

# Innovative Gebäudekonzepte im ökologischen und ökonomischen Vergleich über den Lebenszyklus

Kurzfassung

zur Studie Nr. 51/2014 Berichte aus Energie und Umweltforschung im Programm Haus der Zukunft  
im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



Zusammengestellt von Petra Johanna Sölkner

Detail- und ergänzende Informationen sind im Originalbericht nachzulesen.

Verfügbar unter: <http://www.hausderzukunft.at/results.html/id6529>

## Inhalt

1	Projektgrundlagen.....	2
2	Methodische Vorgehensweise .....	4
3	Ergebnisse der Ökobilanzierung LCA.....	5
3.1	LCA Haustechnik.....	5
3.2	LCA Ziegelgebäude .....	8
3.3	LCA Betongebäude.....	9
3.4	LCA Holzgebäude .....	11
3.4.1	Quervergleich der LCA-Ergebnisse über die Gebäudevarianten .....	13
4	Ergebnisse der Lebenszyklus-Kostenbilanzierung (LCC).....	15
5	Diskussion und Schlussfolgerungen .....	18
6	Anhang .....	20

## Abstract

Ausgehend von der Frage, welche Bauweise in welchem Energiestandard mit welcher haustechnischen Ausstattung die umweltschonendste sei, entstand ein umfassender Variantenvergleich. Dazu wurden Bauweisen mit Ziegel, Beton, Holzspanbeton und Holz in zwei Energiestandards für Neubauten definiert und mit verschiedenen haustechnischen Systemen kombiniert. Die 45 Gebäudevarianten wurden anhand eines standardisierten Gebäudeplanes ausgelegt und deren Umweltwirkungen in einer Ökobilanz abgeschätzt sowie die Kosten über den gesamten Lebenszyklus berechnet.

Die Bilanzergebnisse zeigen, dass keine der Varianten für alle Problemstellungen die absolute Lösung ist. Insgesamt scheinen die verwendeten Baustoffe kaum einen Einfluss auf das Gesamtergebnis der Ökobilanz zu haben, wesentlich wirkt sich hingegen der Energiestandard aus. Die Umweltindikatoren sind in ihren Ergebniswerten unterschiedlich stark durch die Haustechnikvarianten belastet, einen klaren Sieger gibt es aber auch hier nicht.

## 1 Projektgrundlagen

Ausgehend von der Streitfrage, welcher Baustoff und welches Gebäudekonzept das bessere, umweltverträglichere und kostengünstigere sei, entstand in der ACR, Austrian Cooperative Research, die Idee zum vorliegenden Forschungsprojekt. Im Projekt wurden verschiedene Gebäudetypen mit der dazugehörigen Haus- und Energietechnik in unterschiedlicher baulicher Ausführung miteinander verglichen. Als Gebäudekonzepte wurden das Niedrigenergiehaus, das Sonnenhaus, das Passivhaus und das Plusenergiehaus betrachtet. Als Bauweisen wurden verschiedene Ziegel-, Beton-, Holzfaserbeton- und Holzgebäude angenommen. Basierend auf den Energiestandards wurden geeignete Haustechniksysteme entwickelt und mit den unterschiedlichen Bauweisen kombiniert. Daraus entstanden 45 Gebäudevarianten, die hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen (Ökobilanz = LCA, Life Cycle Assessment) über einen Bilanzzeitraum von 100 Jahren sowie hinsichtlich ihrer Kostenaufwendungen über einen Bilanzzeitraum von 50 Jahren (LCC, Life Cycle Costing) berechnet und beurteilt wurden.

Im Forschungsprojekt wurde ein konkretes Objekt auf die unterschiedlichen Gebäudevarianten ausgelegt. Die Außenabmessungen sind bei allen Varianten ident, der Keller ist ebenfalls ident in Stahlbeton angenommen und die Dachausbildung ist gleich. Lediglich die Dämmstärke ist bei Passiv- und Plusenergiehäusern höher als bei den Niedrigenergiehäusern. Bei den unterschiedlichen Gebäudevarianten mit gleicher Bruttogeschosßfläche ergeben sich differierende Nettotonutzflächen in Abhängigkeit von der jeweiligen Wandstärke der Außenwände.

*Tabelle 1: Übersicht über die Baustoffvarianten*

Baustoffvarianten	
Ziegel	mit WDVS (EPS)
	einschalig
Beton	mit WDVS (EPS)
Holzspanbeton	mit WDVS (EPS)
	mit WDVS (Holzfaser)
	einschalig
Massivholz	mit Mineralwollgedämmung
Holzsteher	mit Zellulosedämmung
	mit Mineralwollgedämmung

*Tabelle 2: Übersicht über die Haustechniksysteme und Energiestandards<sup>1</sup>*

Haustechniksysteme		HWB <sub>Ref</sub>
NEH1	Niedrigenergiehaus mit Wärmepumpe	40 kWh/m <sup>2</sup> a
NEH2	Niedrigenergiehaus mit Pelletsheizung	
SH	Sonnenhaus mit Solaranlage und Stückholzofen	
PH1	Passivhaus mit Wärmepumpe	10 kWh/m <sup>2</sup> a
PH2	Passivhaus mit Pelletsheizung	
PEH	Plusenergiehaus	

<sup>1</sup> Details sind im Projektbericht nachzulesen.

Im Summe ergaben sich die in Tabelle 3 gelisteten Variantenkombinationen, die einer Bilanzierung unterzogen wurden.

Tabelle 3: Übersicht über die bilanzierten Gebäudevarianten

Struktur	Kürzel	Bauweise	HT-Var.	
1. Ziegelbauweisen	<b>1.1.</b>	<b>Niedrigenergiehaus (NEH)</b>		
	1.1.1.	Z-N-W-P	Ziegel + WDVS + Pelletsheizung	NEH2
	1.1.2.	Z-N-W-W	Ziegel + WDVS + Wärmepumpe	NEH1
	1.1.3.	Z-N-1-P	Ziegel einschalig + Pelletsheizung	NEH2
	1.1.4.	Z-N-1-W	Ziegel einschalig + Wärmepumpe	NEH1
	<b>1.2.</b>	<b>Sonnenhaus (SH)</b>		
	1.2.1.	Z-S-W-E	Ziegel + WDVS + Einzelofen	SH
	1.2.2.	Z-S-1-E	Ziegel einschalig + Einzelofen	SH
	<b>1.3.</b>	<b>Passivhaus (PH)</b>		
	1.3.1.	Z-P-W-P	Ziegel + WDVS + Pelletsheizung	PH2
	1.3.2.	Z-P-W-W	Ziegel + WDVS + Wärmepumpe	PH1
	1.3.3.	Z-P-1-P	Ziegel einschalig + Pelletsheizung	PH2
	1.3.4.	Z-P-1-W	Ziegel einschalig + Wärmepumpe	PH1
	<b>1.4.</b>	<b>Plusenergiehaus (PEH)</b>		
1.4.1.	Z-E-W-W	Ziegel + WDVS + Wärmepumpe	PEH	
1.4.2.	Z-E-1-W	Ziegel einschalig + Wärmepumpe	PEH	
2. Betonbauweisen	<b>2.1.</b>	<b>Niedrigenergiehaus (NEH)</b>		
	2.1.1.	B-N-W-P	Beton + WDVS + Pelletsheizung	NEH2
	2.1.2.	B-N-W-W	Beton + WDVS + Wärmepumpe	NEH1
	<b>2.2.</b>	<b>Sonnenhaus (SH)</b>		
	2.2.1.	B-S-W-E	Beton + WDVS + Einzelofen	SH
	<b>2.3.</b>	<b>Passivhaus (PH)</b>		
	2.3.1.	B-P-W-P	Beton + WDVS + Pelletsheizung	PH2
	2.3.2.	B-P-W-W	Beton + WDVS + Wärmepumpe	PH1
	<b>2.4.</b>	<b>Plusenergiehaus (PEH)</b>		
	2.4.1.	B-E-W-W	Beton + WDVS + Wärmepumpe	PEH
3. Holzspanbetonbauweisen	<b>3.1.</b>	<b>Niedrigenergiehaus (NEH)</b>		
	3.1.1.	S-S-H-E	Holzspanbeton + WDVS Holzfaser + Pelletsheizung	NEH2
	3.1.2.	S-S-W-E	Holzspanbeton + WDVS Holzfaser + Wärmepumpe	NEH1
	3.1.3.	S-S-0-E	Holzspanbeton + WDVS EPS + Pelletsheizung	NEH2
	3.1.4.	S-S-H-E	Holzspanbeton + WDVS EPS + Wärmepumpe	NEH1
	3.1.5.	S-S-W-E	Holzspanbeton + Pelletsheizung	NEH2
	3.1.6.	S-S-0-E	Holzspanbeton + Wärmepumpe	NEH1
	<b>3.2.</b>	<b>Sonnenhaus (SH)</b>		
	3.2.1.	S-S-H-E	Holzspanbeton + WDVS Holzfaser + Einzelofen	SH
	3.2.2.	S-S-W-E	Holzspanbeton + WDVS EPS + Einzelofen	SH
	3.2.3.	S-S-0-E	Holzspanbeton + Einzelofen	SH
	<b>3.3.</b>	<b>Passivhaus (PH)</b>		
	3.3.1.	S-P-W-P	Holzspanbeton + WDVS 26cm EPS + Pelletsheizung	PH2
	3.3.2.	S-P-W-W	Holzspanbeton + WDVS 26cm EPS + Wärmepumpe	PH1
3.3.3.	S-P-11-P	Holzspanbeton + WDVS 11cm EPS + Pelletsheizung	PH2	
3.3.4.	S-P-11-W	Holzspanbeton + WDVS 11cm EPS + Wärmepumpe	PH1	
<b>3.4.</b>	<b>Plusenergiehaus (PEH)</b>			
3.4.1.	S-E-W-W	Holzspanbeton + WDVS 26cm EPS + Wärmepumpe	PEH	
3.4.2.	S-E-11-W	Holzspanbeton + WDVS 11cm EPS + Wärmepumpe	PEH	
4. Holzbauweisen	<b>4.1.</b>	<b>Niedrigenergiehaus (NEH)</b>		
	4.1.3.	H-N-M-P	Massivholz + Mineralwolle + Pelletsheizung	NEH2
	4.1.4.	H-N-M-W	Massivholz + Mineralwolle + Wärmepumpe	NEH1
	4.1.5.	H-N-Z-P	Holzsteher + Zellulosedämmung + Pelletsheizung	NEH2
	4.1.7.	H-N-M-P	Holzsteher + Mineralwolle + Pelletsheizung	NEH2
	4.1.8.	H-N-M-W	Holzsteher + Mineralwolle + Wärmepumpe	NEH1
	<b>4.2.</b>	<b>Sonnenhaus (SH)</b>		
	4.2.2.	H-S-M-E	Massivholz + Mineralwolle + Einzelofen	SH
	4.2.4.	H-S-M-E	Holzsteher + Mineralwolle + Einzelofen	SH
	<b>4.3.</b>	<b>Passivhaus (PH)</b>		
	4.3.1.	H-P-M-P	Massivholz + Mineralwolle + Pelletsheizung	PH2
	4.3.2.	H-P-M-W	Massivholz + Mineralwolle + Wärmepumpe	PH1
	4.3.3.	H-P-M-P	Holzsteher + Mineralwolle + Pelletsheizung	PH2
	4.3.4.	H-P-M-W	Holzsteher + Mineralwolle + Wärmepumpe	PH1
<b>4.4.</b>	<b>Plusenergiehaus (PEH)</b>			
4.4.1.	H-E-M-0	Massivholz + Mineralwollämmung + Wärmepumpe	PEH	
4.4.2.	H-E-M-0	Holzsteher + Mineralwollämmung + Wärmepumpe	PEH	

## 2 Methodische Vorgehensweise

### Folgende Arbeitsschritte im Projekt

1. Gebäudeentwurf, Objektstandort
2. Bauweisen (Gebäudestandards, Baustoffe)
3. Konstruktive Aufbauten und Energiestandards (Heizwärmebedarf HWB)
4. Planunterlagen und Energieausweise (iterativ)
5. Haustechnischen Ausstattung (Wärmebereitstellung, Lüftung, Elektroinstallationen, Sanitärausstattung)
6. Leistungsverzeichnisse inkl. Kosten für alle Bauwerkstypen, Haustechnik und Elektroinstallationen inklusive Mengenermittlung
7. Bilanzierungszeiträume: LCA = Life Cycle Assessment 100 Jahre, LCC = Life Cycle Costing 50 Jahre
8. Massenbilanz für die Ökobilanzierung (LCA)
9. Ökobilanzen für die Bau- (EcoSoft bzw. ecoinvent) und Haustechnikvarianten (SimaPro)
10. Lebenszykluskostenanalyse (LCC)
11. Gegenüberstellung der Gebäudevarianten und Auswertung

### Bilanzierte Lebenszyklusphasen (Module)

Der Lebenszyklus der Gebäudevarianten wurde entsprechend der ÖNORM EN 15978 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode“ analysiert. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die bewerteten Phasen des Lebenszyklus (hinterlegte Felder).

Tabelle 4: Bewertete Lebenszyklusphasen, nach ÖNORM EN 15978

Angaben zum Lebenszyklus des Gebäudes															
A 1-3 Herstellung			A 4-5 Errichtung		B 1-7 Nutzung							C 1-4 Ende des Lebenszyklus			
A1 Rohstoffbeschaffung	A2 Transport	A3 Produktion	A4 Transport	A5 Errichtung/Einbau	B1 Nutzung	B2 Instandhaltung	B3 Instandsetzung	B4 Austausch	B5 Modernisierung	B6 Energieverbrauch im Betrieb	B7 Wasserverbrauch	C1 Rückbau/Abriss	C2 Transport	C3 Abfallverwertung	C4 Entsorgung

### Bilanzierte Ökoindikatoren

In der Ökobilanz wurden gemäß CML 3.2-Methode die in Tabelle 5 gelisteten LCIA-Indikatoren berechnet. Der Primärenergieeinsatz wurde auch kumuliert als CED tot ausgewiesen.<sup>2</sup>

Tabelle 5: Übersicht über die Baustoffvarianten

Bez.	Indikator	Einheit
AP	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	kg SO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> a
EP	Eutrophierungspotenzial	kg PO <sub>4</sub> eq/m <sup>2</sup> a
ODP	Potenzial zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht	kg CFC-11 <sub>eq</sub> /m <sup>2</sup> a
POCP	Potenzial zur Bildung von troposphärischem Ozon	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/m <sup>2</sup> a
GWP	Treibhauspotenzial	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> a
CED non ren	Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie, rohstofflich und energetisch genutzte Ressourcen	MJ/m <sup>2</sup> a
CED ren	Einsatz erneuerbarer Primärenergie, rohstofflich und energetisch genutzte Ressourcen	MJ/m <sup>2</sup> a

<sup>2</sup> Eine kurze Erklärung der Indikatoren ist im Anhang zu finden.

### 3 Ergebnisse der Ökobilanzierung LCA

Die folgende Darstellung der Ökobilanzergebnisse (LCA) gliedert sich in die Abschnitte Haustechnik, Ziegelbauweisen, Betonbauweisen und Holzbauweisen.<sup>3</sup> Im Anschluss wird ein Quervergleich über alle bilanzierten Gebäudevarianten für zwei Indikatoren exemplarisch angestellt.<sup>4 5</sup>

#### 3.1 LCA Haustechnik

Die Ökobilanz von Heizung, Lüftung und Elektroinstallationen wird in Abbildung 1 dargestellt. Die Variante NEH1 stellt den Referenzwert mit 100 % bei jedem Indikator. Die anderen Haustechniktypen sind dazu in Relation gesetzt. Jeder Indikator hat eine völlig andere Skalierung als die anderen, ein Vergleich zwischen den Indikatoren ist nicht zulässig. Die Biomasse-beheizten Varianten (NEH2 und PH2) und das Sonnenhaus haben sehr hohe Anteile an erneuerbaren Energieträgern (CED ren) im Vergleich zu den anderen Varianten, daher sind die Balken relativ hoch. Diese Skala wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit der anderen Indikatoren bei 300 % begrenzt. Der erneuerbare Anteil am Primärenergieverbrauch ist bei den Wärmepumpen-Varianten relativ gering, er entsteht lediglich aus dem Anteil an erneuerbaren Energieträgern im zugrunde gelegten Strommix. Beim gesamten Primärenergieverbrauch sind die Wärmepumpenvarianten wegen des Verhältnisses eingesetzter Strominput zu umgesetzter nutzbarer Heizwärme in Relation niedriger als die Werte der Varianten mit Holzbrennstoffen. Das Plusenergiehaus (PEH) weist aufgrund des produzierten PV-Stroms in den meisten Kategorien negative Werte auf.

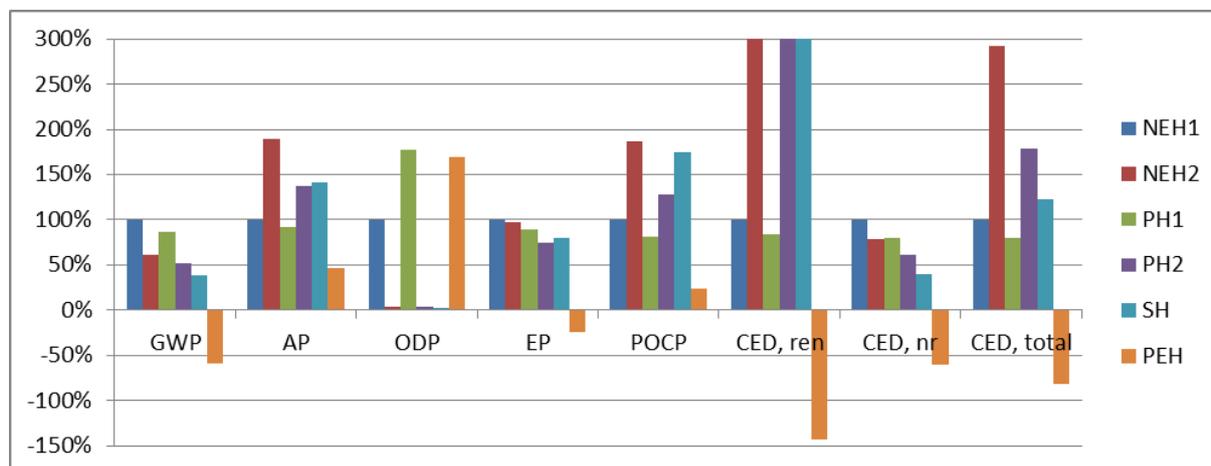


Abbildung 1: Gesamtbelastungen aus Heizung, Lüftung und Elektroinstallation über den gesamten Lebenszyklus

Bei den mit Holzbrennstoffen beheizten Varianten NEH2 und PH2 sowie beim SH fällt das Treibhauspotenzial – korrespondierend zum Einsatz erneuerbarer Energieträger – relativ niedrig aus. Extrem niedrig sind ihre Werte beim Ozonabbaupotenzial, beim POCP und beim AP liegen die Werte etwa doppelt so hoch wie bei den Wärmepumpenvarianten. Bei EP liegen alle Haustechnikvarianten in einem ähnlichen Wertebereich.

#### Lebenszyklus Heizung und Lüftung nach Indikatoren

Die folgenden Absätze beschreiben die Ergebnisse der einzelnen Ökoindikatoren für Heizung und Lüftung über den gesamten Lebenszyklus. Die zugehörigen Abbildungen 2 bis 5 sind im Anschluss daran zu finden.

Anmerkung zum Plusenergiehaus: Die vermiedenen Umweltbelastungen durch den PV-Stromertrag wurden ebenso wie die Belastungen aus der Herstellung und Erneuerung der PV-Anlage dem Gewerk „Elektro“ zuge-

<sup>3</sup> Die Holzspanbauweisen zeigen ein ähnliches Bild, wie die anderen Massivbauweisen und wurden aus Gründen der Kürze nicht in diese Kurzfassung aufgenommen.

<sup>4</sup> An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass für die Bilanzierung der Massivbauvarianten und der Holzbauvarianten unterschiedliche Bilanzierungssysteme zum Einsatz gekommen sind, weil diese Infrastruktur in den bilanzierenden Instituten vorhanden war. Die Ergebnisse sind daher nicht direkt miteinander zu vergleichen. Auf die Unterschiede zwischen den Datenbanken wird in Abschnitt 3.2 des Projektberichtes eingegangen.

<sup>5</sup> Die Ergebnisse der Bilanzierung in absoluten Zahlen – getrennt nach Lebenszyklusphasen – sind für jede Gebäudevariante in den Ergebnisdatenblättern in Anhang 2 der Projektberichtes nachzulesen.

ordnet. Das PEH weist im Gewerk „Heizung und Lüftung“ daher Belastungen für Strombedarf auf, die Deckung durch den PV-Ertrag wird dagegen an anderer Stelle berücksichtigt.

**Primärenergieinhalt erneuerbar (CED ren):** Die Betriebsphase der Biomasse-beheizten Gebäude (B6) bestimmt den CED ren, die anderen Lebensphasen sind in der Grafik praktisch nicht sichtbar. Relativ hohe Werte zeigen hier NEH2, PH2 und SH, die Wärmepumpen-beheizten Gebäude NEH1, PH1 und PEH haben einen geringen Verbrauch an erneuerbaren Energien. Beim SH wird der solare Anteil in der Grafik nicht abgebildet (Abbildung 5 links).

**Primärenergieinhalt nicht erneuerbar (CED non ren):** Auch hier ist die Betriebsphase (B6) entscheidend, außer beim Sonnenhaus. Das Heizen mit Pellets (NEH2, PH2) führt zu einem höheren nicht erneuerbaren Anteil als das Beheizen mittels Stückholzofen (SH). Die Phasen A1-A3 und B4 gemeinsam tragen zwischen 13 % (NEH2) und 64 % (SH) zum Gesamtwert bei. Die Phasen A1-A3 und B4 für Sonnenhaus (SH) zeigen hier etwas höhere Werte als beispielsweise das NEH2. Dies wird durch den geringen Bedarf in der Betriebsphase wieder aufgewogen, sodass das SH insgesamt in dieser Kategorie am besten abschneidet.

**Primärenergieinhalt gesamt (CED total):** Die Ergebnisse für den CED non ren liegen deutlich unter jenem des CED ren, weshalb der CED total stärker vom CED ren bestimmt wird.

**Treibhauspotenzial (GWP):** Die Betriebsphase (B6) ist – ausgenommen beim SH – wieder bestimmend. Je geringer das GWP des jeweiligen Gebäudetyps für Strom und Biomasse ausfällt, desto geringer ist es über den Lebenszyklus. Das geringste Treibhauspotenzial weist das Sonnenhaus (SH) auf, obwohl die Belastungen für die Herstellung (A1-A3 und B4) der Solaranlage und des Solartanks hier höher sind als bei den anderen Varianten. Das SH profitiert besonders vom hohen Anteil an Solarenergie und der Biomasse als Energieträger. Das GWP für die Entsorgung der Haustechnikkomponenten ist verschwindend gering. Das GWP für die materialbezogene Nutzungsphase (B4) ist am höchsten bei den Systemen mit Wärmepumpe. Der Beitrag wird durch die diffusen R134a-Emissionen während der Nutzung<sup>6</sup> und bei der Entsorgung der ausgetauschten Pumpen<sup>7</sup> verursacht. Diese könnten bei sorgfältiger Abdichtung und umsichtiger Entsorgung auch deutlich niedriger ausfallen.

**Versauerungspotenzial (AP):** Das AP ist am höchsten beim NEH2. Verursacht wird dieser Effekt durch die Pelletsheizung. Die Biomasseheizung macht sich auch beim PH2 und beim SH in der Betriebsphase bemerkbar, wirkt sich aber wegen des geringen Heizbedarfs nicht so stark aus. Bei den anderen Gebäudetypen dominiert der Strombedarf für den Betrieb das Versauerungspotenzial. Beim SH ist das AP der Herstellungs- (A1-A3) und Erneuerungsphase (B4) deutlich sichtbar. Zu den hohen Werten trägt v.a. die Solaranlage bei, in der Errichtungsphase auch der Pufferspeicher, der aber über die 100 Jahre Nutzungsdauer nicht ausgetauscht werden muss.

**Ozonabbaupotenzial (ODP):** Das ODP wird v.a. durch die materialbezogene Nutzungsphase (B4) bestimmt. Ausschlaggebend dafür ist die Produktion des Kältemittels der Wärmepumpe bzw. der verwendete generische Datensatz aus ecoinvent. Beim PH1 und PEH beträgt die angenommene Lebensdauer der Wärmepumpe wie jene des Kompaktlüftungsgeräts, in das sie eingebaut ist, nur 20 Jahre, deshalb ist das ODP bei diesen beiden Gebäudetypen höher als beim NEH1. Das ODP der Herstellungsphase (A1-A3) der Gebäudetypen NEH1, PH1 und PEH ist ebenfalls durch das Kältemittel in der Wärmepumpe verursacht. Insgesamt sind die ODP-Werte wie beim Neubau üblich als relativ gering zu bewerten.

**Photosmogpotenzial (POCP):** Die höchsten Beiträge zum POCP liefern die Biomasse-betriebenen Heizsysteme (NEH2, PH2, SH).

**Eutrophierungspotenzial (EP):** Wieder sind die Belastungen durch den energiebezogenen Betrieb (B6) am höchsten. Solaranlage und Pufferspeicher tragen beim SH wesentlich zu den Belastungen in der Herstellungsphase (A1-A3) bei. Das EP der materialbezogenen Nutzungsphase (B4) ist v.a. durch den Austausch der Solaranlage verursacht.

---

6 Annahme: 100 % des Kältemittels gehen über die gesamte Nutzungsdauer der Wärmepumpe verloren, einmal wird nachgefüllt

7 Annahme: 20 % des Kältemittels entweichen bei der Entsorgung

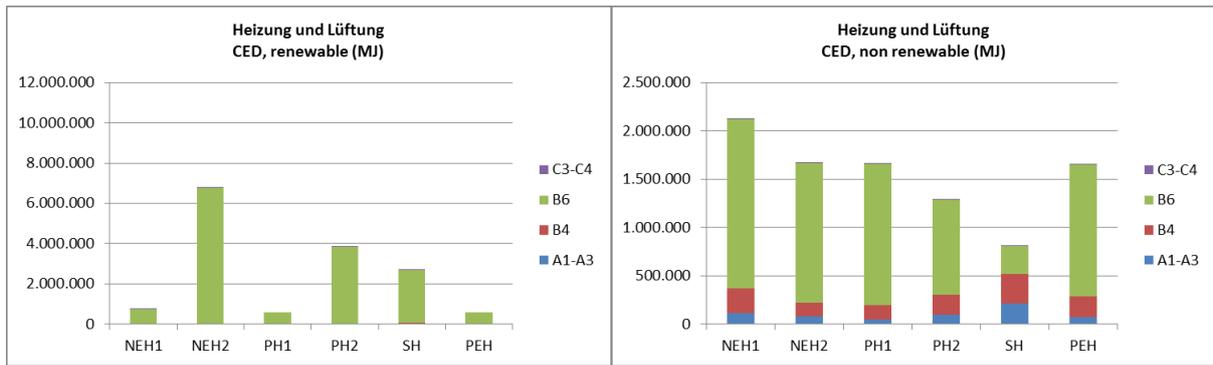


Abbildung 2: Kumulierte LCA Ergebnisse Primärenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar für alle Haustechnikvarianten

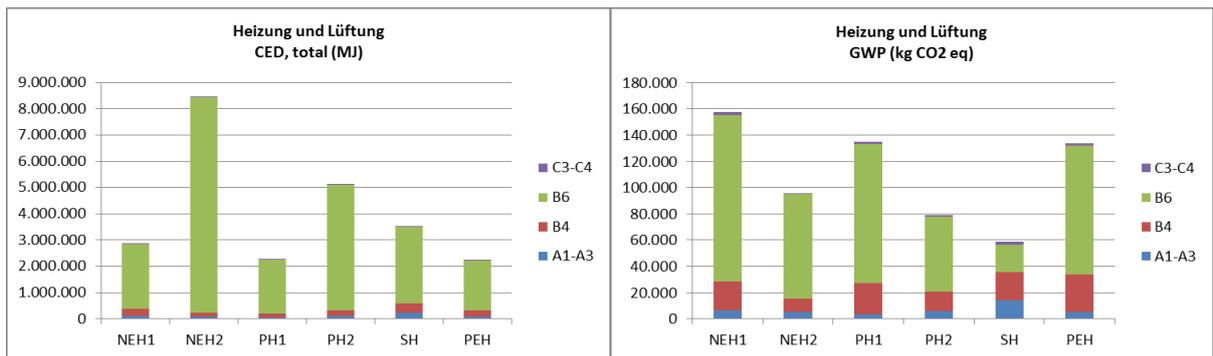


Abbildung 3: Kumulierte LCA Ergebnisse Primärenergiebedarf total und Treibhauspotenzial für alle Haustechnikvarianten

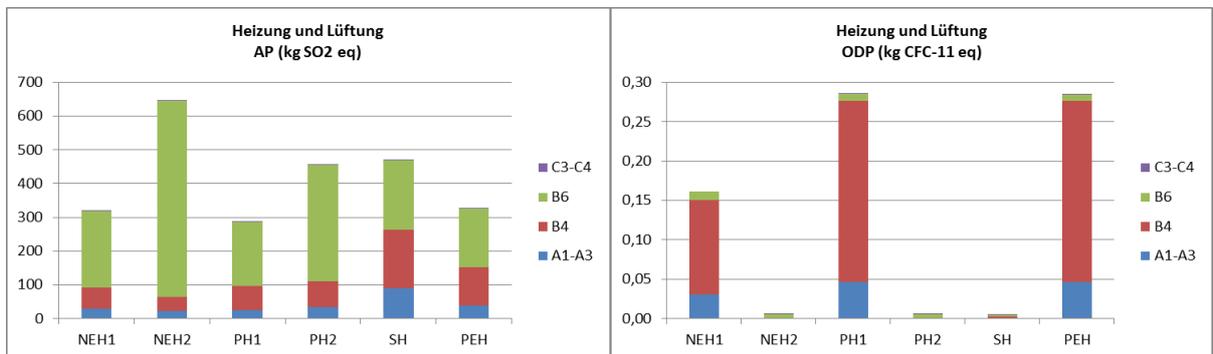


Abbildung 4: Kumulierte LCA Ergebnisse Versäuerungspotenzial und Ozonzerstörungspotenzial für alle Haustechnikvarianten

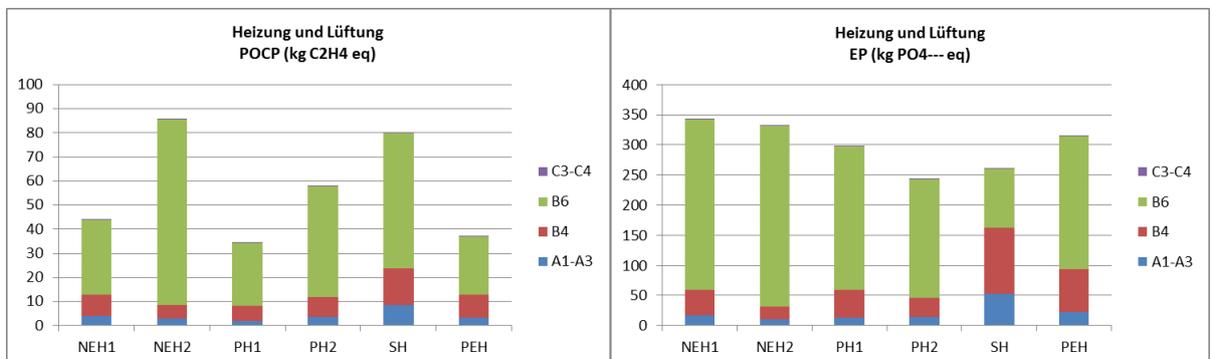


Abbildung 5: Kumulierte LCA Ergebnisse Potenzial für Bildung troposphärischen Ozons und Eutrophierungspotenzial für alle Haustechnikvarianten

### 3.2 LCA Ziegelgebäude

Die Abbildungen 6 bis 9 zeigen die Bilanzergebnisse der Ökoindikatoren aller Ziegelvarianten im Verhältnis zueinander. Das Niedrigenergiehaus 1.1.1 Ziegel mit WDVS und Haustechnik NEH2 (Pelletsheizung) dient als Referenz und ist auf 100 Prozent gesetzt. Die Codierung der Gebäudevarianten entspricht der Tabelle 3.

Abbildung 9 zeigt das Versäuerungspotenzial (AP) und das Eutrophierungspotenzial (EP). Wie bereits in Abbildung 5 ersichtlich, haben die Biomasse-beheizten Gebäudevarianten ein höheres Versäuerungspotenzial als die mittels Wärmepumpe beheizten. Beim Eutrophierungspotenzial sind die Unterschiede geringer. Hier liegen die Passivhäuser etwa unter dem Niedrigenergiestandard.

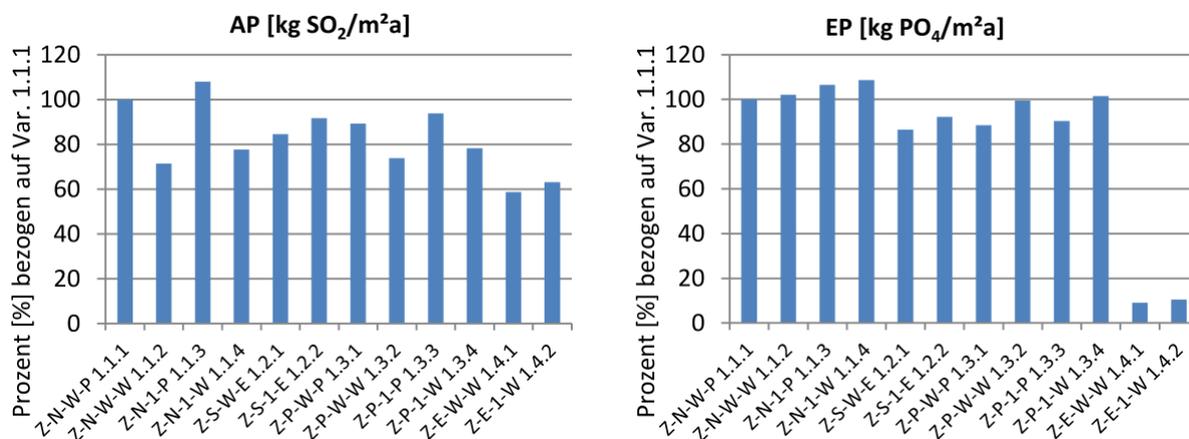


Abbildung 6: Vergleich des Versäuerungspotenzials (AP) und des Eutrophierungspotenzials (EP) der Ziegel-Gebäudevarianten

Beim Treibhauspotenzial (GWP) erzielen die Sonnenhäuser abgesehen von den Plusenergiehäusern bessere Ergebnisse als die anderen Varianten. Beim Potenzial zum Abbau stratosphärischen Ozons (ODP) sind die Biomasse-beheizten Ziegelgebäudevarianten wesentlich niedriger als die Wärmepumpenvarianten (Abbildung 7). Mit diesen beiden Indikatoren ist die Klimafreundlichkeit der Heizung mit Biomasse und Solarenergie beschrieben.

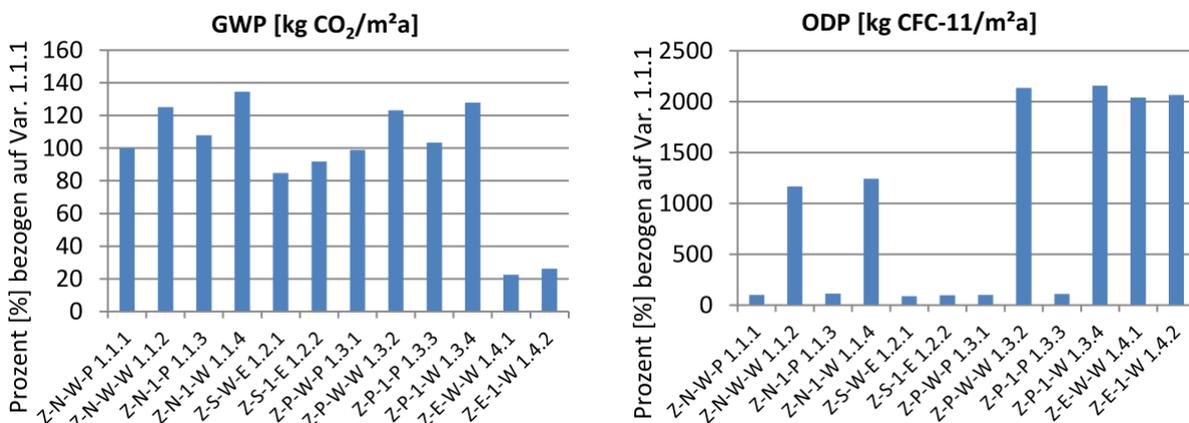


Abbildung 7: Vergleich des Treibhauspotenzials (GWP) und des Ozonabbaupotenzials (ODP) der Ziegel-Gebäudevarianten

Das Potenzial zur Bildung von Photooxidantien ist bei biomassebeheizten Varianten höher (Abbildung 8), innerhalb der Wärmepumpenvarianten sind kaum Unterschiede auszumachen. Beim gesamten Primärenergieverbrauch liegen die Niedrigenergiehäuser mit Pelletsheizung deutlich über jenen mit Wärmepumpe, die Sonnenhäuser liegen nur geringfügig darüber.

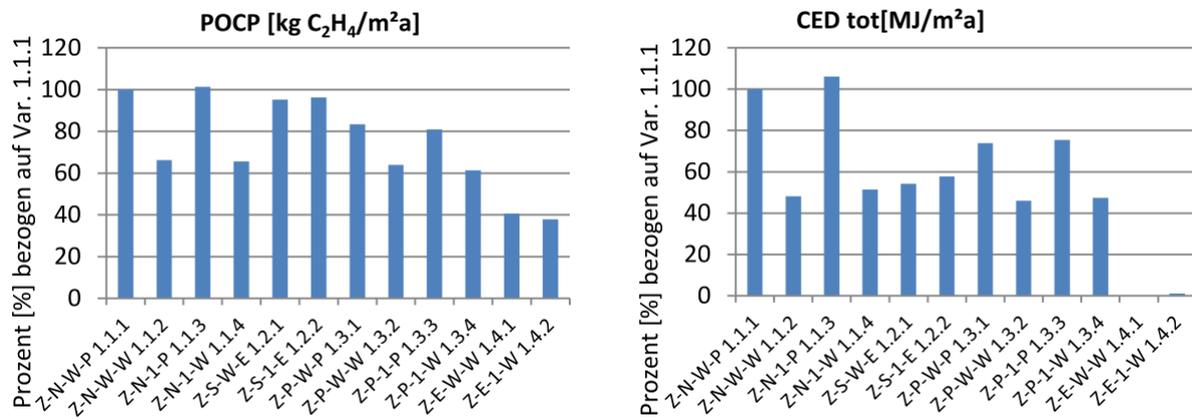


Abbildung 8: Vergleich des Potenzials zur Bildung von Photooxidantien (POCP) und der gesamte Primärenergieverbrauch (CED tot) der Ziegel-Gebäudevarianten

Beim differenzierten Primärenergieverbrauch nicht erneuerbarer Energieträger liegt das Sonnenhaus unter den Werten der Passivhäuser, was einen niedrigeren Betriebsstromverbrauch für das Solarwärmesystem gegenüber dem Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung eines Passivhauses belegt. Der hohe Anteil der Deckung des Betriebsenergiebedarfes aus erneuerbaren Energieträgern bei den mit Biomasse und Solarwärme beheizten Gebäudevarianten ist mit den Ergebnissen in Abbildung 9 (rechts) belegt.

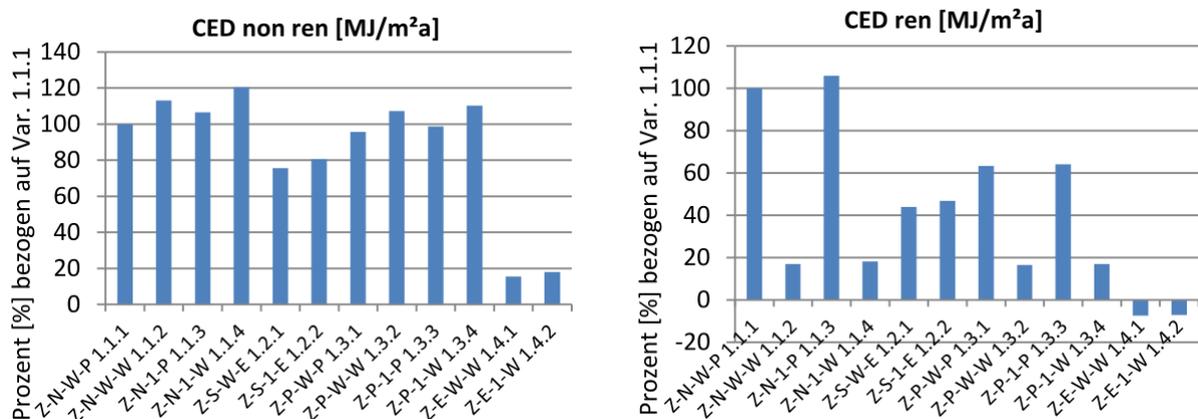


Abbildung 9: Vergleich des Primärenergieverbrauchs nicht erneuerbar (CED non r.) und erneuerbar (CED r.) der Ziegel-Gebäudevarianten

### 3.3 LCA Betongebäude

Die Bilanzergebnisse der Betonbauweisen in Kombination mit den Haustechnikvarianten sind in den Abbildungen 10 bis 12 dargestellt. Neben dem Vergleich der Gebäudevarianten kann hier auch der Einfluss des Energieverbrauchs auf das Bilanzergebnis des jeweiligen Indikators herausgelesen werden. Der rote Balkenanteil der Grafiken beschreibt den Energiebedarf aus der Gebäudenutzung (Modul B6), der blaue Balkenabschnitt fasst die restlichen Bilanzmodule (Herstellung A1-A3, Nutzung B4, Entsorgung C3-C4) zusammen.

Abbildung 10 zeigt links das Versauerungspotenzial (AP), mittig das Eutrophierungspotenzial (EP) und rechts das Treibhauspotenzial (GWP) der sechs Haustechnikvarianten. Die mit Biomasse beheizten Gebäudevarianten weisen beim Indikator AP eine höhere Belastung auf als die mit Wärmepumpe betriebenen Varianten. Obwohl das Passivhaus mit Wärmepumpe einen wesentlich geringeren Heizwärmebedarf als das Niedrigenergiehaus mit Wärmepumpe aufweist, zeigen sich bei diesen beiden Varianten nur geringe Unterschiede im energiebedingten Versauerungspotenzial. Diese Unterschiede sind vor allem auf den erhöhten Strombedarf durch die kontrollierte Wohnraumlüftung bei der Passivhausvariante zurückzuführen. Der Energieverbrauch während der Gebäudenutzung schlägt beim AP v.a. beim NEH2 (Pelletsheizung) zu Buche, beim SH liegt der Anteil der anderen Module etwas über den Werten der anderen Varianten, was im höheren Materialbedarf begründet ist. Einen gewissermaßen Sonderfall stellt das Plusenergiehaus dar. Die Photovoltaikanlage (PV) erhöht zunächst die Belastungen

durch Herstellung, Erneuerung und Entsorgung signifikant. Im Vergleich zur Herstellung und Erneuerung der PV-Anlage mit einer sehr vorsichtig angenommenen Nutzungsdauer von 20 Jahren sind die Beiträge der anderen Elektro- und Sanitärkomponenten gering. Die vermiedenen Umweltbelastungen durch den PV-Stromertrag sind jedoch deutlich (z.B. GWP mal 4) höher als die Belastungen aus Herstellung und Erneuerung der PV-Anlage. Sie kompensieren in manchen Fällen die Umweltlasten aus Herstellung, Erneuerung, Nutzung (Beheizung, Lüftung) und Entsorgung. Bei der Wirkungskategorie EP zeigen sich mit Ausnahme des Plusenergiehauses keine wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Betongebäudevarianten. Die Niedrigenergie-, Passiv- und Sonnenhausvarianten in Betonbauweise liegen hinsichtlich ihres Treibhausgaspotenzials bei der Betrachtung der Phasen für Herstellung, Austausch und Entsorgung in ähnlichen Größenordnungen. Der höhere Wert des Plusenergiehauses (PEH) ist, wie zuvor erwähnt, auf die umfangreichere Haustechnik (Photovoltaik, Wärmepumpe und kontrollierte Wohnraumlüftung) zurückzuführen, wird jedoch durch die vermiedenen Umweltbelastungen durch den PV-Stromertrag mehr als kompensiert (roter Balken im negativen Bereich der Skala). Bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus weisen die biomassebeheizten Gebäudevarianten insgesamt ein geringeres Treibhausgaspotenzial auf.

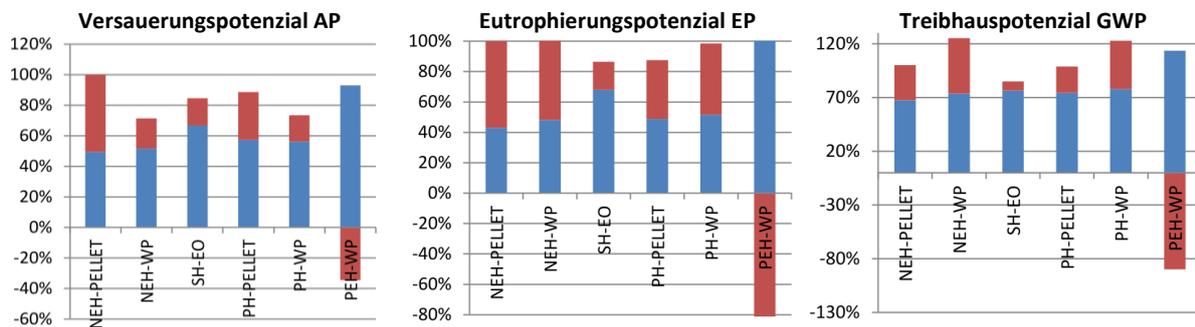


Abbildung 10: Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierungspotenzial (EP) und Treibhauspotenzial (GWP) aller Haustechnikvarianten in Betonbauweise

Abbildung 11 zeigt die Indikatoren Ozonabbaupotenzial (ODP) und Potenzial zum Abbau stratosphärischen Ozons. Beim Indikator Ozonabbaupotenzial fällt auf, dass die Wärmepumpen-beheizten Gebäudevarianten eine signifikant höhere Umweltbelastung aufweisen. Ausschlaggebend ist der verwendete Datensatz der ecoinvent-Datenbank für die Produktion des Kältemittels für den Wärmepumpenkreislauf. Die biomassebeheizten Gebäudevarianten weisen beim Potenzial zur Bildung von Photooxidantien eine signifikant höhere Belastung als die mit Wärmepumpe betriebenen Varianten auf. Ähnlich wie beim Treibhausgaspotenzial reduziert der Stromertrag durch die PV-Anlage die höheren POCP-Emissionen der Plusenergiehausvariante deutlich.

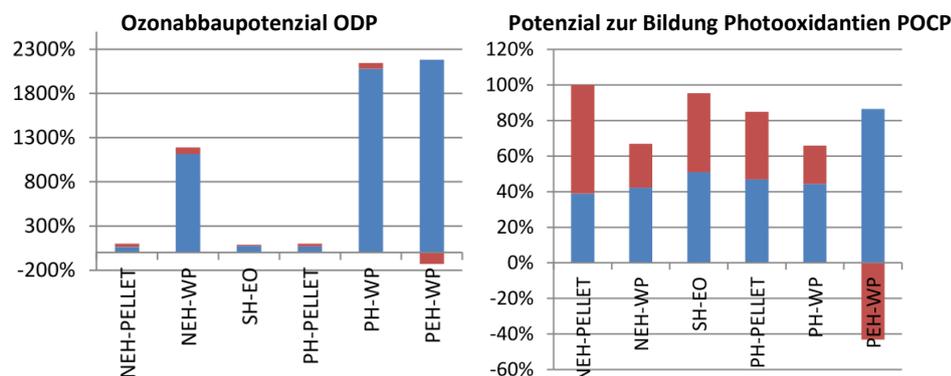


Abbildung 11: Ozonabbaupotenzial (ODP) und Potenzial zur Bildung von Photooxidantien (POCP) aller Haustechnikvarianten in Betonbauweise

Abbildung 12 zeigt die Relationen der Primärenergieverbräuche erneuerbar und nicht erneuerbarer Energieträger sowie des kumulierten Wertes der Betongebäudevarianten zueinander. Der CED tot wird im Wesentlichen vom CED ren dominiert. Die Gebäudevarianten mit Wärmepumpe schneiden bei diesem Indikator deutlich besser ab als die biomassebeheizten Gebäudevarianten.

Durch den Einsatz von Solarthermie in Kombination mit der Biomasseheizung ist das Sonnenhaus beim Indikator Primärenergiebedarf nicht erneuerbar besser als die Passiv- und Niedrigenergiehausvarianten. Wie bei den meisten Indikatoren führt der Abzug der vermiedenen Umweltbelastung durch den PV-Strom beim Plusenergiehaus zu einem niedrigeren Wert.

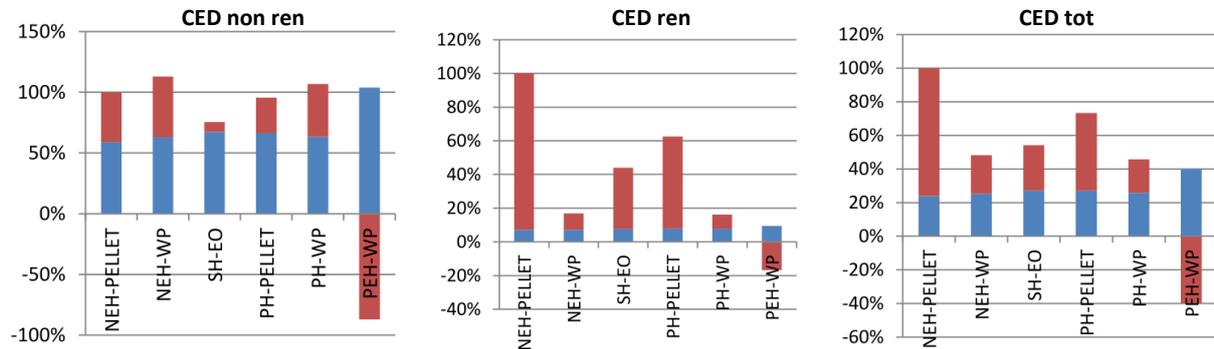


Abbildung 12: Primärenergiebedarf nicht erneuerbar (CED non ren), erneuerbar (CED ren) und gesamt (CED tot) aller Haustechnikvarianten in Betonbauweise

### 3.4 LCA Holzgebäude

#### Bilanzergebnisse der Holzbauweisen<sup>8</sup>

Die Varianten der Holzbauweise unterscheiden sich vor allem durch die Aufbauten der Außenwände (inklusive Holzfassade anstelle eines Wärmedämmverbundsystems) sowie den Innenausbau (Zwischendecke, Innenwände) von den anderen Varianten. Innerhalb der Holzbauvarianten werden Holzmassivbauweise und Holzrahmenbauweise unterschieden.<sup>9</sup> Zwischendecke und tragende Innenwände sind in Leichtbauweise ausgeführt. Der Keller inkl. Boden und Decke sowie der Dachaufbau sind mit den Massivbauvarianten des entsprechenden Energiestandards ident.

Abbildung 13 zeigt die Ökoindikatoren über den Lebenszyklus der Holzbauvarianten. Der Energieverbrauch während der Nutzungsphase (Phase B6) ist in dieser Darstellung nicht enthalten. Umweltbelastungen entstehen vor allem bei der Herstellung der Baumaterialien für die Errichtung und Instandhaltung sowie bei der Entsorgung. Die Variante Holzrahmenbauweise mit Mineralwollendämmung im Niedrigenergiestandard HR-N-M wurde als Referenzwert auf 100 % gesetzt.

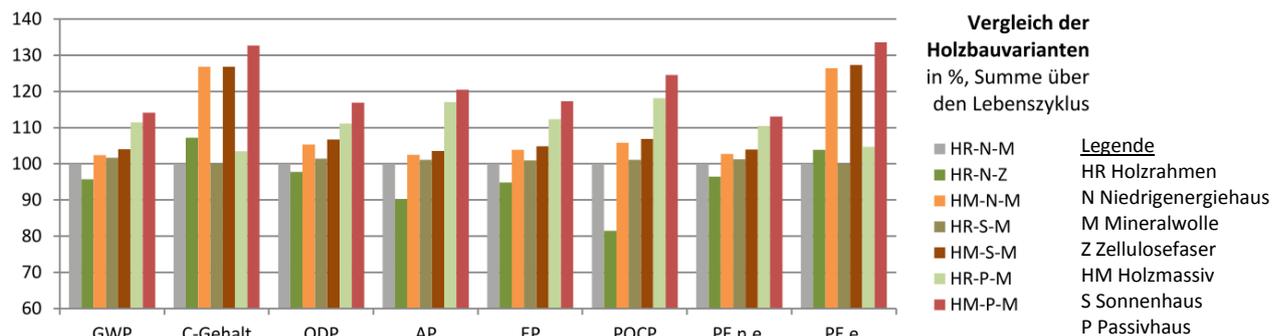


Abbildung 13: Vergleich der bilanzierten Indikatoren über den Lebenszyklus der Holzbauvarianten (exkl. Haustechnik und Betriebsenergieverbrauch)

<sup>8</sup> Die Bilanzierung der Holzbauvarianten erfolgte mit einem anderen Programm (andere Datenbank) (vgl. Abschnitt 2.5.4 und 2.5.5, Projektbericht Hauptteil) als die Massivbau-Varianten. Außerdem sind Änderungen der Haustechnikdaten laut Abschnitt 2.5.3 des Projektberichtes (Seite 20) in die Berechnungen der Holz-Gebäudevarianten nicht übernommen worden. Deshalb zeigt vor allem das Sonnenhaus völlig falsche Ergebnisse, da zum Zeitpunkt der nicht korrigierten Berechnung die Solarerträge nur zu 20 % in die Gesamtergebnisse übernommen werden konnten (Methodik der Energieausweisprogramme). In die Gesamtübersicht der Indikatoren (Abschnitt 3.1.7 im Projektbericht) sowie in die Lebenszykluskostenberechnung (Abschnitt 3.4 im Projektbericht) sind die Korrekturen eingeflossen.

<sup>9</sup> Details zu den Aufbauten: siehe Projektbericht

Die Indikatorwerte für die Massivholzbauweise bei gleichem Energiestandard liegen stets etwas höher als jene der Holzrahmenbauweise (Abbildung 14), d.h. über den Lebenszyklus gesehen treten höhere Umweltbelastungen auf. Der biogene Kohlenstoffgehalt (C-Gehalt) im Baumaterial liegt bei den Holzmassivbauvarianten um rund 25 % höher als bei der Holzrahmenbauweise. Dieser Effekt zeigt sich einerseits in den ebenfalls um ca. 25 % über den Holzrahmenbauweisen liegenden Werten für den Indikator Primärenergie, erneuerbar (PE e.).<sup>10</sup>

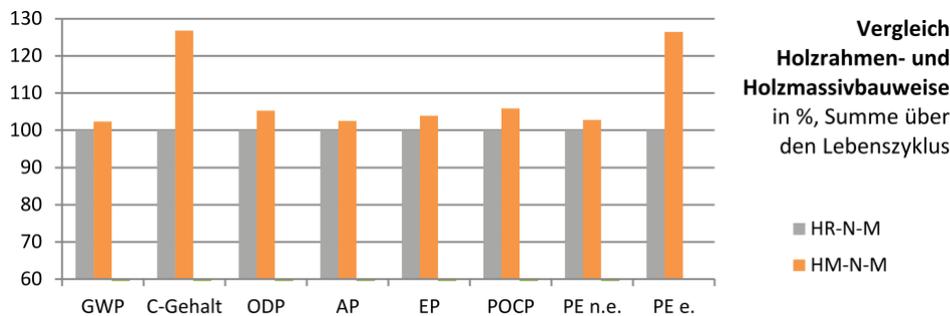


Abbildung 14: Vergleich der analysierten Indikatoren über den Lebenszyklus für ein Gebäude in Holzrahmenbauweise und in Holzmassivbauweise im Niedrigenergiestandard<sup>11</sup>

### Bilanzergebnisse der Gebäudevarianten in Holzrahmenbauweise

Die Ökobilanzergebnisse für die Holzbauvarianten wurden mit den Ergebnissen der Haustechnikbilanzierung und des Energieeinsatzes während der Nutzung (Phase B6) zusammengeführt. Für die Niedrigenergievarianten mit Pelletsheizung ist die Phase B6 die dominante Lebenszyklusphase. Bei den Niedrigenergievarianten mit Wärmepumpe sowie bei den Sonnenhausvarianten liegt die Phase B6 etwa in der gleichen Größenordnung wie die Herstellungs- und Ersatzphase (A1-A3, B4). In den Passivhausvarianten liegen einige Indikatoren in den Herstellungs- und Ersatzphasen sogar unter der Phase B6 während beim Plusenergiehaus mittels PV-Anlage mehr Strom erzeugt und somit substituiert wird, als für die Gebäudekonditionierung und Warmwasserbereitung aufgewendet werden muss. In der Nutzungsphase B6 sind die Werte daher negativ. Mit sinkendem Energiebedarf während der Nutzung durch einen anderen Energiestandard sinken zwar nicht die Umweltbelastungen bei der Errichtung und Instandhaltung eines Gebäudes (aufgrund der dickeren Dämmschichten steigen sie leicht an), dessen Optimierung sollte jedoch im Mittelpunkt stehen.

Abbildung 15 zeigt einen Gesamtvergleich der Gebäudevarianten (inkl. Nutzungsphase) in Holzrahmenbauweise. Für die Holzmassivbauweise ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Ergebnisse beinhalten die jeweiligen Holzbauvarianten, die Haustechnik und den Energieeinsatz während der Nutzung. Je höher die Energieeffizienz eines Gebäudes ist, desto geringer sind generell die Umweltwirkungen über den Lebenszyklus. Varianten mit Biomasseheizung schneiden bei den Indikatoren AP, EP und POCP sowie beim Primärenergiebedarf schlechter ab als jene mit Wärmepumpe. Bei den Indikatoren GWP und ODP schneiden Gebäude mit Biomasseheizung hingegen besser ab. Das Plusenergiegebäude (Gebäudehülle entspricht der Passivhausvariante) schneidet bei allen Indikatoren außer dem ODP am besten ab.<sup>11 12</sup>

10 Zum Zeitpunkt der ersten Bilanzierung gängige Energieausweisprogramme konnten den nutzbaren Solarertrag der Sonnenhäuser nicht vollständig in die Berechnung einbeziehen. Die Hilfsenergiebedarfe für die Biomasseheizungen sind standardmäßig in den Energieausweisprogrammen zu hoch angesetzt und entsprechen nicht dem modernen Stand der Technik. Die korrigierten Haustechnik-Berechnungen sind in die Holzbau-Varianten nicht eingeflossen.

11 Zum Zeitpunkt der Bilanzierung gängige Energieausweisprogramme konnten den nutzbaren Solarertrag der Sonnenhäuser nicht vollständig in die Berechnung einbeziehen. Die Hilfsenergiebedarfe für die Biomasseheizungen sind standardmäßig in den Energieausweisprogrammen zu hoch angesetzt und entsprechen nicht dem modernen Stand der Technik. Die korrigierten Haustechnik-Berechnungen sind in die Holzbau-Varianten nicht eingeflossen.

12 Detaillierte Auswertungen dazu sind in Kapitel 3.1.1 des Projektberichtes Hauptteil zur Haustechnik zu finden.

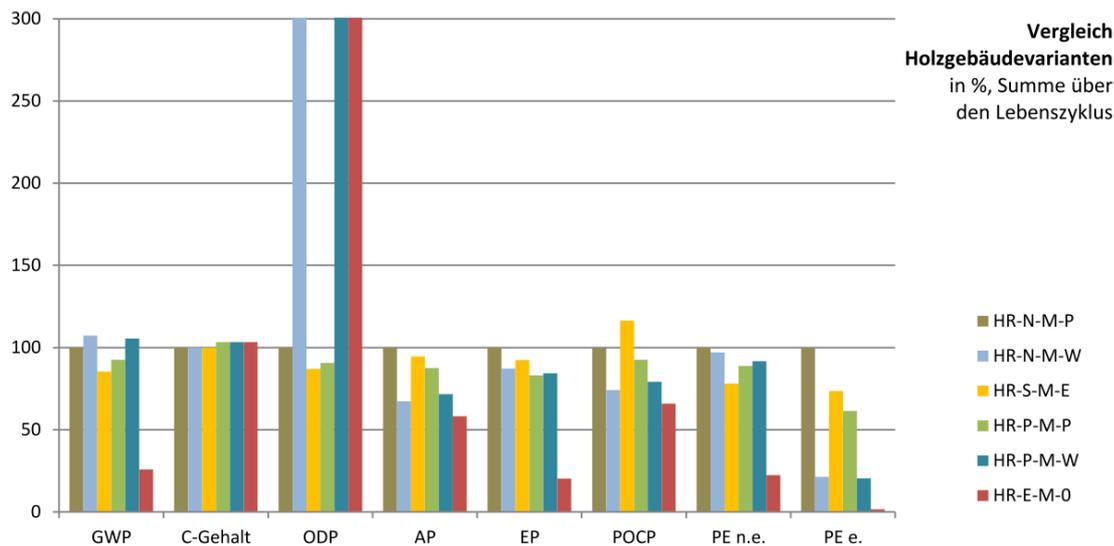


Abbildung 15: Vergleich der analysierten Indikatoren über den Lebenszyklus der Gebäude in Holzrahmenbauweise (Gebäudehülle, Haustechnik und Energieeinsatz während der Nutzung)

Die Ergebnisse zeigen, wie relevant die Wahl der Haustechnik und des Energiestands für die Umweltauswirkungen eines Gebäudes sind. Darüber hinaus wird auch hier klar, dass keine Variante bei allen Indikatoren am besten abschneidet.

#### Quervergleich der LCA-Ergebnisse über die Gebäudevarianten

Die Abbildungen 16 zeigen die Gegenüberstellung der Ergebnisse zweier Indikatoren für alle Gebäudevarianten aus der Ökobilanz: Versäuerungspotenzial und Treibhauspotenzial. Die Holzgebäudevarianten sind als **braune** Balken dargestellt, da diese mit einem anderen Bilanzierungssystem gerechnet wurden als die Massivbauweisen (**blaue** Balken).<sup>13</sup> Die Ergebnisse dürfen trotz der Darstellung in einem gemeinsamen Diagramm nicht miteinander verglichen werden.

Die Farbcodierung am Balkengrund und die Variantenkürzel entsprechen der Variantenaufstellung in Tabelle 3. Beide Gegenüberstellungen zeigen ein sehr homogenes Bild innerhalb der Variantengruppen der Gebäude, die sich in erster Linie auf den Energiestandard und in zweiter Linie auf die Bauweise beziehen. Dies gilt sowohl für die Massivbauvarianten als auch für die Holzbauvarianten. Keine Gebäudevariante und kein Energiestandard zeigt bei allen Indikatoren ein sehr gutes oder sehr schlechtes Ergebnis.<sup>14</sup>

Ein etwas höheres Versäuerungspotenzial haben die Gebäude mit Biomasseheizungen gegenüber jenen mit Wärmepumpen (Abbildung links). Das Treibhauspotenzial von Niedrigenergiehäusern und Passivhäusern liegt etwa im gleichen Bereich (Abbildung rechts). Die Sonnenhäuser liegen beim Treibhauspotenzial unter den normalen Niedrigenergiehäusern, was auf die aus der Sonne gewonnene Heizwärme zurückzuführen ist. Sie schlagen bei diesem Indikator auch die Passivhäuser, die im Wertebereich der Niedrigenergiehäuser liegen. Entsprechend dem Hauptbericht muss betont werden, dass die Wärmegewinne der relativ großen Solaranlage eines Sonnenhauses nicht korrekt abgebildet werden können. Bei einer korrekten Darstellung der solaren Deckung von 60 % der Wärmebedarfe für Heizung und Warmwasser im Jahresdurchschnitt, wie im Projekt ausgelegt, dürfte sich der Bedarf an anderen Energieträgern zur Restwärmedeckung (Holz) maximal mit 40 % zu Buche schlagen. Mit eingerechnetem Hilfsenergiebedarf sollte ein korrektes Ergebnis bei etwas mehr als der Hälfte gegenüber dem NEH2 liegen. Das wirkt sich selbstverständlich auch auf die Ergebnisse der Indikatoren Versäuerungspotenzial (AP) aus.

Gewissermaßen einen Sonderfall stellt das Plusenergiehaus dar. Der Umstand, dass v.a. die Photovoltaik-Anlage die Belastungen aus der Herstellung, Erneuerung und Entsorgung des PEH signifikant erhöht, geht in der Gesamtdarstellung verloren. Ganz im Gegenteil, schneidet doch das Plusenergiegebäude bei praktisch allen Indika-

<sup>13</sup> Im Kapitel 3.1.5 LCA Holzgebäude ist lt. Projektbericht eine Korrektur der Haustechnikdaten nicht eingeflossen, in den Massivbauvarianten sind die Korrekturen durchgehend berücksichtigt (siehe Kapitel 2.5.3 im Projektbericht).

<sup>14</sup> Gegenüberstellungen der anderen Indikatoren und ergänzende Beschreibungen sind im Hauptteil des Projektberichtes zu finden.

toren deutlich am besten ab. Dies ist aber ausschließlich der vermiedenen Umweltbelastung durch den PV-Stromertrag geschuldet, die bei vielen Indikatoren fast gleich hoch ist, wie die gesamten Belastungen aus der Herstellung und Erneuerung, Beheizung und Entsorgung des Plusenergiegebäudes.

Durch diese Netto-Betrachtung steigt das Plusenergiehaus als deutlicher Sieger aller Klassen aus dem Gebäudevergleich aus. Bis zu welchem Ausmaß man vermiedene Umweltbelastung tatsächlich anrechnen darf, ist letztlich eine Konventionsfrage. Im Mittelpunkt steht hier die Fragen, wie man die aus dem Netz bezogene Energie bewertet, wie die notwendige Ausgleichsenergie und letztlich die grauen Rucksäcke der notwendigen Standby-Kraftwerke etc. mit einbezogen werden. Diese Fragen bedürfen mit Sicherheit noch einer eingehenden wissenschaftlichen Diskussion.

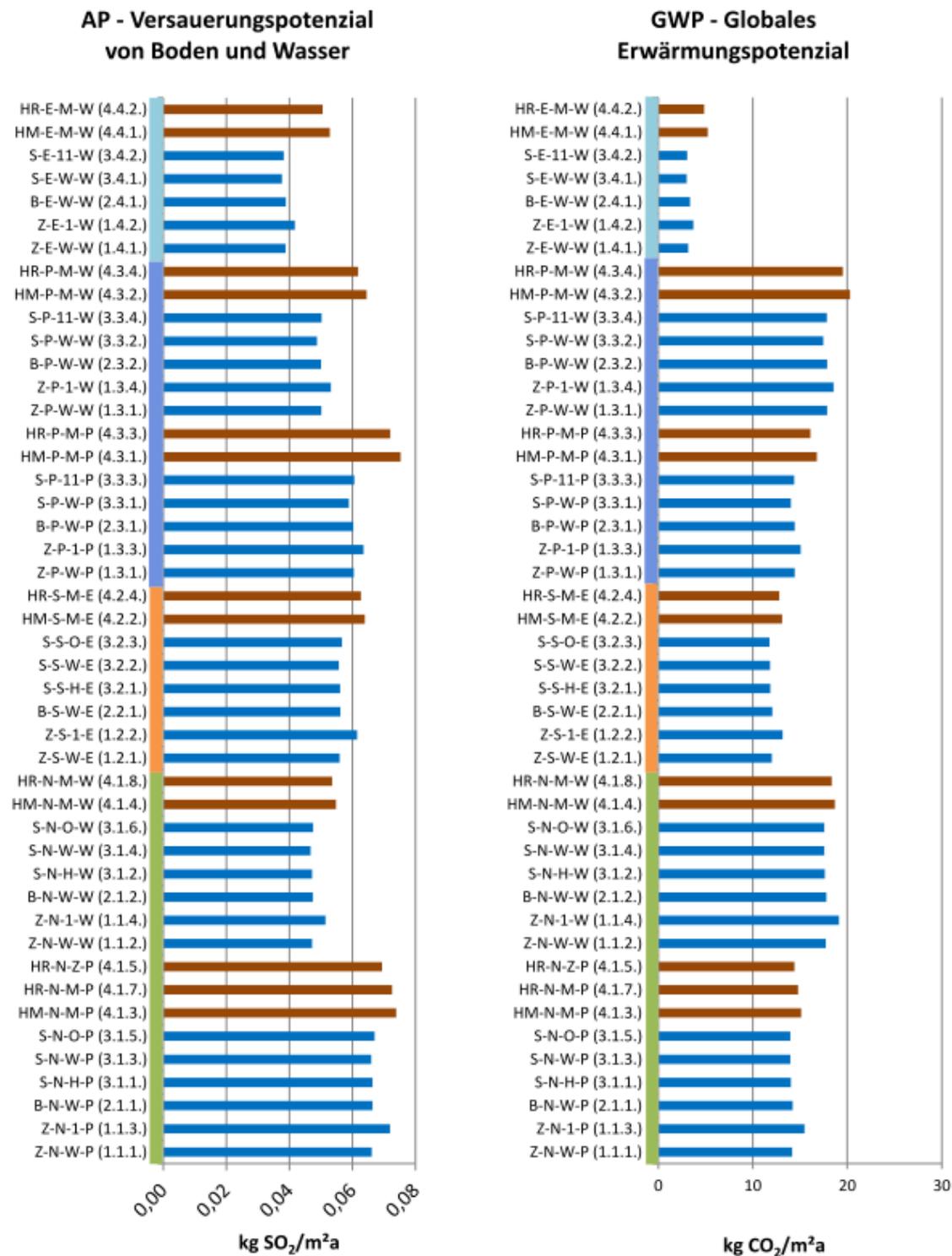


Abbildung 16: Aufstellung Versauerungspotenzial und Treibhauspotenzial aller Gebäudevarianten

#### 4 Ergebnisse der Lebenszyklus-Kostenbilanzierung (LCC)

Der Bilanzierung der Lebenszykluskosten sind 50 Jahre Durchrechnungszeitraum für die Barwerte zugrunde gelegt. Erfasst wurden sowohl die Gebäude an sich, als auch deren haustechnische Ausstattung in den sechs beschriebenen Varianten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 und 18 zusammengestellt. Die Farbgebung der Balken orientiert sich an der Variantenzusammenstellung in Tabelle 3. Der Balkengrund bezeichnet die Bauvarianten, die Balkenfarben bezeichnen die Energiestandards und die Schraffur weist auf Pellets-beheizte Gebäudevarianten hin.

Die Barwerte einer Lebenszykluskostenbilanz erfassen alle Kosten, die im Zuge der Errichtung und Nutzung des Gebäudes (inkl. Heiz- und Betriebskosten) auftreten, nach der Barwertmethode abgezinst auf den gegenwärtigen Berechnungszeitpunkt. Sie stellen den Gegenwartswert künftiger Ausgaben dar. Im Projekt wurden dafür 5,5 % Abzinsung angesetzt. Die 50 Jahre Durchrechnungszeitraum haben rein bilanztechnische Gründe, sie bedeuten nicht, dass die Gebäude nach 50 Jahren keinen Wert mehr haben.

Abbildung 17 zeigt links den Gesamtbarwert der jeweiligen Variante bezogen auf die Bruttogeschosßfläche (BGF) und rechts bezogen auf die Nettogeschosßfläche (NGF). Bei der Betrachtung dieser beiden Auswertungsgrafiken wird ersichtlich, dass sich das Ergebnis bezogen auf die Nettonutzfläche leicht verändert. Wenn bei dem Bezug auf die Bruttofläche das Sonnenhaus etwa den gleichen Barwert wie die Passivhausvarianten hat, so sind die Barwerte der Sonnenhäuser bezogen auf die Nettofläche niedriger als jene der Passivhausvarianten. Innerhalb eines Energiestandards (SH = NEH) beträgt die Barwertspanne pro m<sup>2</sup> BGF maximal 195 Euro und 357 Euro/m<sup>2</sup> NGF, wogegen der Barwert aller Gebäudevarianten grundsätzlich von 2.422 bis 3.044 Euro/m<sup>2</sup> NGF, also um 622 Euro/ m<sup>2</sup> NGF, variiert.

Die Darstellung der Barwerte in Abbildung 18 aufgeteilt in Herstellungskosten (A1-A3) und Kosten aus dem Gebäudebetrieb (Nutzung B6) macht einmal mehr die Bedeutung der Haustechnik bzw. des Energiestandards klar. Bei den reinen Herstellungskosten liegen die Niedrigenergiehäuser in ihrer Baustoffkategorie am günstigsten, Passivhäuser, Sonnenhäuser und Plusenergiehäuser sind höherpreisig. Bei der Nutzungsphase in Abbildung 18 (rechts) wird ersichtlich, dass die Sonnenhäuser sehr kosteneffizient im Betrieb sind, da sie mindestens 50 % ihres Wärmebedarfes aus der Sonneneinstrahlung generieren (hier 60 % solare Deckung). Die Wärmepumpenvarianten liegen aufgrund ihrer geringeren Primärenergieverbrauchs unter den Pellets-beheizten Varianten, bei den NEH nur geringfügig, bei den PH jedoch deutlich.

Die negativen Betriebskosten der Plusenergiehäuser ergeben sich aus den Verkäufen des PV-Stromüberschusses; selbstverständlich fallen auch hier Kosten für den Gebäudebetrieb an. Da die Höhe der Einspeisevergütung für Solarstrom langfristig schwer vorherzusagen ist und stark von politischen Entscheidungen abhängig ist, muss die Aussagekraft dieser Ergebnisse hinterfragt werden, zumal für die nächsten 50 Jahre eine stabile Preissituation zugrunde gelegt wurde und die Berechnung auf heutigen Energiepreisen basiert.

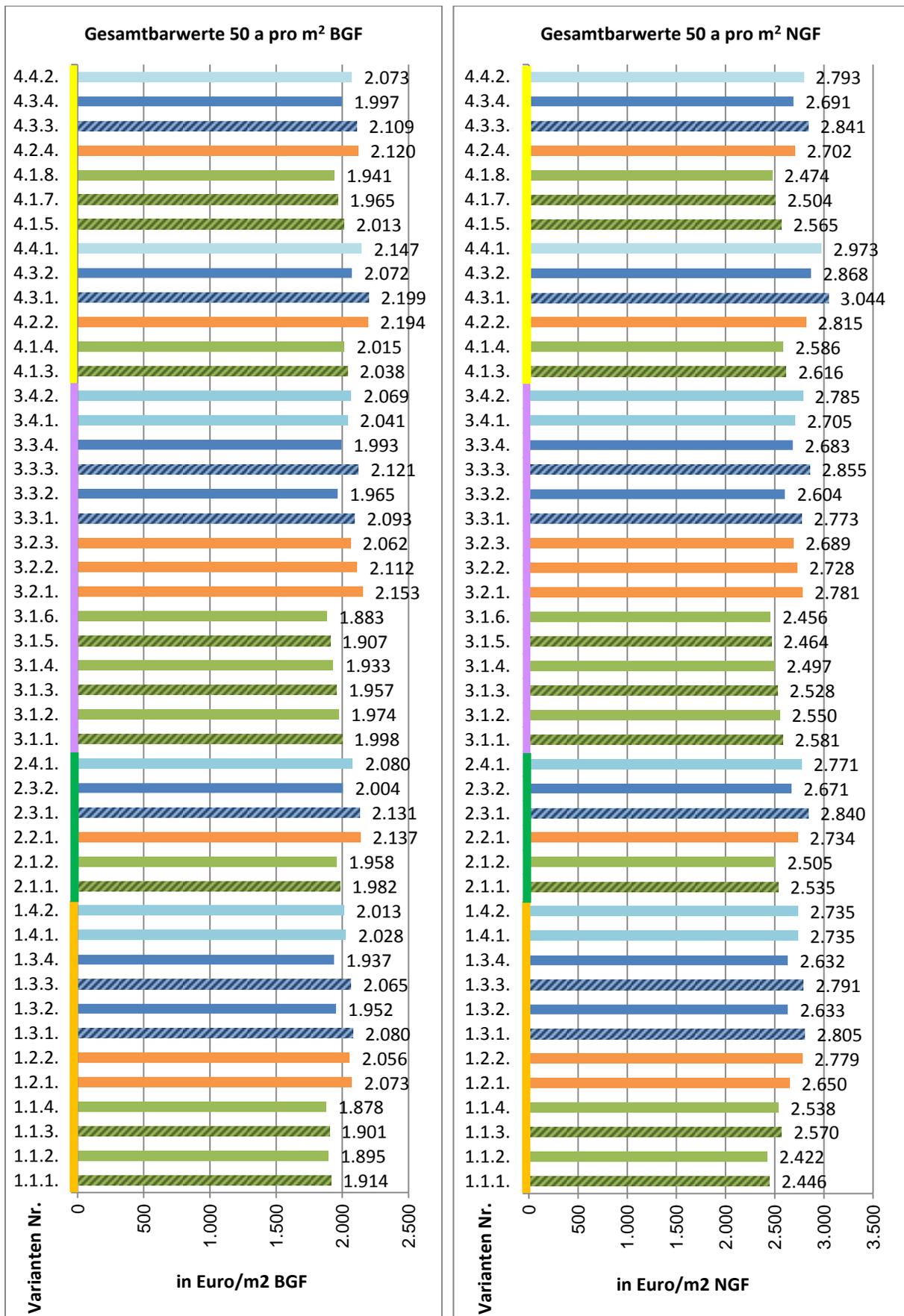


Abbildung 17: Gesamtbarwerte bezogen auf m<sup>2</sup> Bruttogeschöffläche und Nettogeschöffläche

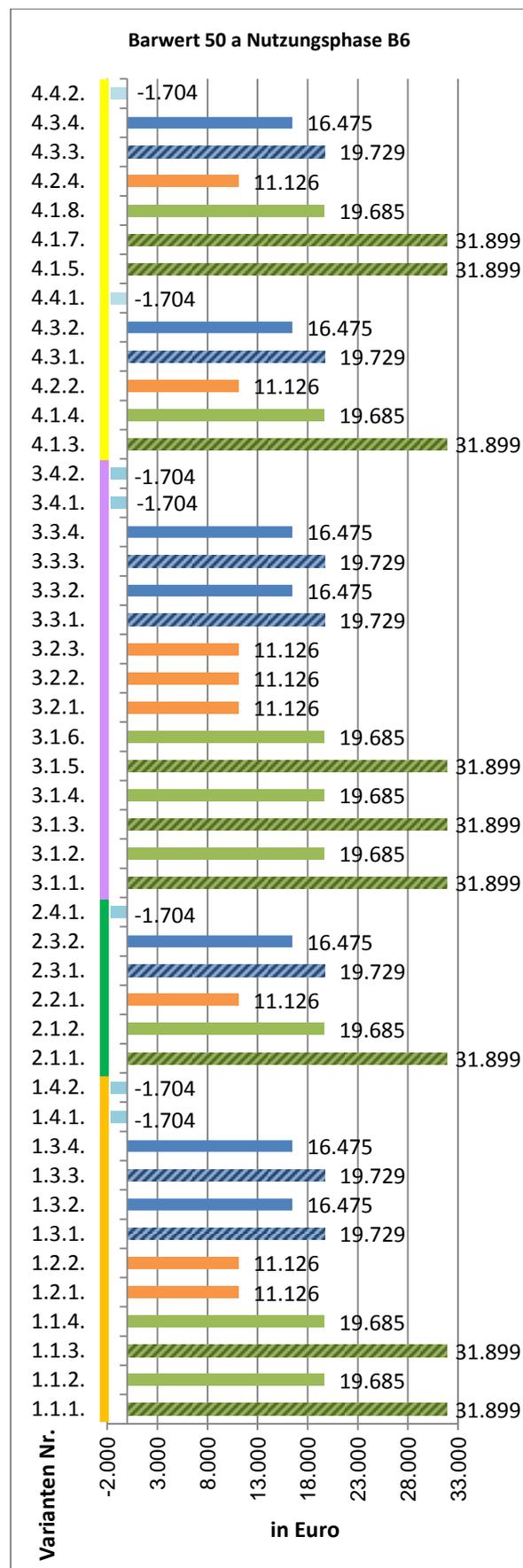
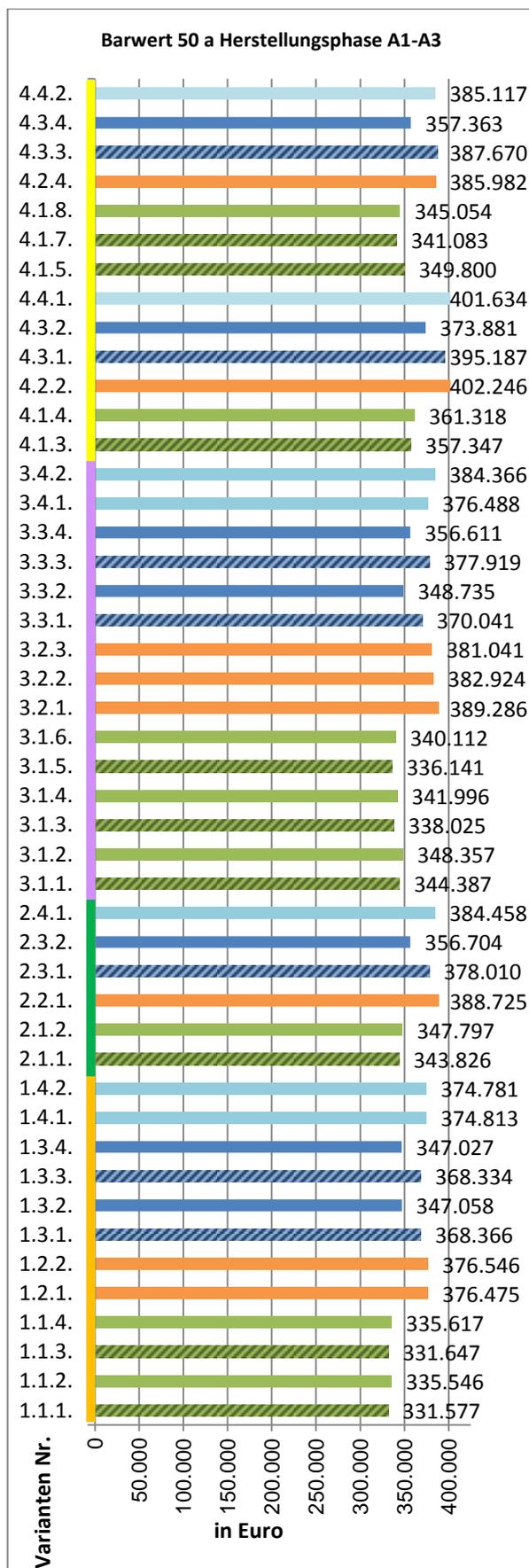


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Barwerte für Herstellung A1-A3 und Nutzung B6 in Euro, Bilanzierungszeitraum 50 a

## 5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Der Gebäudevergleich auf Basis der Lebenszyklusanalyse eines beispielhaften Einfamilienhauses mit einer für Österreich typischen Größe über die Nutzungsdauer von 100 Jahren zeigt, dass die Wahl der Baustoffe kaum einen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Als entscheidend stellt sich das Haustechnikkonzept heraus, sowie die Wahl der eingesetzten Komponenten und Energieträger bzw. der grundsätzliche Energiestandard eines Gebäudes. Es wird außerdem deutlich, dass die historisch geprägte, ausschließliche Betrachtung des Heizwärmebedarfes für die Beurteilung moderner Gebäudekonzepte zu Fehleinschätzungen führt. Die Einzelergebnisse der verschiedenen Umweltindikatoren belegen, dass kein bestimmter Baustoff, kein Energiestandard und somit keine Gebäudevariante bei allen Indikatoren die anderen überragt. Es ist immer eine Frage der Zielsetzung, welches Konzept das geeignetste für den jeweiligen Fall ist.

Es gibt viele Aspekte, die im Zusammenhang mit einem Gebäude zu beachten sind. Seriös ist dementsprechend nur die Beurteilung der Gesamtsituation: Standort, klimatische Besonderheiten, Sonneneinstrahlung bzw. Verschattungen, Sonnenstunden im Winter, Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger, Preisstabilität von Energieträgern, Möglichkeiten zur Eigenversorgung, Möglichkeit zur Nutzung von Ressourcen, besondere Nutzungen im Gebäude, spezielle Bedürfnisse der Nutzer usw.

Die Ergebnisse im Projekt (siehe Langfassung) zeigen die methodischen Grenzen heutiger Energieausweisprogramme, Berechnungstools und Bilanzierungssysteme. Die Bilanzergebnisse hängen stark von den Grunddaten der Datenbanken ab, jedem Bewertungssystem liegt eine andere Absicht zugrunde und wird durch diese beeinflusst. Methodische Lücken müssen dringend geschlossen werden, damit die Energiestandards und Ökobilanzen von Gebäuden korrekt dargestellt werden können.

Bei einem zukunftsfähigen Gebäudestandard muss an erster Stelle die Bedarfsminimierung stehen sowie die Versorgung mit erneuerbaren Energieträgern. Die Lebens- und Nutzungsdauer von Gebäuden und ihren Bauteilen zu erhöhen, ist ein weiteres wichtiges Ziel. Dafür ist auch die Gebäudeplanung ganzheitlich und flexibel auszulegen, damit sie den sich wandelnden Bedürfnissen ihrer Nutzer anpassbar sind. So wird der Materialeinsatz durch Umbauten und Erneuerungen über die Gebäudelebensdauer begrenzt. Aber auch dem Nutzerverhalten muss künftig mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Durch unangepasstes Nutzerverhalten können die tatsächlichen Energieverbräuche die berechneten Energiebedarfe deutlich übersteigen. Die Notwendigkeit, solche Mehrverbräuche durch geeignete Maßnahmen – und dazu gehören neben technischen Voraussetzungen in erster Linie Information, Aufklärung und Schulung der Nutzer – zu beschränken, muss dringend von Öffentlichkeit und Politik wahrgenommen werden.

Die reine Betrachtung der Anfangsinvestition eines Gebäudes (Errichtungskosten) schafft kein korrektes Bild über die wahren Kosten eines Gebäudes. Die Gesamtkosten über den Bilanzzeitraum werden sehr stark von den laufenden Kosten der Gebäudenutzung beeinflusst. Umbauten und Sanierungszyklen sind eine Frage der Produktqualität, des Standes der Technik, aber auch des Geschmacks. Solche Kosten sind steuerbar, die Betriebskosten hingegen sind – einmal durch den Energiestandard bei der Errichtung festgelegt – nur geringfügig beeinflussbar. Lediglich technischer Fortschritt und Erneuerungen können hier greifen. Technische Systeme müssen kostengünstiger werden, damit diese auch die Kosten die Umweltverträglichkeit widerspiegeln. Ziel ist die mögliche Adaptierung von technisch überholten Systemen durch Austausch weniger Bauteile, was ressourcenschonend und kostensparend wäre.

Die reine Kostengutschrift der Stromerträge aus der Photovoltaikanlage eines Plusenergiegebäudes lässt leicht darüber hinweg täuschen, dass auch hier Kosten für die Gebäudenutzung anfallen. Keineswegs politisch gesichert sind angesetzte Einspeisevergütungen, was eine Vorkalkulation der Kosten schwierig macht. Dasselbe gilt für die Zinssätze zur Abzinsung, die immer nur eine auf Erfahrungswerten basierte Annahme sein können. Dennoch ist die Abschätzung der Gesamtkosten eines Gebäudes über seinen gesamten Lebenszyklus eine wichtige Entscheidungshilfe. Sie sollte als solche für jedes Gebäude – nicht nur für große Bürobauten – zum Einsatz kommen. Dafür müssen allerdings einfache Werkzeuge verfügbar sein, damit solche Bilanzen rasch und zu angemessenen Kosten erstellt werden können.

## **Ausblick und Empfehlungen**

Da der Energieverbrauch durch die Gebäudenutzung einen wesentlichen Anteil der Umweltwirkung von Gebäuden verursacht, muss auf selbigen das Hauptaugenmerk bei der Planung und Auslegung von Gebäuden gerichtet werden. Umfassende Gesamtkonzepte sind heute auch für kleine Objekte wie Einfamilienhäuser wichtig.

Als Empfehlung für politische Entscheidungsträger, aber auch für private Bauwillige, ergeben sich aus dem Projekt folgende Punkte:

- Es ist nicht richtig, eine bestimmte Bauweise gegenüber einer anderen bevorzugt zu fördern, denn jede hat ihre Schwächen, ihre Stärken und ihre Berechtigung.
- An erster Stelle im Maßnahmenkatalog muss nach wie vor die Erhöhung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden stehen.
- Der Einsatz erneuerbarer Energieträger muss entscheidend forciert und deren Kostenstabilität sichergestellt werden.
- Systeme zur Abschätzung der Energieverbräuche und zur Gebäudebilanzierung müssen deutlich verbessert und vereinheitlicht werden, ohne ihre Flexibilität einzuschränken, wodurch diese bei unterschiedlichen Anforderungen angewendet werden können.
- Die Weiterentwicklung, Vereinfachung und Fehlervermeidung bei haustechnischen Systemen ist ein wichtiger Schritt zur Vermeidung technisch bedingter Mehrverbräuche durch die Gebäudenutzung. Daneben gilt es, die Lebensdauer der technischen Einrichtungen durch dauerhaftere Konstruktionen zu erhöhen und Systeme zu entwickeln, die bei einer Erneuerung nur den Austausch von wenigen Teilen erfordern.
- Unterstützend sollte die Energieeffizienz der produzierenden Baustoffindustrie erhöht werden.
- Die Recyclingquoten bei großen Gebäuden sind teilweise sehr hoch. Bei kleinen Objekten ist der finanzielle Aufwand der Trennung von Bauteilen oft noch extrem hoch und ein Recycling unwirtschaftlich. Ein geeigneter Finanzierungsmodus für die Trennung und Rezyklierung relativ geringer Baustoffmengen, wie sie beim Abbruch von Einfamilienhäusern anfallen, sollte dringend erarbeitet werden.
- Die Ausdehnung der Energieberatung auch auf die Nutzungsphase von Gebäuden hin, ist ein wichtiges Instrument zur Bewusstmachung und folglich zur Reduktion der Energieverbräuche, das beim Nutzerverhalten ansetzt. Außerdem ist es sinnvoll, Mechanismen zur Begrenzung des Verschwendungspotenzials von Energie im Gebäudekontext zu entwickeln.

### Kurzbeschreibung der Umweltindikatoren

**Primärenergieinhalt** (PEI oder CED, cumulative energy demand): Als Primärenergieinhalt wird der zur Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung erforderliche Gesamtbedarf an energetischen Ressourcen bezeichnet. In der vorliegenden Untersuchung wird der Primärenergieinhalt aller nicht erneuerbaren und erneuerbaren Ressourcen getrennt angeführt. Er enthält sowohl die energetisch als auch die stofflich genutzten Ressourcen. Der Primärenergieinhalt wird aus dem unteren Heizwert aller eingesetzten energiehaltigen Ressourcen berechnet und in Megajoule (MJ) angegeben.

CED non ren	Primärenergie nicht erneuerbar, rohstofflich und energetisch genutzte Ressourcen
CED ren	Primärenergie erneuerbar, rohstofflich und energetisch genutzte Ressourcen
CED tot	Primärenergie nicht erneuerbar plus erneuerbar

**Treibhauspotenzial** (GWP, global warming potential): Beschreibt den Beitrag eines Spurengases zur globalen Erwärmung relativ zu Kohlendioxid. In der vorliegenden Untersuchung wird das Treibhauspotenzial für den Zeithorizont von 100 Jahren bestimmt (GWP100a). Das Treibhauspotenzial wird in Kohlendioxid-Äquivalenten (kg CO<sub>2</sub> eq) angegeben.

**Versauerungspotenzial von Boden und Wasser** (AP, acidification potential): Versauerung von Boden und Wasser wird hauptsächlich durch die Wechselwirkung von Stickoxid- (NO<sub>x</sub>) und Schwefeldioxidgasen (SO<sub>2</sub>) mit anderen Bestandteilen der Luft verursacht. Zu den eindeutig zugeordneten Folgen zählt die Versauerung von Seen und Gewässern, welche zu einer Dezimierung der Fischbestände in Zahl und Vielfalt führt. Für die Berechnung des Versauerungspotenzials werden die durchschnittlichen „Europäischen Säurebildungspotenziale“ verwendet. Das Versauerungspotenzial wird in Schwefeldioxid-Äquivalenten (kg SO<sub>2</sub> eq) angegeben.

**Photochemische Ozonbildung** (POCP, photochemical ozone creation potential): Photosmog in Städten und ihrer näheren Umgebung wird durch die Bildung von Photooxidantien in der unteren Troposphäre verursacht. Darunter wird jene Mischung aus, reaktionsfreudigen Gasen verstanden, die sich bildet, wenn Sonnenstrahlung auf anthropogene Emissionen (insbesondere Stickstoffoxidverbindungen und Kohlenwasserstoffe) trifft. Das Photooxidantien-Bildungspotenzial wird als Ethen-Äquivalent (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq) angegeben.

**Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht** (ODP, ozone depletion potential): Die Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht wird durch die Katalysatorwirkung von Halogenen unter speziellen klimatischen Bedingungen verursacht. Die dadurch vermehrt zur Erdoberfläche durchdringende ultraviolette Strahlung fördert die Bildung von Hautkrebs und grauem Star. Das Ozonabbaupotenzial wird in R11-Äquivalenten angegeben.

**Eutrophierungspotenzial** (EP, eutrophication potential): Eutrophierung ist die Übersättigung eines Ökosystems mit essentiellen nicht organischen Nährstoffen wie Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die normalerweise nur in geringen Konzentrationen vorhanden sind. Dies führt in Gewässern zu vermehrter Produktion von Algen und Wasserpflanzen und in der Folge zu einer Verschiebung der Artenvielfalt des Ökosystems. Das Eutrophierungspotenzial des Nährstoffeintrages wird in Phosphat-Äquivalenten (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq) angegeben.

### Projektbeteiligte

Bautechnisches Institut Linz (BTI)  
Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg (bvfs)  
Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZfi)  
Holzforschung Austria (HFA)  
Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik (OFI)  
Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (IBO)  
Forschungsgesellschaft für Wohnen, Bauen und Planen (FGW)  
TU Graz, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie  
Porr AG