innovative und wirtschaftliche Aufbereitungstechnologien entwickelt und in der Praxis angewandt werden, um das künftige Deponieabfallaufkommen so gering wie möglich zu halten.

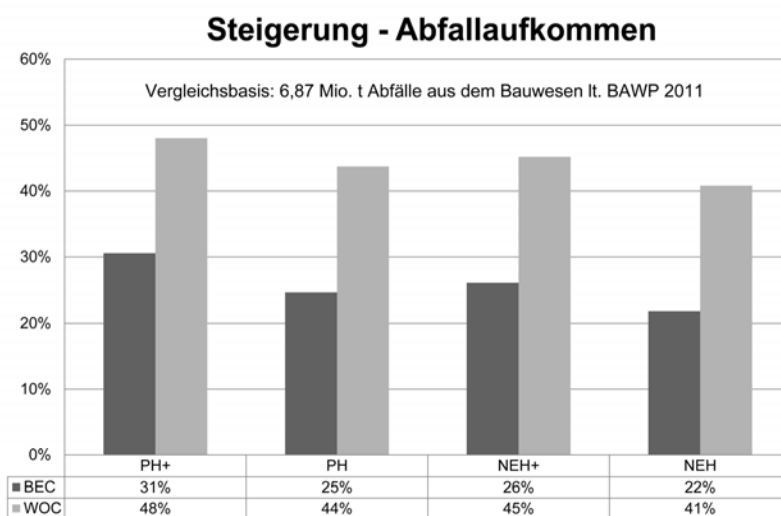


Abbildung 74 Steigerung des Abfallaufkommens – Vergleichsbasis BAWP 2011

## 9 Ausblick

In diesem Kapitel wird ein Ausblick hinsichtlich des künftigen Handlungs- und Forschungsbedarfs für eine nachhaltige Sanierung und Modernisierung des österreichischen Gebäudebestands gegeben. Die Unterteilung der Handlungsempfehlungen wurde zur besseren Übersicht nach Bauprodukterzeuger, Planer, Normung und politischen Entscheidungsträgern vorgenommen. Anschließend wird der weitere Forschungsbedarf anhand der im Zuge der Bearbeitung aufgetretenen Fragestellungen und der neuen Erkenntnisse für die jeweiligen Themengebiete abgeleitet.

### 9.1 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die ganzheitliche Betrachtung hinsichtlich einer nachhaltigen Sanierung des österreichischen Gebäudebestands unter der Berücksichtigung von interdisziplinären Schnittstellen führte zu einer Vielzahl von fachspezifischen Detailergebnissen, weshalb eine getrennte Darstellung für die jeweiligen Themengebiete vorgenommen wurde.

#### 9.1.1 Bauprodukterzeuger

Zur Entwicklung von ökoeffizienten und auch kreislauffähigen Bauprodukten liefert eine Ökobilanz gemäß ISO 14040 [57] wertvolle Hinweise. Die Ergebnisse können auch als Kundeninformation in Form einer Umweltproduktdeklaration verwertet werden und in weiterer Folge für Gebäudezertifizierungen herangezogen werden, wobei die Bereitstellung von aussagekräftigen Informationen über den künftigen Instandhaltungs- und Entsorgungsaufwand von Bedeutung ist.

Wünschenswert wären auch Herstellerangaben über das Verhalten von Bauprodukten und Systemlösungen gegenüber außerplanmäßigen Einwirkungen (Robustheit). Gerade qualitativ hochwertige Sanierungen und Modernisierungen sind grundsätzlich mit einem höheren stofflichen und energetischen Aufwand verbunden, weshalb auch das Schadensausmaß bei Eintritt einer außerplanmäßigen Einwirkung möglicherweise höher ist. Beispielsweise könnte mittels Worst Case-Szenarien der jeweilige Instandsetzungsaufwand in Abhängigkeit von den jeweiligen außerplanmäßigen Einwirkungen (Hagel, etc.) angegeben werden, wobei hier noch Forschungsbedarf besteht.

Bei der Entwicklung von Systemlösungen sollte ebenfalls nicht nur Augenmerk auf die Energieeffizienz, sondern auch auf die Kreislauffähigkeit gelegt werden. Zusammengefügte Bauprodukte sollten in der Instandsetzungsphase leicht lösbar und in der Entsorgungsphase sortenrein trennbar sein, wodurch der Instandsetzungsaufwand sowie der Deponie-Anteil der anfallenden Baurestmassen reduziert werden kann. Wie auch in [73] gezeigt wird, besteht in Österreich noch großes Potential für die Erhöhung der Recycling-Quote, beispielsweise bei Gipskartonplatten aus Gebäudeabbrüchen und nicht nur aus Verschnitt.

Der dominante Einfluss des Wirkungsgrads der bilanzierten PV-Anlagen auf die Ökobilanz-Ergebnisse zeigt den Schwerpunkt für weitere Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf.

Eine Verbesserung der Ökobilanz-Kennwerte (z.B. GWP, CED) von Bauprodukten würde bei einer energetischen Modernisierung des österreichischen Gebäudebestands mittels PV-Anlagen (Single-SI) aufgrund des geänderten Strommix mit höheren Anteilen an erneuerbaren Energieträgern eintreten.

### 9.1.2 Planung

Die Ergebnisse der Potentialanalyse zeigen, dass durch die zielsichere Auswahl von dauerhaften Bauprodukten mit Hilfe von europäischen und nationalen Regelwerken unter Berücksichtigung von kreislaufwirtschaftlichen Aspekten deutlich mehr Energie und Treibhausgase eingespart werden können als durch eine thermische Sanierung mit Niedrigenergiehaus- statt mit Passivhaus-Komponenten, der u.a. einen Einsatz von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) erfordert. Neben einer Auswahl von ökoeffizienten Bauprodukten ist auch die konstruktive Durchbildung hinsichtlich der Höhe und Art der künftig anfallenden Baurestmassen für eine nachhaltige Sanierung des österreichischen Gebäudebestands von Bedeutung. Diese Aspekte gilt es auch in der Ausbildung von Planern und Bauausführenden zur Bewusstseinsbildung hinsichtlich kreislauffähiger Konstruktionen zu vermitteln.

Des Weiteren sollte der Einfluss der voraussichtlichen Lebensdauer der zusammengeführten Bauprodukte in der Planung (Fügetechnik) im Hinblick auf künftige Instandsetzungsmaßnahmen verstärkt berücksichtigt werden. Für die einfache und übersichtliche Darstellung aller relevanten Informationen kann der entwickelte Bewertungsraster (siehe Kapitel 3.3.1) herangezogen werden, um die Berücksichtigung von lebenszyklusrelevanten Aspekten bereits in der Planungsphase sicherzustellen.

Die Sinnhaftigkeit von ökoeffizienten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen wurde mittels Potential- und Dominanzanalysen nachgewiesen, wobei besonders der großflächige Einsatz von PV-Anlagen mit hohem Wirkungsgrad (Single-SI) zu einer deutlichen Erhöhung der Ökoeffizienz führen würde.

In Zukunft sollten besonders bei qualitativ hochwertigen Gebäudesanierungen aufgrund des hohen stofflichen Sanierungs- und Modernisierungsaufwands auch außerplanmäßige Einwirkungen im Planungsprozess zumindest qualitativ bewertet werden, um das Schadensausmaß im Eintrittsfall durch organisatorische und konstruktive Vorkehrungen so gering wie möglich zu halten. Die Risikovermeidung gefolgt von der Risikoreduzierung ist einer Risikoabwälzung auf eine Versicherung zu bevorzugen.

### 9.1.3 Normung & Regelwerke

Eine Präzisierung der Aussagen zur Instandhaltung in den jeweiligen bauprodukt-spezifischen Regelwerken ist hinsichtlich der Durchführung von treffsicheren Lebenszyklusbewertungen zu empfehlen. Hilfreich wären auch Angaben hinsichtlich der Kreislauffähigkeit der künftig anfallenden Baurestmassen.

Die Verfügbarkeit von produkt- oder zumindestens branchenspezifischen Umweltproduktdeklarationen würde den Vergleich von funktional gleichwertigen Bauprodukten erleichtern und so die Auswahl von ökoeffizienten Bauprodukten ermöglichen. Dadurch kann ein weiteres Einsparpotential genutzt werden, das für die Baubeteiligten auf den ersten Blick nicht ersichtlich ist (Stichwort: Graue Energie von Bauprodukten).

Bauprodukt-Normen decken in der Regel planmäßige Einwirkungen (Wind, Schnee etc.) ab, nicht aber außerplanmäßige Einwirkungen (z.B. Hagel) mit Ausnahme von PV und Abdichtungen. Wenn die statistische Lebensdauer der Bauprodukte erhöht werden soll, dann muss künftig diese Anforderungen in europäischen Regelwerken berücksichtigt werden, insbesondere trifft dies auf Bauprodukte der Gebäudehülle zu.

### 9.1.4 Politische Entscheidungsträger

Die Ergebnisse der Potentialanalyse zeigen den Nutzen von qualitativ hochwertigen Gebäudesanierungen auf. Die größten Einsparungen können durch die PV-Stromerzeugung mittels Single-SI-Paneele und durch die thermische Sanierung des Gebäudebestands zumindestens mit Niedrigenergiehaus-Komponenten erreicht werden. Die solare Wärmeerzeugung ist laut der Studie „Regenerative Energie in Österreich“ [59] durch die vorhandene Haustechnik deutlich größeren Restriktionen unterworfen, weshalb maximal 45 PJ/a in das Energiesystem integrierbar sind. Der Unterschied zwischen einer thermischen Sanierung mit Niedrigenergiehaus- statt mit Passivhaus-Komponenten (Differenz des Einsparpotentials ca. 9 PJ/a) ist im Vergleich zu einer Auswahl von ökoeffizienten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen (Einsparpotential ca. 23 PJ/a) von untergeordneter Bedeutung.

Zur Erreichung der Klimaschutzziele und Energieeinsparziele muss eine thermische Sanierung des österreichischen Gebäudebestands zumindestens auf Niedrigenergiehausniveau sowie das bedeutende Potential an solarer Energieerzeugung voll ausgenützt werden. Die Ergebnisse der Potentialanalyse beziehen sich auf einen vollständig thermisch sanierten und energetisch modernisierten Gebäudebestand, wodurch der dringende Handlungsbedarf hinsichtlich einer Erhöhung der Sanierungsquote bezogen auf den österreichischen Gebäudebestands aufgezeigt wird.

Es muss bewusst sein, dass durch den bisherigen Anstieg der Nettonutzfläche pro Kopf (z.B. durch die Zunahme der Single-Haushalte) der Gesamtwärmebedarf pro Kopf nicht im gleichen Ausmaß absinkt, wie der Heizwärmebedarf pro m<sup>2</sup> Nutzfläche infolge einer thermischen Sanierung.

Die Erhöhung des Strommix-Anteils von erneuerbaren Energieträgern würde auch zu einer Verbesserung der Ökobilanz-Kennwerte von stromintensiven Herstellungsprozessen führen (Bauproduktherstellung). Die Folge ist auch ein exponentieller Anstieg des Anteils der erneuerbaren Energieträger je Betrachtungszeitraum (analog Zinseszinsseffekt). Dieser Positiv-Kreislauf betrifft selbstverständlich auch die anderen Ökobilanz-Kennwerte, wie beispielsweise das Treibhauspotential (GWP).

## 9.2 Weiterer Forschungsbedarf

### 9.2.1 Weiterführende Potentialanalysen

In der vorliegenden Dissertation wurde das Einsparpotential an Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine thermische Sanierung und energetische Modernisierung des österreichischen Gebäudebestands mittels Ökobilanz-Kennwerten aufgezeigt. Das dafür entwickelte Modell des österreichischen Gebäudebestands könnte mit Lebenszykluskosten verknüpft werden, um daraus generelle Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der bilanzierten Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen treffen zu können. In diesem Zusammenhang könnten auch die reduzierten Umweltwirkungen mittels externer Kosten entgegengerechnet werden, um den Mehrwert von nachhaltigen Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen in volkswirtschaftlicher Hinsicht aufzeigen zu können.

Ab dem 2. Halbjahr 2013 sollte laut Statistik Austria [100] durch die Zusammenführung der Registerdaten eine bessere Datenlage über den österreichischen Gebäudebestand verfügbar sein, wodurch eine Präzisierung des entwickelten österreichischen Gebäudemodells, besonders in Bezug auf den Nichtwohngedäudebestand, möglich wird. Die genauere Kenntnis über beheizte Nutzflächen, Nutzungsart und Bauepoche von Nichtwohngedäuden kann auch für eine präzisere Auswahl und

Ökobilanzierung von repräsentativen thermischen Sanierungs- und energetischen Modernisierungsmaßnahmen genutzt werden.

Bei künftigen Forschungsarbeiten wäre auch eine Erweiterung um raumplanerische Aspekte zielführend, um die Umweltauswirkungen durch Pendlerverkehr und Infrastrukturaufwendungen infolge von Zersiedelungseffekten berücksichtigen zu können.

### **9.2.2 Bauproduktforschung & -systementwicklung**

Der durchgeführte bauteilspezifische Ökobilanz-Vergleich zeigt, dass durch die Auswahl von ökoeffizienten Bauprodukten unter Berücksichtigung der Aspekte der Kreislauffähigkeit ein wesentlich größeres Einsparpotential erreicht wird als durch eine Verbesserung des Gebäudeenergiestandards mit Niedrigenergiehaus- statt mit Passivhaus-Komponenten (siehe Kapitel 8.4). Dadurch wird auch die Relevanz einer interdisziplinären Systementwicklung aufgezeigt, und der damit erreichbare Mehrwert in ökologischer und ökonomischer Hinsicht kann mittels Umweltproduktdeklarationen (EPD) und Lebenszykluskostenanalysen (LCC) nachgewiesen werden.

Der hohe Einfluss des Wirkungsgrads von PV-Anlagen auf die Ökobilanz-Ergebnisse der Potentialanalyse zeigt die Notwendigkeit von weiteren Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen in diesem Bereich auf.

### **9.2.3 Lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl und Planung**

Die durchgeführten Potential- und Dominanzanalysen (LCA) für hochqualitative Gebäudesanierungen zeigen, dass eine lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl und Planung nicht zu vernachlässigen sind. Besonders die Lösbarkeit der zusammengefügt Bauprodukte und Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen sind bei Bauprodukten unterschiedlicher Nutzungsdauerklassen von Bedeutung. Des Weiteren sollten europäische Regelwerke auch Prüfverfahren für die Bewertung der Robustheit von Bauprodukten gegenüber außerplanmäßigen Einwirkungen (z.B. Hagel), einschließlich der Angabe von Expositionsklassen beinhalten.

Diese Aspekte werden in europäischen Normen bisher gar nicht oder nur rudimentär behandelt. Folglich muss die Qualität und Verfügbarkeit der Daten über die voraussichtliche Lebensdauer für definierte Einbaubedingungen sowie über die Kreislauffähigkeit der anfallenden Baurestmassen für die lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl und Planung sowie für die Durchführung von aussagekräftigen Lebenszyklusbewertungen noch deutlich verbessert werden. Bauprodukterzeuger können beispielsweise mittels Umweltproduktdeklarationen (EPD) die Stärken und Schwächen ihres Bauprodukts für definierte Einbaubedingungen und Nutzungsdauerklassen bereitstellen.

### **9.2.4 Kreislaufwirtschaft**

Des Weiteren zeigen die Forderungen der Abfall-Rahmenrichtlinie der EU [27], dass Abfallvermeidung und Recycling künftig vorrangig anzustreben sind, um eine Verwertungsquote bei nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen von mindestens 70 Masseprozent bis zum Jahr 2020 zu erreichen. Dies sollte bei der Entwicklung von Bauprodukten und -systemlösungen durch kreislaforientierte Verwertungskonzepte berücksichtigt werden. Für die Anwendung von Recycling-Bauprodukten auf breiter Basis ist die bestehende Rechtsunsicherheit hinsichtlich einer gesetzlichen Festlegung des Abfall-Endes zu beheben.

# Anhang

## A. Bauteilspezifische LCA-Vergleiche

### Einleitung

In diesem Kapitel werden die Ökobilanz-Kennwerte der in der Know-How-Plus-Studie [93] untersuchten Aufbauten gegenübergestellt, um detailliertere Aussagen zur Ökoeffizienz sowie über das Abfallaufkommen treffen zu können. Eine Untergliederung der Sanierungsmaßnahmen wurde nach Bauepochen und Bauteilen der thermischen Gebäudehülle vorgenommen. Die wichtigsten Erkenntnisse wurden im Kapitel 3.4 zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Lebenszyklusbewertungen sowie die umfassende Beschreibung der zur Verfügung stehenden Sanierungs- und Modernisierungsvarianten können aus dem baukonstruktionsorientierten Leitfaden entnommen werden. Der baukonstruktionsorientierte Leitfaden ist über die Haus der Zukunft-Homepage (Link: [www.hausderzukunft.at/results.html/id5991](http://www.hausderzukunft.at/results.html/id5991)) abrufbar.

Die nachfolgenden Kapitelüberschriften entsprechen den Kürzeln des baukonstruktionsorientierten Leitfadens der Know-How-Plus-Studie [93] und beginnen mit dem in der Tabelle 9-1 angegebenen Kürzel für den jeweiligen Aufbau (AW, DGD,...) gefolgt vom 2. Kürzel für die bilanzierten thermischen Sanierungsmaßnahme (AD für Außendämmung oder ID für Innendämmung) bzw. Modernisierungsmaßnahme (PV und Solarthermie) gemäß der Tabelle 9-2.

*Tabelle 9-1 Kurzbezeichnung - Aufbauten*

Aufbau	1. Kürzel
Außenwand	AW
Dachgeschoßdecke	DGD
Dachschräge	DS
Flachdach	FD
Kellerdecke	DGK
Erdberührter Fußboden	EB

*Tabelle 9-2 Kurzbezeichnung – Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen*

Sanierungsmaßnahme	2. Kürzel
Außendämmung	_AD
Innendämmung	_ID
Solarthermie	_ST
Photovoltaik	_PV

## Außenwand - AW01\_ID

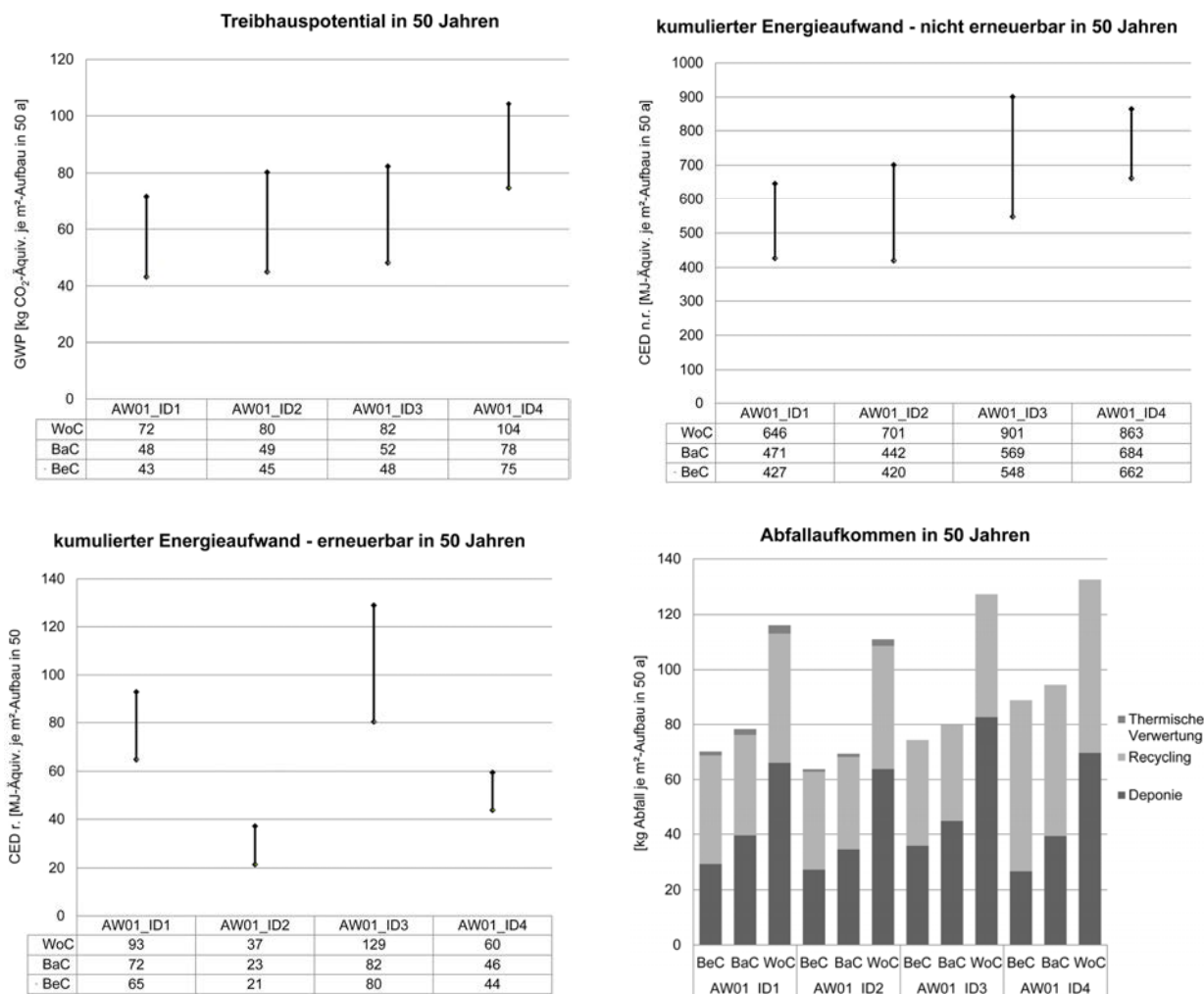


Abbildung 75 LCA-Vergleich – AW01\_ID

Die Varianten AW01\_ID1 und AW01\_ID2 weisen im Vergleich mit den anderen Aufbauten tendenziell niedrigere Kennwerte bezogen auf eine Nutzungsdauer von 50 Jahren auf (siehe Abbildung 75). Das schlechtere Abschneiden der Variante AW01\_ID4 ist auf den höheren Materialinput zurückzuführen. Kritisch zu hinterfragen ist, ob die für die Variante AW01\_ID1 eingesetzte Dampfsperre tatsächlich zu einer Verkürzung der Lebensdauer der angrenzenden Bauteilschichten führt. Für eine weitere Reduktion des Deponieanteils müsste eine höhere Recyclingquote der verwendeten mineralischen Bauprodukte und Gipskartonplatten wie bisher erreicht werden. Laut [73] kann in Österreich beispielsweise für rückgebaute Gipskartonplatten eine Recycling-Quote von null Prozent angenommen werden, obwohl in anderen EU-Mitgliedsländern deutlich höhere Recyclingquoten erreicht werden. ([73], Anhang A2 S. 19)



## Außenwand - AW01\_AD

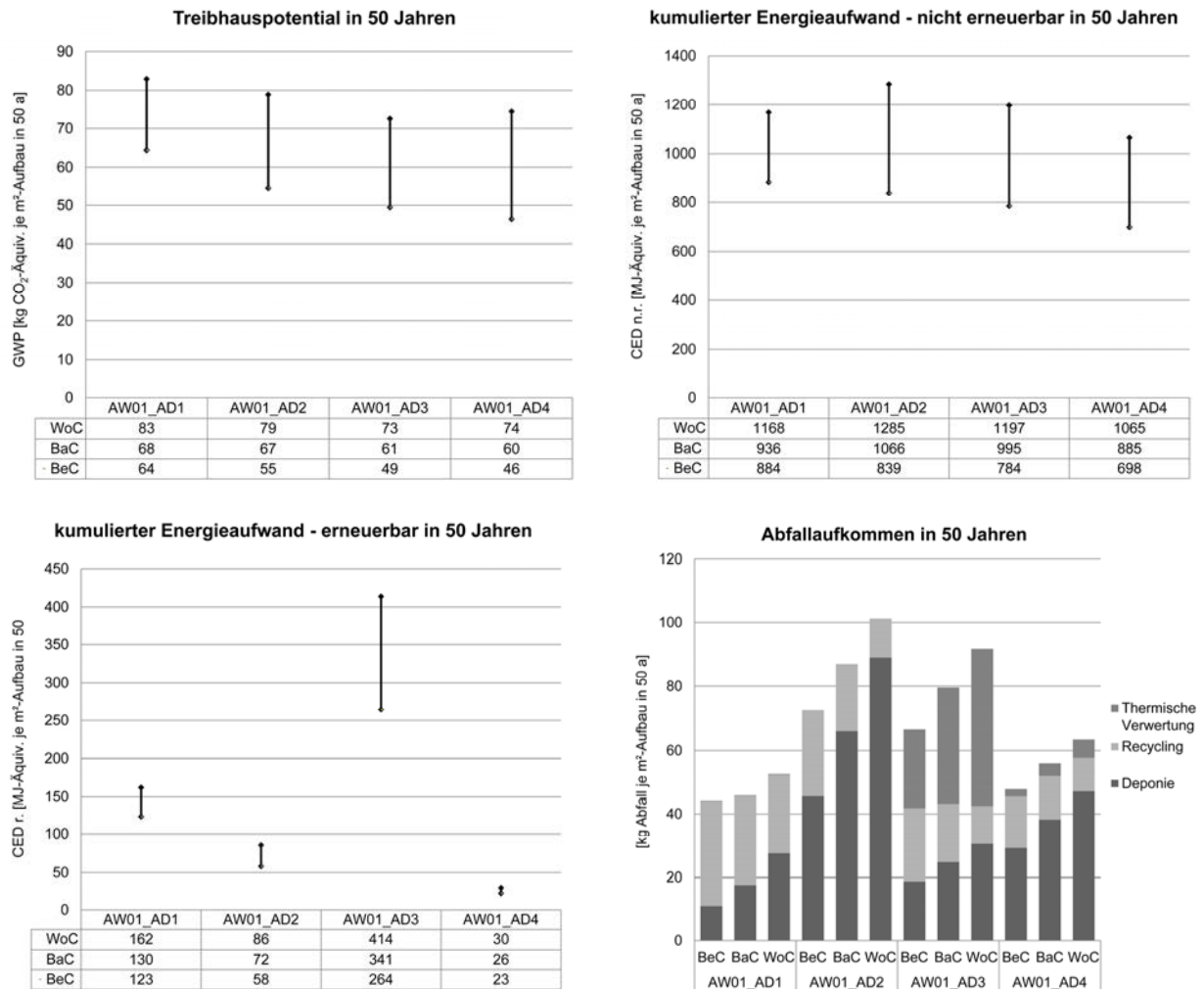


Abbildung 76 LCA-Vergleich – AW01\_AD

Die untersuchten Varianten weisen bei den Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) annähernd gleiche Bandbreiten auf (siehe Abbildung 76). Beim kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) stellt die Variante AW01\_AD3 aufgrund der verwendeten Holzfaserdämmplatten den Ausreißer dar. Die Verwendung von Bauprodukten aus erneuerbaren Energieträgern, einschließlich des CO<sub>2</sub>-Speichereffekts ist positiv zu werten. Auch beim Abfallaufkommen wird dies durch den hohen Anteil an thermischer Verwertung (Variante AW01\_AD3) ersichtlich. Der vergleichsweise hohe Deponieanteil der Variante AW01\_AD2 und AW01\_AD4 wird durch die schlechtere Kreislauffähigkeit des Wärmedämmverbundsystems aufgrund der geringen Sortenreinheit der anfallenden Baurestmassen verursacht.

## Außenwand - AW01\_AD\_ST

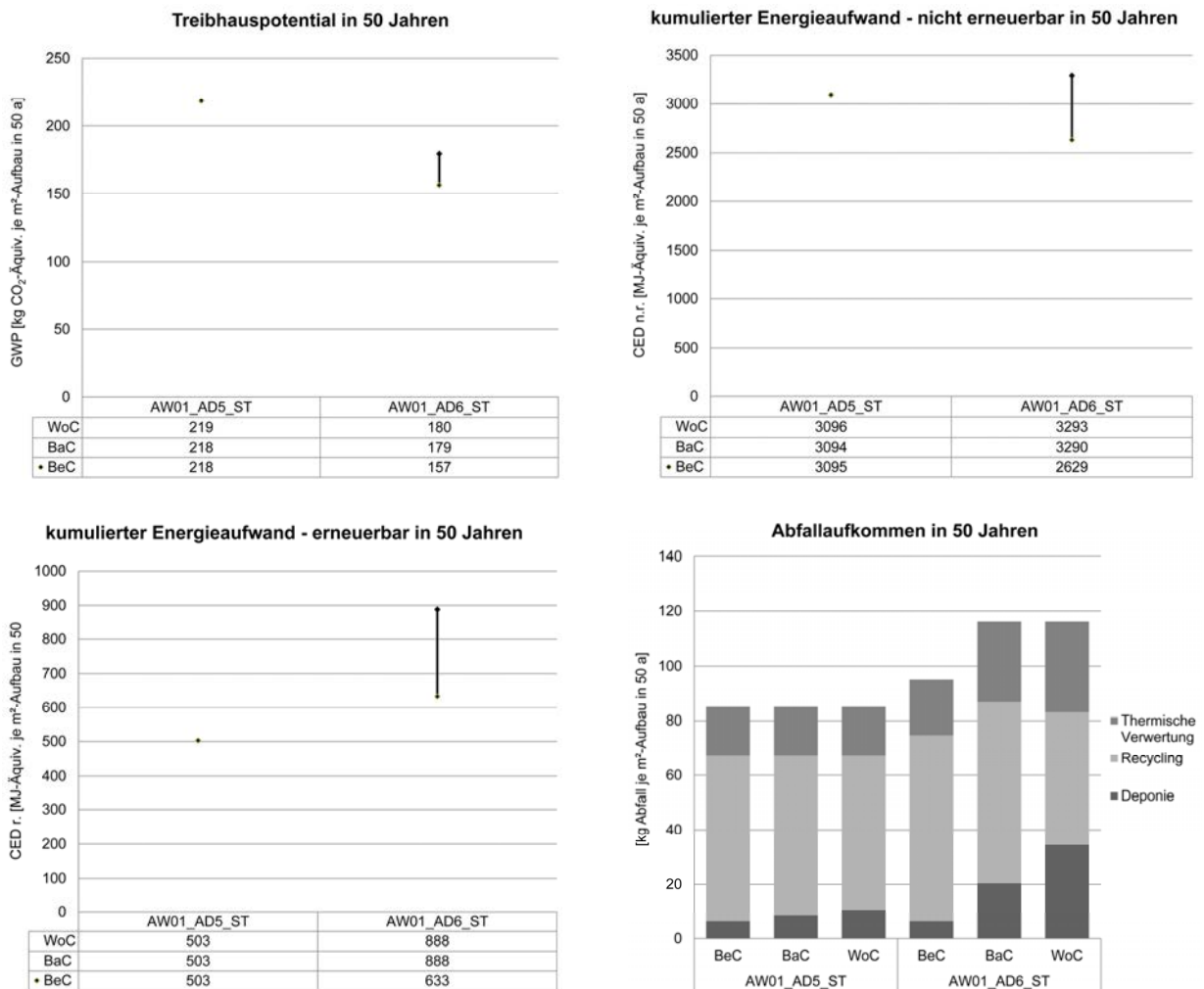


Abbildung 77 LCA-Vergleich – AW01\_AD\_ST

Die Variante AW01\_AD5\_ST beinhaltet einen Flachkollektor mit Alurahmen, die andere Variante AW01\_AD6\_ST umfasst einen Flachkollektor mit Holzrahmen und Mineralwollendämmung. Der unterschiedliche Materialinput an Metallen führt nur beim Indikator Treibhauspotential (GWP) zu einer merkbaren Kennwert-Erhöhung der Variante AW01\_AD5\_ST (siehe Abbildung 77).

Beim kumulierten Energieaufwand (CED n.r.) liegen beide Varianten annähernd gleich auf. Der höhere Holzanteil der Variante AW01\_AD6\_ST führt wiederum zu einer deutlichen Erhöhung des kumulierten Energieaufwands – erneuerbar (CED r.), wobei dies aufgrund der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern positiv zu werten ist.

Das höhere Deponie-Abfallaufkommen der Variante AW01\_AD6\_ST wird einerseits durch den höheren stofflichen Aufwand für die Sanierung sowie andererseits durch die vergleichsweise niedrigeren Recycling-Quoten verursacht. Im Best Case weicht das Abfallaufkommen der Variante AW01\_AD6\_ST (Flachkollektor mit Holzrahmen) nur geringfügig ab, da hier eine hohe Recycling-Quote und eine längerer Lebensdauer der verwendeten OSB-Platte und der Mineralwolle zugrunde gelegt wurde.

## Außenwand - AW01\_AD\_PV

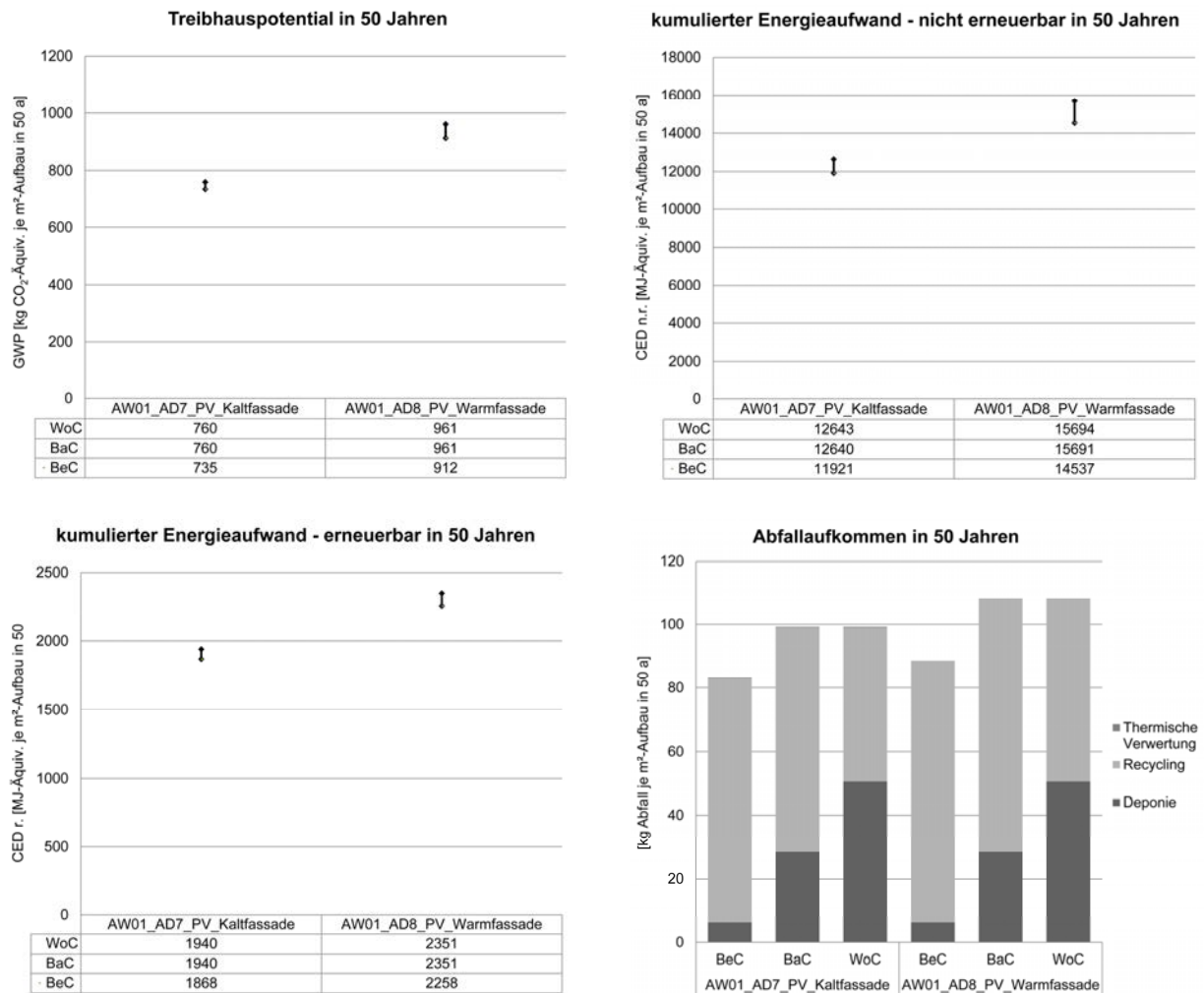


Abbildung 78 LCA-Vergleich – AW01\_AD\_PV

Die Variante AW01\_AD8\_PV\_Warmfassade weist tendenziell um ca. 15 % höhere Kennwerte auf, als die Variante – Kaltfassade (siehe Abbildung 78). Die PV-Paneele der Kaltfassade werden punktweise durch Edelstahl-Elemente gehalten. Die PV-Paneele der Warmfassade werden hingegen auf einem Pfosten-Riegel-System fixiert, wodurch ein vergleichsweise höherer Materialinput erforderlich ist. Der geringfügige Deponieanteil im Best Case wird nur durch den Austausch des mineralischen Innenputzes und der Mineralwolle verursacht. Eine künftige Erhöhung der Recycling-Quote der rückgebauten, sortenreinen Mineralwolle-Dämmungen wäre wünschenswert.

## Außenwand - AW02\_AD

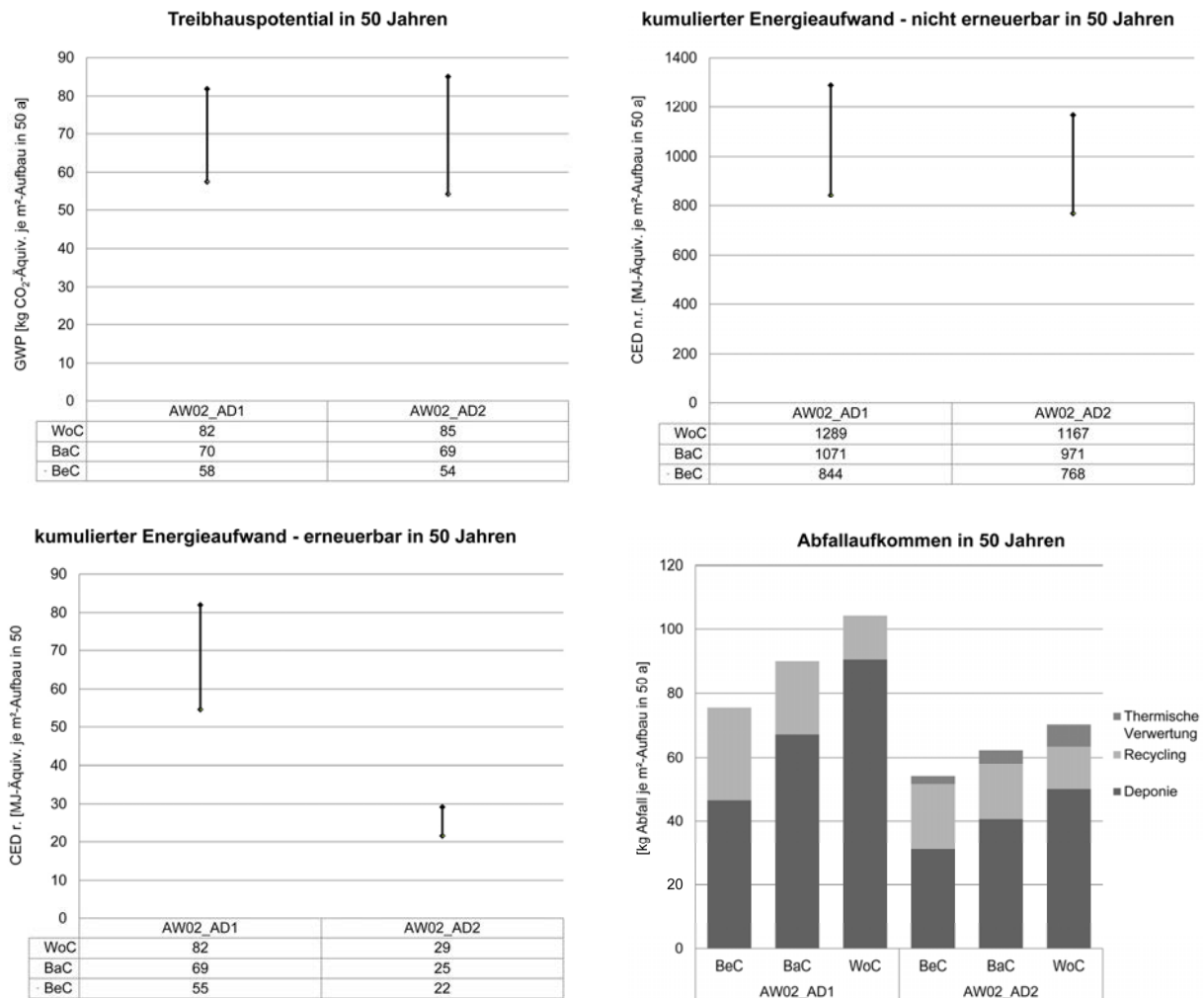


Abbildung 79 LCA-Vergleich – AW02\_AD

Die Variante AW02\_AD1 benötigt einen höheren Materialinput (Mineralwolle) als die Variante AW02\_AD2 (EPS), um den angestrebten U-Wert zu erreichen. Der Unterschied ist auch beim Vergleich des Abfallaufkommens ersichtlich (siehe Abbildung 79). Die beiden Varianten unterscheiden sich bei den Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) nur geringfügig.

Der Ausreißer der Variante AW02\_AD1 beim kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) ist im Vergleich zum kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) als vernachlässigbar zu werten. Beide Varianten weisen einen verhältnismäßig hohen Deponieanteil aufgrund der geringeren Sortenreinheit der anfallenden Hochbaurestmassen auf. Andere alternative Sanierungslösungen mit geringeren Abfallaufkommen und vergleichbarer Dämmwirkung waren nicht verfügbar. Hier ist noch ein weiteres Forschungs- und Entwicklungspotential gegeben.

## Außenwand - AW02\_AD\_ST

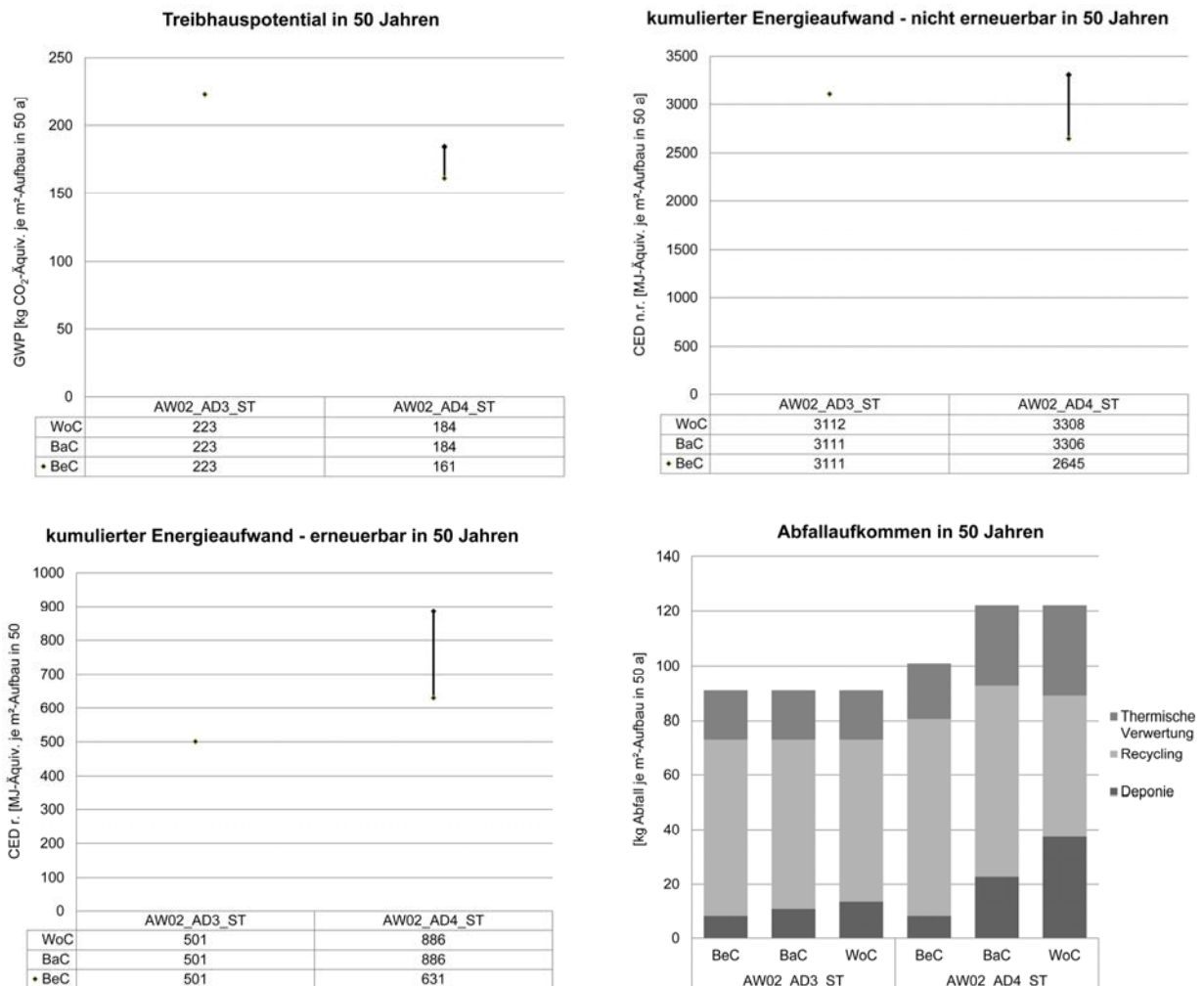


Abbildung 80 LCA-Vergleich – AW02\_AD\_ST

Die Variante AW02\_AD3\_ST beinhaltet einen Flachkollektor mit Alurahmen. Die andere Variante AW02\_AD4\_ST umfasst hingegen einen Flachkollektor mit Holzrahmen und Mineralwollgedämmung. Beim Indikator Treibhauspotential (GWP) ist ein deutlich höherer Kennwert der Variante AW02\_AD3\_ST aufgrund des eingesetzten Aluminiums ersichtlich (siehe Abbildung 80).

Beim kumulierten Energieaufwand (CED n.r.) ist kein nennenswerter Unterschied zwischen beiden Varianten erkennbar. Der höhere Holzanteil der Variante AW02\_AD4\_ST bedingt einen deutlich höheren kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.). Dieser Mehraufwand ist jedoch aufgrund der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern und den CO<sub>2</sub>-Speicherungseffekt positiv zu werten ist.

Das höhere Deponie-Abfallaufkommen der Variante AW02\_AD4\_ST wird einerseits durch den höheren stofflichen Aufwand für die thermische Sanierung sowie andererseits durch die vergleichsweise niedrigeren Recycling-Quoten verursacht. Im Best Case weicht das zu deponierende Abfallaufkommen der Variante AW02\_AD4\_ST nur geringfügig von der Variante AW02\_AD3\_ST ab, da hier eine vergleichsweise hohe Recycling-Quote zugrunde gelegt wurde.

## Außenwand - AW02\_AD\_PV

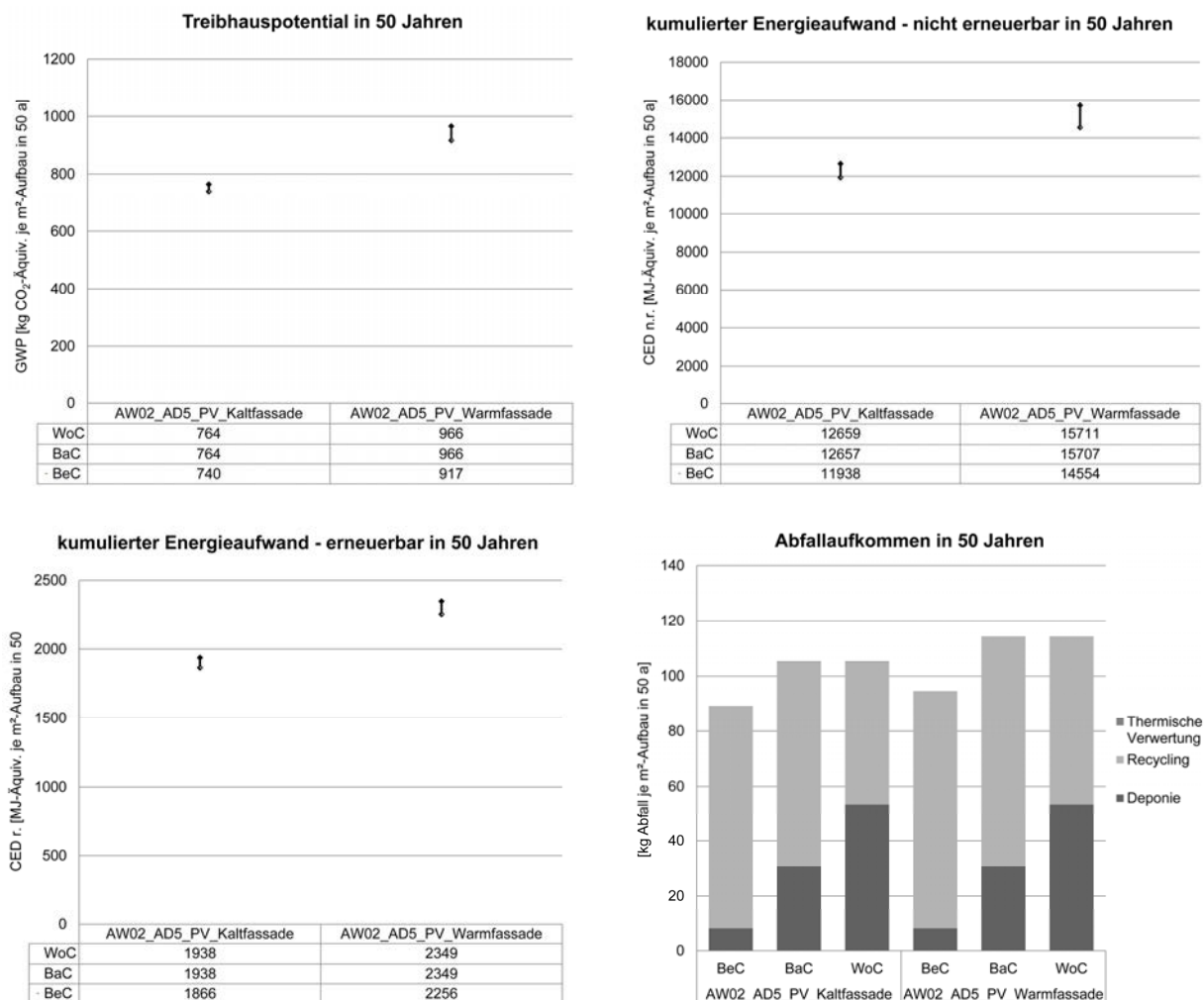


Abbildung 81 LCA-Vergleich – AW02\_AD\_PV

Die Variante AW02\_AD5\_PV\_Warmfassade weist tendenziell um ca. 15 % höhere Kennwerte auf, als die Variante AW02\_AD5\_PV\_Kaltfassade (siehe Abbildung 81). Die PV-Paneele der Kaltfassade werden punktweise durch Edelstahl-Elemente gehalten. Die PV-Paneele der Warmfassade werden stattdessen auf einem Pfosten-Riegel-System fixiert, wodurch ein vergleichsweise höherer Materialinput erforderlich ist, der eine Erhöhung der Kennwerte der Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierten Energieaufwand (CED) zur Folge hat. Der Vorteil des Pfosten-Riegel-Systems ist jedoch die Eignung hinsichtlich der thermischen Sanierung von Skelettbauweisen. Der geringfügige Deponieanteil wird durch den Austausch des mineralischen Innenputzes und der Mineralwolle verursacht.

## Außenwand - AW03\_AD

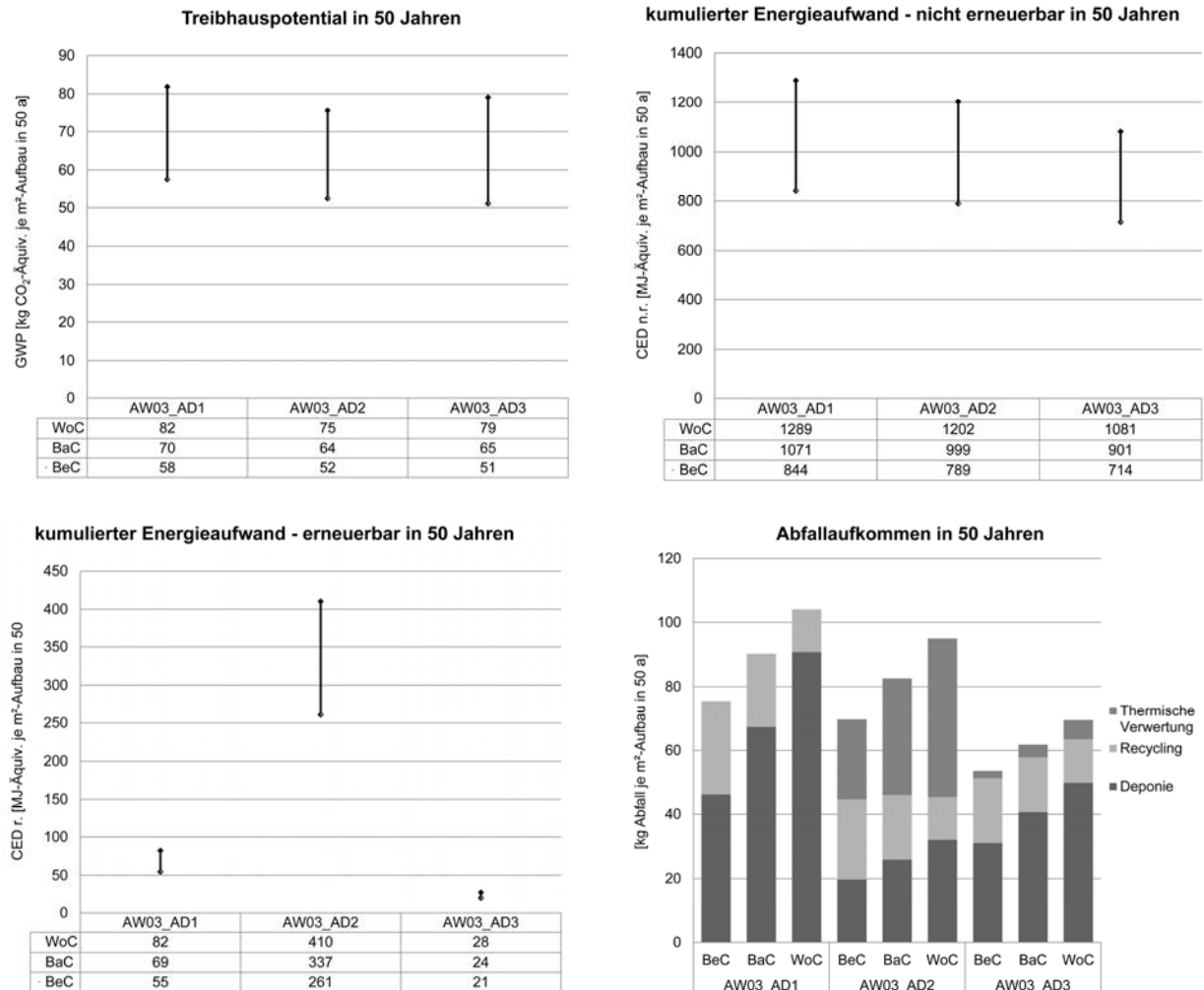


Abbildung 82 LCA-Vergleich – AW03\_AD

Die Variante AW03\_AD1 benötigt einen vergleichsweise höheren Materialinput (Mineralwolle) als die Variante AW03\_AD2 (Holzfaserdämmplatte) und AW03\_AD3 (EPS), um den angestrebten U-Wert zu erreichen. Dies hat auch ein höheres Abfallaufkommen zur Folge (siehe Abbildung 82). Die Variante AW03\_AD2 weist aufgrund der eingesetzten thermisch oder stofflich verwertbaren Holzfaserdämmplatten ein vergleichsweise niedrigeres Deponie-Abfallaufkommen auf.

Die Verwendung einer Holzfaserdämmplatte (=erneuerbarer Energieträger) verursacht auch den Ausreißer bei der Variante AW03\_AD2 beim kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) Beim Indikatoren Treibhauspotential (GWP) sind die Varianten AW03\_AD2 (Holzfaserdämmplatte) und AW03\_AD3 (EPS) geringfügig besser wie die Variante AW03\_AD1 (Mineralwolle).

Bei der Betrachtung des kumulierten Energieaufwands – nicht erneuerbar (CED n.r.) ist die AW03\_AD3 (EPS) um ca. 10 % niedriger als die zwei anderen Varianten, dass im Wesentlichen mit dem niedrigen Materialinput zusammenhängt (62 kg/m<sup>2</sup> statt 90 kg/m<sup>2</sup>). Der verhältnismäßig hohe Deponieanteil der betrachteten Varianten wird aufgrund der geringeren Sortenreinheit der anfallenden Hochbaurestmassen verursacht. Hier ist noch Forschungs- und Entwicklungspotential hinsichtlich kreislauffähiger WDV-Systemlösungen gegeben.

## Außenwand - AW03\_AD\_ST

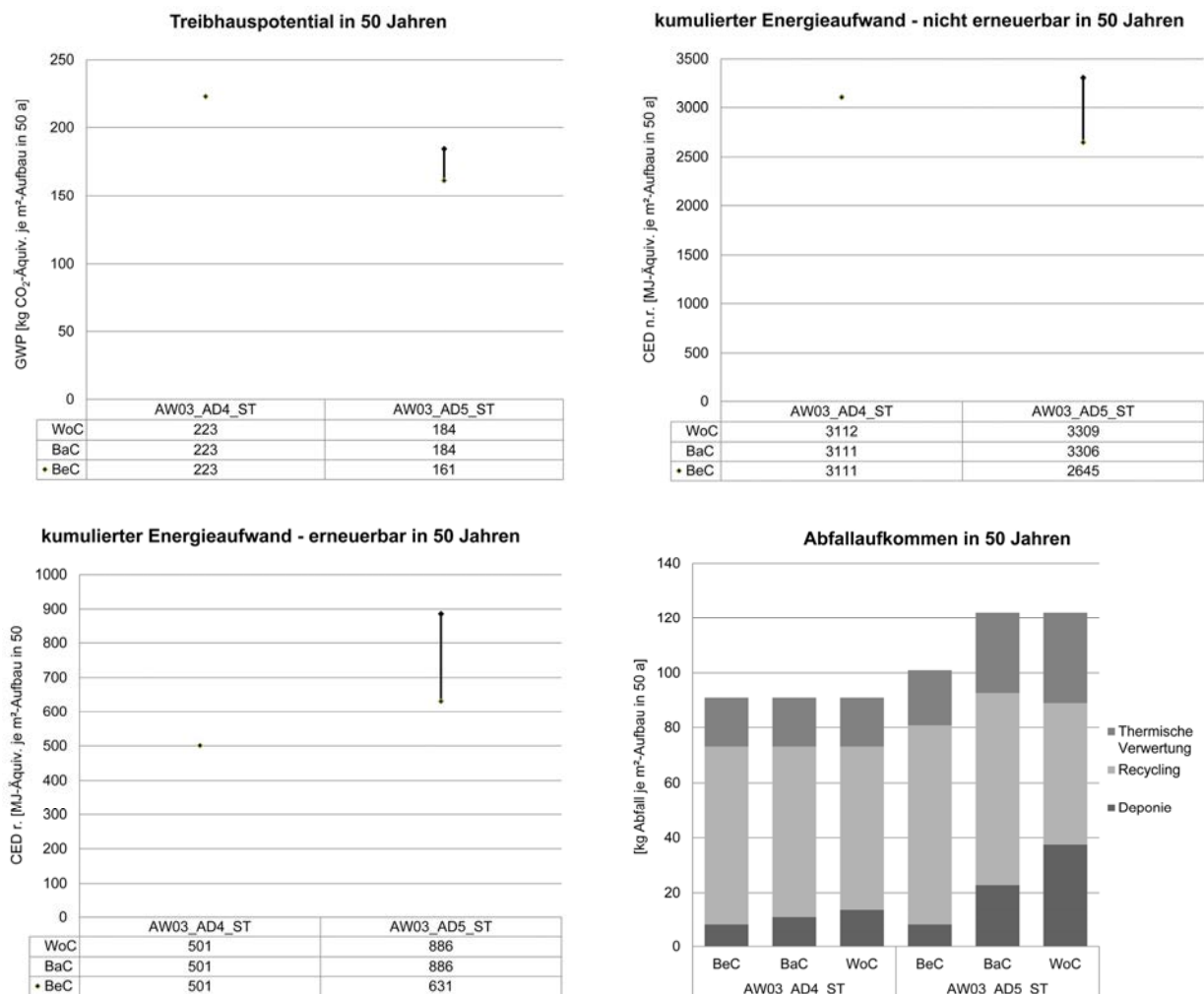


Abbildung 83 LCA-Vergleich – AW03\_AD\_ST

Die Variante AW03\_AD4\_ST beinhaltet einen Flachkollektor mit Alurahmen. Die andere Variante AW03\_AD5\_ST umfasst hingegen einen Flachkollektor mit Holzrahmen und Mineralwollgedämmung. Beim Indikator Treibhauspotential (GWP) weist die Variante AW03\_AD5\_ST einen deutlich geringeren Kennwert auf (siehe Abbildung 83).

Beim kumulierten Energieaufwand (CED n.r.) ist kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Varianten erkennbar. Der höhere Holzanteil der Variante AW03\_AD5\_ST bedingt einen deutlich höheren kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.), wobei dies aufgrund der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern positiv zu werten ist.

Das höhere Deponie-Abfallaufkommen der Variante AW03\_AD5\_ST wird einerseits durch den höheren stofflichen Aufwand zur Sanierung mit Passivhaus-Komponenten und Modernisierung mit PV und Solarthermie (PH+) sowie andererseits durch die niedrigeren Recycling-Quoten der verwendeten Bauprodukte verursacht. Im Best Case der Variante AW03\_AD5\_ST weicht das Deponie-Abfallaufkommen nur geringfügig ab, da hier eine vergleichsweise hohe Recycling-Quote zugrunde gelegt wurde.



## Außenwand - AW03\_AD\_PV

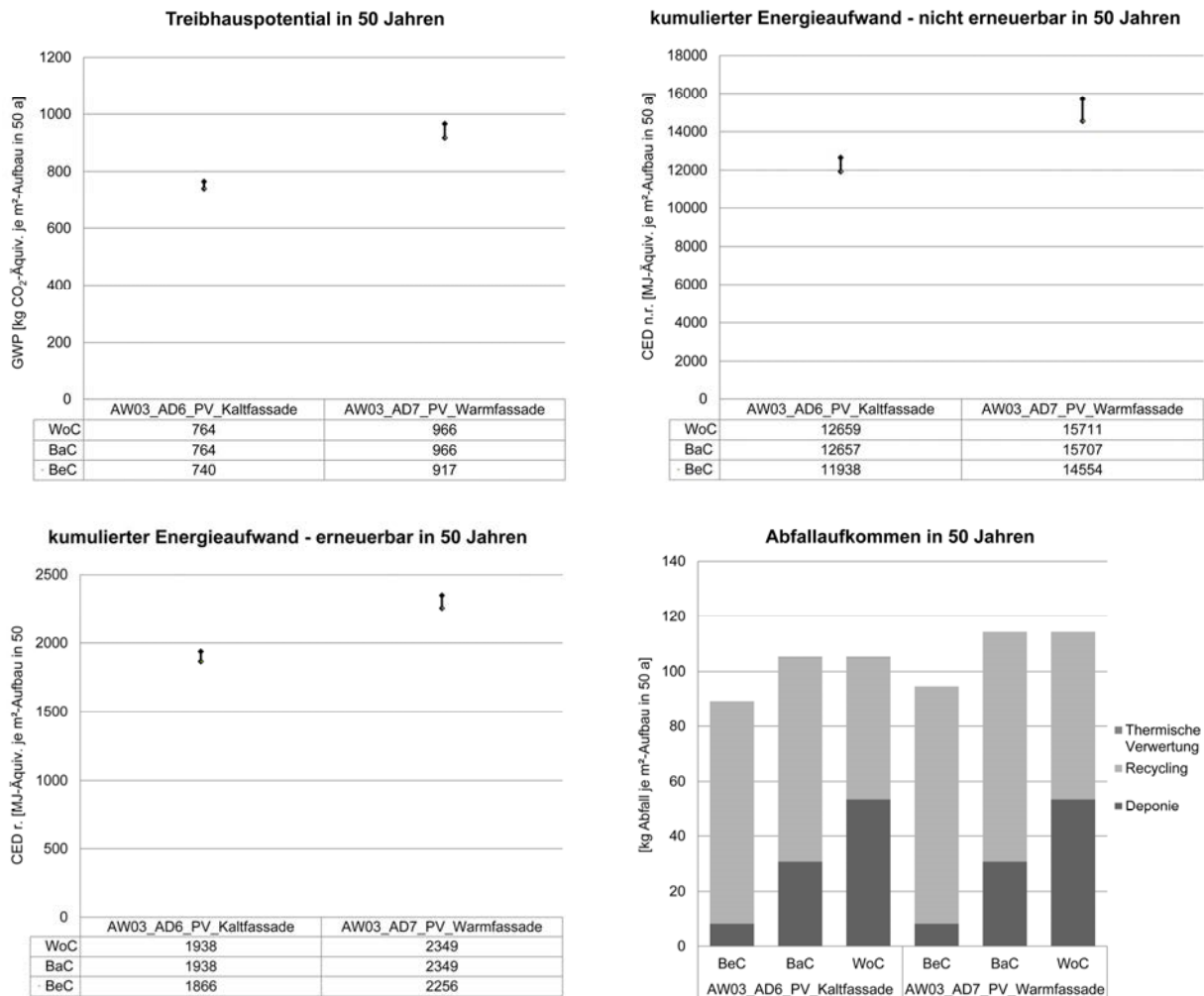


Abbildung 84 LCA-Vergleich – AW03\_AD\_PV

Die Variante AW03\_AD7\_PV\_Warmfassade weist tendenziell um ca. 15 % höhere Kennwerte auf, als die Variante AW03\_AD7\_PV\_Kaltfassade (siehe Abbildung 84). Die PV-Paneele der Kaltfassade werden punktweise durch Edelstahl-Elemente gehalten. Die PV-Paneele der Warmfassade werden stattdessen auf einem Pfosten-Riegel-System fixiert, wodurch ein vergleichsweise höherer Materialinput erforderlich ist, der eine Erhöhung der Kennwerte der Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierter Energieaufwand (CED) zur Folge hat. Hier ist anzumerken, dass diese Lösung auch zur thermischen Sanierung von Skelettbauweisen anwendbar ist. Der geringfügige Deponieanteil ist auf die gute Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen zurückzuführen. Deponiert werden nur der mineralische Innenputz und die Mineralwolle.

**Außenwand - AW04\_AD**

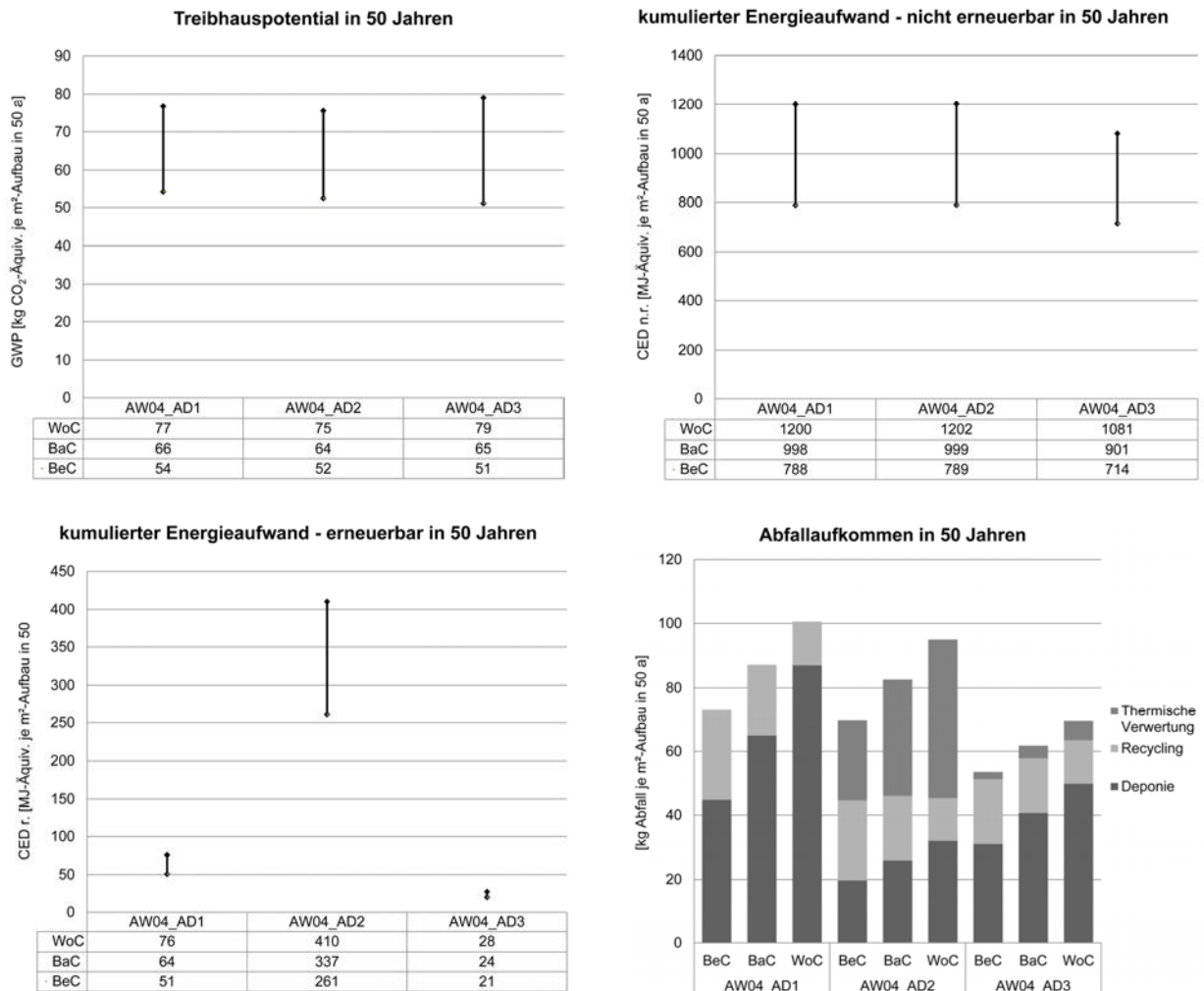


Abbildung 85 LCA-Vergleich – AW04\_AD

Die Variante AW04\_AD1 benötigt einen vergleichsweise höheren Materialinput (Mineralwolle) als die Variante AW04\_AD2 (Holzfaserdämmplatte) und AW04\_AD3 (EPS), um den angestrebten U-Wert zu erreichen. Dies hat auch ein höheres Abfallaufkommen zur Folge (siehe Abbildung 85). Die Variante AW04\_AD2 weist aufgrund der eingesetzten thermisch oder stofflich verwertbaren Holzfaserdämmplatte ein vergleichsweise niedrigeres Deponie-Abfallaufkommen auf.

Die Verwendung einer Holzfaserdämmplatte (=erneuerbarer Energieträger) verursacht auch den Ausreißer bei der Variante AW04\_AD2 beim kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) Beim Indikatoren Treibhauspotential (GWP) sind die Varianten AW04\_AD2 (Holzfaserdämmplatte) und AW04\_AD3 (EPS) geringfügig besser wie die Variante AW04\_AD1 (Mineralwolle).

Bei der Betrachtung des kumulierten Energieaufwands – nicht erneuerbar (CED n.r.) ist die Variante AW04\_AD3 (EPS) um ca. 10 % niedriger als die zwei anderen Varianten, das im Wesentlichen mit dem niedrigen Materialinput zusammenhängt (62 kg/m<sup>2</sup> statt 87 kg/m<sup>2</sup>). Der verhältnismäßig hohe Deponieanteil der drei untersuchten Varianten wird aufgrund der geringeren Sortenreinheit der anfallenden Hochbaurestmassen verursacht. Hier ist noch ein Forschungs- und Entwicklungspotential hinsichtlich kreislauffähiger Systemlösungen gegeben.

## Außenwand - AW04\_AD\_ST

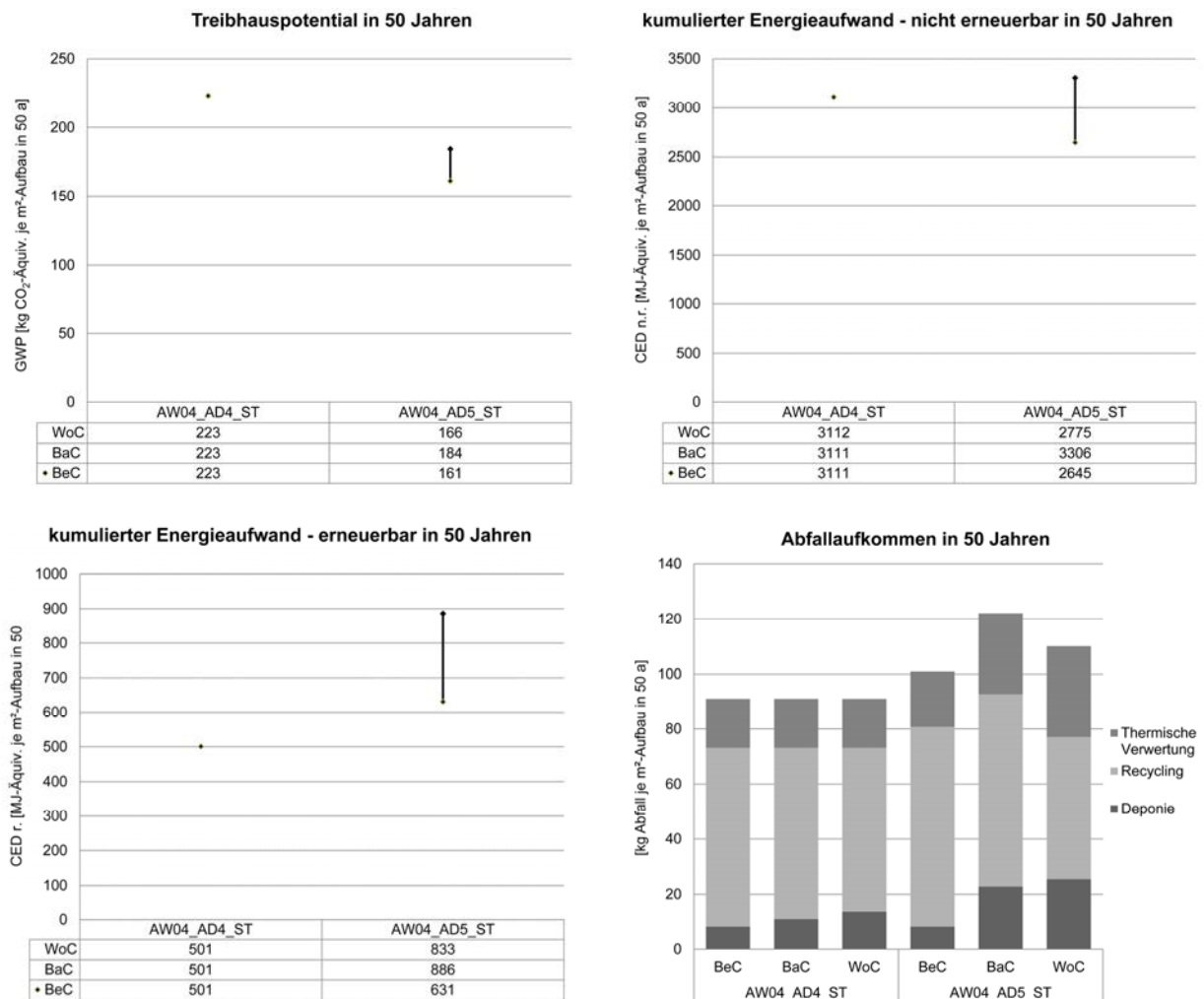


Abbildung 86 LCA-Vergleich – AW04\_AD\_ST

Die Variante AW04\_AD4\_ST beinhaltet einen Flachkollektor mit Alurahmen. Die Variante AW04\_AD5\_ST umfasst hingegen einen Flachkollektor mit Holzrahmen und Mineralwollendämmung. Beim Indikator Treibhauspotential (GWP) weist die Variante AW04\_AD5\_ST einen deutlich geringeren Kennwert auf (siehe Abbildung 86).

Beim kumulierten Energieaufwand (CED n.r.) ist kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Varianten erkennbar. Der höhere Holzanteil der Variante AW04\_AD5\_ST bedingt einen deutlich höheren kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.), wobei dies aufgrund der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern positiv zu werten ist.

Das höhere Deponie-Abfallaufkommen der Variante AW04\_AD5\_ST wird einerseits durch den höheren stofflichen Aufwand zur Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, PV und Solarthermie (Variante PH+) sowie andererseits durch die niedrigeren Recycling-Quoten der anfallenden Baurestmassen verursacht. Im Best Case weicht das Abfallaufkommen der Variante AW04\_AD5\_ST nur geringfügig vom Best Case der Variante AW04\_AD4\_ST ab, da hier eine vergleichsweise hohe Recycling-Quote und längere Lebensdauer (OSB Platte, Mineralwolle etc.) zugrunde gelegt wurde.

## Außenwand - AW04\_AD\_PV

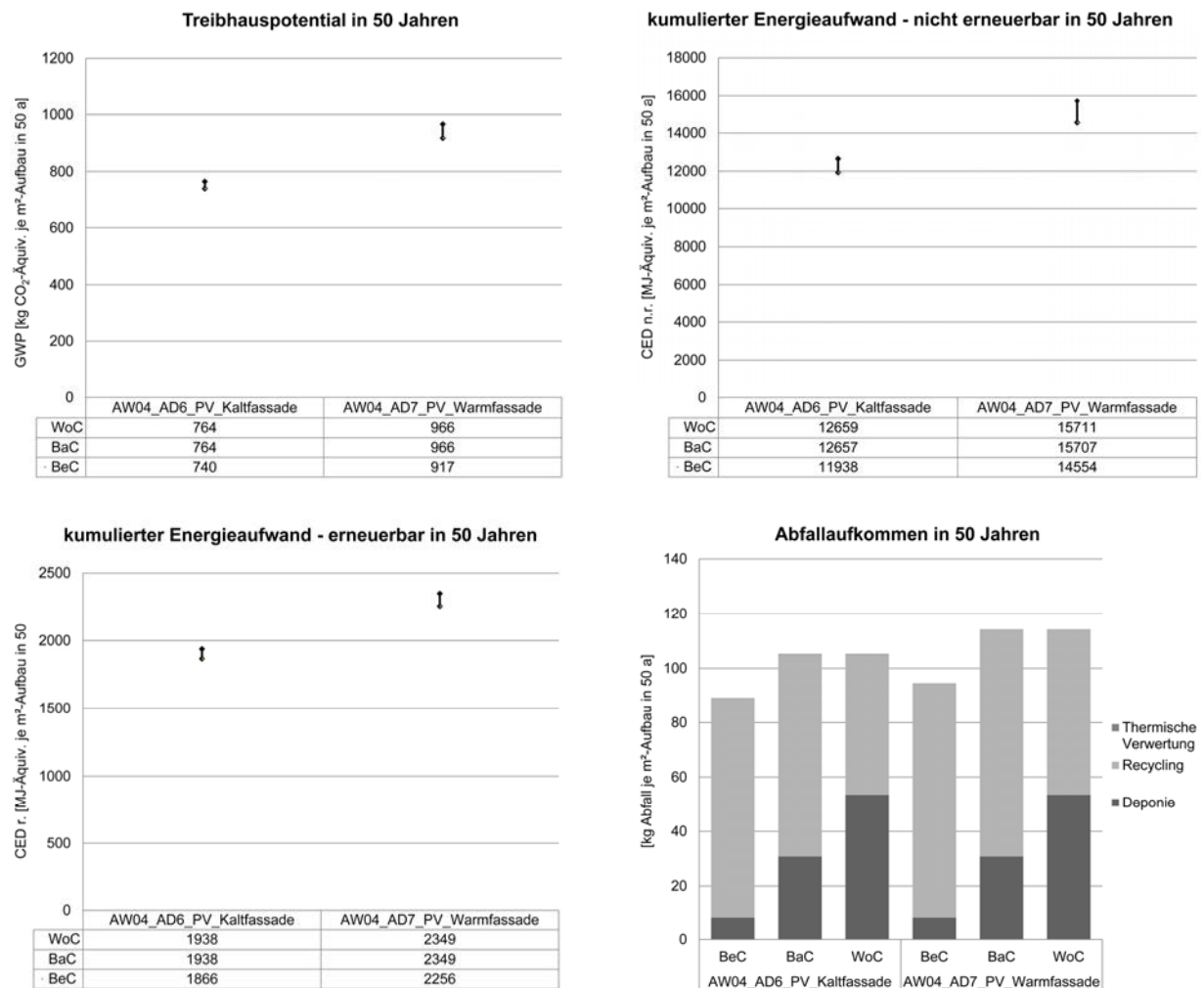


Abbildung 87 LCA-Vergleich – AW04\_AD\_PV

Die Variante AW04\_AD7\_PV\_Warmfassade weist tendenziell um ca. 15 % höhere Kennwerte auf, als die Variante AW03\_AD7\_PV\_Kaltfassade (siehe Abbildung 87). Die PV-Paneele der Kaltfassade werden punktweise durch Edelstahl-Elemente gehalten. Die PV-Paneele der Warmfassade werden stattdessen auf einem Pfosten-Riegel-System fixiert, wodurch ein vergleichsweise höherer Materialinput erforderlich ist. Die Folge sind höhere Kennwerte der Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierter Energieaufwand (CED). Trotzdem kann diese Variante auch für die thermische Sanierung von Skelettbauweisen herangezogen werden. Der geringfügige Deponieanteil wird durch den Austausch des mineralischen Innenputzes und der Mineralwolle verursacht.

## Außenwand - AW05\_AD

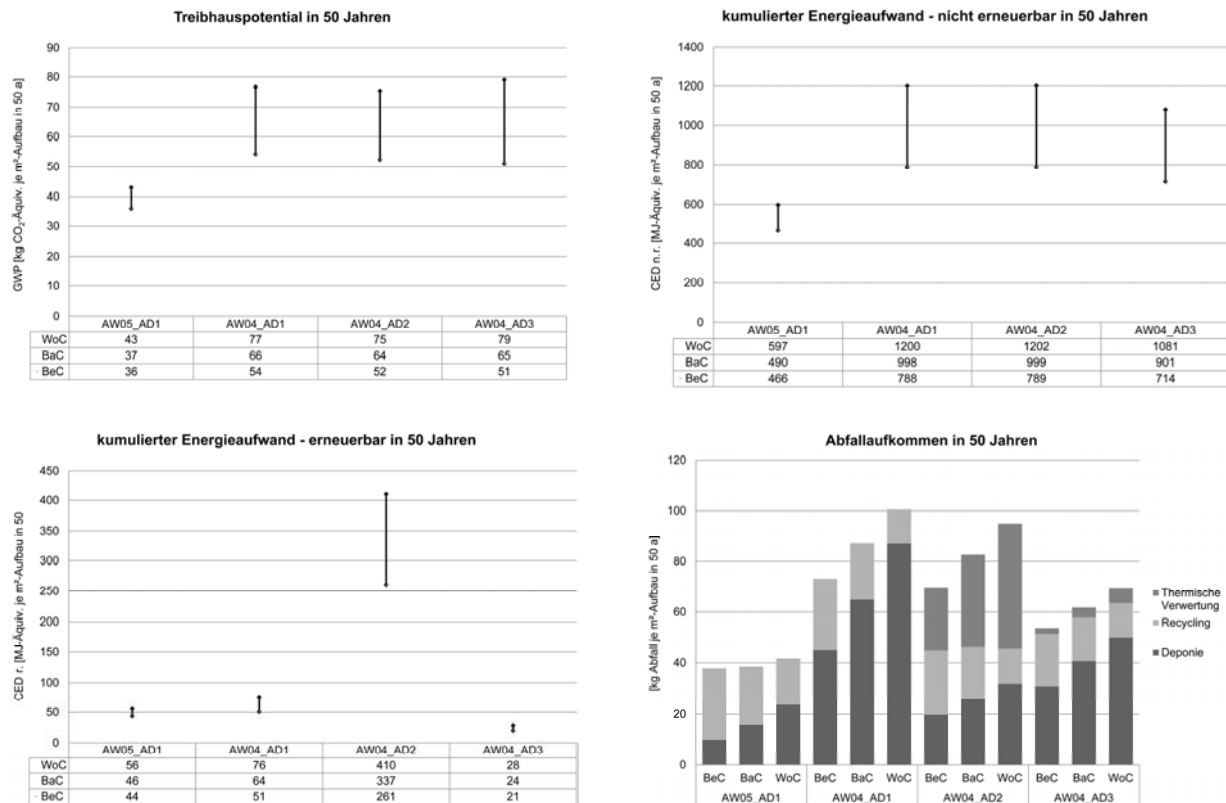


Abbildung 88 LCA-Vergleich – AW05\_AD mit AW04\_AD

Es wurde nur ein hinterlüfteter Fassadenaufbau als Sanierungsvariante bilanziert, da bereits im Bestand ein solcher Aufbau ausgeführt wurde. Deswegen werden die LCA-Kennwerte mit den funktional gleichwertigen Sanierungsmaßnahmen der Variante AW\_04 gegenübergestellt (siehe Abbildung 88).

Bei einem Kennwert-Vergleich mit den Aufbauten AW04\_AD1 bis AW04\_AD3 zur Erreichung eines annähernd gleichen U-Werts zeigt sich, dass aufgrund des wesentlich geringeren Materialinputs der Variante AW05\_AD1 (38 kg/m<sup>2</sup> statt 62 bis 87 kg/m<sup>2</sup>) auch zu dementsprechend niedrigeren Ökobilanz-Kennwerten (GWP, CED n.r. und Abfallaufkommen) führt. Dies ist einerseits auf den Einsatz von vergleichsweise leichten Mineralwolle-Dämmungen (15 kg/m<sup>3</sup>) und andererseits auf die um ca. 10 Jahre längere Lebensdauer zurückzuführen.

Die Ökoeffizienz der hinterlüfteten Fassade (AW05\_AD1) ist bezogen auf die Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) wesentlich besser als jene der bilanzierten Wärmedämmverbundsysteme mit EPS, Mineralwolle oder Holzfaserdämmplatten. Die Verwendung einer Holzfaserdämmplatte (=erneuerbarer Energieträger) verursacht den Ausreißer bei der Variante AW04\_AD2 bezogen auf den kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.).

Vorteilhaft ist auch die leichte Trennbarkeit in der Rückbauphase, die folglich zu einer höheren Sortenreinheit der anfallenden Hochbaurestmassen führt und eine vergleichsweise höhere Recycling-Quote erreicht wird.

## Außenwand - AW05\_AD\_ST

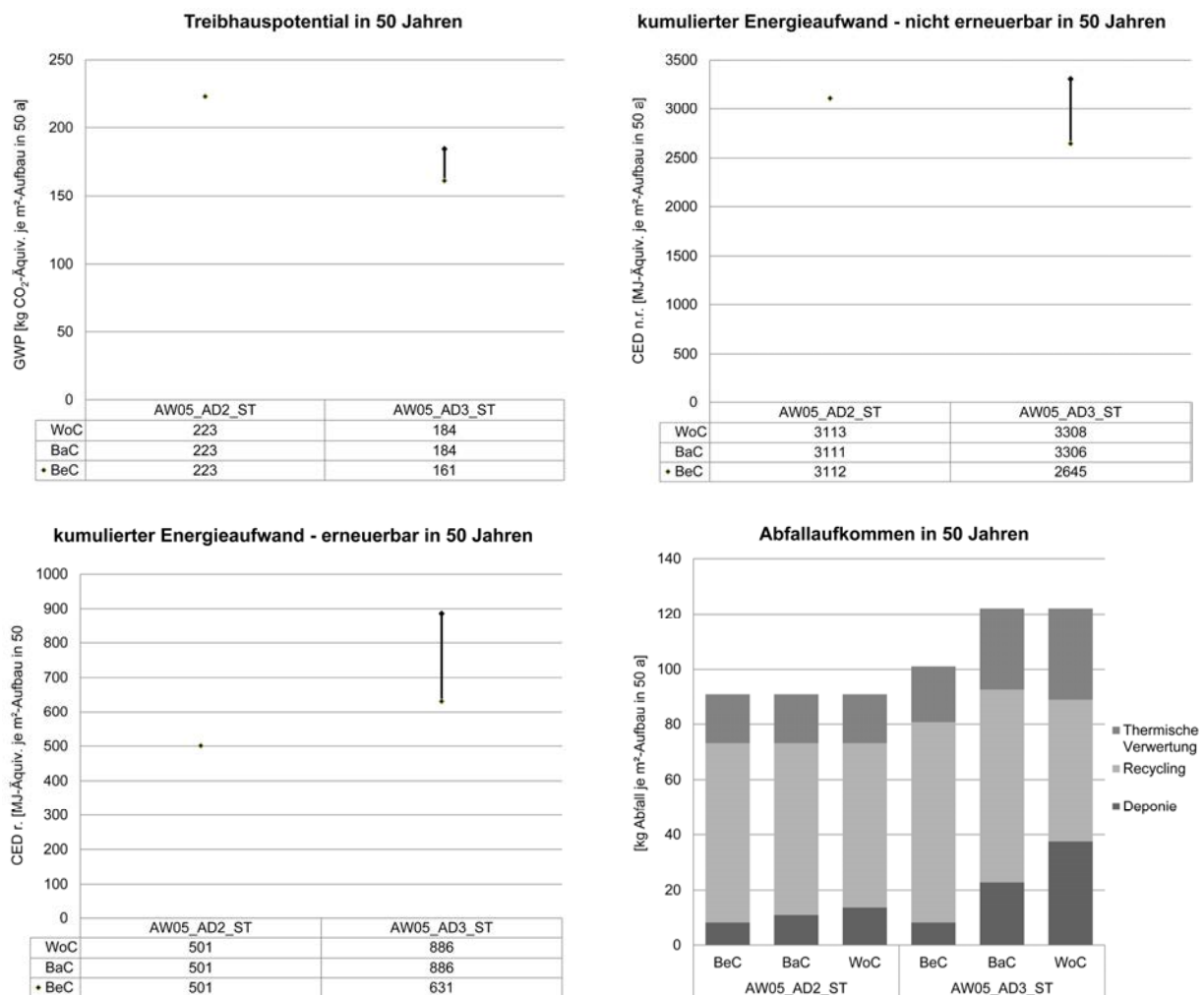


Abbildung 89 LCA-Vergleich – AW05\_AD\_ST

Die Variante AW05\_AD2\_ST beinhaltet einen Flachkollektor mit Alurahmen. Die Variante AW05\_AD3\_ST umfasst hingegen einen Flachkollektor mit Holzrahmen und Mineralwollgedämmung. Beim Indikator Treibhauspotential (GWP) weist die Variante AW05\_AD3\_ST einen deutlich geringeren Kennwert auf (siehe Abbildung 89).

Beim kumulierten Energieaufwand (CED n.r.) ist kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Varianten erkennbar. Der höhere Holzanteil der Variante AW05\_AD3\_ST bedingt einen deutlich höheren kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.), wobei dies aufgrund der stofflichen Nutzung von erneuerbaren Energieträgern und der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Speicherung positiv zu werten ist.

Das höhere Deponie-Abfallaufkommen der Variante AW05\_AD3\_ST wird einerseits durch den höheren stofflichen Aufwand zur thermischen Sanierung und energetischen Modernisierung sowie andererseits durch die niedrigeren Recycling-Quoten der verwendeten Bauprodukte verursacht. Im Best Case der Variante AW05\_AD3\_ST weicht das Deponie-Abfallaufkommen nur geringfügig von der Vergleichsvariante AW05\_AD2\_ST ab, da hier eine vergleichsweise hohe Recycling-Quote zugrunde gelegt wurde.

**Außenwand - AW05\_AD\_PV**

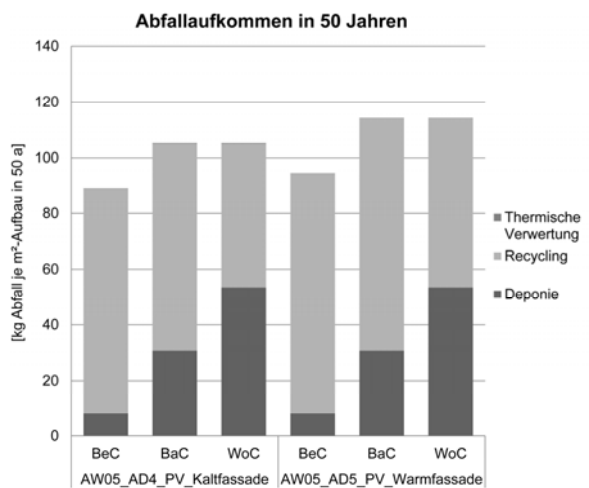
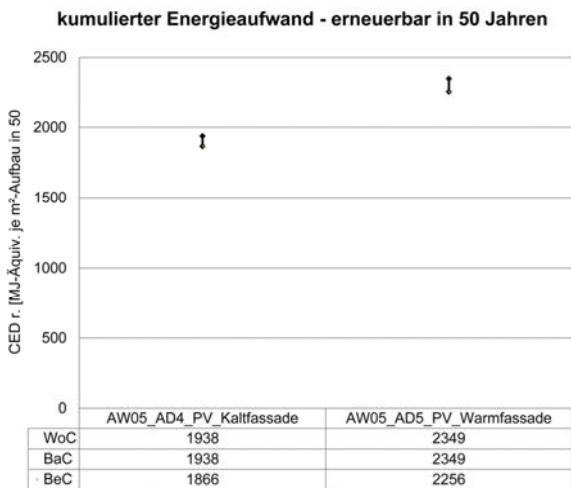
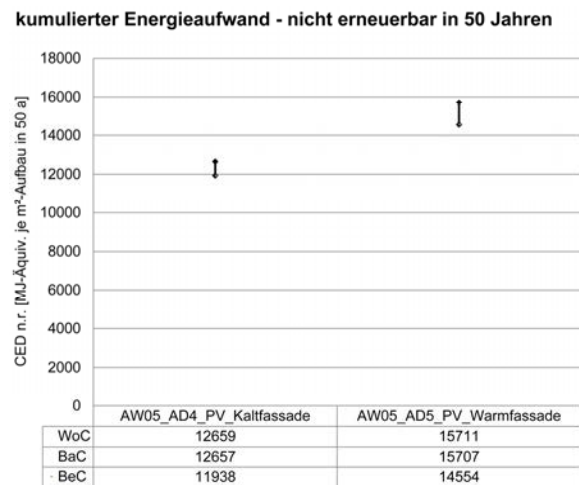
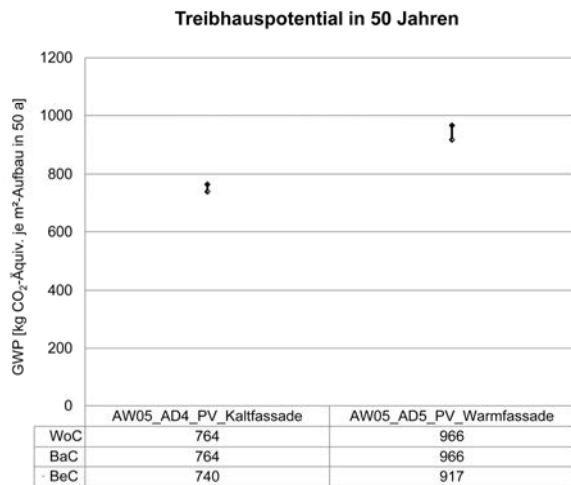


Abbildung 90 LCA-Vergleich – AW05\_AD\_PV

Die Variante AW05\_AD4\_PV\_Warmfassade weist tendenziell um ca. 15 % höhere Kennwerte auf, als die Variante AW05\_AD7\_PV\_Kaltfassade (siehe Abbildung 90). Die PV-Paneele der Kaltfassade werden punktweise durch Edelstahl-Elemente gehalten. Die PV-Paneele der Warmfassade werden stattdessen auf einem Pfosten-Riegel-System fixiert, wodurch ein vergleichsweise höherer Materialinput erforderlich ist, der wiederum zu einer Erhöhung der Kennwerte der Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierter Energieaufwand (CED) führt. Die Stärke der Warmfassade liegt jedoch in ihrer Anwendung zur thermischen Sanierung von Skelettbauweisen. Der geringfügige Deponieanteil wird durch den Austausch des mineralischen Innenputzes und der Mineralwolle verursacht.

## Außenwand - AW06\_AD

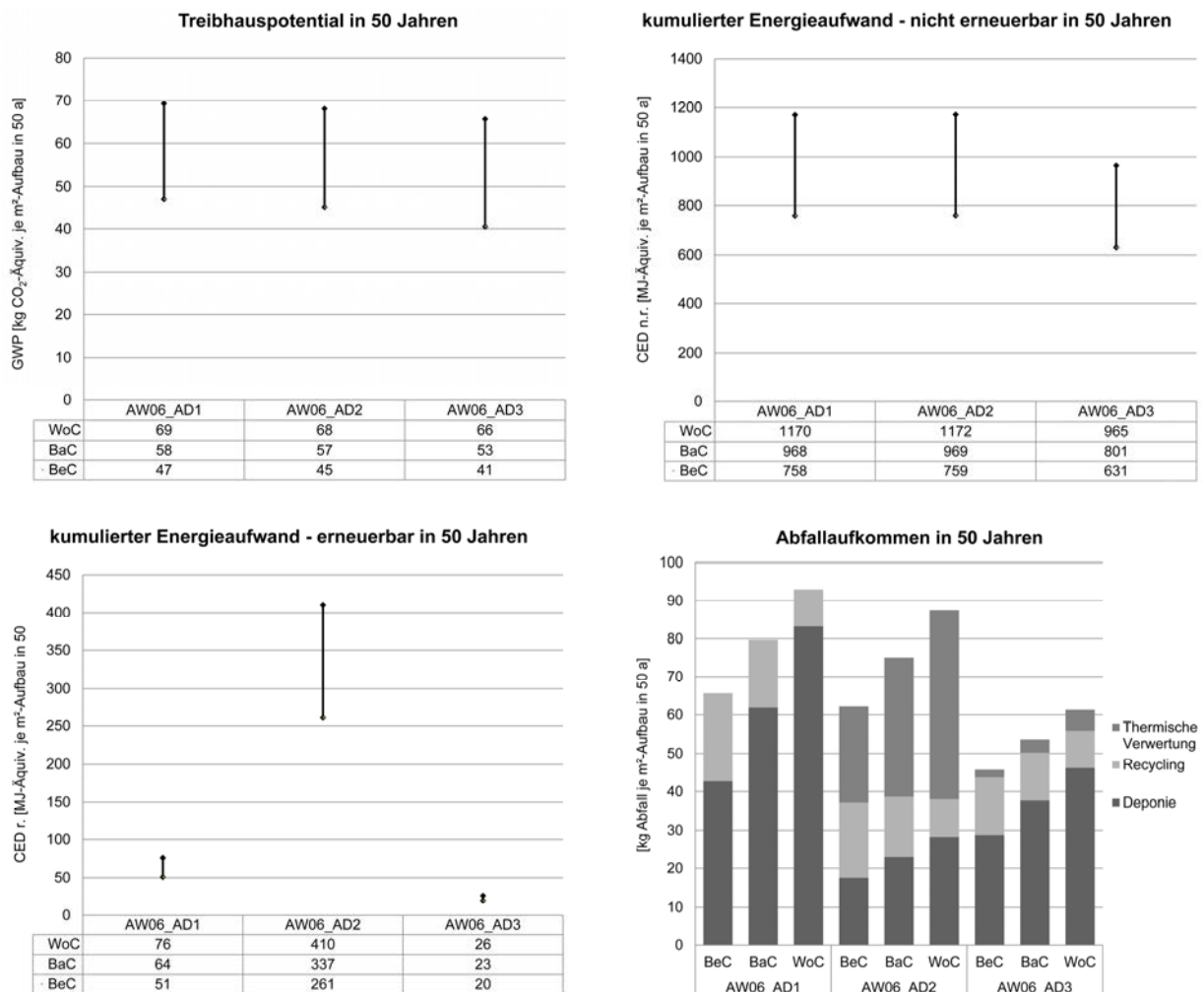


Abbildung 91 LCA-Vergleich – AW06\_AD

Die Variante AW06\_AD1 benötigt einen vergleichsweise höheren Materialinput (Mineralwolle) als die Variante AW06\_AD2 (Holzfaserdämmplatte) und AW06\_AD3 (EPS), um den angestrebten U-Wert zu erreichen. Dies hat auch ein höheres Abfallaufkommen zur Folge (siehe Abbildung 91). Die Variante AW06\_AD2 weist aufgrund der eingesetzten Holzfaserdämmplatte ein vergleichsweise niedrigeres Deponie-Abfallaufkommen auf.

Die Verwendung einer Holzfaserdämmplatte (=erneuerbarer Energieträger) verursacht auch den Ausreißer beim kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) der Variante AW06\_AD2. Dies ist jedoch aufgrund der stofflichen Nutzung von erneuerbaren Energieträgern hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Speichereffekts positiv zu werten.

Beim Indikator Treibhauspotential (GWP) schneiden die Varianten AW06\_AD2 (Holzfaserdämmplatte) und AW06\_AD3 (EPS) geringfügig besser ab als die Variante AW06\_AD1 (Mineralwolle). Bei der Betrachtung des kumulierten Energieaufwands – nicht erneuerbar (CED n.r.) ist die AW06\_AD3 (EPS) um ca. 10 % niedriger als die zwei anderen Varianten, das im Wesentlichen mit dem niedrigen Materialinput zusammenhängt (53 kg/m<sup>2</sup> statt 80 kg/m<sup>2</sup>). Der verhältnismäßig hohe Deponieanteil wird aufgrund der geringeren Sortenreinheit der anfallenden Hochbaurestmassen verursacht.



## Außenwand - AW06\_AD\_ST

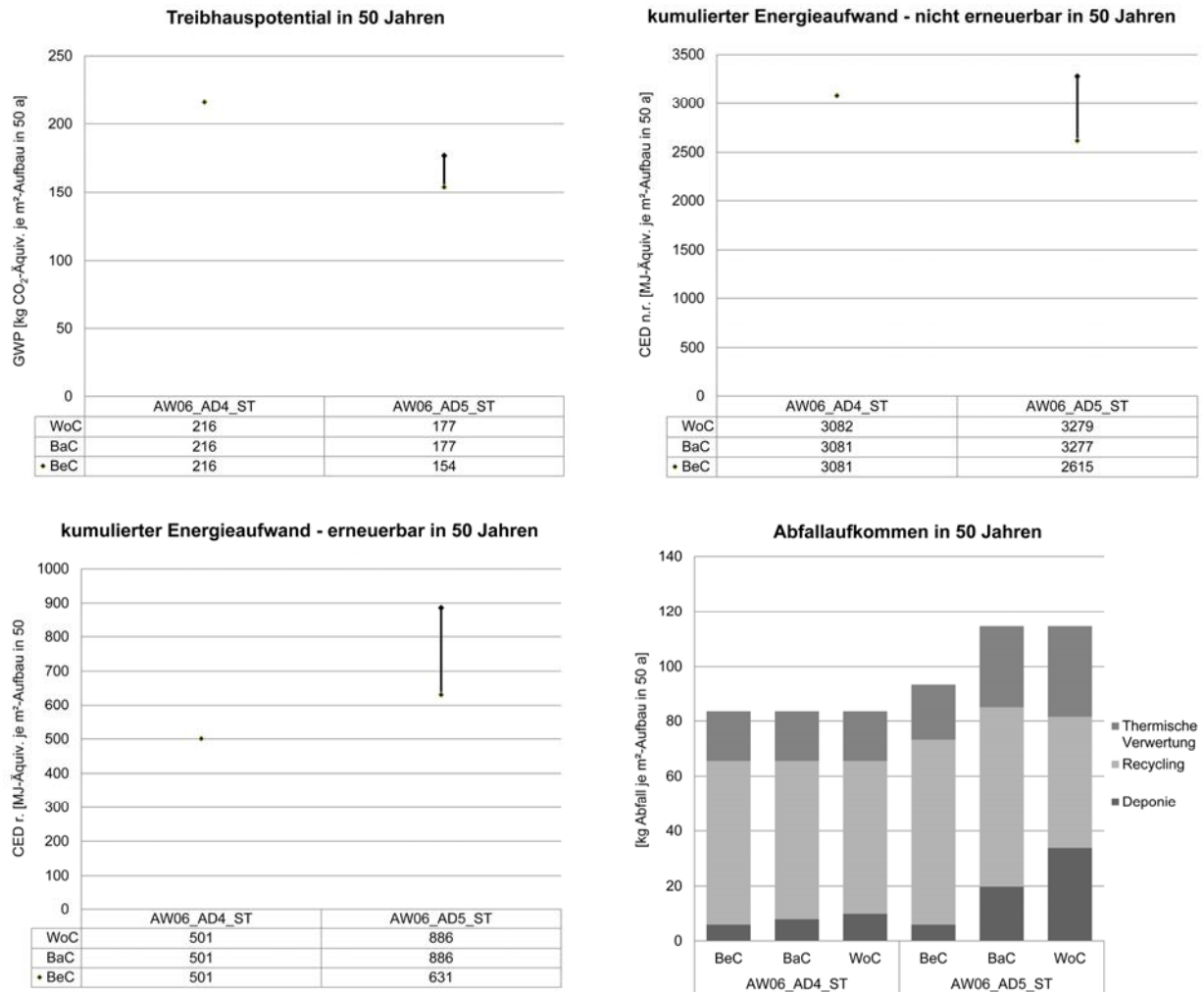


Abbildung 92 LCA-Vergleich – AW06\_AD\_ST

Die Variante AW06\_AD4\_ST beinhaltet einen Flachkollektor mit Alurahmen. Die Variante AW06\_AD5\_ST umfasst hingegen einen Flachkollektor mit Holzrahmen und Mineralwollgedämmung. Beim Indikator Treibhauspotential (GWP) weist die Variante AW06\_AD5\_ST einen deutlich geringeren Kennwert auf (siehe Abbildung 92).

Beim kumulierten Energieaufwand (CED n.r.) ist kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Varianten erkennbar. Der höhere Holzanteil der Variante AW06\_AD5\_ST bedingt einen deutlich höheren kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.), wobei dies aufgrund der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern positiv zu werten ist.

Das höhere Deponie-Abfallaufkommen der Variante AW06\_AD5\_ST wird einerseits durch den höheren stofflichen Aufwand zur thermischen Sanierung und energetischen Modernisierung sowie andererseits durch die niedrigeren Recycling-Quoten der anfallenden Baurestmassen verursacht. Im Best Case der Variante AW06\_AD5\_ST weicht das Deponie-Abfallaufkommen nur geringfügig von der Vergleichsvariante AW06\_AD4\_ST ab, da hier eine vergleichsweise hohe Recycling-Quote zugrunde gelegt wurde.

## Außenwand - AW06\_AD\_PV

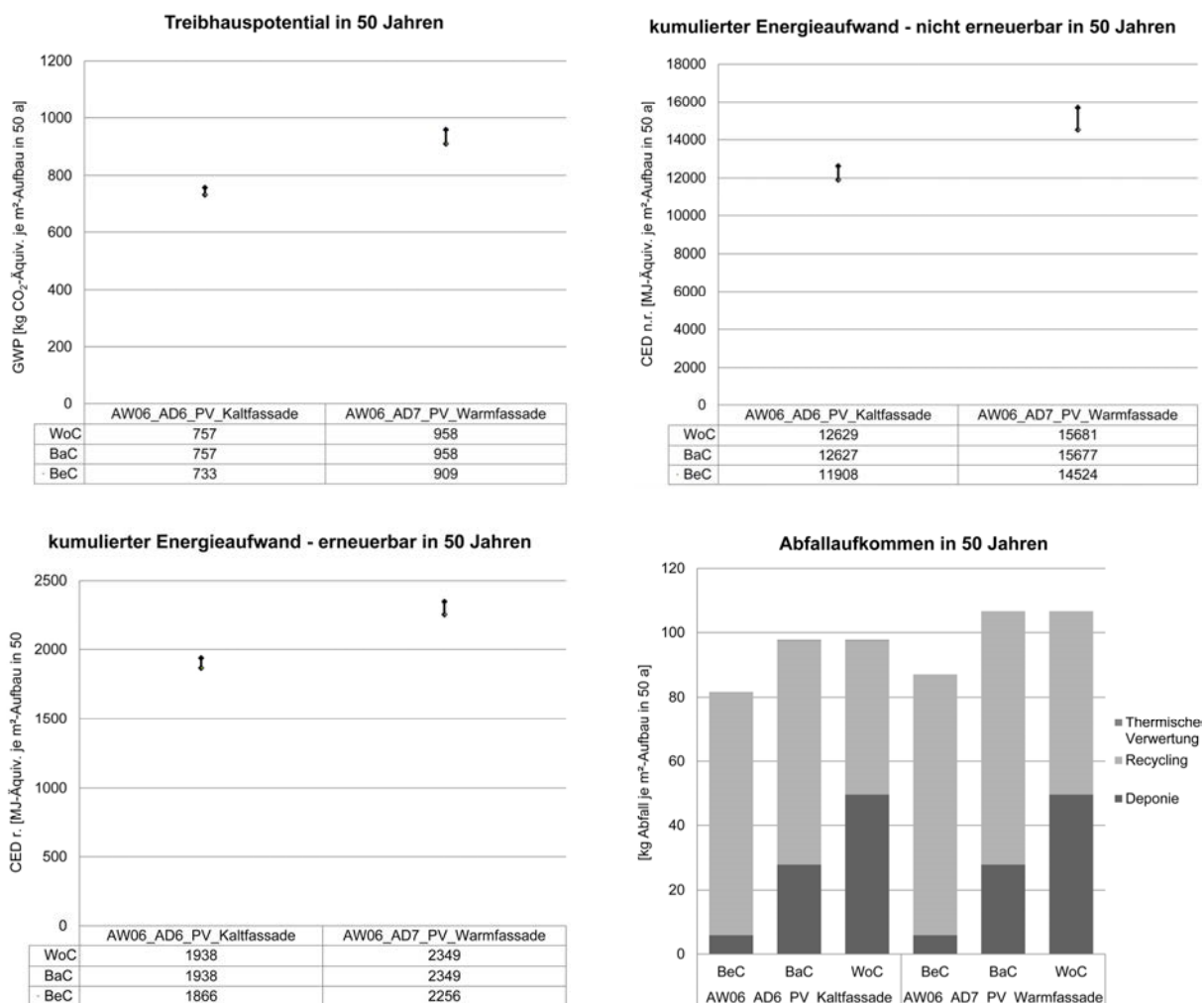


Abbildung 93 LCA-Vergleich – AW06\_AD\_PV

Die Variante AW06\_AD6\_PV\_Warmfassade weist tendenziell um ca. 15 % höhere Kennwerte auf, als die Variante AW06\_AD7\_PV\_Kaltfassade (siehe Abbildung 93). Die PV-Paneele der Kaltfassade werden punktweise durch Edelstahl-Elemente gehalten. Die PV-Paneele der Warmfassade werden stattdessen auf einem Pfosten-Riegel-System fixiert, wodurch ein vergleichsweise höherer Materialinput erforderlich ist, der eine Erhöhung der Kennwerte der Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierter Energieaufwand (CED) zur Folge hat. Der Vorteil liegt aber in der potentiellen Anwendung zur thermischen Sanierung von Skelettbauweisen. Der geringfügige Deponieanteil wird durch den Austausch des mineralischen Innenputzes und der Mineralwolle verursacht.

## Außenwand - AW07\_AD

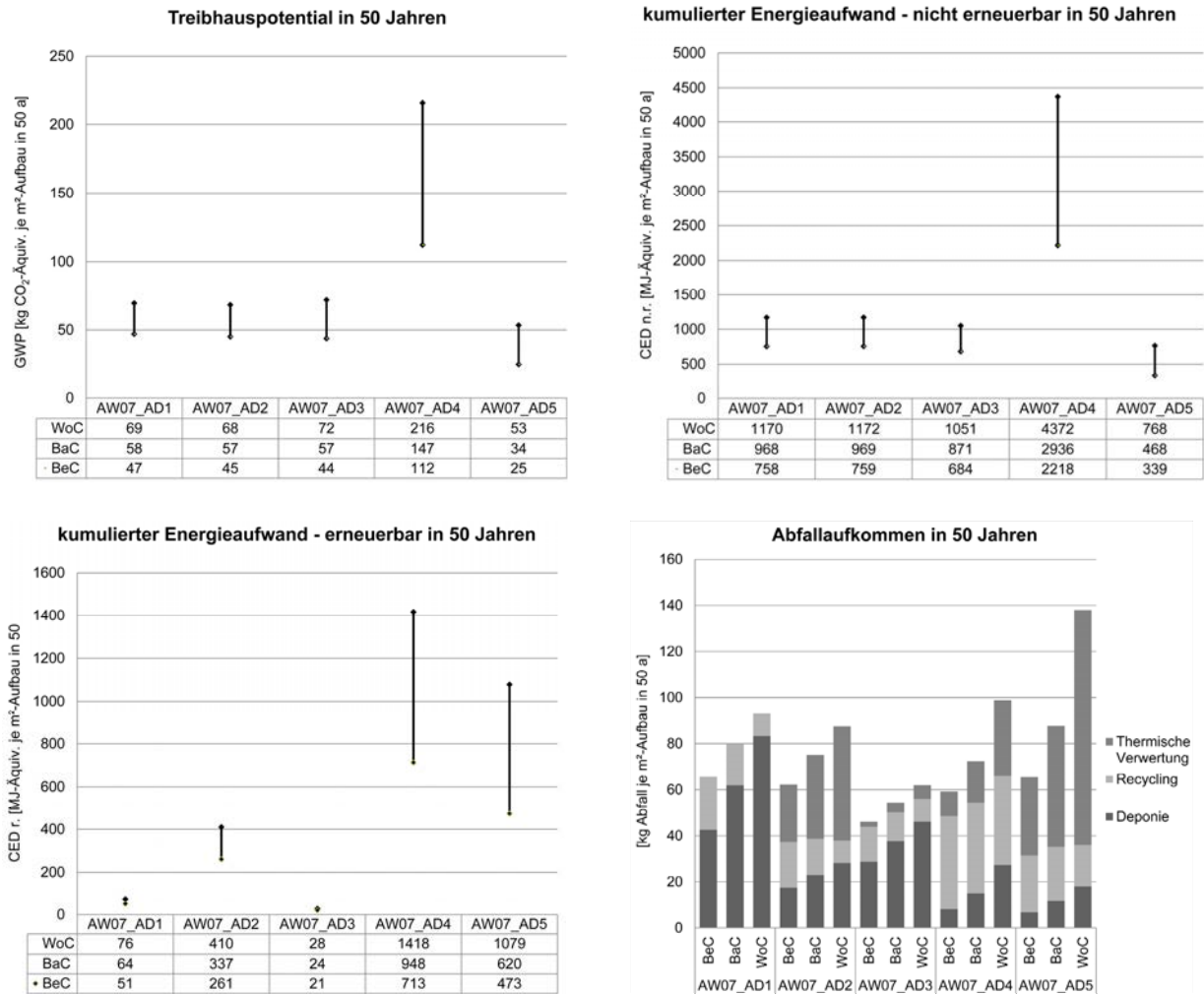


Abbildung 94 LCA-Vergleich – AW07\_AD

Für die Variante AW07\_AD4 wurde eine Vakuumdämmung verwendet, welche zu einer deutlichen Erhöhung beim Treibhauspotential – GWP und beim kumulierten Energieaufwand (CED n.r. und CED r.) führt (siehe Abbildung 94). Die fünfte Variante AW07\_AD5 besteht im Wesentlichen aus Holzprodukten, einschließlich einer Dämmung aus Zellulosefüllstoff. Die stoffliche Verwendung von erneuerbaren Energieträgern ist beim kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) durch einen höheren Kennwert ersichtlich, welcher aber aufgrund der Verwendung von erneuerbaren Ressourcen und langfristigen CO<sub>2</sub>-Speicherung positiv zu werten ist.

Grundsätzlich schneidet die Variante AW07\_AD5 beim Treibhauspotential und beim kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) besser ab. Die Variante AW07\_AD1 (WDVS - Mineralwolle) weist aufgrund der schlechteren Trennbarkeit einen vergleichsweise höheren Deponieanteil auf. Die Varianten AW07\_AD4 und AW07\_AD5 haben zwar ein höheres Abfallaufkommen, trotzdem ist der Deponieanteil aufgrund der besseren Kreislauffähigkeit geringer.

## Außenwand - AW07\_AD\_ST

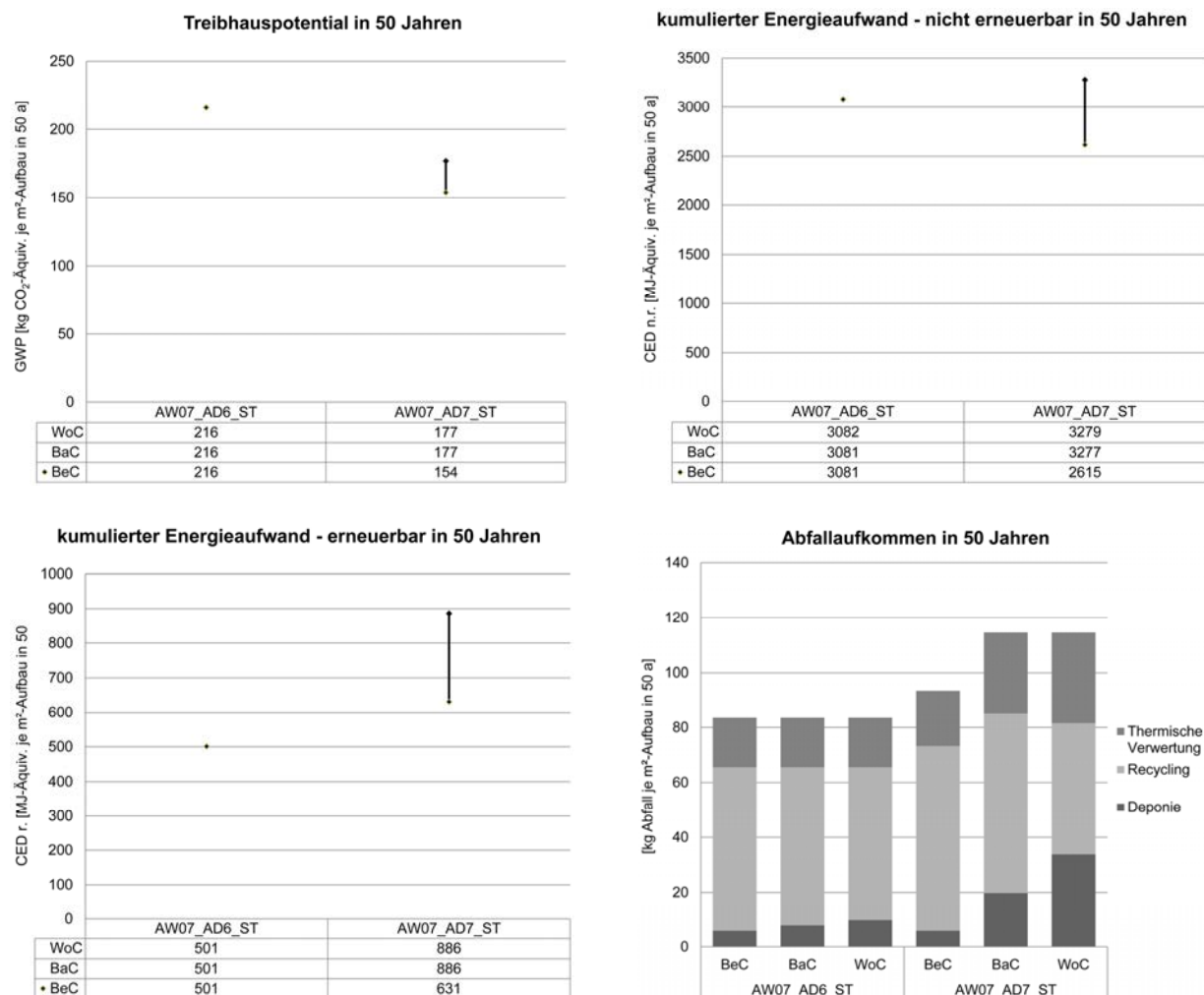


Abbildung 95 LCA-Vergleich – AW07\_AD\_ST

Die Variante AW07\_AD6\_ST beinhaltet einen Flachkollektor mit Alurahmen. Die Variante AW07\_AD7\_ST umfasst hingegen einen Flachkollektor mit Holzrahmen und Mineralwollendämmung. Beim Indikator Treibhauspotential (GWP) weist die Variante AW07\_AD7\_ST einen deutlich geringeren Kennwert auf (siehe Abbildung 95).

Beim kumulierten Energieaufwand (CED n.r.) ist kein nennenswerter Unterschied zwischen beiden Varianten erkennbar. Der höhere Holzanteil der Variante AW07\_AD7\_ST bedingt einen deutlich höheren kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.). Dies ist aufgrund der stofflichen Nutzung von erneuerbaren Energieträgern hinsichtlich einer langfristigen CO<sub>2</sub>-Speicherung positiv zu werten.

Das höhere Abfallaufkommen der Variante AW07\_AD7\_ST wird einerseits durch den höheren stofflichen Aufwand zur thermischen Sanierung und energetischen Modernisierung sowie andererseits durch die vergleichsweise niedrigeren Recycling-Quoten der anfallenden Baurestmassen verursacht. Im Best Case der Variante AW07\_AD7\_ST weicht das Deponie-Abfallaufkommen nur geringfügig von der Vergleichsvariante ab, da hier eine vergleichsweise hohe Recycling-Quote zugrunde gelegt wurde.

### Außenwand - AW07\_AD\_PV

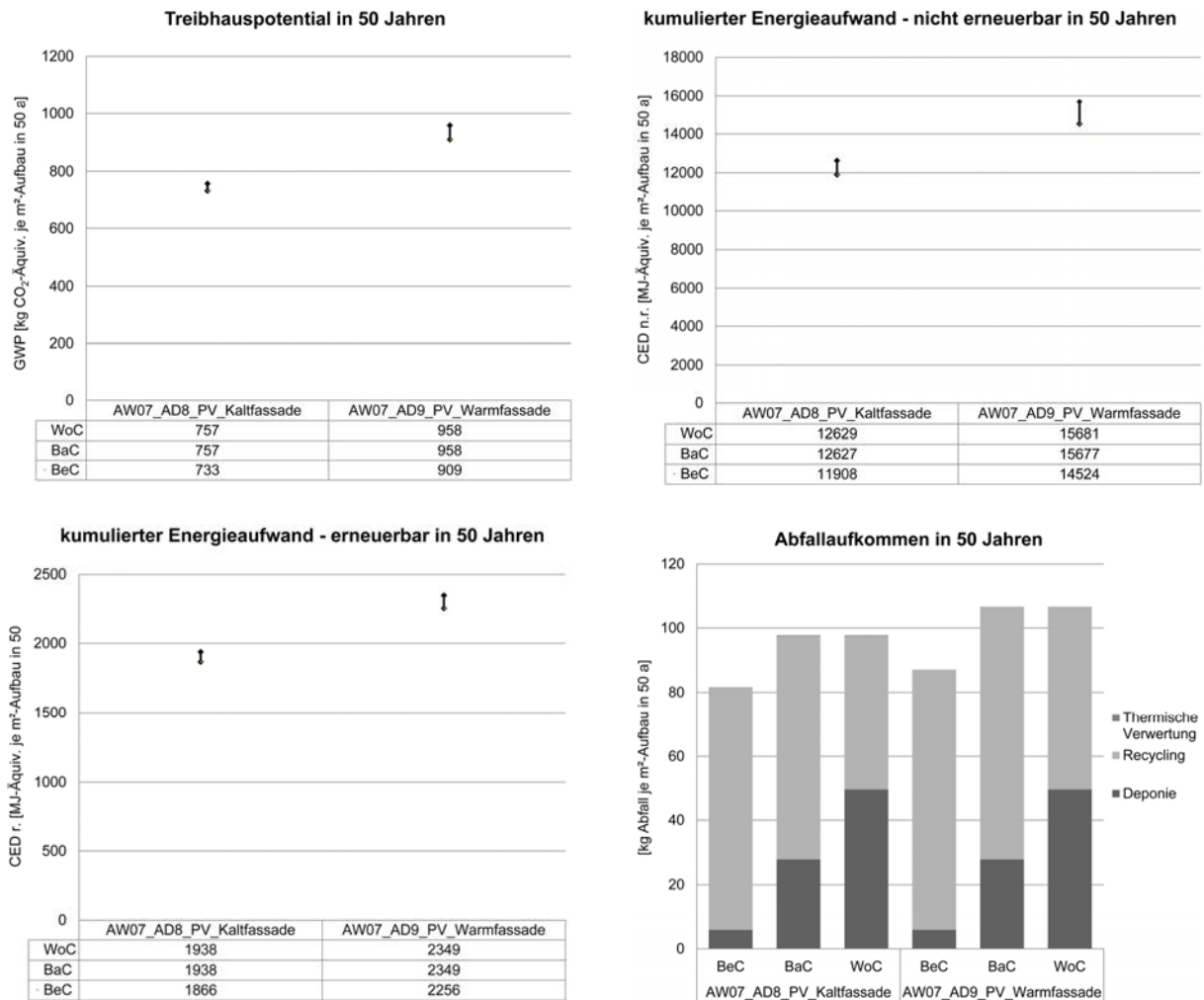


Abbildung 96 LCA-Vergleich – AW07\_AD\_PV

Die Variante AW07\_AD8\_PV\_Warmfassade weist tendenziell um ca. 15 % höhere Kennwerte auf, als die Variante AW07\_AD9\_PV\_Kaltfassade (siehe Abbildung 96). Die PV-Paneele der Kaltfassade werden punktweise durch Edelstahl-Elemente gehalten. Die PV-Paneele der Warmfassade werden stattdessen auf einem Pfosten-Riegel-System fixiert, wodurch ein vergleichsweise höherer Materialinput erforderlich ist, der eine Erhöhung der Kennwerte der Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierter Energieaufwand (CED) zur Folge hat. Der Vorteil dieser energieintensiveren Variante liegt jedoch in der Verwendungsmöglichkeit zur thermischen Sanierung von Skelettbauweisen. Der geringfügige Deponieanteil wird durch den Austausch des mineralischen Innenputzes und der Mineralwolle verursacht.

## Außenwand - AW08\_AD

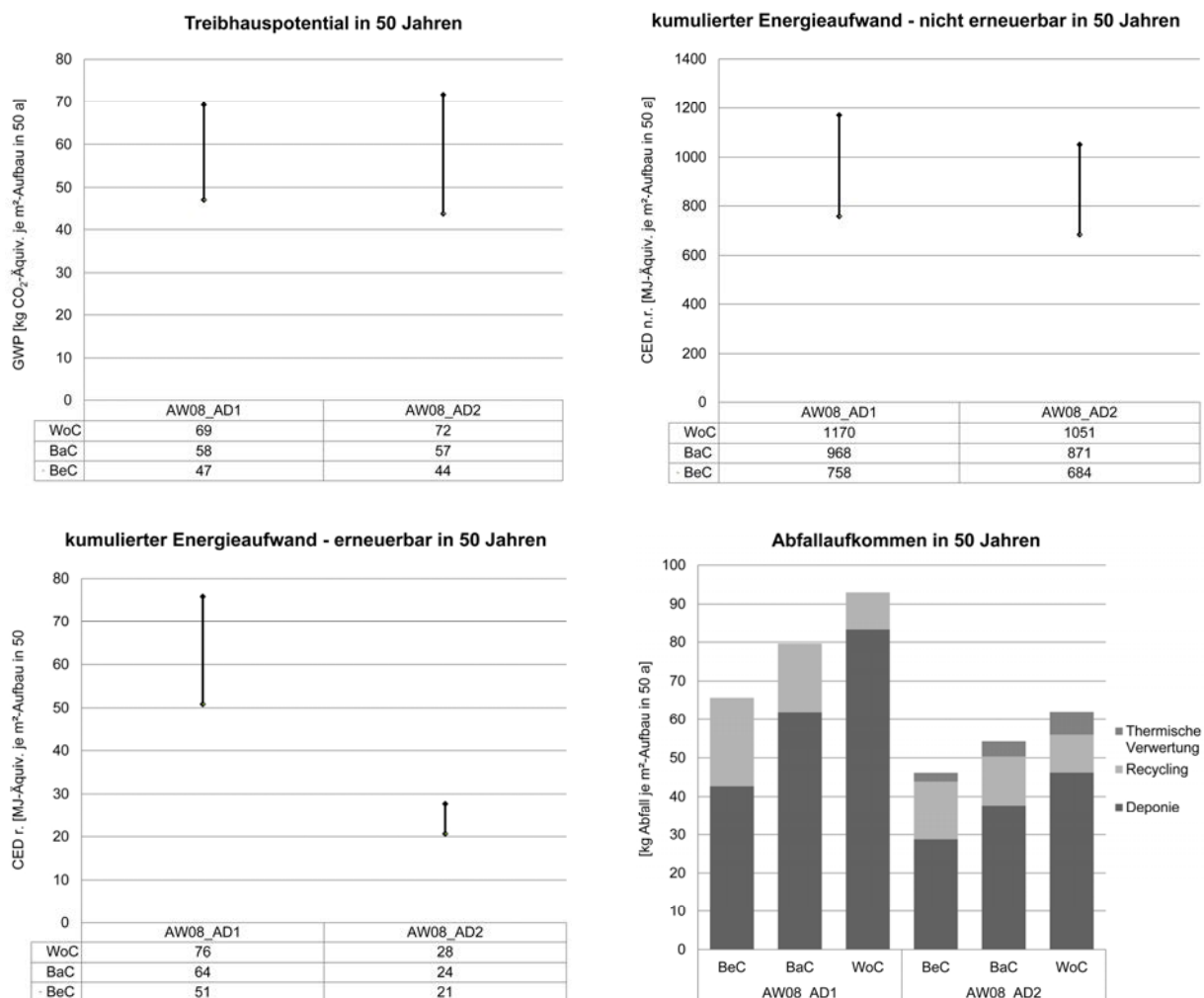


Abbildung 97 LCA-Vergleich – AW08\_AD

Ein Vergleich zwischen der Variante AW08\_AD1 (Mineralwolle) und AW08\_AD2 (EPS) zeigt beim Treibhauspotential – GWP nur einen geringfügigen Unterschied (siehe Abbildung 97). Beim kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r) ist die Variante AW08\_AD2 um ca. 10 % niedriger.

Beim kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) und beim Abfallaufkommen weist die Variante AW08\_AD1 (Mineralwolle) deutlich höhere Kennwerte auf, die grundsätzlich auf den höheren Materialinput (80 kg statt 54 kg) zurückzuführen sind.

Beide Varianten weisen einen vergleichsweise hohen Deponie-Anteil auf. Mit kreislauffähigeren alternativen Dämmsystemen (Holzfaserplatte etc.) konnten die angestrebten Ziel-U-Werte für den vorliegenden Altbestand (25 cm Mantelbeton) nicht erreicht werden. Hier ist noch ein Forschungsbedarf hinsichtlich innovativer und abfallarmer Sanierungslösungen gegeben.

## Außenwand - AW08\_AD\_ST

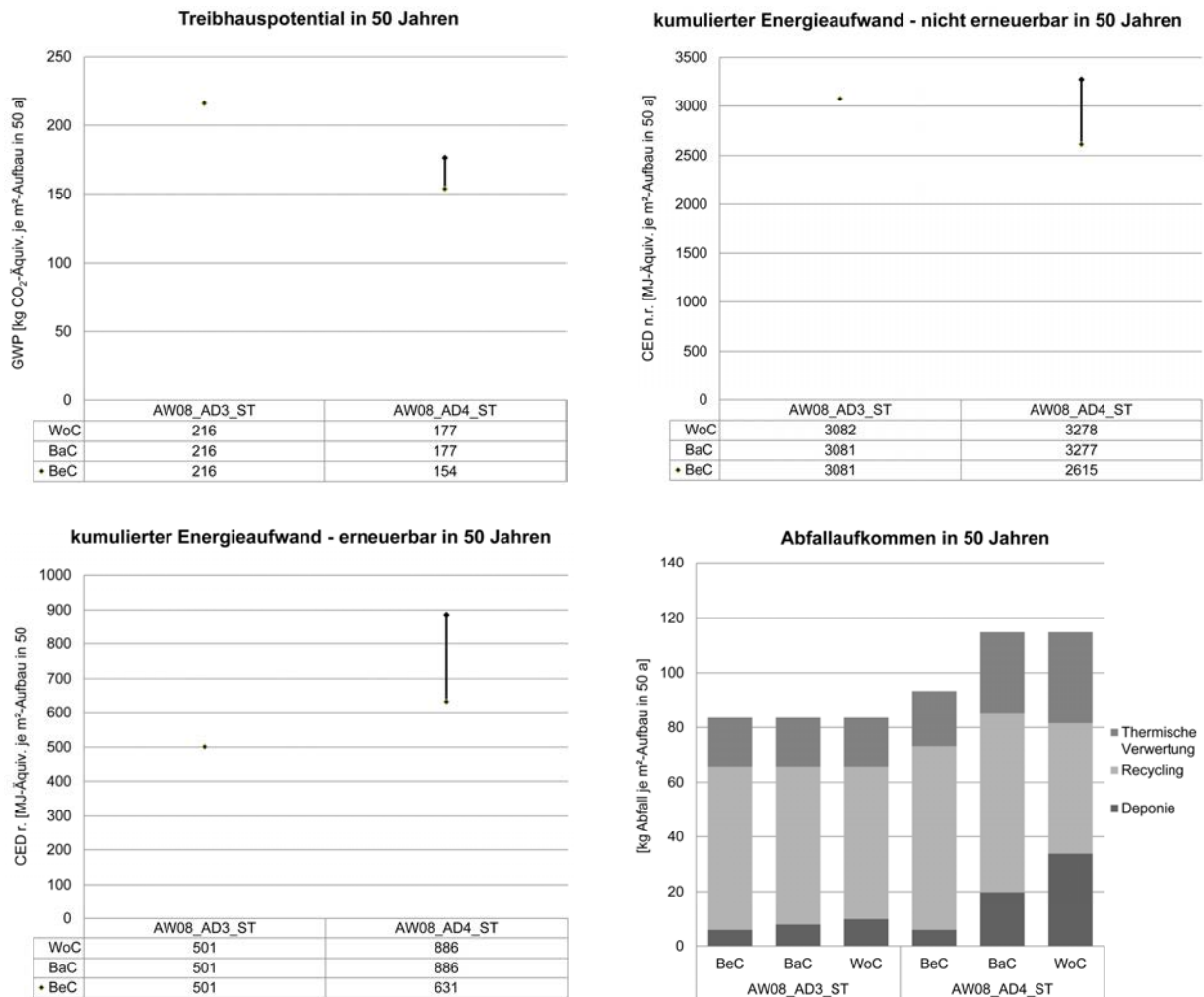


Abbildung 98 LCA-Vergleich – AW08\_AD\_ST

Die Variante AW08\_AD3\_ST beinhaltet einen Flachkollektor mit Alurahmen. Die Variante AW08\_AD4\_ST umfasst hingegen einen Flachkollektor mit Holzrahmen und Mineralwollendämmung. Beim Indikator Treibhauspotential (GWP) weist die Variante AW08\_AD4\_ST einen deutlich geringeren Kennwert auf (siehe Abbildung 98).

Beim kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) ist kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Varianten erkennbar. Der höhere Holzanteil der Variante AW08\_AD4\_ST bedingt einen deutlich höheren kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.), wobei dies aufgrund der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern, einschließlich einer langfristigen CO<sub>2</sub>-Speicherung positiv zu werten ist.

Das höhere Deponie-Abfallaufkommen der Variante AW08\_AD4\_ST wird einerseits durch den höheren stofflichen Aufwand zur thermischen Sanierung und energetischen Modernisierung sowie andererseits durch die niedrigeren Recycling-Quoten der verwendeten Bauprodukte verursacht. Im Best Case der Variante AW08\_AD4\_ST weicht das Abfallaufkommen nur geringfügig ab, da hier eine vergleichsweise hohe Recycling-Quote zugrunde gelegt wurde.

## Außenwand - AW08\_AD\_PV

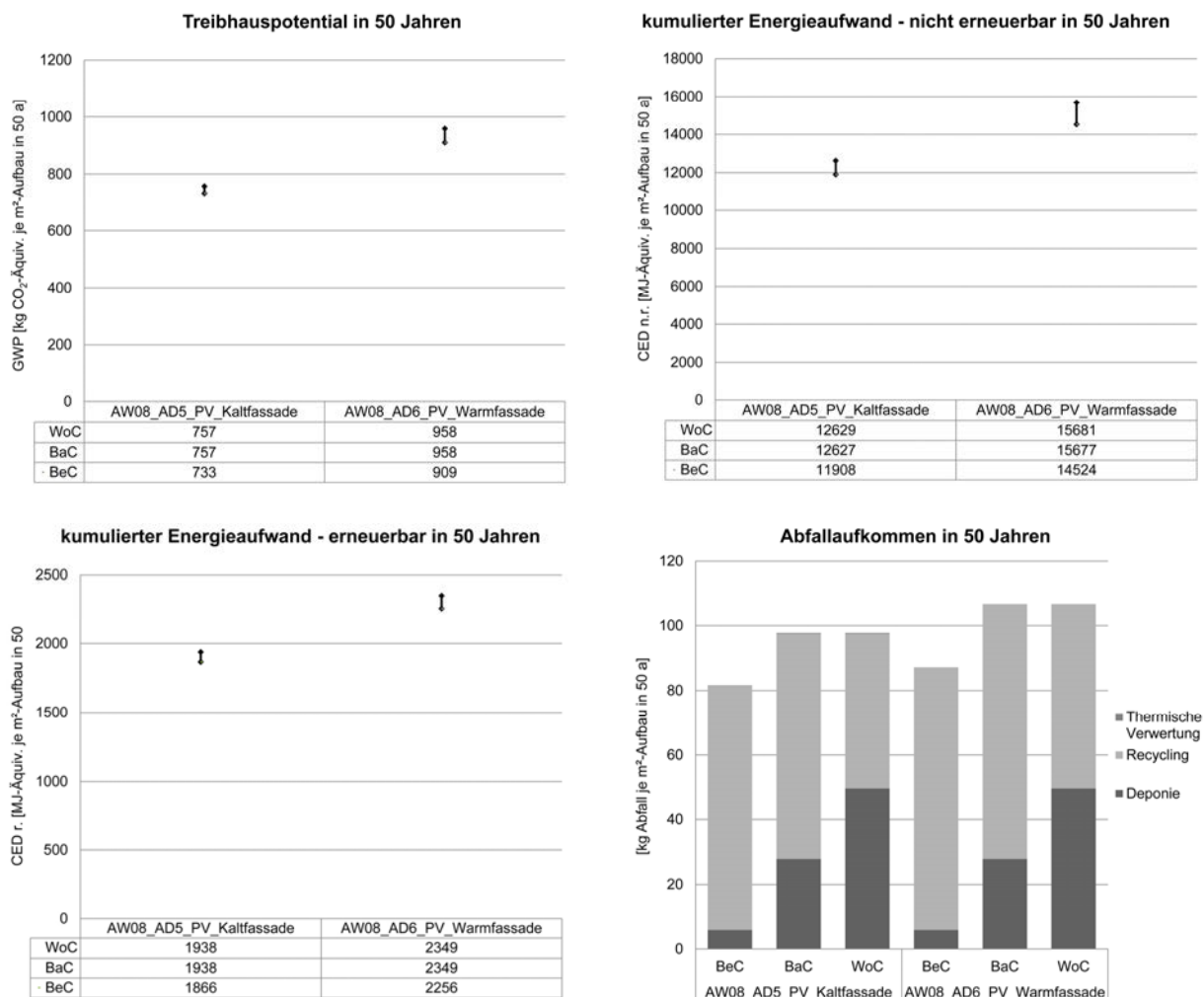


Abbildung 99 LCA-Vergleich – AW08\_AD\_PV

Die Variante AW08\_AD5\_PV\_Warmfassade weist tendenziell um ca. 15 % höhere Kennwerte auf, als die Variante AW08\_AD6\_PV\_Kaltfassade (siehe Abbildung 99). Die PV-Paneele der Kaltfassade werden punktweise durch Edelstahl-Elemente gehalten. Die PV-Paneele der Warmfassade werden stattdessen auf einem Pfosten-Riegel-System fixiert, wodurch ein vergleichsweise höherer Materialinput erforderlich ist, der eine Erhöhung der Kennwerte der Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierter Energieaufwand (CED) zur Folge hat. Im Gegensatz zur punkweisen Fixierung kann die Pfosten-Riegel-Variante zur thermischen Sanierung von Skelettbauweisen verwendet werden. Der geringfügige Deponieanteil wird durch den Austausch des mineralischen Innenputzes und der Mineralwolle verursacht.



**Außenwand - AW09\_AD**

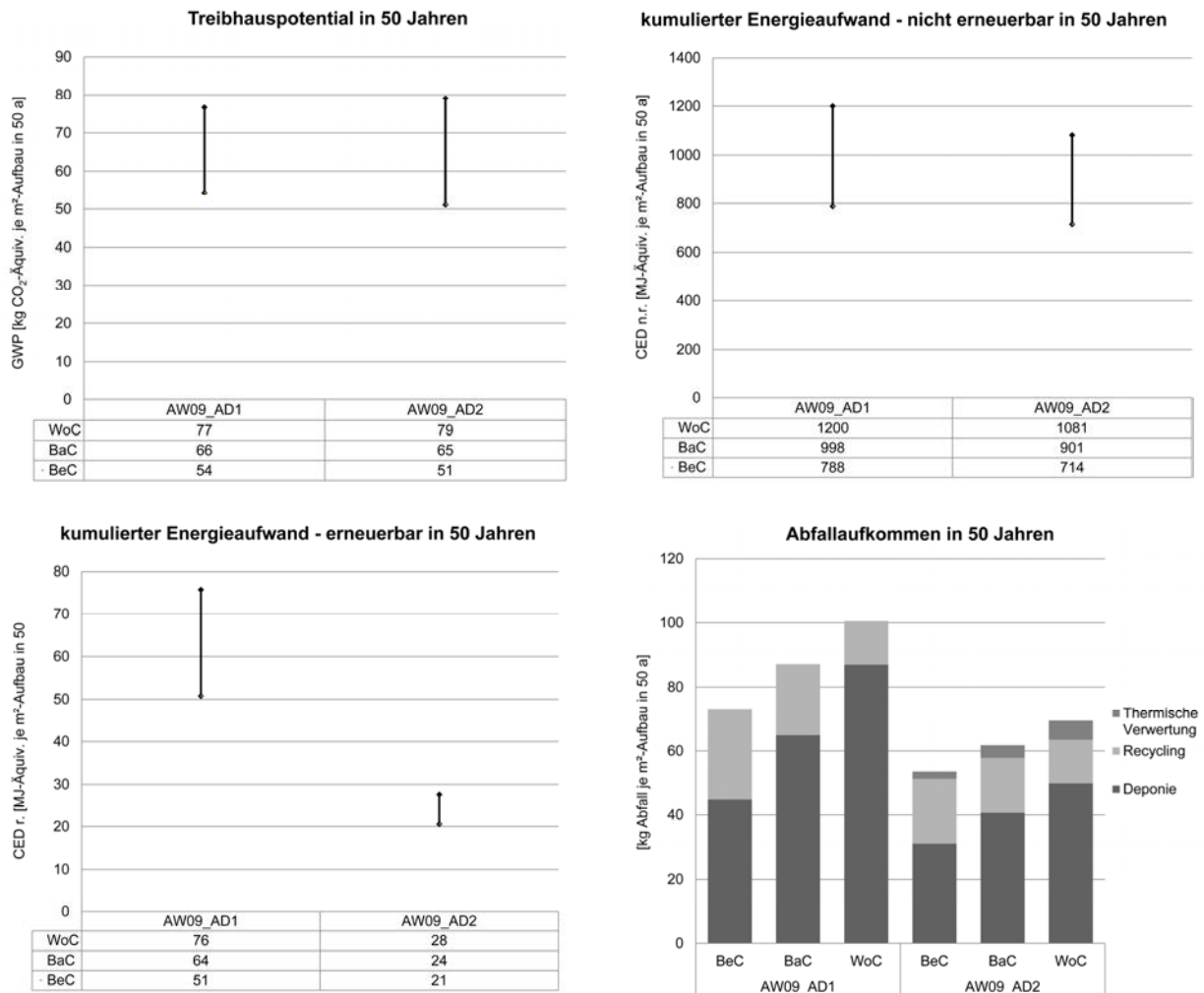


Abbildung 100 LCA-Vergleich – AW09\_AD

Ein Vergleich zwischen der Variante AW09\_AD1 (Mineralwolle) und AW09\_AD2 (EPS) zeigt beim Treibhauspotential – GWP nur einen geringfügigen Unterschied (siehe Abbildung 100). Beim kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r) ist die Variante AW09\_AD2 um ca. 10 % niedriger.

Beim kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) und beim Abfallaufkommen weist die Variante AW09\_AD1 (Mineralwolle) deutlich höhere Kennwerte auf. Grund ist der höhere Materialinput (87 kg statt 62 kg) der Variante AW09\_AD1.

Beide Varianten weisen einen vergleichsweise hohen Deponie-Anteil auf. Mit kreislauffähigeren alternativen Dämmsystemen (Holzfaserplatte etc.) konnten die angestrebten Ziel-U-Werte für den vorliegenden Altbestand (Betonfertigteile-Sandwichenelemente) nicht erreicht werden. Folglich besteht hier noch ein weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich abfallarmer Sanierungsvarianten.

## Außenwand - AW10\_AD

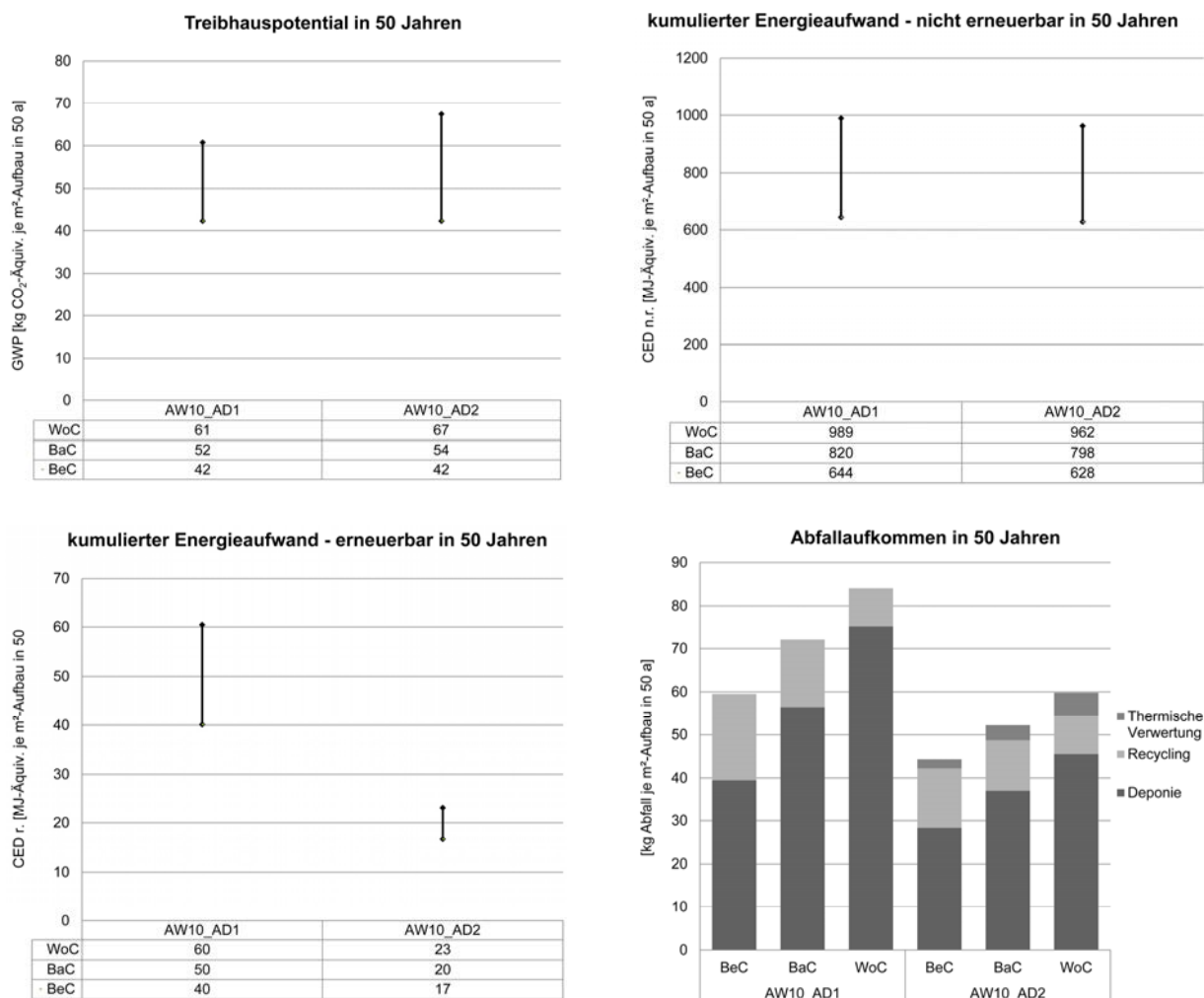


Abbildung 101 LCA-Vergleich – AW10\_AD

Ein Vergleich zwischen der Variante AW10\_AD1 (Mineralwolle) und AW10\_AD2 (EPS) zeigt beim Treibhauspotential – GWP und beim kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r) nur einen geringfügigen Unterschied (siehe Abbildung 101).

Beim kumulierten Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) und beim Abfallaufkommen weist die Variante AW10\_AD1 (Mineralwolle) deutlich höhere Kennwerte auf, die grundsätzlich auf den höheren Materialinput (72 kg statt 52 kg) zurückzuführen sind.

Beide Varianten weisen einen vergleichsweise hohen Deponie-Anteil auf. Mit kreislauffähigeren alternativen Dämmsystemen (Holzfaserplatte etc.) konnten die angestrebten Ziel-U-Werte für den vorliegenden Altbestand (30 cm Porenbetonstein) nicht erreicht werden, weshalb hier noch ein Forschungsbedarf hinsichtlich innovativer und abfallarmer Sanierungslösungen besteht.

**Dachgeschoßdecke - DGD01\_AD**

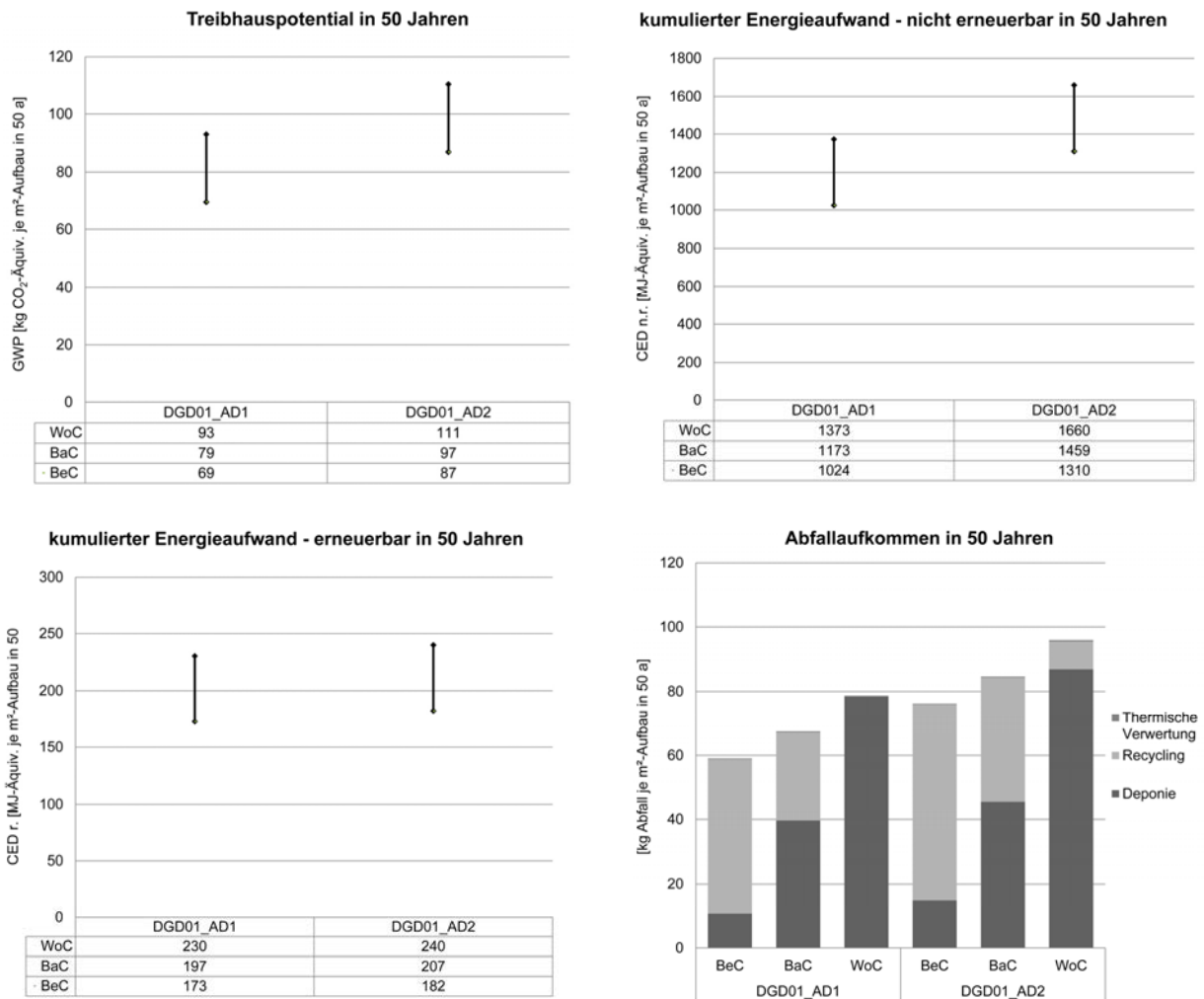


Abbildung 102 LCA-Vergleich – DGD01\_AD

Die Variante DGD01\_AD2 weist einen höheren Materialinput (85 kg/m<sup>2</sup> statt 68 kg/m<sup>2</sup>) auf, da zusätzlich eine EPB Perlit-Ausgleichschüttung bilanziert wurde. Dies führt auch zu vergleichsweise höheren Kennwerten bei den ausgewählten Indikatoren (siehe Abbildung 102). Beim Abfallaufkommen ist für den Best Case ein wesentlich geringerer Deponie-Anteil erkennbar, da aufgrund der guten Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen eine dementsprechend hohe Recycling-Quote für die anfallenden sortenreinen Baurestmassen zugrunde gelegt wurde.

## Dachgeschoßdecke - DGD02\_AD

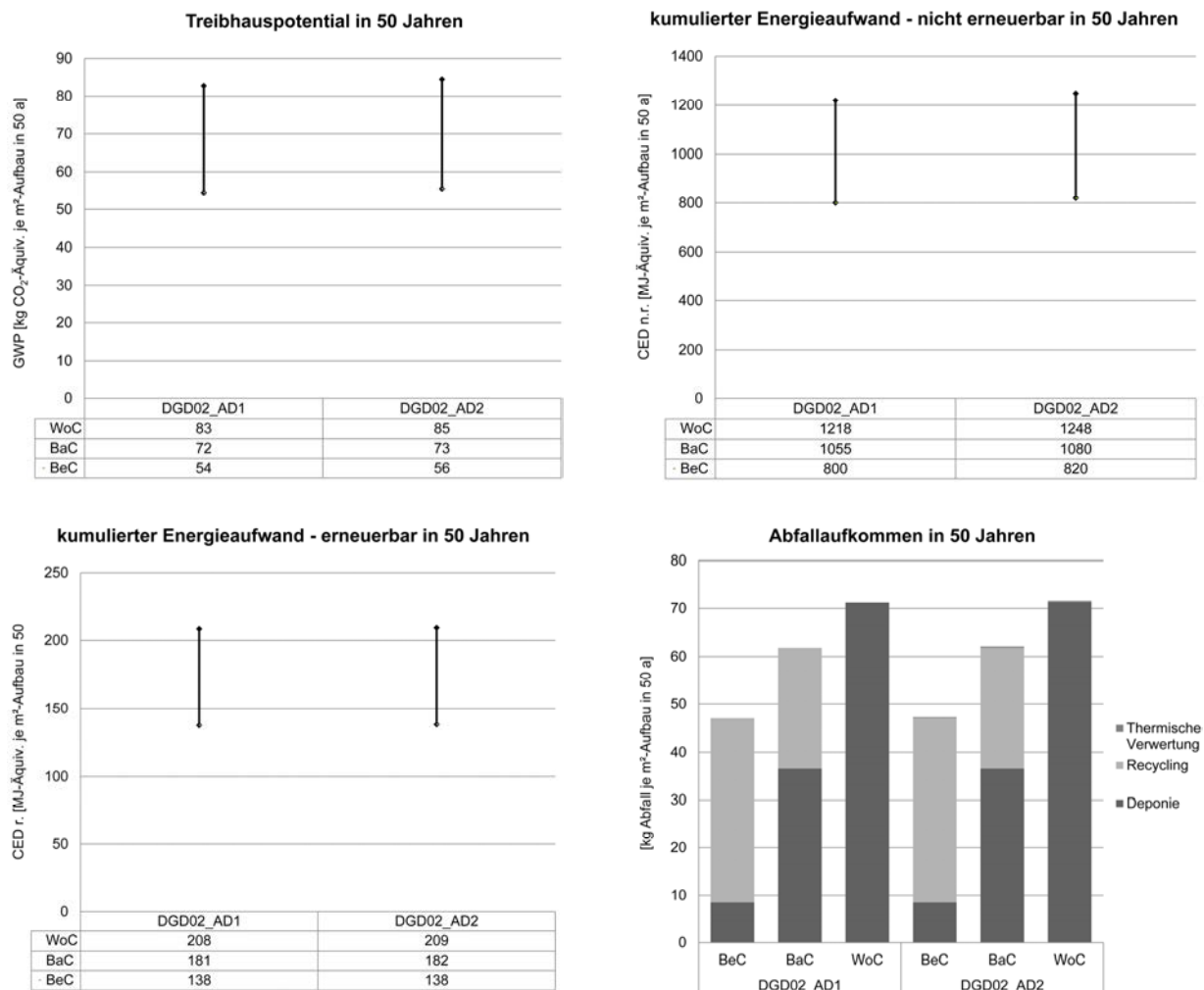


Abbildung 103 LCA-Vergleich – DGD02\_AD

Die Variante DGD02\_AD1 und DGD02\_AD1 haben annähernd den gleichen Materialinput (ca. 63 kg), weshalb auch kein wesentlicher Unterschied bei einem Vergleich der Ökobilanz-Kennwerte ersichtlich ist (siehe Abbildung 103). Der Einfluss der Lebensdauer ist beim Vergleich des Abfallaufkommens zwischen den Best und Worst Case-Kennwerten der jeweiligen Variante ersichtlich.

Beim Abfallaufkommen ist für den Best Case ein wesentlich geringerer Deponie-Anteil erkennbar, da aufgrund der guten Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen eine dementsprechend hohe Recycling-Quote für die anfallenden sortenreinen Baurestmassen zugrunde gelegt wurde.

**Dachgeschoßdecke - DGD03\_AD**

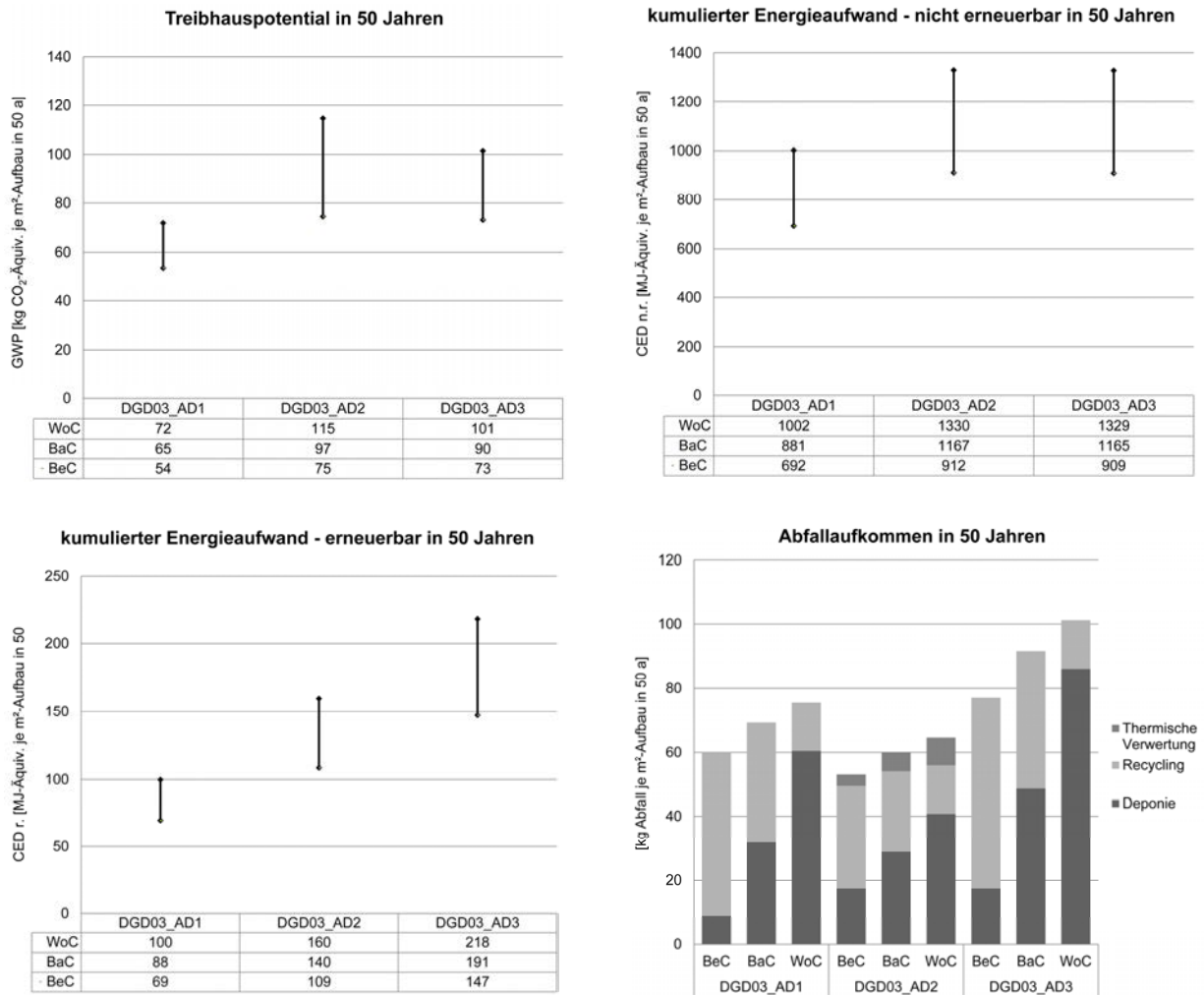


Abbildung 104 LCA-Vergleich – DGD03\_AD

Für die Varianten DGD03\_AD1 und DGD03\_AD3 wurde eine Steinwolle-Dämmung und für die Variante DGD03\_AD2 eine EPS-Dämmung bilanziert. Beim Variantenvergleich bezogen auf das Treibhauspotential – GWP zeigt sich kein großer Unterschied zwischen der Variante der DGD03\_AD2 (EPS) und DGD03\_AD3 (Mineralwolle), obwohl ein höherer Materialinput aufgrund der ausgewählten Steinwolle erforderlich ist (ca. 32 kg Mehrgewicht) (siehe Abbildung 104). Grund sind die deutlich niedrigeren Ökobilanz-Kennwerte der Steinwolle im Vergleich zu einer Glaswolle. Die Variante DGD03\_AD1 schneidet bei den Indikatoren Treibhauspotential - GWP und kumulierten Energieaufwand (CED) am besten ab. Auch beim Abfallaufkommen, einschließlich eines niedrigeren Deponie-Anteils ist diese Variante vorteilhafter.

## Dachgeschoßdecke - DGD04\_AD

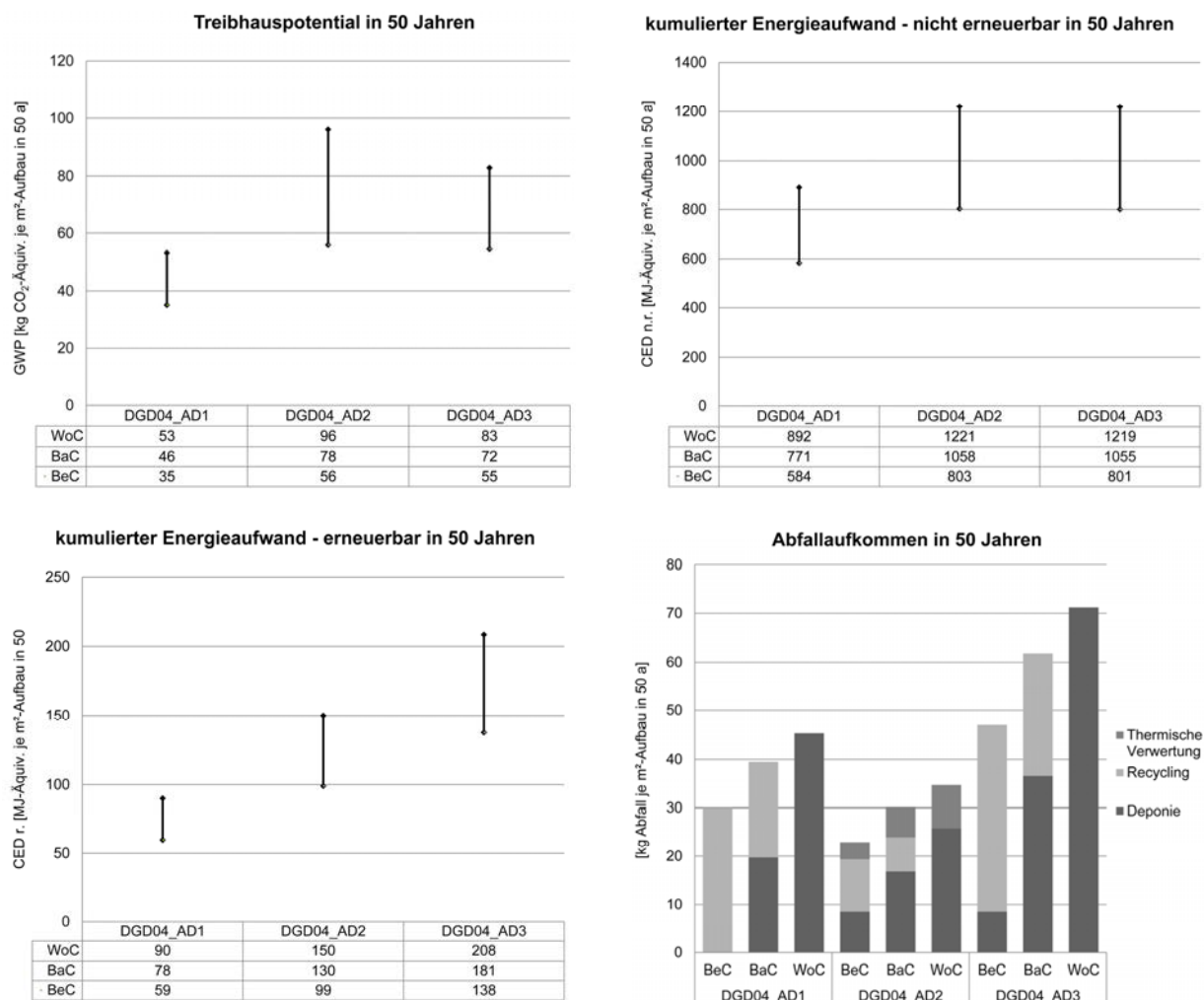


Abbildung 105 LCA-Vergleich – DGD04\_AD

Für die Varianten DGD04\_AD1 und DGD04\_AD3 wurde eine Steinwolle-Dämmung und für die Variante DGD04\_AD2 eine EPS-Dämmung zugrunde gelegt. Beim Variantenvergleich bezogen auf das Treibhauspotential – GWP zeigt sich kein großer Unterschied zwischen der Variante der DGD04\_AD2 (EPS) und DGD04\_AD3 (Mineralwolle), obwohl ein höherer Materialinput für die Variante DGD04\_AD3 (Steinwolle) erforderlich ist (ca. 32 kg Mehrgewicht) (siehe Abbildung 105). Dies ist auf die deutlich niedrigeren Ökobilanz-Kennwerte der Steinwolle im Vergleich zu einer Glaswolle zurückzuführen. Die Variante DGD04\_AD1 schneidet bei den Indikatoren Treibhauspotential - GWP und kumulierten Energieaufwand (CED) am besten ab. Auch beim Abfallaufkommen, einschließlich eines niedrigeren Deponie-Anteils ist diese Variante vorteilhafter.

**Dachgeschoßdecke - DGD05\_AD**

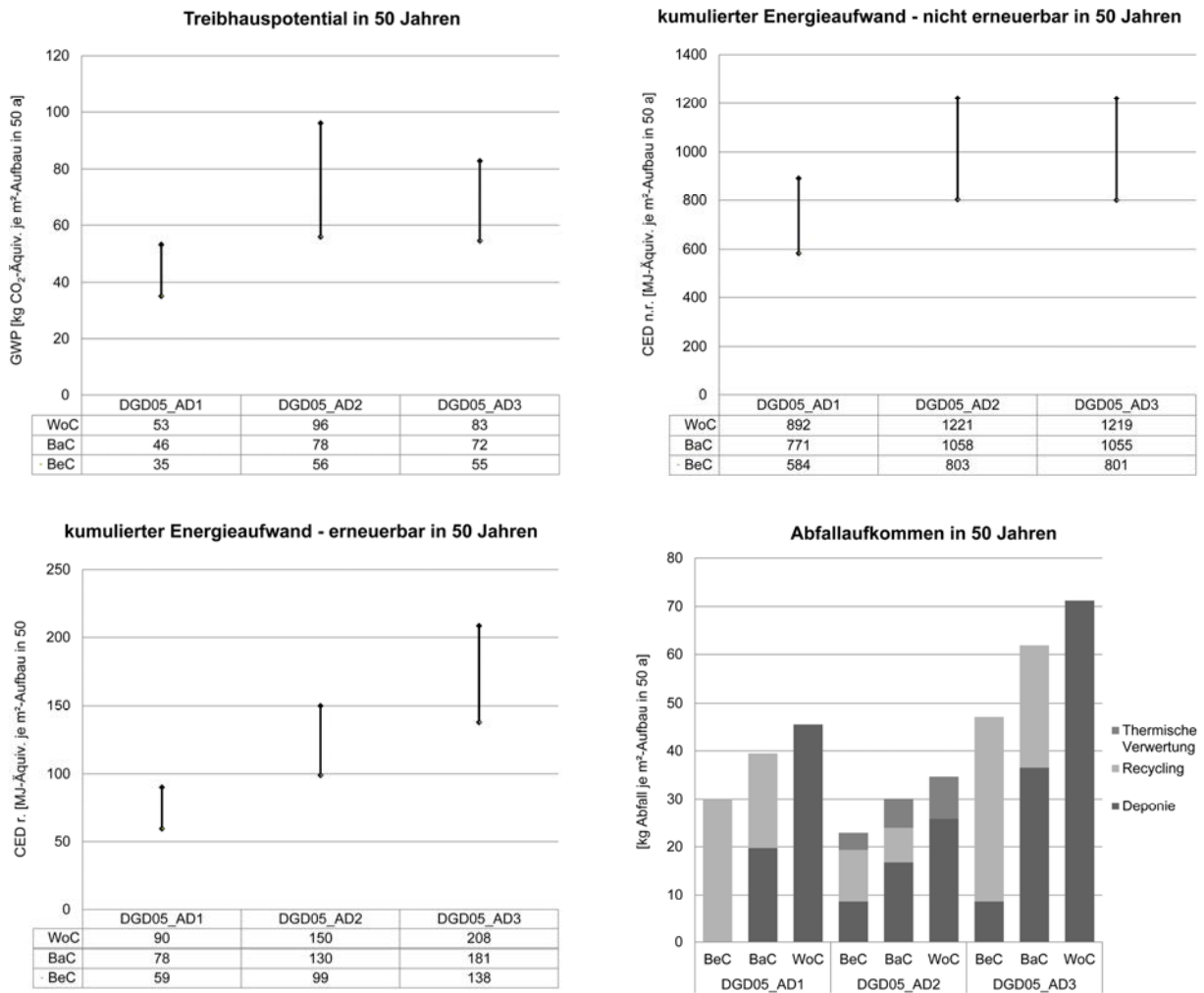


Abbildung 106 LCA-Vergleich – DGD05\_AD

Für die Varianten DGD05\_AD1 und DGD05\_AD3 wurde eine Steinwolle-Dämmung und für die Variante DGD05\_AD2 eine EPS-Dämmung bilanziert. Beim Variantenvergleich bezogen auf das Treibhauspotential – GWP zeigt sich kein großer Unterschied zwischen der Variante DGD05\_AD2 (EPS) und DGD05\_AD3 (Mineralwolle), obwohl ein höherer Materialinput aufgrund der ausgewählten Steinwolle erforderlich ist (ca. 32 kg Mehrgewicht) (siehe Abbildung 106). Dies ist auf die deutlich niedrigeren Ökobilanz-Kennwerte der Steinwolle im Vergleich zu einer Glaswolle zurückzuführen. Die Variante DGD05\_AD1 schneidet bei den Indikatoren Treibhauspotential - GWP und kumulierten Energieaufwand (CED) am besten ab. Auch beim Abfallaufkommen sowie beim Deponieanteil ist diese Variante von Vorteil.

## Dachgeschoßdecke - DGD06\_AD

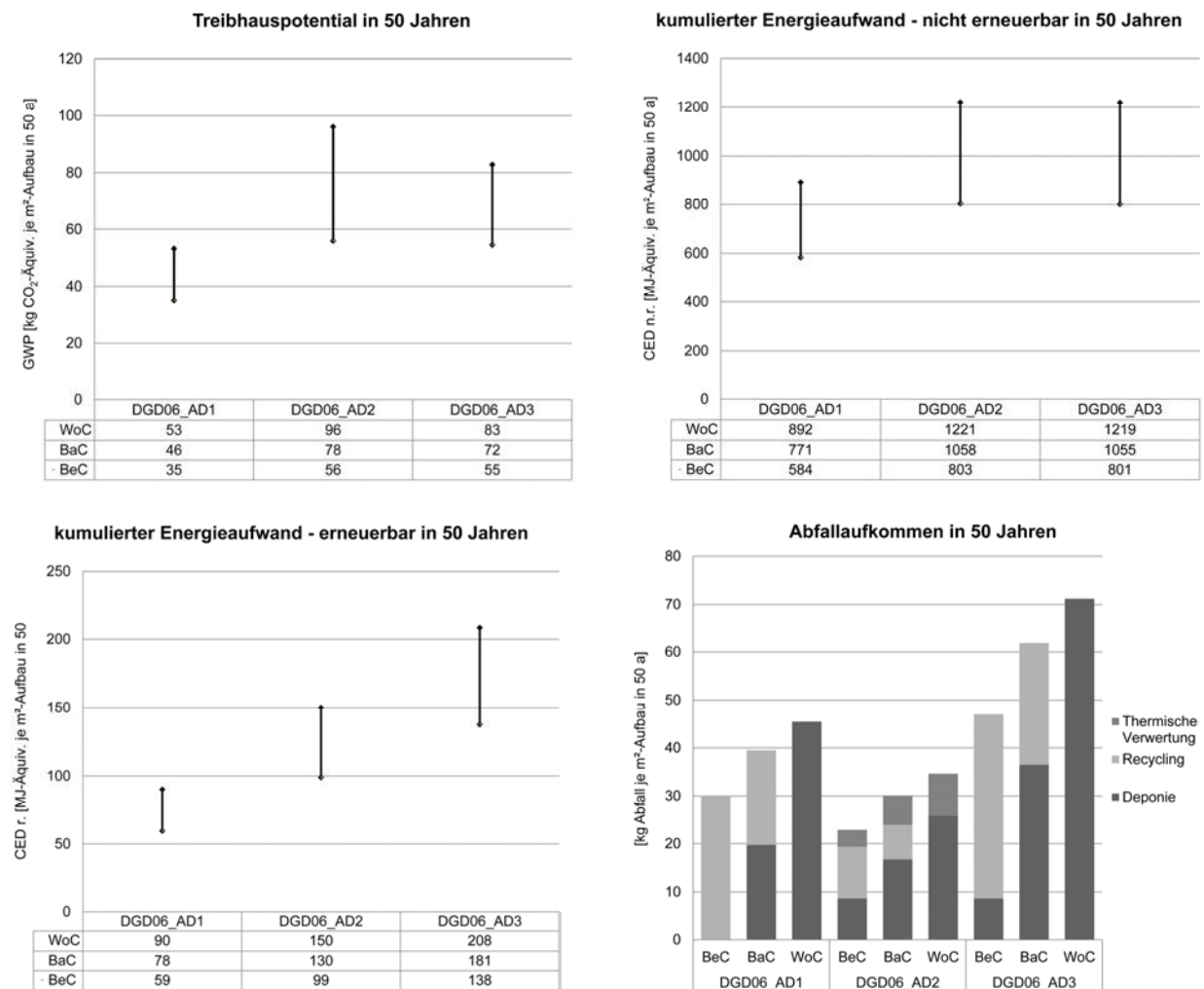


Abbildung 107 LCA-Vergleich – DGD06\_AD

Für die Varianten DGD06\_AD1 und DGD06\_AD3 wurde eine Steinwolle-Dämmung und für die Variante DGD06\_AD2 eine EPS-Dämmung zugrunde gelegt. Beim Variantenvergleich bezogen auf das Treibhauspotential – GWP zeigt sich kein großer Unterschied zwischen der Variante der DGD06\_AD2 (EPS) und DGD06\_AD3 (Mineralwolle), obwohl ein höherer Materialinput für die Variante DGD06\_AD3 erforderlich ist (ca. 32 kg Mehrgewicht) (siehe Abbildung 107). Dies ist auf die deutlich niedrigeren Ökobilanz-Kennwerte der Steinwolle im Vergleich zu einer Glaswolle zurückzuführen. Die Variante DGD06\_AD1 schneidet bei den Indikatoren Treibhauspotential (GWP) und kumulierten Energieaufwand (CED) am besten ab. Des Weiteren ist sie beim Abfallaufkommen, einschließlich eines niedrigeren Deponie-Anteils vorteilhafter als die anderen zwei Varianten.



**Kellerdecke - DGK01\_ID**

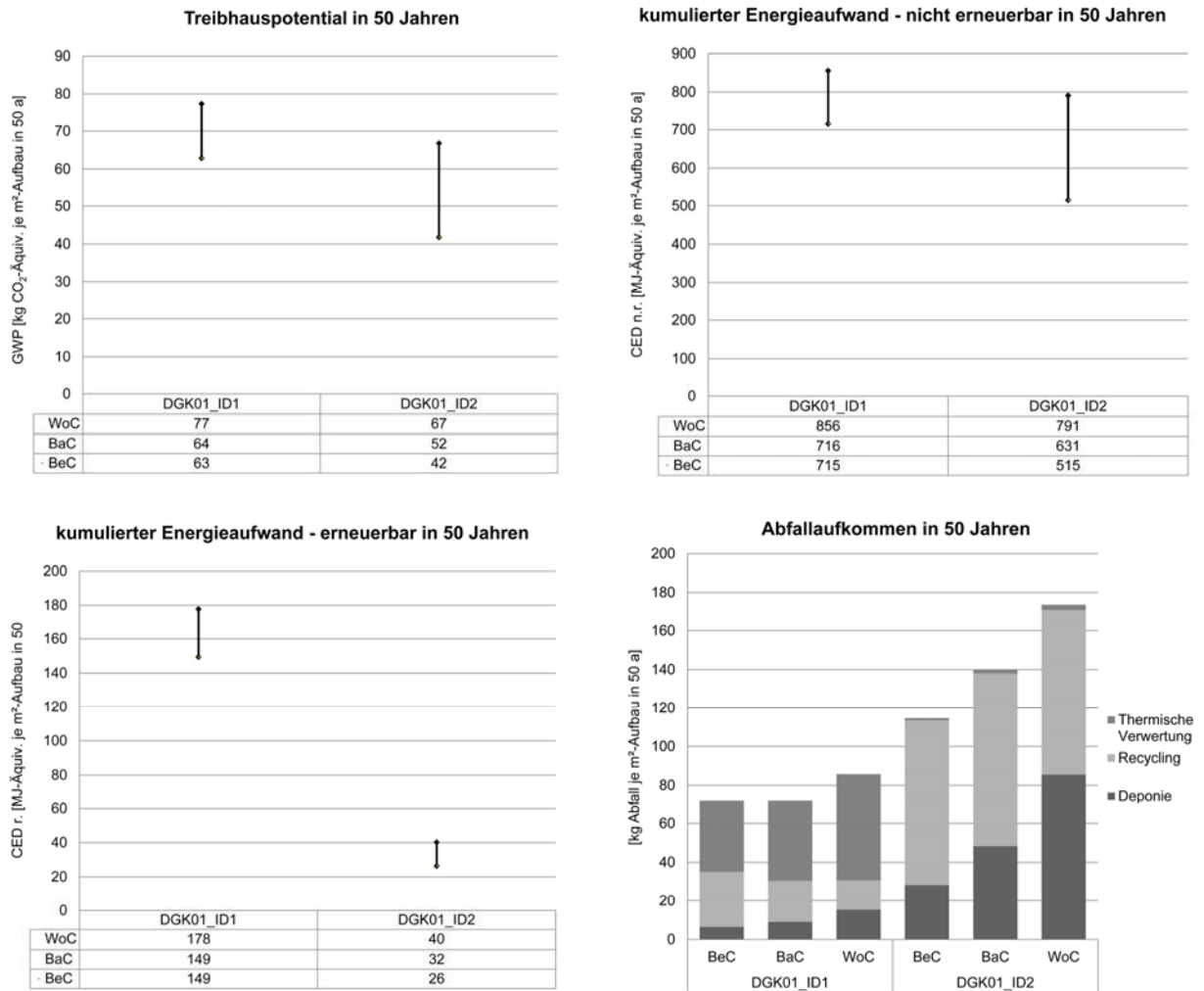


Abbildung 108 LCA-Vergleich – DGK01\_ID

Die Variante DGK01\_ID2 weist im Vergleich zur Variante DGK01\_ID1 einen fast doppelt so hohen Materialinput (140 kg statt 72 kg) auf, welches hauptsächlich auf die Verwendung eines 5 cm zementgebundenen Estrichs anstatt von zwei Holzspanplatten V100 (Dicke je 1,8 cm) zurückzuführen ist. Auch die Lebensdauer der Variante DGK01\_ID2 ist im Schnitt um 10 bis 15 Jahre kürzer. Trotzdem schneidet die Variante DGK01\_ID2 beim Indikator Treibhauspotential - GWP und kumulierten Energieaufwand (CED) besser ab (siehe Abbildung 108). Dies hängt mit den vergleichsweise niedrigeren herstellungsbedingten Umweltwirkungen der eingesetzten Holzspanplatten und der EPB-Perlite zusammen.

## Flachdach - FD01\_AD

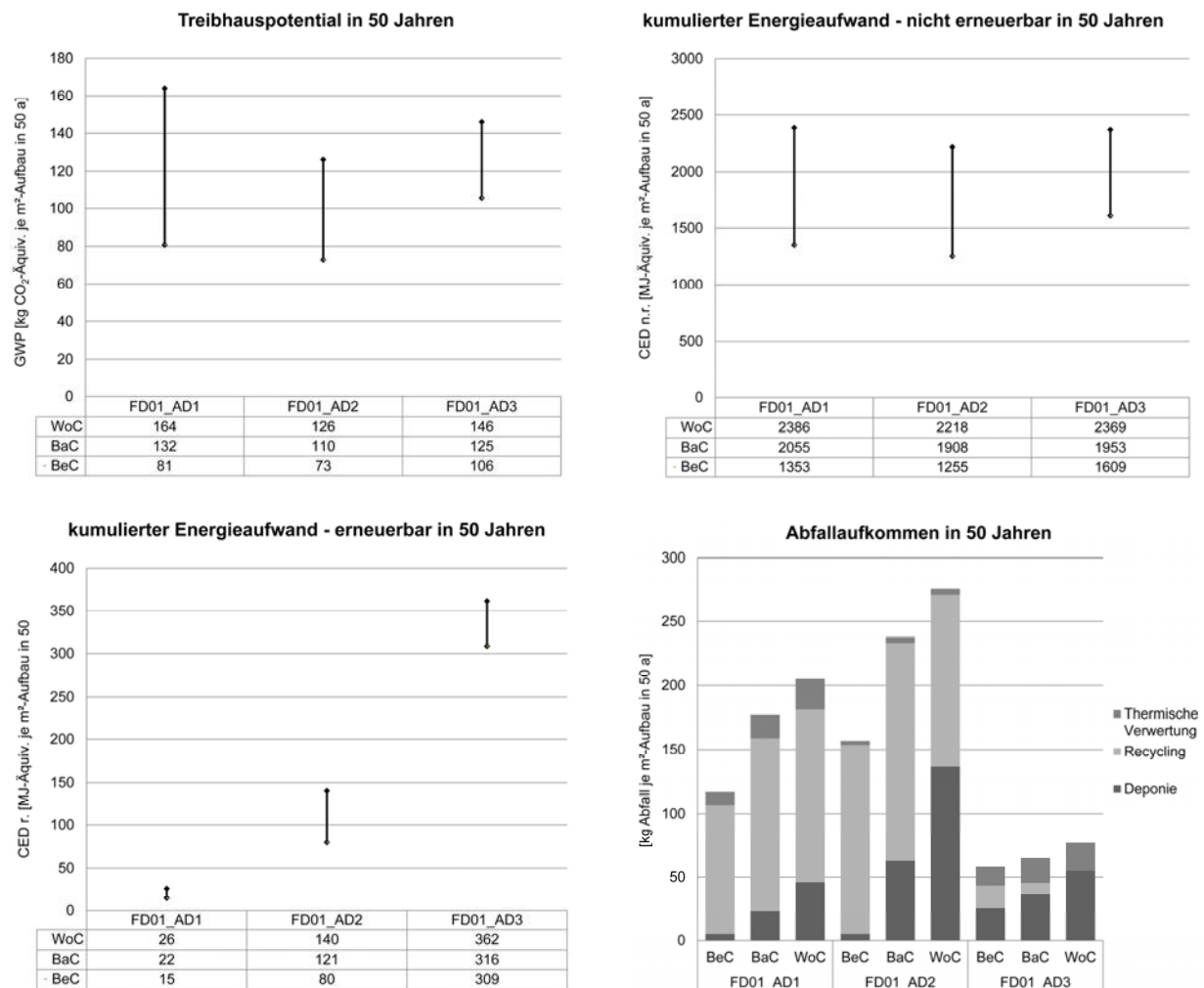


Abbildung 109 LCA-Vergleich – FD01\_AD

Die Variante FD01\_AD3 (Schaumglas mit Bitumenabdichtung) weist einen deutlich niedrigeren Materialinput (65 kg/m<sup>2</sup>) auf, als die Varianten FD01\_AD1 (EPS mit Kunststoffabdichtung und Kiesschüttung; 177 kg/m<sup>2</sup>) und Varianten FD01\_AD2 (Steinwolle mit Kunststoffabdichtung und Kiesschüttung; 238 kg/m<sup>2</sup>) (siehe Abbildung 109). Der Unterschied zeigt sich auch beim Vergleich des Abfallaufkommens der drei betrachteten Aufbauten. Trotz des vergleichsweise höheren Materialinputs schneiden die Varianten FD01\_AD1 und FD01\_AD2 hinsichtlich des Deponieaufkommens aufgrund der guten Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen besser ab.

Im Best Case sind die Ökobilanz-Kennwerte (GWP, CED n.r.) der Varianten FD01\_AD1 und FD01\_AD2 um ca. 20 bis 30 % niedriger wie jene der Variante FD01\_AD3, da für diese eine Bitumen-Abdichtungsbahn zur Anwendung kommt, die im Vergleich zu einer Kunststoffabdichtungsbahn deutlich höhere Ökobilanz-Kennwerte aufweist. Der deutlich höhere kumulierte Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) der Variante FD01\_AD3 wird durch den eingesetzten Dämmstoff (Schaumglas) verursacht, obwohl die zu erwartende Lebensdauer im Vergleich zur EPS- und Mineralwolle-Variante fast doppelt so lang ist.

**Flachdach - FD02\_AD**

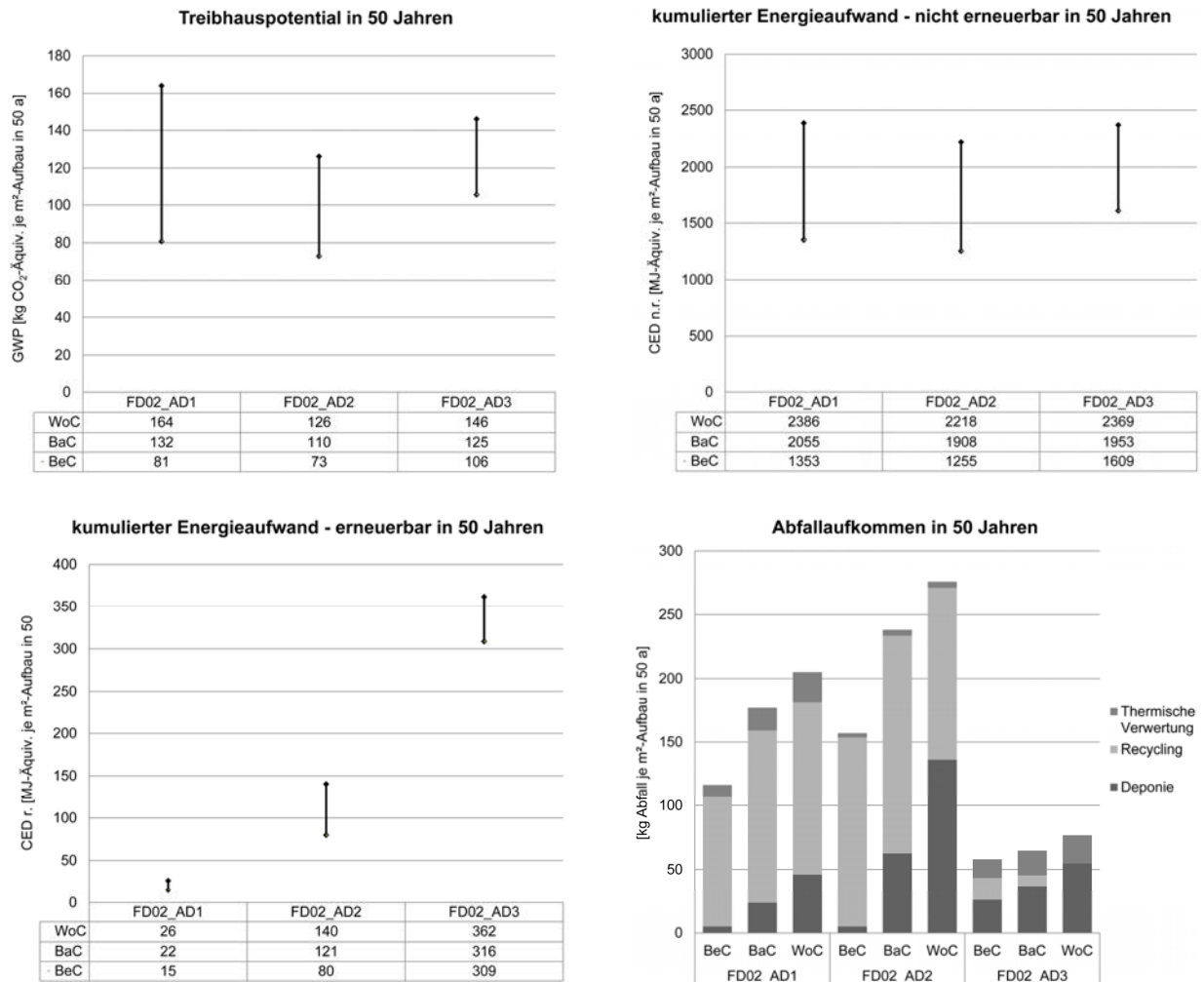


Abbildung 110 LCA-Vergleich – FD02\_AD

Die Variante FD02\_AD3 (Schaumglas mit Bitumenabdichtung) weist einen deutlich niedrigeren Materialinput (65 kg/m<sup>2</sup>) auf, als die Varianten FD02\_AD1 (EPS mit Kunststoffabdichtung und Kiesschüttung; 177 kg/m<sup>2</sup>) und FD02\_AD2 (Steinwolle mit Kunststoffabdichtung und Kiesschüttung; 238 kg/m<sup>2</sup>) (siehe Abbildung 110). Der Unterschied zeigt sich auch beim Vergleich des Abfallaufkommens der drei betrachteten Aufbauten. Trotz des vergleichsweise höheren Materialinputs schneiden die Varianten FD02\_AD1 und FD02\_AD2 hinsichtlich des Deponieaufkommens aufgrund der guten Trennbarkeit der anfallenden Baurestmassen besser ab.

Im Best Case sind die Ökobilanz-Kennwerte (GWP, CED n.r.) der Varianten FD02\_AD1 und FD02\_AD2 um ca. 20 bis 30 % niedriger wie jene der Variante FD02\_AD3, da für diese eine Bitumen-Abdichtungsbahn zur Anwendung kommt, die im Vergleich zu einer Kunststoffabdichtungsbahn deutlich höhere Ökobilanz-Kennwerte aufweist. Der deutlich höhere kumulierte Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) der Variante FD02\_AD3 wird durch den eingesetzten Dämmstoff (Schaumglas) verursacht, obwohl die zu erwartende Lebensdauer im Vergleich zur EPS und Mineralwolle-Variante fast doppelt so lang ist. Von Vorteil ist jedoch das deutlich geringere Abfallaufkommen. Dieses weist jedoch aufgrund der schlechteren Trennbarkeit der verklebten Schaumglasprodukte einen vergleichsweise höheren Deponieanteil auf.

## Dachschräge - DS02\_AD\_ID

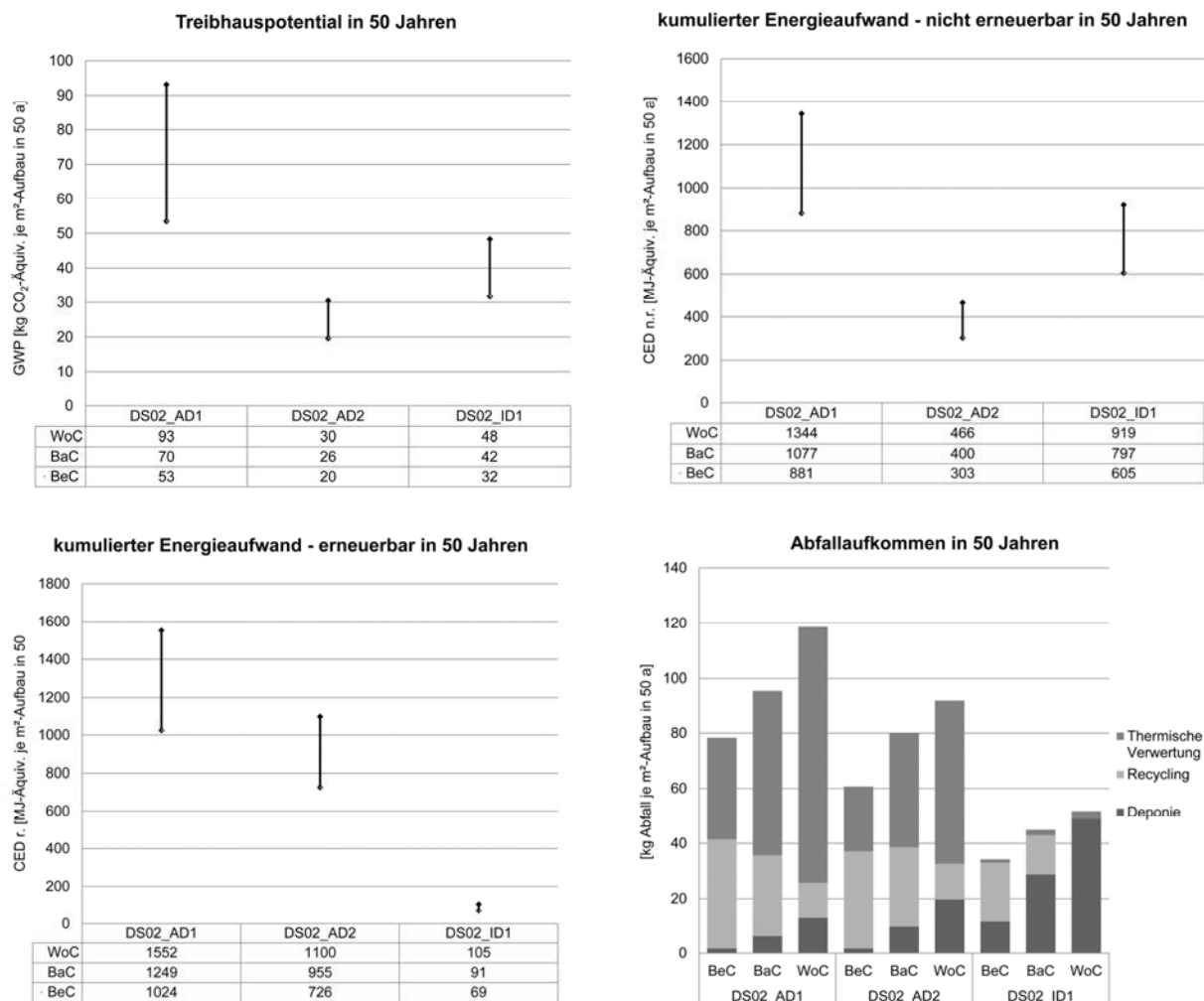


Abbildung 111 LCA-Vergleich – DS02\_AD\_ID

Beim Treibhauspotential (GWP) und beim kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) weist die Variante DS02\_AD1 aufgrund der eingesetzten EPS-Dämmung deutlich höhere Kennwerte auf. Die Variante DS02\_AD2 hat zwar einen höheren Materialinput als die Variante DS02\_AD3 (80 statt 45 kg/m<sup>2</sup>), trotzdem werden niedrigere Ökobilanz-Kennwerte aufgrund der Verwendung von weniger energieintensiven Bauprodukten (Konterlattung und leichtere Mineralwolle-Dämmung, 15 statt 115 kg/m<sup>3</sup>) erreicht (siehe Abbildung 111).

Der hohe kumulierte Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) der Varianten DS02\_AD1 und DS02\_AD2 wird durch die eingesetzten Holzprodukte (Lattung, Konterlattung etc.) verursacht, wobei dies aufgrund der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern positiv zu werten ist.

Beim Abfallaufkommen weist die Variante DS02\_ID1 den niedrigsten Wert auf, hat aber aufgrund der rückgebauten Gipskartonplatten einen höheren Deponieanteil als die beiden anderen Varianten. Die Recycling-Quote von rückgebauten Gipskartonplatten ist lt. [73] in anderen EU-Mitgliedsländern deutlich höher, weshalb es hier noch ein Verbesserungspotential zu nutzen gilt. Bei allen drei Varianten wird die Lebensdauer des Dachgeschoßaufbaus durch die eingebaute Mineralwolle-Dämmung begrenzt, d.h., der Aufbau eines ausgebauten Dachgeschoßes weist eine kürzere Lebensdauer auf als ein nicht ausgebautes Dachgeschoß. Der Vorteil der Variante DS02\_ID1 ist, dass eine thermische Sanierung von innen her stattfindet, weshalb keine Verkürzung der

Lebensdauer des bestehenden Dachaufbaus eintritt. Die Folge ist, dass der Materialinput der Variante DS02\_ID1 im Vergleich zu den anderen zwei Varianten um die Hälfte niedriger ist. Dies spiegelt sich auch beim Abfallaufkommen wider.

### Dachschräge - DS03\_AD\_ID

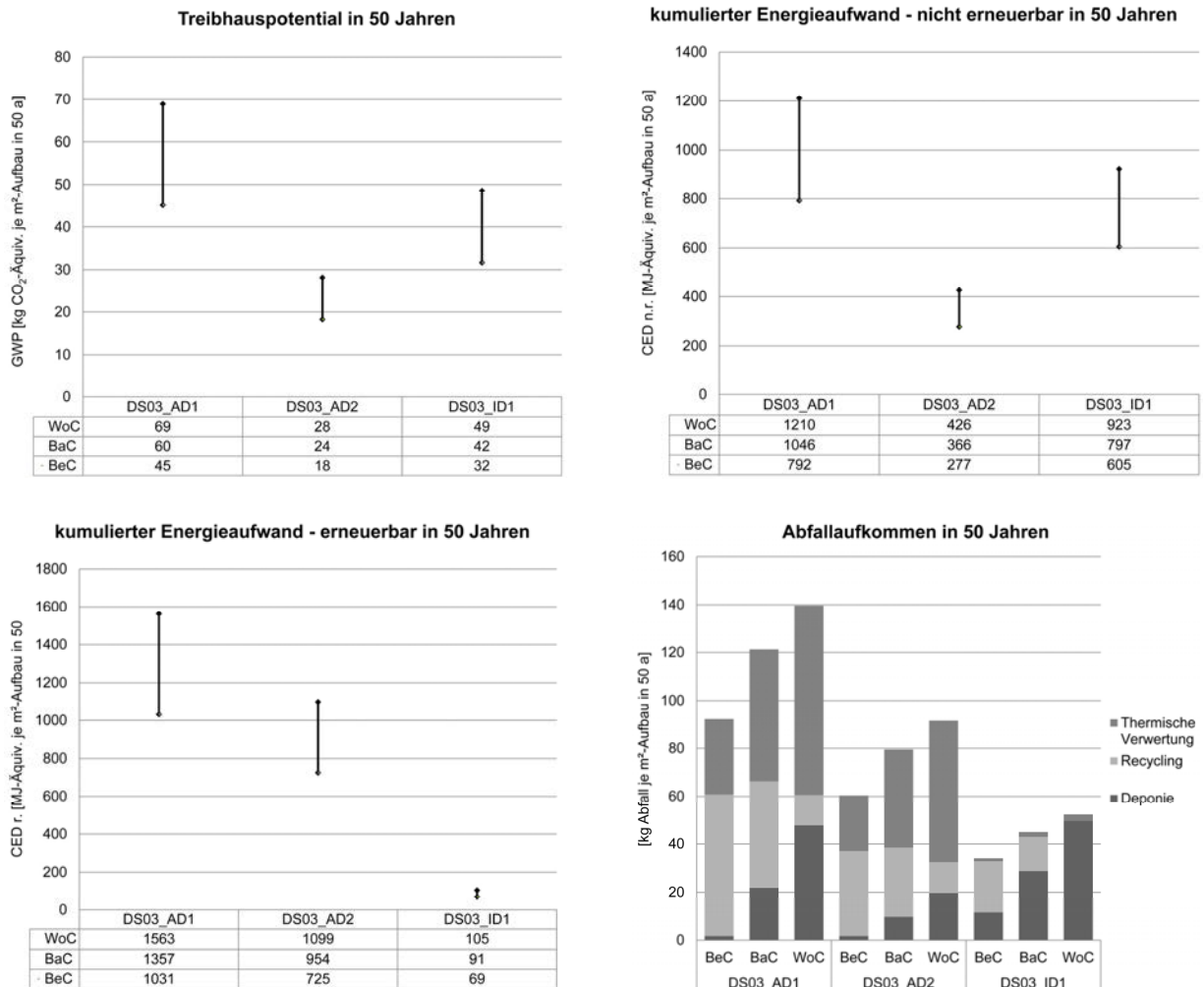


Abbildung 112 LCA-Vergleich – DS03\_AD\_ID

Die Variante DS03\_AD2 weist die niedrigsten Ökobilanz-Kennwerte bei den Indikatoren Treibhauspotentials (GWP) und kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) auf, obwohl ein höherer Materialinput wie für die Variante DS03\_AD3 (80 statt 45 kg/m<sup>2</sup>) benötigt wird. Grund ist die Verwendung von weniger energieintensiven Bauprodukten (Konterlattung und leichtere Mineralwolle-Dämmung, 15 statt 115 kg/m<sup>3</sup>).

Beim Treibhauspotential (GWP) und beim kumulierten Energieaufwand – nicht erneuerbar (CED n.r.) weist hingegen die Variante DS03\_AD1 aufgrund der eingesetzten EPS-Dämmung deutlich höhere Kennwerte auf (siehe Abbildung 112). Der hohe kumulierte Energieaufwand – erneuerbar (CED r.) der Varianten DS03\_AD1 und DS03\_AD2 wird durch die eingesetzten Holzprodukte (Lattung, Konterlattung etc.) verursacht, wobei dies aufgrund der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern positiv zu werten ist.

Beim Abfallaufkommen weist die Variante DS03\_ID1 den niedrigsten Wert auf, hat aber aufgrund der rückgebauten Gipskartonplatten einen höheren Deponieanteil als die beiden anderen Varianten. Der Deponieanteil kann, wie ein Vergleich der Recycling-Quoten mit anderen EU-Mitgliedsländern zeigt, noch deutlich gesenkt werden. Bei allen drei Varianten wird die Lebensdauer des Dachgeschoßaufbaus durch die eingebaute Mineralwolle-Dämmung begrenzt, d.h., der Aufbau eines ausgebauten Dachgeschoßes weist eine kürzere Lebensdauer auf als ein nicht ausgebauter Dachgeschoß.

Der Vorteil der Variante DS02\_ID1 ist, dass eine thermische Sanierung von innen her stattfindet, weshalb keine Verkürzung der Lebensdauer des bestehenden Dachaufbaus eintritt. Die Folge ist, dass der Materialinput der Variante DS02\_ID1 im Vergleich zu den anderen zwei Varianten um die Hälfte niedriger ist. Dies wirkt sich auch positiv auf das Abfallaufkommen aus.

### Erdberührter Fußboden - EB\_AD\_ID

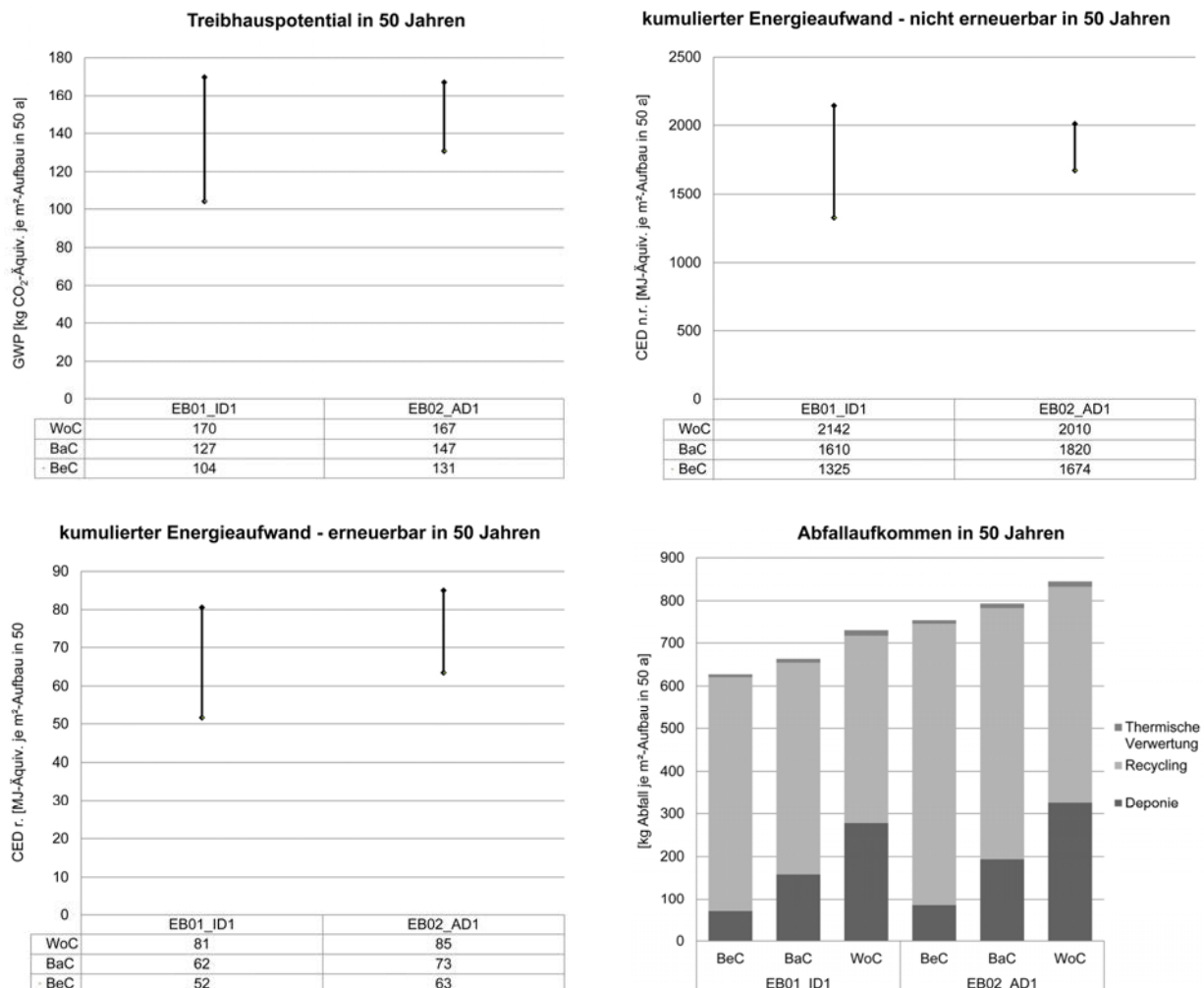


Abbildung 113 LCA-Vergleich – EB\_AD\_ID

Die Variante EB02\_AD1 weist im Best Case grundsätzlich höhere Kennwerte als die Variante EB01\_ID1 bezogen auf eine Nutzungsdauer von 50 Jahren auf (siehe Abbildung 113). Die Gründe sind die höheren stofflichen Aufwendungen in der Sanierungsphase aber auch in der Nutzungsphase, welche aufgrund einer mangelnden Lösbarkeit der zusammengefügt Bauteilschichten zu einer Verkürzung der Lebensdauer der verwendeten Bauprodukte führt. Die bituminöse Abdichtungsbahn

ist hinsichtlich der Lebensdauer des Aufbaus der begrenzende Faktor. Der geringe Deponieanteil im Best Case setzt einen sortenreinen Rückbau voraus, wodurch eine höhere Recycling-Quote der anfallenden Baurestmassen erreicht wird.

## B. Ecofys-Kennzahlen

In der Tabelle 9-3 sind die aus der Ecofys-Studie [22] übernommen Kennzahlen für das solarurbane und technische Flächenpotential dargestellt.

Tabelle 9-3 Übersicht – Ecofys-Kennzahlen [22]

Stadttraumtypen	Solarurbanes Flächenpotential		Technisches Flächenpotential	
	Dach/NF	Fassade/NF	Dach/NF	Fassade/NF
Altstadtquartiere	0,114	0,000	0,18	0,18
Innerstädtische Baublöcke, Gründerzeit	0,049	0,000	0,03	0,05
Gewerbe- und Industriekomplexe - Gründerzeit	0,528	0,000	0,53	0,02
Zweckbaukomplexe - Gründerzeit	0,028	0,000	0,20	0,09
Werks- und Genossenschaftssiedlungen	0,036	0,000	0,13	0,05
Einfamilienhaus - Vorkriegszeit	0,091	0,000	0,20	0,26
Wiederaufbau Ensembles	0,096	0,000	0,10	0,02
Sozialer Wohnbau 50er	0,220	0,000	0,22	0,38
Sozialer Wohnbau 60er	0,097	0,050	0,10	0,14
Sozialer Wohnbau 70er	0,128	0,125	0,13	0,13
Geschosswohnbau NBL	0,057	0,091	0,17	0,18
Einfamilienhaus - Nachkriegszeit	0,156	0,000	0,16	0,16
Zweckbau, öffentliche Einrichtungen - Nachkriegszeit	0,210	0,042	0,21	0,10
Gewerbe und Industrie - NBL	0,125	0,037	0,13	0,16
Geschosswohnbau der 80er	0,099	0,049	0,16	0,08
Einfamilienhaus 80er	0,046	0,046	0,27	0,08
Gewerbe / Industrie 80er	0,400	0,170	0,25	0,17
Büro / Infrastruktur 80 er	0,313	0,133	0,21	0,13
Einkaufszentren 80er	0,222	0,028	0,40	0,05
Freizeitanlagen 80er	0,240	0,019	0,67	0,19

Erläuterung der Kürzel:

Dach/NF: Solar nutzbare Dachflächen je m<sup>2</sup> Nutzfläche

Fassade/NF: Solar nutzbare Fassadeflächen je m<sup>2</sup> Nutzfläche



## C. Literaturverzeichnis

- [1] Steiermärkisches Baugesetz - Stmk. BauG. Baugesetznovelle 2012. LGBl. Nr. 78/2012. 1995.
- [2] Altmann N. e. a.: Renovation through Quality supply chains and EPC Standards – REQUEST. 2012. <http://www.energyagency.at/projekte-forschung/gebäude-haushalt/detail/artikel/request-qualitätssteigerung-im-sanierungsprozess.html>.
- [3] Amtmann M., Groß M.: Tabula- Eine Typologie österreichischer Wohngebäude. Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency. 2011.
- [4] ArchiPHYSIK: (2011) lizenziert für Rosenfelder & Höfler Consulting. 2011.
- [5] Architectural Institute of Japan: The English edition of principal guide for service life planning of buildings. 1993.
- [6] Arlt J., Pfeiffer M.: Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau. Fraunhofer IRB Verlag. 2005.
- [7] Baumgartner G., Gutschi C., Bachhiesl U., et al.: Technisch-wirtschaftliche Analyse energetischer und thermischer Sanierungsmöglichkeiten von Einfamilienhäusern. 11. Symposium Energieinnovation. 2010.
- [8] Budelmann H.: Monitoring von Betonbauwerken: Sensoren, Methoden, Erfahrungen. Sicherheitsgewinn durch Monitoring? Zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Gruebl. 2006. <http://tocs.ulb.tu-darmstadt.de/190602147.pdf>.
- [9] Building Research Establishment, Freyssinet International, Institute of Construction Science "Eduardo Torroja", et al.: A Thematic Network on Performance Based Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures. CON REP NET Network Newsletter. 2004.
- [10] Bund Technischer Experten e.V.: Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte. 2008. [www.expertebte.de](http://www.expertebte.de).
- [11] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. 2001. <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/46918/publicationFile/726/leitfaden-nachhaltiges-bauen-nicht-barrierefrei.pdf>.
- [12] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Umweltbundesamt GmbH: Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011 - Teil 1. 2011. <http://www.bundesabfallwirtschaftsplan.at/>.
- [13] Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen - Deutschland: Zwischenauswertung vom 01.09.2008 zur Überarbeitung der Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen des Hochbaus für den Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“. 2008.

- [14] Caccavelli D., Gugerli H.: TOBUS - A European diagnosis and decision-making tool for office building upgrading. Energy Build 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00100-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00100-1).
- [15] CalCon Software GmbH: epiqr 3.0 Handbuch. 2006.
- [16] Cole I., Shutt G., Gilbert D., et al.: Predicted lifetimes of metallic building components - A practical database derived from expert opinion. Cooperative Research Centre (CRC) for Construction Innovation. 2006.
- [17] COMET Kompetenzzentrum: multifunctional plug & play facade (mppf) - Projekt-Nr. 815075. 2012.
- [18] Davies H., Wyatt D.: Appropriate use of the ISO 15686-1 factor method for durability and service life prediction. 10th DBMC International Conference on durability of building materials and components. 2005.
- [19] Defaix P. R.: The potential for solar electricity production in the EU-27. 2009. <http://nws.chem.uu.nl/publica/Publicaties%202009/NWS-S-2009-12.pdf>.
- [20] Ebel W., et al.: Ergänzungen zur Studie „Energiesparpotential im Gebäudebestand“. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). 1991.
- [21] Eckerle K., et al.: PROGNOSE: Niedertemperatur-Wärmemarkt in Österreich 1995-2010. 1996.
- [22] Ecofys GmbH et al.: Leitbilder und Potenziale eines solaren Städtebaus. 2004.
- [23] Ecoinvent Centre (2007): ecoinvent data v2.2. ecoinvent reports No. 1-25, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. 2007. [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- [24] Ellmar H.: Gegenüberstellung Bauproduktenrichtlinie BPR mit der Construction Products Directive CPD. Österreichisches Normungsinstitut. Dezember 1998.
- [25] Energie-Control: Jahresreihen der Aufbringung elektrischer Energie (Gesamte Versorgung). 2009. [www.e-control.at](http://www.e-control.at).
- [26] Esser E., Gieler R.P., Haustein T., et al.: Aachener Bausachverständigentage - Bauteilalterung - Bauteilschädigung - Typische Schädigungsprozesse und Schutzmaßnahmen. 2008.
- [27] Europäisches Parlament: Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. 2008. [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/waste\\_management/ev0010\\_de.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/ev0010_de.htm).
- [28] Europäisches Parlament: Construction Products Regulation (CPR) - Verordnung des Europäischen Parlaments und Europäischen Rates zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates. 2010.

- 
- [29] Europäisches Parlament: Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. 2012.
- [30] European Commission - Enterprise and Industry DG: Construction - Interpretative document No. 1: Mechanical resistance and stability. 2011.
- [31] European Commission - Enterprise and Industry Directorate-General: Guidance Paper F - Durability and the Construction Products Directive. 2004.
- [32] European Organisation for Technical Approvals: Guidance Document 002 - Assumption of working life of construction products in Guidelines for European Technical Approval, European Technical Approvals and Harmonized Standards. 1999.
- [33] European Organisation for Technical Approvals: Guidance Document 003 - Assessment of working life of products. 1999.
- [34] [European Organisation for Technical Approvals: ETAG 04 - Leitlinie für europäische technische Zulassungen für außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht. 2000.
- [35] Eustacchio E.: Qualitätssicherung und Zertifizierung von Bauprodukten. Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA – TU Graz. 2005.
- [36] Everding D.: Solarer Städtebau – Pilotprojekte, Lösungsmodelle, Potenziale. Solarer Städtebau – Pilotprojekte, Lösungsmodelle, Potenziale Fachtagung - Ökologische Siedlungsentwicklung im Spiegel aktueller Trends und Praxiserfahrungen. 2005.
- [37] Fachinformationszentrum Karlsruhe: IKARUS-Datenbank Version 3.1. 1999.
- [38] fib - International Federation for Structural Concrete: fib Model Code for Concrete Structures. Ernst & Sohn. 2010.
- [39] Flourentzou F., Brandt E., Wetzel C.: MEDIC - a method for predicting residual service life and refurbishment investment budgets. Energy Build Elsevier Sequoia SA. 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00031-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00031-6).
- [40] Flourentzou F., Droutsas K., Wittchen K.B.: EPIQR software. Energy Build Elsevier Sequoia SA. 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00026-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00026-2).
- [41] Gaspar P. L., de Brito J.: Assessment of the overall degradation level of an element, based on field data. 2005. <http://www.irbnet.de/daten/iconda/06089011541.pdf>.
- [42] Gierga M., Erhorn H.: Bestand und Typologie beheizter Nichtwohngebäude in Westdeutschland. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. 1993.
- [43] Gruhler K., Böhm R.: Ressourcenbezogene Kennwerte von Nichtwohngebäuden; Analyse und Aufarbeitung von Daten der Statistik "Bauen und Wohnen". 2011. [http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3956492&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm text/html 01 Inhaltstext;](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3956492&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm text/html 01 Inhaltstext;)

- <http://media.obvsg.at/AC09356409-1001> TUW Inhaltsverzeichnis 2;  
<http://permalink.obvsg.at/AC09356409>.
- [44] Hahne A., Hirn G.: Recycling von PV-Modulen. BINE Informationsdienst 02/10. 2010.  
[http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2010/Projektinfo\\_02-2010/projekt\\_0210\\_internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2010/Projektinfo_02-2010/projekt_0210_internetx.pdf).
- [45] Hallberg D.: Quantification of exposure classes in the European standard. 2005.  
<http://www.irbnet.de/daten/iconda/06089013412.pdf>.
- [46] Hauptverband der Allgemein Beeideten und Gerichtlich Zertifizierten Sachverständigen Österreichs / Landesverband Steiermark und Kärnten: Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile. SV-Landesverb. Steiermark u. Kärnten. 2006.
- [47] Hinz E.: Gebäudetypologie Bayern - Entwicklung von 11 Hausdatenblättern zu typischen Gebäuden aus dem Wohngebäudebestand Bayerns. Institut Wohnen und Umwelt GmbH. 2006.  
[http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/klima\\_altbau/Bericht\\_Hausdatenblaetter\\_Bayern.pdf](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Bericht_Hausdatenblaetter_Bayern.pdf).
- [48] Höhnl W., Schremser R.: Die neue europäische Bauproduktenverordnung. Austrian Standards Institute. 2011. <https://www.astandis.at/>.
- [49] Holper S., Zimmer S.: Ermittlung von Referenz HWB-Werten für Österreich. TU Graz. 2011.
- [50] Hovde P. J., Moser K.: Performance Based Methods for Service Life Prediction. CIB W080 / RILEM 175 SLM. 2004.  
[http://cibworld.xs4all.nl/pebbu\\_dl/resources/literature/downloads/05AdditionalThemes/01Pub294.pdf](http://cibworld.xs4all.nl/pebbu_dl/resources/literature/downloads/05AdditionalThemes/01Pub294.pdf).
- [51] IEA International Energy Agency: Potential for Building Intergated Photovoltaics. 2002.  
<http://www.netenergy.ch/pdf/BipvPotentialSummary.pdf>.
- [52] International Organization for Standardization: ISO 2394 - General principles on reliability for structures. 1998.
- [53] International Organization for Standardization: ISO 15686-1 - Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 1: General principles. 2000.
- [54] International Organization for Standardization: ISO 15686-2 - Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 2: Service life prediction procedures. 2001.
- [55] International Organization for Standardization: ISO 13823 - General principles on the design of structures for durability. 2008.
- [56] International Organization for Standardization: ISO 15686-8 Building and constructed assets - Service life planing; Part 8: Reference service life and service-life estimation. 2008.

- [57] International Organization for Standardization: ISO 14040 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. 2009.
- [58] Kalamees T.: Failure analysis of 10 year used wooden building. Engineering Failure Analysis. 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S1350-6307\(02\)00025-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1350-6307(02)00025-0).
- [59] Kaltschmitt M. Streicher W., et al.: Regenerative Energien in Österreich. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden; SpringerLink (Online service). 2009.
- [60] Klauß S., Kirchhof W., Gissel J.: Erfassung regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. 2009 [www.zub-kassel.de](http://www.zub-kassel.de).
- [61] Kleemann M., et al.: Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung in Gebäuden. Bremer Energie Institut. 2000.
- [62] Klingenberg J.: Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden - Dissertation. TU Darmstadt. 2007. <http://permalink.obvsg.at/AC05906321>.
- [63] Kohler N., et al.: Entwicklung, Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Springer. 1999.
- [64] Kollmann A., Lindorfer J., Schwarz M., et al.: Betrachtung der ökonomischen, energetischen und ökologischen Effekte anlagenseitiger Sanierungsmaßnahmen im Vergleich zur thermischen Sanierung zur effizienteren Energienutzung. 2012.
- [65] Kranzl L., Bayr M., Müller A., et al.: Effekte einer Steigerung der thermischen Sanierungsrate öffentlicher Gebäude. 2012.
- [66] Lair J., Le Téno J., Boissier D.: Durability assessment of building products. RILEM Publications SARL. 2000.
- [67] Lang G., Lang M.: CO<sub>2</sub> und Energie im Wohnbau - Erhebung CO<sub>2</sub> Emissionen und Energieverbrauch für Wohngebäude im Bestand und Neubau in Österreich für den Berichtszeitraum 2008-2020 zur Zielerreichung der EU-Klimastrategie inklusive Prognose bis 2050. IG Passivhaus Österreich. 2009.
- [68] Lath C.: Rohbaukonstruktionen der Gründerzeit (1800 - 1918) - Diplomarbeit. TU Graz. 1999.
- [69] Marteinsson B.: Service Life Estimations in the Design of Buildings: A Development of the Factor Method. Centre for Built Environment. 2005. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hig:diva-2351>.
- [70] Maydl P.: Nachhaltiges Bauen. Forschungsjournal der TU Graz WS 06/07. 2007.
- [71] Mc Duling J. J., Cloete C.E., Horak E.: The Application of Neuro-Fuzzy Methodolgy to Maintenance of Buildings. International Cost Engineering Council Congress. 2006. <http://www.icoste.org/Slovenia2006Papers/icecFinal00047.pdf>.

- [72] Meyer P., Bächler M., Christen K., et al.: Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten – Grundlagendaten für den Unterhalt und die Erneuerung von Wohnbauten. Impulsprogramm IP Bau - Bundesamt für Konjunkturfragen. 2011.
- [73] Mötzl H., Pladerer C.: Assessment of Buildings and Constructions (ABC) - Disposal - Maßzahlen für die Entsorgungseigenschaften von Gebäuden und Konstruktionen für die Lebenszyklusbewertung. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. 2009. [http://www.ibo.at/documents/813974\\_IBO\\_Moetzl\\_Endbericht.pdf](http://www.ibo.at/documents/813974_IBO_Moetzl_Endbericht.pdf).
- [74] Müller A.: Szenarien der Gebäudesanierung in Österreich bis zum Jahr 2050: Sanierungsqualität als Schlüssel zum Erfolg. Ökosan'11. 2011. [http://www.aee-intec-events.org/oekosan11/images/stories/documents/Download/Andreas\\_Mueller.pdf](http://www.aee-intec-events.org/oekosan11/images/stories/documents/Download/Andreas_Mueller.pdf).
- [75] [Öko-Institut e.V.: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) - Version 4.7. 2011. [www.gemis.de](http://www.gemis.de).
- [76] Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB Richtlinie 1 - Mechanische Festigkeit und Standsicherheit. Österreichisches Institut für Bautechnik. 2007.
- [77] Österreichisches Institut für Bautechnik: Erläuternde Bemerkungen zu OIB-Richtlinie 1 „Mechanische Festigkeit und Standsicherheit“. 2007.
- [78] Österreichisches Institut für Bautechnik: Leitfaden Energietechnisches Verhalten von Gebäuden. 2007. [www.oib.or.at](http://www.oib.or.at).
- [79] Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung: Innovation & Klima - Innovative Klimastrategien für die österreichische Wirtschaft. 2007.
- [80] Österreichisches Normungsinstitut: Eurocodes- Grundlagen - Normen und Recht - Bauproduktenrichtlinie - Bauproduktenrichtlinie und Normen - Interpretative Documents. 2011.
- [81] Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM B 4710-1 - Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regel zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1 für Normal- und Schwerbeton). 2010.
- [82] Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 1990 - Eurocode Grundlagen der Tragwerksplanung. 2003.
- [83] Österreichisches Normungsinstitut: ÖVE/ÖNORM EN 60812 Analysetechniken für die Funktionstüchtigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). 2006.
- [84] Österreichisches Normungsinstitut: Instandsetzung, Umbau und Verstärkung von Betonbauten - Allgemeine Regeln und nationale Umsetzung der ÖNORM EN 1504. 2008.
- [85] Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN ISO 12944-5 Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme. 2008.

- [86] Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM B 1992-1-1 - Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Festlegungen. 2011.
- [87] Pöhn C., et al.: EXCEL-Schulungs-Tool für Wohngebäude. 2008.  
<http://www.oib.or.at/veroeff.htm>.
- [88] PV Cycle: European Association for the Recovery of Photovoltaic Moduls - Annual Report 2012. 2012. [http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Annual-Report\\_2012\\_LR.pdf](http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Annual-Report_2012_LR.pdf).
- [89] Raupach M.: Erhaltung von Betonbauwerken. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden; SpringerLink (Online service). 2008.
- [90] Sarja A., Bamforth P., Caccavelli D., et al.: European guide for life time design and management of civil infrastructures and buildings. Lifetime Engineering of Buildings and Civil Infrastructures. 2005.
- [91] Scarpellini S., et al.: ENSLIC Building - Energy Saving through Promotion of Life Cycle Assessment in Buildings. [www.enslic.eu](http://www.enslic.eu). 2010.
- [92] Schriefl E., Hass R.: Auswirkungen der Entwicklung des österreichischen Wohngebäudebestands auf Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch – Ergebnisse eines multidimensionalen Simulationsmodells. Energy Economics Group; Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft - TU Wien. 2006.
- [93] Schulter D., Maydl P., Höfler K., et al.: Know How Plus - Möglichkeiten und Grenzen von Gebäudesanierungen auf Plusenergiehausstandard. BMVIT - Haus der Zukunft Plus 2012.
- [94] Schulter D., Maydl P.: Nachhaltig massiv - AP 02 - Lebensdauer von Bauteilen und Bauprodukten. 2009.
- [95] Schulze H.: Informationsdienst Holz - Baulicher Holzschutz. Holzbau Handbuch Reihe 3 Teil 5 Folge 2. DGfH Innovations- und Service GmbH. 1997.
- [96] Stanzer G., Novak S., Spanring C., et al.: Regionale Szenarien erneuerbarer Energiepotenziale in den Jahren 2012 / 2020. 2010.
- [97] Statistik Austria: GEBÄUDE- UND WOHNUNGSZÄHLUNG - Hauptergebnisse Österreich. 2004. [www.statistik.at](http://www.statistik.at).
- [98] Statistik Austria: Gesamtenergiebilanz 1970 bis 2007. 2008.
- [99] Statistik Austria: Bericht über die Probezählung 2006 - Ergebnisse und Evaluierung. 2009. [www.statistik.at](http://www.statistik.at).
- [100] Statistik Austria: Telefonische Auskunft von Hr. K. Vollmann am 20.06.2011. 2011.

- [101] Stein B. e. a.: Intelligent Energy Europe Project - EPISCOPE: Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks. 2013. <http://episcope.eu/fileadmin/episcope/public/docs/EPISCOPE-ProjectInformation.pdf>.
- [102] Venkatesan S., Kumar A., Setunge S.: Evaluation of Residual Service Life methodologies using refurbishment projects as case studies. International Conference on Project Management Tour Hosts. 2006. [http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/Research\\_library/ResearchLibraryC/Refereed\\_Conference\\_Papers/Evaluation\\_of\\_Residual\\_Service\\_Life\\_methodologies\\_using\\_refurbishment\\_projects\\_as\\_case\\_studies.pdf](http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/Research_library/ResearchLibraryC/Refereed_Conference_Papers/Evaluation_of_Residual_Service_Life_methodologies_using_refurbishment_projects_as_case_studies.pdf).
- [103] Vogel M., Bohner E., Günter M., et al.: Beurteilung der Dauerhaftigkeit und Restnutzungsdauer von Betonbauteilen mittels probabilistischer Methoden. Innovationen in der Betonbautechnik 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung - Universität Karlsruhe (TH). 2006.
- [104] Wartha C.: Lebenszyklusorientierte Gebäudebewertung mit dem Energieausweis Plus. Tagung: klima:aktiv Bauen und Sanieren. 2012.
- [105] Weiß J., Dunkelberg E.: Erschließbare Energieeinsparpotenziale im Ein- und Zweifamilienhausbestand. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). 2010.
- [106] Zelger T., et al.: PH-Sanierungsbauteilkatalog - Auswertung gebäudesanierungsbezogener HdZ-Forschungsberichte mit konstruktiven, bauphysikalischen und bauökologischen Ergänzungen . Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. 2009. [http://www.ibo.at/documents/endbericht\\_0937\\_ph\\_sanierungsbauteilkatalog.pdf](http://www.ibo.at/documents/endbericht_0937_ph_sanierungsbauteilkatalog.pdf).



## D. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Dreistufige Projektstruktur mit Ergebnissen .....	15
Abbildung 2 Zielsetzung und gewählte Vorgangsweise .....	16
Abbildung 3 Rahmenbedingungen für den Umgang mit der Dauerhaftigkeit im Bauwesen.....	24
Abbildung 4 Wesentlichen Bestandteile der ISO 13823 [51], verändert .....	30
Abbildung 5 Grenzzustandsbewertung - ISO 13823 [51], verändert .....	31
Abbildung 6 ISO 15686-Methodik zur Lebensdauerdatenermittlung nach [50], verändert .....	36
Abbildung 7 Technische Lebensdauer [51] .....	38
Abbildung 8 Bauproduktauswahl nach Umwelteinwirkungen und Schutzdauer nach [78] .....	42
Abbildung 9 Generelles Ablaufschema des Alterungsmodells – Nachhaltig massiv [85] .....	46
Abbildung 10 Problemstellungen bei der Berechnung der Austauschraten [85].....	54
Abbildung 11 Vorschlag zur Bereitstellung harmonisierter Lebensdauerdaten .....	55
Abbildung 12 Angestrebte Ziel-U-Wert (AEE INTEC - Geier 2012), abgebildet in [84] .....	59
Abbildung 13 Auszug aus dem baukonstruktionsorientierten Leitfaden – Übersicht über unterschiedliche Sanierungsvarianten, einschließlich bauphysikalischer Kennwerte [84] .....	60
Abbildung 14 Bewertungsraster für Lebenszyklusbewertungen [84] .....	61
Abbildung 15 Auswahl der Referenzgebäude - Regelkreislauf.....	66
Abbildung 16 Allokationsschlüssel – Flach- und Steildach mit und ohne Dachgeschoßausbau [84]...	67
Abbildung 17 Ablauf – Heizwärmebedarfsberechnung [84].....	68
Abbildung 18 Berechnungsergebnisse - mittlere Seehöhe je Klimazone [84] .....	69
Abbildung 19 LCA-Kennwerte – Heizwärmebedarf [84].....	70
Abbildung 20 Gegenüberstellung - Heizwärmebedarf vor und nach der Sanierung (Variante 3).....	72
Abbildung 21 Modellberechnung – solarurbanes und technisches Flächenpotential [84] .....	73
Abbildung 22 Vergleich – Nennleistungen der PV-Anlagen [84].....	76
Abbildung 23 PV-Stromerzeugungspotential – solarurbanes Flächenpotential - Variante 1 – Wohngebäudebestand [84] .....	79
Abbildung 24 PV-Stromerzeugungspotential – technisches Flächenpotential - Variante 1 – Wohngebäudebestand [84] .....	80
Abbildung 25 PV-Stromerzeugungspotential - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand [84].....	81
Abbildung 26 PV-Stromerzeugungspotential für Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand [84].....	81
Abbildung 27 Vergleich Stromerzeuger – GWP [84].....	84
Abbildung 28 Vergleich Stromerzeuger – CED n.r. [84].....	85
Abbildung 29 Bilanzierung des Einsparpotentials .....	87

Abbildung 30 Treibhausgas-Bilanz – Variante 1 - Wohngebäudebestand .....	88
Abbildung 31 Energiebilanz – CED n.r. – Variante 1 - Wohngebäudebestand.....	89
Abbildung 32 Energiebilanz – CED r. – Variante 1 - Wohngebäudebestand.....	89
Abbildung 33 Abfallaufkommen – Variante 1 - Wohngebäudebestand .....	90
Abbildung 34 Treibhausgas-Bilanz – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand .....	91
Abbildung 35 Energie-Bilanz – CED n.r. – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand.....	91
Abbildung 36 Energie-Bilanz – CED r. – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand.....	92
Abbildung 37 Abfallaufkommen – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand .....	93
Abbildung 38 Treibhausgas-Bilanz – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand .....	94
Abbildung 39 Energie-Bilanz – CED n.r. – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand.....	94
Abbildung 40 Energie-Bilanz – CED r. – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand.....	95
Abbildung 41 Abfallaufkommen – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand .....	95
Abbildung 42 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH+) - Variante 1 - Wohngebäudebestand.....	97
Abbildung 43 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH+) – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand.....	99
Abbildung 44 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH+) - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand.....	100
Abbildung 45 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH)- Variante 1 – Wohngebäudebestand .....	102
Abbildung 46 a.) bis d.) Dominanzanalyse (PH) – Variante 2 & 3 –Gesamter Gebäudebestand.....	105
Abbildung 47 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH+) – Variante 1 – Wohngebäudebestand.....	106
Abbildung 48 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH+) – Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand .....	108
Abbildung 49 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH+) – Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand .....	111
Abbildung 50 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH) – Variante 1 – Wohngebäudebestand.....	113
Abbildung 51 a.) bis d.) Dominanzanalyse (NEH) – Variante 2 & 3 – Gesamter Gebäudebestand...	115
Abbildung 52 Restpotential – GWP - Variante 1 - Wohngebäudebestand .....	120
Abbildung 53 Restpotential – CED n.r. - Variante 1– Wohngebäudebestand .....	121
Abbildung 54 Restpotential – CED r. - Variante 1 – Wohngebäudebestand .....	121
Abbildung 55 Restpotential – GWP - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand .....	122
Abbildung 56 Restpotential – CED n.r. - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand .....	123
Abbildung 57 Restpotential – CED r. - Variante 2 – Gesamter Gebäudebestand .....	123
Abbildung 58 Restpotential – GWP - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand .....	124
Abbildung 59 Restpotential – CED n.r. - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand .....	125
Abbildung 60 Restpotential – CED r. - Variante 3 – Gesamter Gebäudebestand .....	125
Abbildung 61 Übersicht - Abfallaufkommen – Plusenergiehausstandard (PH+) .....	126
Abbildung 62 Übersicht - Abfallaufkommen – Passivhausstandard (PH) .....	127
Abbildung 63 Übersicht - Abfallaufkommen – Niedrigenergiehausstandard mit PV & ST (NEH+).....	128

---

Abbildung 64 Übersicht - Abfallaufkommen – Niedrigenergiehausstandard (NEH).....	128
Abbildung 65 Modellierung – Referenzgebäude [84] .....	130
Abbildung 66 Zusammenfassung - Methodische Vorgangsweise (bottom-up-Ansatz) .....	131
Abbildung 67 Veränderung des Strommix infolge Bestandssanierung auf Plusenergiehausstandard	132
Abbildung 68 Einsparpotential durch Bestandssanierung auf vier unterschiedliche Gebäude-Energiestandards .....	133
Abbildung 69 Dominanz-Analyse – CED n.r. – Gesamter Gebäudebestand (Variante 2).....	134
Abbildung 70 Dominanz-Analyse – GWP – Gesamter Gebäudebestand (Variante 2).....	135
Abbildung 71 Abfallaufkommen infolge Bestandssanierung auf Plusenergiehausstandard (PH+) bzw. Niedrigenergiehausstandard (NEH) .....	137
Abbildung 72 Steigerung des Abfallaufkommens – Vergleichsbasis BAWP 2011 .....	137
Abbildung 73 LCA-Vergleich – AW01_ID.....	144
Abbildung 74 LCA-Vergleich – AW01_AD .....	145
Abbildung 75 LCA-Vergleich – AW01_AD_ST.....	146
Abbildung 76 LCA-Vergleich – AW01_AD_PV.....	147
Abbildung 77 LCA-Vergleich – AW02_AD .....	148
Abbildung 78 LCA-Vergleich – AW02_AD_ST.....	149
Abbildung 79 LCA-Vergleich – AW02_AD_PV.....	150
Abbildung 80 LCA-Vergleich – AW03_AD .....	151
Abbildung 81 LCA-Vergleich – AW03_AD_ST.....	152
Abbildung 82 LCA-Vergleich – AW03_AD_PV.....	153
Abbildung 83 LCA-Vergleich – AW04_AD .....	154
Abbildung 84 LCA-Vergleich – AW04_AD_ST.....	155
Abbildung 85 LCA-Vergleich – AW04_AD_PV.....	156
Abbildung 86 LCA-Vergleich – AW05_AD mit AW04_AD.....	157
Abbildung 87 LCA-Vergleich – AW05_AD_ST.....	158
Abbildung 88 LCA-Vergleich – AW05_AD_PV.....	159
Abbildung 89 LCA-Vergleich – AW06_AD .....	160
Abbildung 90 LCA-Vergleich – AW06_AD_ST.....	161
Abbildung 91 LCA-Vergleich – AW06_AD_PV.....	162
Abbildung 92 LCA-Vergleich – AW07_AD .....	163
Abbildung 93 LCA-Vergleich – AW07_AD_ST.....	164
Abbildung 94 LCA-Vergleich – AW07_AD_PV.....	165
Abbildung 95 LCA-Vergleich – AW08_AD .....	166
Abbildung 96 LCA-Vergleich – AW08_AD_ST.....	167

Abbildung 97 LCA-Vergleich – AW08_AD_PV.....	168
Abbildung 98 LCA-Vergleich – AW09_AD .....	169
Abbildung 99 LCA-Vergleich – AW10_AD .....	170
Abbildung 100 LCA-Vergleich – DGD01_AD .....	171
Abbildung 101 LCA-Vergleich – DGD02_AD .....	172
Abbildung 102 LCA-Vergleich – DGD03_AD .....	173
Abbildung 103 LCA-Vergleich – DGD04_AD .....	174
Abbildung 104 LCA-Vergleich – DGD05_AD .....	175
Abbildung 105 LCA-Vergleich – DGD06_AD .....	176
Abbildung 106 LCA-Vergleich – DGK01_ID.....	177
Abbildung 107 LCA-Vergleich – FD01_AD .....	178
Abbildung 108 LCA-Vergleich – FD02_AD .....	179
Abbildung 109 LCA-Vergleich – DS02_AD_ID.....	180
Abbildung 110 LCA-Vergleich – DS03_AD_ID.....	181
Abbildung 111 LCA-Vergleich – EB_AD_ID.....	182

## E. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Konnex - Nutzungsdauer Bauwerk und Bauprodukt nach [30], verändert.....	27
Tabelle 2-2 Nutzungsdauerklassen - ÖNORM EN 1990 nach [75], verändert .....	28
Tabelle 2-3 Beispiel - Faktormethode .....	39
Tabelle 2-4 Abdeckung der Faktorklassen in Regelwerken.....	42
Tabelle 2-5 Gegenüberstellung publizierter Lebensdauermodelle .....	45
Tabelle 2-6 Konnex zwischen ISO 15686-Faktorklassen und Regelwerke .....	47
Tabelle 3-1 Definition der Lösbarkeit von Bauteilschichten nach [85] .....	62
Tabelle 4-1 Übersicht über gewichtete HWB-Kennzahlen – Wohngebäude .....	71
Tabelle 4-2 Übersicht über gewichtete HWB-Kennzahlen – Nichtwohngebäude (NWG).....	72
Tabelle 5-1 Übersicht über die integrierbaren solar erzeugten Wärmemengen [84] .....	75
Tabelle 5-2 Bandbreite – Kollektorenergieeinträge lt. [84], in Anlehnung an [55].....	76
Tabelle 5-3 Übersicht – Flächenpotential je Variante [84] .....	77
Tabelle 5-4 Übersicht über solar nutzbare Dach- und Fassadenflächen [84].....	78
Tabelle 5-5 Übersicht über technische Flächen für PV & Solarthermie [84].....	78
Tabelle 5-6 Übersicht über solarurbanes Flächenpotential für PV & Solarthermie [84] .....	79
Tabelle 6-1 Definition – Gebäudeenergiestandards.....	82
Tabelle 6-2 Szenario – Rahmenbedingungen [84].....	87
Tabelle 7-1 Variantenabhängige Stromverbrauchs-Kennzahlen [84] .....	118
Tabelle 7-2 Variantenabhängige Verteilung bzgl. PV-Strom und österreichischer Strommix [84].....	118
Tabelle 7-3 Nutzenergiebedarf –Variante 1 - Wohngebäudebestand.....	119
Tabelle 7-4 Nutzenergiebedarf – Variante 2 & 3 – Gesamter Gebäudebestand .....	119
Tabelle 8-1 Nutzenergiebedarf nach Sanierung des österreichischen Gebäudebestands.....	136
Tabelle 8-2 Strombedarf nach Sanierung des österreichischen Gebäudebestands.....	136
Tabelle 9-1 Kurzbezeichnung - Aufbauten .....	143
Tabelle 9-2 Kurzbezeichnung – Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen .....	143
Tabelle 9-3 Übersicht – Ecofys-Kennzahlen [19] .....	184

## F. Glossar

a-Si...Amorphous Silicon / Amorphes Silizium.

BAC...Base Case.

BEC...Best Case.

BPV...Bauprodukteverordnung.

CED n.r....Cumulative Energy Demand – non renewable (kumulierter Energieaufwand – erneuerbare Energieträger; oft auch als Primärenergieinhalt – PEI bezeichnet).

CED r....Cumulative Energy Demand - renewable (kumulierter Energieaufwand – erneuerbare Energieträger).

CEN...European Committee for Standardization / Europäisches Komitee für Normung.

CEN/TC...European Committee for Standardization / Technical Committee.

CdTe...Cadmium Telluride Photovoltaic Laminates / Cadmiumtellurid.

CIB...International Council for Building.

CIS...Copper Indium Selenide Photovoltaic Panels / Kupfer Indium Diselenid.

DL...Design life: Geplante Nutzungsdauer des Bauwerks. [54]

EFH...Einfamilienhaus.

EN...Europäische Norm.

Energetische Modernisierungsmaßnahmen... Solarthermie- und Photovoltaik-Anlagen zur Nutzung der Solarenergie.

EOTA... European Organisation for Technical Approvals

EPD...Environmental Product Declaration (Umweltproduktdeklaration) gem. ÖNORM EN ISO 14025.

ESL ...estimated service life: Die mittels Faktormethode rechnerisch ermittelte Lebensdauer. [54]

ETAG...Europäische Technische Zulassung.

EV-Raumheizung...Energieverbrauch für Raumheizung. Dieses Kürzel wurde in dieser Arbeit für die Ergebnis-Darstellung des Energieverbrauchs für Raumwärme in den Abbildungen verwendet. (siehe Kapitel 8)

FMEA...Fehler-Möglichkeit-Einfluss-Analyse.

GEM...Gemeinschaftsunterkünfte (z.B. Studentenheime).

GWP...Globing Warming Potential (Treibhauspotential).

hEN...Harmonisierte europäische Norm.

HWB...Heizwärmebedarf. Dieses Kürzel wurde in dieser Arbeit für die Ergebnis-Darstellung des Energieverbrauchs für Raumwärme in den Abbildungen verwendet. (siehe Kapitel 6 und 7)

ILS...Initiation limit state: Initiierung der Materialschädigung.

ISO...Internationale Organisation für Normung.

LCA...Life Cycle Assessment / Ökobilanz.

LCC...Life Cycle Costing.

Lösbarkeit...Einfluss der gewählten Fügetechnik auf den Instandsetzungsaufwand.

MFH-G...Mehrfamilienhaus groß (mehr als 2 Wohnungen).

MFH-K...Mehrfamilienhaus klein (bis zu 2 Wohnungen).

Multi-SI... Multi crystalline silicon cells / Multi-Silizium.

NDP...Nationally Determined Parameter.

NEH...Kürzel für die Variante „Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten“

NEH+...Kürzel für die Variante „Sanierung mit Niedrigenergiehaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie“

Nutzenergie...Jene Energie, die nach der letzten Umwandlung in den Geräten vom Verbraucher zur Bedürfnisbefriedigung zur Verfügung steht. [59]

NWG...Nichtwohngebäude.

NWV...Nutzwärmeverbrauch

OIB...Österreichisches Institut für Bautechnik.

PH...Kürzel für die Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten“

PH+...Kürzel für die Variante „Sanierung mit Passivhaus-Komponenten, Photovoltaik und Solarthermie“

PSL...predicted service life: Voraussichtliche Lebensdauer, die entsprechend einer ISO 15686-konformen Datenerhebung (z.B. strukturierte Erfahrungswerte) zu erwarten ist. [54]

PV...Photovoltaik.

Restpotential...Dieses kann für weitere alternative Maßnahmen hinsichtlich der Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz genutzt werden, wie beispielsweise durch einen Wechsel von nicht erneuerbare auf erneuerbare Energieträger (Biomasse statt fossile Brennstoffe, Windkraft etc., aber ohne Photovoltaik und Solarthermie bezogen auf den österreichischen Gebäudebestand, da dieses Potential bereits in dieser Arbeit berücksichtigt wurde) oder durch weitere alternative Energieeffizienz-Maßnahmen bzgl. Energieverbrauch für Raumheizung (Gebäudesteuerung, Effizienz-Steigerung von Heiz-Systemen etc.), wobei berücksichtigt werden muss, dass das Einspar-Potential durch thermische Sanierung mittels Niedrigenergie- und Passivhaus-Komponenten bereits genutzt worden ist.

Ribbon-SI...Ribbon Silicon / Ribbon Silizium.

RILEM...Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages / International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures.

RSL...reference service life: Referenz-Lebensdauer ist jene Lebensdauer, die unter einer bestimmten Referenz-Umgebungsbedingung erwartet werden kann; dient zugleich als Ausgangswert für die Lebensdauerabschätzung mittels der Faktormethode. [54]

Single-SI...Single crystalline silicon cells / Mono-Silizium.

SLP...service life prediction: Lebensdauerabschätzung bzw. -vorhersage. [54]

SLS...serviceability limit states: Gebrauchstauglichkeit.

Solarurbanes Flächenpotential...entspricht lt. der Ecofys-Studie [22] im Wesentlichen dem technischen Flächenpotential, wobei weitere städtebauliche Flächenvorbehalte (Grünanlagen, geschützte Gebäude und Strukturen oder Ausschlussflächen aufgrund technischer oder wirtschaftlicher Aspekte) berücksichtigt werden.

Technisches Flächenpotential...Das technische Flächenpotential wurde in der Ecofys-Studie [22] für 20 Stadtraumtypen (Wohngebäude, Industrie-, Gewerbebauten) unter Berücksichtigung von Eigenverschattung, Ausrichtung und Nachbarbebauung ermittelt.

$t_{\text{exponiert}}$ ...Zeitraum, beginnend vom Initiierungszeitpunkt der Materialschädigung bis mit dem Versagenszeitpunkt des Bauprodukts

Thermische Sanierungsmaßnahmen...Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeschutzes, einschließlich der Installation von Lüftungen mit Wärmerückgewinnung (WRG).

Trennbarkeit...Einflussfaktor auf die Kreislauffähigkeit (Sortenreinheit) der anfallenden Baurestmassen.

$t_{\text{start}}$ ...Initiierung der Materialschädigung. [55]

UCTE...Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity.

ULS...ultimate limit state: Grenztragfähigkeit.

Variante 1...Räumliche Systemgrenze ist der österreichische Wohn-Gebäudebestand

Variante 2...Räumliche Systemgrenze ist der gesamte Gebäudebestand sowie eine Annahme eines Transports der solar erzeugten Wärmemengen zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden

Variante 3...Räumliche Systemgrenze ist der gesamte Gebäudebestand sowie eine Annahme, dass kein Transport der solar erzeugten Wärmemengen zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden existiert.

WDVS...Wärmedämmverbundsystem.

WOC...Worst Case.

WRG...Wärmerückgewinnung.