

Forschungsprojekt

## +++ Haus



Entwicklung eines kostengünstigen, hochflexiblen Wohngebäudes in Holzbauweise und Plusenergie-Standard

Abschlussbericht

gefördert unter dem Az: 31718 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Dezember 2015



## Forschungsprojekt

# +++ Haus

Entwicklung eines kostengünstigen, hochflexiblen Wohngebäudes in Holzbauweise und Plusenergie-Standard

## Abschlussbericht

gefördert unter dem Az: 31718 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

## Antragsteller:

**Architektur Contor Müller Schlüter**  
ACMS Architekten GmbH  
Hofaue 55, 42103 Wuppertal



Prof. Christian Schlüter, Architekt BDA  
MSc Björn Fries, Architekt

## Kooperationspartner:

TGA-Planung:

**Gertec GmbH Ingenieurgesellschaft**  
Martin-Kremmer-Str. 12, 45327 Essen



Holzbau:

**Terhalle Holzbau GmbH**  
Solmsstraße 46, 48683 Ahaus-Ottenstein



## Bearbeitungszeitraum:

01.01.2014 bis 31.06.2015



## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	20
1.1	These	20
1.2	Zielsetzung	21
1.3	konzeptioneller Rahmen	22
1.3.1	Kontext	22
1.3.2	Grenzen energetischer Betrachtungsweisen	22
1.3.3	CO <sub>2</sub> -bilanzieller Vergleichsmaßstab und wirtschaftliche Bewertung	24
2	Zusammenfassung	25
2.1	ganzheitliches Bewertungssystem für das +++Haus	25
2.1.1	Entwicklung des nachhaltigen Bauens	25
2.1.2	vom Passivhaus zum EffizienzhausPlus	26
2.1.3	Problematik von Primärenergiebilanzen	27
2.1.4	vom EffizienzhausPlus zum aktivplus Haus	28
2.1.5	Problematik von Endenergiebilanzen	29
2.1.6	allgemeine Problematik von flächenbezogenen Betrachtungen	29
2.1.7	Ziele für eine weitergehende, ganzheitliche Bewertung	30
2.1.8	Problematik der Integration von über die Nutzung hinausgehenden Lebenszyklusphasen	30
2.1.9	Treibhauspotentialgetriebene Bewertung des +++Hauses	34
2.1.10	Problematik der vermeintlichen CO <sub>2</sub> -Neutralität	35
2.1.11	Umweltverträgliches CO <sub>2</sub> -Budget	37
2.1.12	Alternativen zur Neutralität als Bewertungsmaßstab	38
2.1.13	Bewertung der +++Haus Konzepte nach den etablierten Plusenergiestandards	39
2.2	Ergebnisse in Bezug auf die Konstruktion des +++Hauses	41
2.3	Ergebnisse für die Energieversorgung des +++Hauses	42
2.4	Abhängigkeiten zwischen thermischer Hülle und Energieversorgung	42
3	Fazit	44
4	Ziele	48
4.1	Ökologische Qualität - Umwelt	48
4.2	Soziale Qualität - Mensch/Gesundheit	48
4.3	Ökonomische Qualität - finanzielle Mittel	49
4.4	Technische Qualität - Objekt	49
5	Strategien	50

5.1	Effizienz	50
5.2	Konsistenz	51
5.3	Suffizienz	52
6	Projektbeteiligte	54
7	Ergebnisdiskussion	57
7.1	Ökologische Zielsetzung für das +++Haus	57
7.1.1	Ableitung eines Vergleichbarkeitskriteriums und Abgrenzung zu anderen Standards	57
7.1.2	Bewertung der +++Haus Konzepte nach etablierten Plusenergiestandards	64
7.2	Materialien und Bauteile	65
7.2.1	Kriterien zur Baustoffwahl – Bewertungsmatrix	65
7.2.2	Dämmstoffwahl	71
7.2.3	Ständerwerk	74
7.2.4	Gipskartonbekleidung Aussenwand	87
7.2.5	solaraktive Fassadenbekleidung	90
7.2.6	Fensterqualität	98
7.2.7	Optimierung der Aussenwanddämmung	102
7.3	Technologien	118
7.3.1	Bauweisen	118
7.3.2	Energieversorgung	128
7.4	Methoden zur Erreichung einer ausgeglichene CO <sub>2</sub> -Bilanz	134
7.4.1	Kompensationsmaßnahmen vor dem Hintergrund ökologischer werdender Stromerzeugung	134
7.4.2	Optimierung des Gebäudes und der Energieversorgung gegenüber Kompensation mittels Photovoltaik	142
7.4.3	Zusammensetzung der CO <sub>2</sub> Bilanz	144
8	Drittverwendungsfähigkeit	149
8.1	Übertragbarkeit der Ergebnisse	149
8.1.1	Bauteilorientierter Ansatz	149
8.1.2	aktuelle Baufgaben Nachverdichtung & Aufstockung	149
8.1.3	Werkzeuge zur Wirkungsmaximierung ökonomischer Mittel	149
8.1.4	Bewertungsmaßstäbe für ökologische Gebäude	150
8.1.5	Strategie zur Minimierung von Umweltwirkungen	151
8.2	Anschlussfähigkeit	151
8.2.1	Wieviel CO <sub>2</sub> -Emissionen darf ein Gebäude verursachen?	151
8.2.2	Substitution emissionsintensiver Baustoffe	151
9	Dokumentation der Arbeitspakete	152

9.1	AP 1 Energieplushäuser in Fertigbauweise	152
9.1.1	Marktstudie	152
9.1.2	Forschungsprogramm "Effizienzhäuser Plus"	152
9.1.3	Pilotprojekt Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität (BMVBS Haus in Berlin)	155
9.1.4	Gestaltung	156
9.1.5	Konstruktion (Boden, Wand, Dach)	157
9.1.6	Thermische Hülle	158
9.1.7	Energie-/Technikkonzept	158
9.1.8	Photovoltaik	163
9.1.9	Messergebnisse, Stand Mai 2014	165
9.2	AP 2 Gründung und Bodenplatte	177
9.2.1	Allgemeine Überlegungen	177
9.2.2	Einsparpotential der Bodenplatte	177
9.2.3	Aufgeständerte Holzkonstruktion	179
9.2.4	erdberührte Massivholz-Bodenplatte	179
9.2.5	Optimierungspotentiale von Stahlbeton	181
9.3	AP 3 Tragstruktur	182
9.3.1	Ausgangssituation	182
9.3.2	Konstruktionsarten	183
9.4	AP 4 Aussenwand	187
9.4.1	Grundsätzliche Überlegungen	187
9.4.2	Raumabschluss	189
9.4.3	Ständerwerk / Unterkonstruktion	202
9.4.4	Dämmung	206
9.4.5	Aussenwandbekleidung	212
9.4.6	Fensterelemente	216
9.5	Dach	225
9.5.1	Konstruktion Dach	225
9.5.2	Dampfbremse	229
9.5.3	Dachdämmung	232
9.5.4	Dachabdichtung	237
9.6	AP 6 Zwischendecken	244
9.6.1	Deckensysteme	244
9.6.2	Deckenaufbauten zur Verbesserung des Schallschutz	248
9.7	AP 7 Zwischenwände	254
9.8	Energie- und Technikkonzept	259
9.8.1	Energiebedarf	259
9.8.2	Energieerzeugung	261

9.8.3	Solaraktive Fassade	264
9.9	AP 9 Nasszellen	283
9.9.1	Fertignasszellen – Modulbauweise	283
9.9.2	Wassersparende Armaturen	286
9.9.3	Oberflächen mit Nanobeschichtung für „Easy-to-clean-Effekt“	286
9.9.4	Grauwassernutzung	286
9.10	AP 10 Anbauten	287
9.10.1	Tragprofile aus Stahl und Aluminium im Vergleich	287
9.11	AP 11 Ökobilanz	290
9.11.1	Bauteile	290
9.11.2	Gebäude (Konstruktion)	290
9.11.3	Gebäude (Nutzung)	290
9.11.4	Ökobilanzdaten Mineralisches Gebäude	292
9.11.5	Ökobilanzdaten Variante Ökonomisch	296
9.11.6	Ökobilanzdaten Variante Ausbalanciert	301
9.11.7	Ökobilanzdaten Variante Ökologisch	306
10	Anlagen	311



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1.1-1: Entwicklung des energiesparenden Bauens, [Fraunhofer IBP, 2011]	25
Abbildung 2.1.2-1: Effizienzhaus-Plus Varianten im Vergleich [Fraunhofer IBP, 2011, S.19]	27
Abbildung 2.1.8-1: flächenbezogener Primär- und Endenergiebedarf der +++Haus Varianten	31
Abbildung 2.1.8-2: nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für die Konstruktion der +++Haus Varianten	32
Abbildung 2.1.8-3: Treibhauspotential der Konstruktion der +++Haus Varianten	33
Abbildung 2.1.8-4: Treibhauspotential der Nutzungsphase der +++Haus Varianten (Technikkonzepte)	33
Abbildung 2.1.9-1: Treibhauspotential unterschiedlicher Energiequellen, Quelle: [Großklos, 2014]	34
Abbildung 2.1.10-1: Treibhauspotential der Konstruktion und der Nutzungsphase der +++Haus Varianten, ohne Berücksichtigung der Kompensationsmaßnahmen aus Photovoltaik	35
Abbildung 2.1.10-2: Umweltwirkungen der Konstruktion der +++Haus Varianten	36
Abbildung 2.1.10-3: Treibhauspotential von Nadel- und Laubholz bei verschiedenen Entsorgungsszenarien	37
Abbildung 2.1.11-1: globaler Ökologischer Fußabdruck und Biokapazität, Quelle: [NFA, 2015]	38
Abbildung 2.1.13-1: Primär- und Endenergiebilanz der +++Haus Varianten nach EffizienzhausPlus Standard	39
Abbildung 2.1.13-2: Endenergiebilanz der +++Haus Varianten nach AktivPlus Standard	40
Abbildung 2.1.13-3: äqv. Fahrleistung der +++Haus Varianten nach aktivplus Standard *Annahme: Energiebedarf E-Fahrzeug = 20 kWh/100 km, AN=170 m <sup>2</sup>	41
Abbildung 2.1.13-1: CO <sub>2</sub> -Fußabdruck der +++Haus Varianten über einen Nutzungszeitraum von 50 Jahre, absolut ohne PV-Kompensationsmaßnahmen	45
Abbildung 2.1.13-2: CO <sub>2</sub> -Fußabdruck der +++Haus Varianten pro Person und Jahr ohne PV-Kompensationsmaßnahmen *Belegungsdichte 4 Bewohner, Betrachtungszeitraum 50 Jahre	45
Abbildung 2.1.13-3: CO <sub>2</sub> -Fußabdruck der +++Haus Varianten pro Person und Jahr ohne PV-Kompensationsmaßnahmen *durchschnittliche Belegungsdichte 2,8 Bewohner (50 Jahre 2 Personen + 2 Personen 20 Jahre), Betrachtungszeitraum 50 Jahre	46
Abbildung 2.1.13-4: Anteil des CO <sub>2</sub> -Fußabdruck eines Bewohners einer +++Haus Variante (für Wohnen) an einem theoretischen, umweltverträglichen CO <sub>2</sub> -Fußabdruck (personen- und jahresbezogen)	46

Abbildung 2.1.13-1: Effizienzstrategien	51
Abbildung 2.1.13-1: Konsistenzstrategien	51
Abbildung 2.1.13-1: Suffizienzstrategien	53
Abbildung 7.1.1-1: Prinzip eines Passivhauses, Quelle: <a href="http://passiv.de/de/o2_informationen/o2_qualitaetsanforderungen/o2_qualitaetsanforderungen.htm">http://passiv.de/de/o2_informationen/o2_qualitaetsanforderungen/o2_qualitaetsanforderungen.htm</a>	57
Abbildung 7.1.1-2: Passivhaus Standard	58
Abbildung 7.1.1-3: Primärenergiefaktoren in analogie zur DIN V 18599, Tabelle 1 aus [Fraunhofer IBP, 2011]	59
Abbildung 7.1.1-4: EffizienzhausPlus Standard	60
Abbildung 7.1.1-5: Die aktivplus Merkmale	61
Abbildung 7.1.1-6: AktivPlus Standard	62
Abbildung 7.1.1-7: +++Haus	63
Abbildung 7.1.2-1: Bewertung des +++Hauses nach etablierten Plusenergiestandards	64
Abbildung 7.2.1-1: induzierte Mehr-/Minderkosten auf Bauteilebene	66
Abbildung 7.2.1-2: spezifische Optimierungskosten auf Bauteilebene	68
Abbildung 7.2.1-3: absolutes Einsparpotential und spezifische Optimierungskosten auf Bauteilebene	69
Abbildung 7.2.1-4: normierte Bewertung der Umweltwirkungskategorien zur Bewertung von möglichen Lastverschiebungen	71
Abbildung 7.2.2-1: Ökobilanzdaten von Holzrahmenbauklemmfilz in unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten	73
Abbildung 7.2.2-2: CO <sub>2</sub> -Bilanz von Holzrahmenbauwänden mit Klemmfilzdämmung in unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten	74
Abbildung 7.2.3-1: Einfluss des Ständerwerks auf den Wärmedurchgangswiderstand und die Transmissionswärmeverluste der Aussenwand	76
Abbildung 7.2.3-2: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential aus dem Heizwärmebedarf in Abhängigkeit des Technikkonzepts	77
Abbildung 7.2.3-3: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential aus dem Heizwärmebedarf in Abhängigkeit des Technikkonzepts	77
Abbildung 7.2.3-4: CO <sub>2</sub> -Bilanz unterschiedlicher Holzrahmenbauständer	78
Abbildung 7.2.3-5: Unterschiede in der CO <sub>2</sub> -Bilanz unterschiedlicher Holzrahmenbauständer durch größere oder geringere Mengen Dämmstoff	78
Abbildung 7.2.3-6: CO <sub>2</sub> -Bilanz unterschiedlicher Holzrahmenbauständer unter Berücksichtigung des Dämmstoffs	78
Abbildung 7.2.3-7: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential der Aussenwand (Konstruktion) in Abhängigkeit der Dämmstärke	79
Abbildung 7.2.3-8: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential der Aussenwand (Konstruktion + Nutzungsphase) in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Technikkonzepts	80

Abbildung 7.2.3-9: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential der Aussenwand (Konstruktion + Nutzungsphase) in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Technikkonzepts (ohne Varianten mit fossilen Energieträgern)	81
Abbildung 7.2.3-10: Einsparmöglichkeiten der Bauteildicke bei Volldämmung in Abhängigkeit vom ansonsten gewählten Holzrahmenbauständer (absolut und prozentual)	82
Abbildung 7.2.3-11: Kostenvergleich Glaswollefilz-Zwischenständerdämmung ggü. Holzweichfaser Volldämmung in Abhängigkeit vom gewählten U-Wert	83
Abbildung 7.2.3-12: absolute Mehrkosten für das +++Haus bei Holzweichfaser Volldämmung anstelle Glaswollefilz Zwischenständerdämmung	84
Abbildung 7.2.3-13: Absolute CO <sub>2</sub> -Ersparnis für das +++Haus bei Holzweichfaser Volldämmung anstelle Glaswollefilz Zwischenständerdämmung	84
Abbildung 7.2.3-14: alternativer Aussenwandaufbau für das +++Haus bei Holzweichfaser Volldämmung anstelle Glaswollefilz Zwischenständerdämmung	85
Abbildung 7.2.3-15: alternativer Aussenwandaufbau in der Grundrissdarstellung EG	86
Abbildung 7.2.3-16: alternativer Aussenwandaufbau in der Grundrissdarstellung EG	87
Abbildung 7.2.4-1: Einfluss einer Gipskartonplatte auf das Treibhauspotential einer Holzrahmenbauwand	88
Abbildung 7.2.4-2: Einfluss einer Gipskartonplatte auf die nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand einer Holzrahmenbauwand	89
Abbildung 7.2.4-3: Treibhauspotential einer gipskartonbekleideten Holzrahmenbauwand mit Holzfasereinblasdämmung	90
Abbildung 7.2.4-4: nicht erneuerbarer Primärenergieaufwand einer gipskartonbekleideten Holzrahmenbauwand mit Holzfasereinblasdämmung	90
Abbildung 7.2.5-1: Einsparpotentiale unterschiedlicher Wärmeverluste bei Realisierung einer solaraktiven Fassade	92
Abbildung 7.2.5-2: Einsparmöglichkeiten einer solaraktiven Fassade in Abhängigkeit vom Technikkonzept	92
Abbildung 7.2.5-3: Einsparmöglichkeiten einer solaraktiven Fassade in Kombination mit einer Lüftungsanlage mit WRG in Abhängigkeit vom Technikkonzept	93
Abbildung 7.2.5-4: Nutzungsmöglichkeiten der Wärmegewinne in Kombination mit und ohne WRG der Lüftungsanlage	94
Abbildung 7.2.5-5: CO <sub>2</sub> -Bilanz von Fassadenbekleidungsmaterialien im Vergleich	94
Abbildung 7.2.5-6: Ökobilanzdaten von solaraktiven Fassaden in der Gesamtbetrachtung	96
Abbildung 7.2.5-7: Einfluss einer solaraktiven Fassade auf die CO <sub>2</sub> -Bilanz	97
Abbildung 7.2.5-8: Einfluss einer solaraktiven Fassade auf die erforderliche Photovoltaikfläche	97

Abbildung 7.2.6-1: kummulierte Transmissionswärmeverluste über Fensterflächen des +++Hauses über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren in Abhängigkeit vom U-Wert	99
Abbildung 7.2.6-2: Anlagenaufwandszahl, Energieträger und spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der verschiedenen Technikkonzepte	100
Abbildung 7.2.6-3: CO <sub>2</sub> -Emissionen infolge von Transmissionswärmeverlusten über die Fensterflächen in Abhängigkeit vom U-Wert und dem gewählten Technikkonzept	100
Abbildung 7.2.6-4: Einfluss des U-Werts der Fenster auf die CO <sub>2</sub> -Bilanz in Abhängigkeit vom Technikkonzept	100
Abbildung 7.2.6-5: Einfluss des U-Werts der Fenster auf die erforderliche Photovoltaikfläche in Abhängigkeit vom Technikkonzept	101
Abbildung 7.2.6-6: Mehr-/Minderkosten für Fenster in unterschiedlichen Dämmqualitäten	101
Abbildung 7.2.6-7: Kosten Photovoltaik	101
Abbildung 7.2.6-8: Mehr-/Minderkosten für Fenster in unterschiedlichen Dämmqualitäten einschließlich der resultierenden Mehr-/Minderfläche PV	102
Abbildung 7.2.7-1: Transmissionswärmeverluste und erforderliche Dämmstärken in Abhängigkeit vom U-Wert und der WLG des Dämmstoffs	104
Abbildung 7.2.7-2: Transmissionswärmeverluste in Abhängigkeit zur Dämmstoffdicke	105
Abbildung 7.2.7-3: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV) für Glasfaserklemmfilz	107
Abbildung 7.2.7-4: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV) für Holzfaserinblasdämmung	107
Abbildung 7.2.7-5: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV) für Holzweichfaserdämmung	108
Abbildung 7.2.7-6: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Glasfaserklemmfilz	110
Abbildung 7.2.7-7: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Holzfaserinblasdämmung	111
Abbildung 7.2.7-8: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Holzweichfaserdämmung	112
Abbildung 7.2.7-9: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Glasfaserklemmfilz	113
Abbildung 7.2.7-10: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Holzfaserinblasdämmung	114

Abbildung 7.2.7-11: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Holzweichfaserdämmung	115
Abbildung 7.2.7-12: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV ), Ökobilanz dt. Strommix 617 g CO <sub>2</sub> äqv./kWh	116
Abbildung 7.2.7-13: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV ), Ökobilanz dt. Strommix 500 g CO <sub>2</sub> äqv./kWh	117
Abbildung 7.2.7-14: Ökobilanz dt. Strommix 400 g CO <sub>2</sub> äqv./kWh	117
Abbildung 7.3.1-1: Bauteile des Referenzgebäudes in mineralischer Bauweise	119
Abbildung 7.3.1-2: Bauteile des +++Hauses in den unterschiedlichen Holzbauvarianten	120
Abbildung 7.3.1-3: Ökobilanz und Kosten der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten	121
Abbildung 7.3.1-4: Umweltwirkungen der unterschiedlichen +++Haus Konstruktionsvarianten, normiert	121
Abbildung 7.3.1-5: Umweltwirkungen der unterschiedlichen +++Haus Konstruktionsvarianten (nur Holzbau), normiert	122
Abbildung 7.3.1-6: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2015	123
Abbildung 7.3.1-7: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2015	124
Abbildung 7.3.1-8: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2035	126
Abbildung 7.3.1-9: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2035	126
Abbildung 7.3.1-10: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2045	127
Abbildung 7.3.1-11: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2045	127
Abbildung 7.3.1-12: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2064	128
Abbildung 7.3.1-13: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2064	128
Abbildung 7.3.2-1: Kosten und Treibhauspotential der Technikvarianten des +++Hauses	129
Abbildung 7.3.2-2: Treibhauspotential (Nutzungsphase) der Technikvarianten des +++Hauses	130
Abbildung 7.3.2-3: Treibhauspotential (Nutzungsphase) der Technikvarianten des +++Hauses	130
Abbildung 7.3.2-4: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2015	131

Abbildung 7.3.2-5: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2015	131
Abbildung 7.3.2-6: jährliche Energiebilanz der verschiedenen Technikkonzepte	132
Abbildung 7.3.2-7: Energiepreise	133
Abbildung 7.3.2-8: perspektivische, jährliche Nutzungskosten	133
Abbildung 7.3.2-9: perspektivische, jährliche Nutzungskosten, investitionskostenbereinigt	134
Abbildung 7.4.1-1: Treibhauspotential von Netz- und PV-Strom	135
Abbildung 7.4.1-2: Nettostromaufkommen und Netzverluste Deutschland, Quelle: [Ziesing , 2015, S.33]	135
Abbildung 7.4.1-3: Treibhauspotential von Photovoltaikstrom bei Direktnutzung, Einspeisung, Verdrängung sowie Einspeisung und zeitversetztem Bezug	136
Abbildung 7.4.1-4: Kosten CO <sub>2</sub> -Emissionskompensation mittels PV	136
Abbildung 7.4.1-5: Flächenbedarf CO <sub>2</sub> -Emissionskompensation mittels PV	137
Abbildung 7.4.1-6: CO <sub>2</sub> -Bilanz Laub- und Nadelhölzer bei unterschiedlichen Verwertungsszenarien	138
Abbildung 7.4.1-7: für „CO <sub>2</sub> -neutralen“ Energiebezug erforderliche PV-Strommenge in Abhängigkeit vom genutzten Energieträger	139
Abbildung 7.4.1-8: für „CO <sub>2</sub> -neutrale“ Deckung des Heizwärmebedarfs erforderliche PV-Strommenge in Abhängigkeit vom genutzten Energieträger	139
Abbildung 7.4.1-9: CO <sub>2</sub> -Bilanz der +++Haus Varianten ohne Kompensationsmaßnahmen durch PV	140
Abbildung 7.4.1-10: erforderliche Photovoltaikkapazitäten und –flächen der unterschiedlichen Technikkonzepte des +++Hauses	141
Abbildung 7.4.1-11: Flächenbedarf zur Kompensation von CO <sub>2</sub> mittels PV in Abhängigkeit von der Ökobilanz des deutschen Strommixes und Kapazitätsgrenzen der zur Verfügung stehenden Dachflächen	141
Abbildung 7.4.1-12: potentielle Kompensationsleistung der zur Verfügung stehenden Dachfläche in Abhängigkeit des Treibhauspotentials des deutschen Strommixes	142
Abbildung 7.4.2-1: Flächenbedarf für PV der +++Haus Varianten	143
Abbildung 7.4.3-1: Zusammensetzung der CO <sub>2</sub> -Bilanz der +++Haus Varianten	144
Abbildung 7.4.3-2: Zusammensetzung der CO <sub>2</sub> -Bilanz der +++Haus Varianten	145
Abbildung 7.4.3-3: prozentuale Verteilung der CO <sub>2</sub> -Bilanz der +++Haus Varianten (Konstruktion, Nutzung)	146
Abbildung 7.4.3-4: prozentuale Verteilung der CO <sub>2</sub> -Bilanz der +++Haus Varianten (Konstruktion, Heizen/WW/Lüften, Nutzerstrom)	147
Abbildung 7.4.3-5: prozentuale Verteilung der CO <sub>2</sub> -Bilanz der +++Haus Varianten (Konstruktion, Heizen, Lüften, Warmwasser, Nutzerstrom)	148
Abbildung 9.1.2-1: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013],	153
Abbildung 9.1.2-2: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2013],	153

Abbildung 9.1.2-3: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2013],	153
Abbildung 9.1.2-4: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2013],	153
Abbildung 9.1.2-5: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 2, 2013],	154
Abbildung 9.1.2-6: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2013],	154
Abbildung 9.1.3-1: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014]	156
Abbildung 9.1.4-1: Vergleich beheizte Wohnfläche und beheiztes Gebäudevolumen [Bergmann, 2014]	157
Abbildung 9.1.7-1: Prinzipskizze Weber Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2014]	159
Abbildung 9.1.7-2: Prinzipskizze Bien-Zenker, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013]	160
Abbildung 9.1.7-3: Prinzipskizze Finger Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2012]	160
Abbildung 9.1.7-4: Prinzipskizze Huf Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014]	161
Abbildung 9.1.7-5: Prinzipskizze Schwörer Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014])	162
Abbildung 9.1.7-6: Prinzipskizze Lux Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2012])	163
Abbildung 9.1.7-7: Prinzipskizze BMVBS Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014]	163
Abbildung 9.1.8-1: Vergleich Kennwerte der Photovoltaik [Bergmann, 2014]	164
Abbildung 9.1.9-1: Weber Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus_node.html</a>	165
Abbildung 9.1.9-2: Bien-Zenker, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker_node.html</a>	166
Abbildung 9.1.9-3: Finger Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger_node.html</a>	166
Abbildung 9.1.9-4: Huf Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf_node.html</a>	166
Abbildung 9.1.9-5: Schwörer Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schwoerer/schwoerer_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schwoerer/schwoerer_node.html</a>	167
Abbildung 9.1.9-6: Lux Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus_node.html</a>	167
Abbildung 9.1.9-7: BMVBS Haus Berlin, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin_node.html</a>	168

Abbildung 9.1.9-8: Vergleich gemessene Eigenstromnutzung 2013 [Bergmann, 2014]	169
Abbildung 9.1.9-9: Weber Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus_node.html</a>	170
Abbildung 9.1.9-10: Bien-Zenker, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker_node.html</a>	170
Abbildung 9.1.9-11: Finger Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger_node.html</a>	171
Abbildung 9.1.9-12: Huf Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf_node.html</a>	171
Abbildung 9.1.9-13: Schwörer Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schwoerer/schwoerer_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schwoerer/schwoerer_node.html</a>	172
Abbildung 9.1.9-14: Lux Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus_node.html</a>	172
Abbildung 9.1.9-15: BMVBS Haus Berlin, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin_node.html</a>	173
Abbildung 9.1.9-16: Vergleich gemessener Endenergieverbrauch 2013 [Bergmann, 2014]	174
Abbildung 9.1.9-17: Vorherberechnete und gemessene Strahlungsintensitäten und Stromerträge aus den Photovoltaikanlagen [Erhorn et al., März 2013]	176
Abbildung 9.1.9-1: Strategien Gründung und Bodenplatte	177
Abbildung 9.2.2-1: Ökobilanzdaten Bodenplatte	179
Abbildung 9.3.2-1: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Holzkonstruktionsprinzipien	185
Abbildung 9.4.1-1: Strategien Aussenwand	187
Abbildung 9.4.2-1: Ökobilanzdaten Aussenwand - Raumabschluss	191
Abbildung 9.4.2-2: Umweltwirkungen Holzwerkstoffplatten, normiert	192
Abbildung 9.4.2-3: Ökobilanzdaten Aussenwand – Holzmassivbauweise, äußere Bekleidung	195
Abbildung 9.4.2-4: Ökobilanzdaten Aussenwand – Hybridbauweise, äußere Bekleidung	197



Abbildung 9.4.2-5: Umweltwirkungen der inneren Lage Raumbschluss, normiert	198
Abbildung 9.4.2-6. Ökobilanzdaten Aussenwand	200
Abbildung 9.4.2-7: Umweltwirkungen Aussenwand, normiert	200
Abbildung 9.4.2-8. Umweltwirkungen Aussenwand, normiert (Auswahl Holzkonstruktionen)	201
Abbildung 9.4.2-9. Umweltwirkungen Aussenwand, normiert (Holzrahmenbauvarianten)	202
Abbildung 9.4.3-1: Ökobilanzdaten Holzrahmenbauständer	204
Abbildung 9.4.3-2: Umweltwirkungen Holzrahmenbauständer, normiert	204
Abbildung 9.4.4-1: Ökobilanzdaten Dämmstoffe	210
Abbildung 9.4.4-2: Umweltwirkungen Dämmstoffe, normiert	211
Abbildung 9.4.5-1: Ökobilanzdaten Fassadenbekleidungen	214
Abbildung 9.4.5-2: Umweltwirkungen transparente Fassadenbekleidungen, normiert	214
Abbildung 9.4.5-3: Umweltwirkungen Polycarbonat Fassadenbekleidung und Referenzmaterialien	215
Abbildung 9.4.5-4: Umweltwirkungen Fassadenbekleidungen, normiert	215
Abbildung 9.4.6-1: Umweltwirkung von Fenstern (Herstellung), normiert	217
Abbildung 9.4.6-2: Umweltwirkung von Fenstern mit 3-Scheibenverglasung (Herstellung), normiert (ift Rosenheim Studie)	218
Abbildung 9.4.6-3: Umweltwirkung von Fenstern mit 3-Scheibenverglasung (Herstellung, EoL und Gutschrift), normiert	219
Abbildung 9.4.6-4: Ökobilanzdaten von Fenstern	221
Abbildung 9.4.6-5: Umweltwirkung von Fenstern mit 3-Scheibenverglasung, normiert (ift Rosenheim Studie)	221
Abbildung 9.4.6-6: Umweltwirkung von Fenstern mit 2-Scheibenverglasung, normiert (ift Rosenheim Studie)	222
Abbildung 9.4.6-7: Umweltwirkung von Fenstern, normiert (ift Rosenheim Studie), Quelle: [von Houwald et al., 2012]	223
Abbildung 9.4.6-8: GWP und PENRT von Fenstern, ÖkoPot Studie, Quelle: [Albrecht et al., 2008]	224
Abbildung 9.4.6-9: Ökonomische Bewertung von Fensterqualitäten	225
Abbildung 9.5.1-1: Ökobilanzdaten Dachkonstruktion	229
Abbildung 9.5.1-2: Umweltwirkungen von Dachkonstruktionen, normiert	229
Abbildung 9.5.2-1: Ökobilanzdaten Dampfsperrbahnen	232
Abbildung 9.5.3-1: Ökobilanzdaten Dachdämmung	234
Abbildung 9.5.3-2: Umweltwirkungen von Dachdämmstoffen, normiert	235
Abbildung 9.5.3-3: Umweltwirkungen von Dachdämmstoffen, normiert (Auswahl)	236
Abbildung 9.5.4-1: Ökobilanzdaten von Abdichtungsbahnen	243
Abbildung 9.5.4-2. Umweltwirkungen von Abdichtungsbahnen, normiert	243
Abbildung 9.5.4-3. Umweltwirkungen von Abdichtungsbahnen, normiert (Auswahl)	244

Abbildung 9.6.1-1: Ökobilanzdaten Geschosdecke	248
Abbildung 9.6.2-1: Ökobilanzdaten Trittschalldämmung	250
Abbildung 9.6.2-2: Ökobilanzdaten Estrich	252
Abbildung 9.6.2-3: Umweltwirkungen von Estrichen auf Holzweichfaserdämmung, normiert	252
Abbildung 9.6.2-4: Umweltwirkungen von Estrichen auf Mineralfaserdämmung, normiert	253
Abbildung 9.6.2-5: Umweltwirkungen von Estrichen auf EPS-Dämmung, normiert	253
Abbildung 9.6.2-6: Umweltwirkungen von Trockenestrichen, normiert	254
Abbildung 9.6.2-1: Treibhauspotential von Metallständerwänden	255
Abbildung 9.6.2-2: Umweltwirkungen von Trennwandkonstruktionen, normiert	256
Abbildung 9.6.2-3: Ökobilanzdaten von Trennwandkonstruktionen	258
Abbildung 9.6.2-4: Umweltwirkungen von Trennwandkonstruktionen, normiert	258
Abbildung 9.6.2-5: Umweltwirkungen von Trennwandkonstruktionen, normiert	259
Abbildung 9.8.1-1: Energiebedarf +++Haus	260
Abbildung 9.8.1-2: Technikvarianten des +++Hauses	260
Abbildung 9.8.1-3: Nutzerstrombedarf +++Haus	260
Abbildung 9.8.1-4: mögliche Flächenreduktion Photovoltaik bei geringerem Nutzerstrombedarf	261
Abbildung 9.8.2-1: Kosten, Primärenergiebedarf und Treibhauspotential der Technikvarianten des +++Hauses	262
Abbildung 9.8.2-2: Vergleich Technikvarianten +++Haus (Kosten, Photovoltaik, Primärenergiebedarf und Treibhauspotential)	263
Abbildung 9.8.3-1: 3D TAS Simulationsmodell mit Visualisierung der Zonierung	266
Abbildung 9.8.3-2: 3D Gebäudemodell mit Kollektorflächenvisualisierung	267
Abbildung 9.8.3-3: Randbedingungen der thermischen Simulation	267
Abbildung 9.8.3-4: konstruktive und physikalische Parameter	268
Abbildung 9.8.3-5: Lüftungssystem	269
Abbildung 9.8.3-6: Lufttemperatur und solare Gewinne im Fassadenzwischenraum des Kollektors	270
Abbildung 9.8.3-7: Lufttemperatur und solare Gewinne im Fassadenzwischenraum des Kollektors (teilverschattet)	270
Abbildung 9.8.3-8: Temperaturspreizungen im Fassadenzwischenraum des Kollektors und Außentemperatur im Jahresverlauf	271
Abbildung 9.8.3-9: Temperaturspreizungen im Fassadenzwischenraum des Kollektors und Außentemperatur, Punktwolke	271
Abbildung 9.8.3-10: Temperaturspreizungen im Fassadenzwischenraum des Kollektors, Globalstrahlung, Diffusstrahlung und Außentemperatur im 2-Wochenverlauf	272

Abbildung 9.8.3-11: Transmissionswärmeverluste der Polycarbonatstegplattenfassade ggü. einer konventionellen Holzverkleidung im Jahresverlauf	273
Abbildung 9.8.3-12: Transmissionswärmeverluste der Polycarbonatstegplattenfassade ggü. einer konventionellen Holzverkleidung im Wochenverlauf	273
Abbildung 9.8.3-13: Transmissionswärmeverluste der Polycarbonatstegplattenfassade ggü. einer konventionellen Holzverkleidung, absolut pro m <sup>2</sup> Wandfläche und Jahr	274
Abbildung 9.8.3-14: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade bei Verschiebung der U-Werte, Jahresverlauf	274
Abbildung 9.8.3-15: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade bei Verschiebung der U-Werte, Wochenverlauf	275
Abbildung 9.8.3-16: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade bei Verschiebung der U-Werte, absolut pro m <sup>2</sup> Wandfläche und Jahr	275
Abbildung 9.8.3-17: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade bei ruhender Luftschicht ggü. einem konstanten Volumenstrom, absolut pro m <sup>2</sup> Wandfläche und Jahr	276
Abbildung 9.8.3-18: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade in Abhängigkeit Orientierung, absolut pro m <sup>2</sup> Wandfläche und Jahr	277
Abbildung 9.8.3-19: Einfluss von Wärmeleit- und speicherfähigkeit des Dämmstoffes auf die Wirkungsweise von solaraktiven Fassaden	277
Abbildung 9.8.3-20: Einfluss einer vollflächigen, solaraktiven Fassade auf die Transmissionwärmeverluste des +++Hauses	278
Abbildung 9.8.3-21: Einfluss einer vollflächigen, solaraktiven Fassade auf die Transmissionwärmeverluste des +++Hauses	279
Abbildung 9.8.3-22: Potenziale von solaraktiven Fassaden zur Reduktion von Lüftungs- und Transmissionswärmeverlusten im Vergleich	280
Abbildung 9.8.3-23: Potenziale von solaraktiven Fassaden zur Reduktion von Transmissionswärmeverlusten im Vergleich zur Reduktion von Lüftungswärmeverlusten durch eine Lüftungsanlage mit WRG	280
Abbildung 9.8.3-24: Potenziale von solaraktiven Fassaden zur Reduktion von Lüftungs- und Transmissionswärmeverlusten, sowie eine mögliche Reduktion von Lüftungswärmeverlusten durch eine Lüftungsanlage mit WRG im Vergleich	281
Abbildung 9.8.3-25: Effektivität von Kollektorflächen in Abhängigkeit zur Orientierung	281
Abbildung 9.8.3-26: Einsparmöglichkeiten Lüftungswärmeverluste durch solaraktive Fassade mit und ohne Lüftungsanlage mit WRG	282
Abbildung 9.8.3-27: sommerlicher Wärmeschutz, Einfluss einer solaraktiven Fassade auf max. Oberflächentemperaturen innen und aussen, sowie die daraus resultierende Kühllast bei ruhender und durchströmter Luftschicht	283
Abbildung 9.9.1-1: Abdichtungen in Nasszellen - Theorie, Bild 1+2: SOPRO-Planer, Kapitel 3. <a href="http://www.sopro.de/~run/views/service/sopro-planer.html">http://www.sopro.de/~run/views/service/sopro-planer.html</a> ,	285

Abbildung 9.9.1-2: Abdichtungen in Nasszellen - Praxis, Bild 3: Architektur Contor Müller Schlüter	285
Abbildung 9.10.1-1: Ökobilanzdaten von Metallprofilen für Anbauten	289
Abbildung 9.10.1-2: Umweltwirkungen von Metallprofilen für Anbauten, normiert	289
Abbildung 9.10.1-3: Einfluss möglicher Anbauten auf das Treibhauspotential des +++Hauses	289
Abbildung 9.10.1-4: Einfluss möglicher Anbauten auf das Treibhauspotential des +++Hauses (nur Balkone Südseite)	290
Abbildung 9.11.3-1: Treibhauspotential unterschiedlicher Energiequellen	291
Abbildung 9.11.3-2: Treibhauspotential der +++Haus Varianten (Technikkonzept + Konstruktion)	291
Abbildung 9.11.5-1: Ökobilanzdaten Variante Ökonomisch, Wirkungsbilanz	296
Abbildung 9.11.5-2: Ökobilanzdaten Variante Ökonomisch, Energie- und Stofffluss	297
Abbildung 9.11.5-3: Materialanteile Variante Ökonomisch, absolut	298
Abbildung 9.11.5-4: Materialanteile Variante Ökonomisch, prozentual	299
Abbildung 9.11.5-5: Volumenanteile Variante Ökonomisch, prozentual	300
Abbildung 9.11.6-1: Ökobilanzdaten Variante Ausbalanciert, Wirkungsbilanz	301
Abbildung 9.11.6-2: Ökobilanzdaten Variante Ausbalanciert, Energie- und Stofffluss	302
Abbildung 9.11.6-3: Materialanteile Variante Ausbalanciert, absolut	303
Abbildung 9.11.6-4: Materialanteile Variante Ausbalanciert, prozentual	304
Abbildung 9.11.6-5: Volumenanteile Variante Ausbalanciert, prozentual	305
Abbildung 9.11.7-1: Ökobilanzdaten Variante Ökologisch, Wirkungsbilanz	306
Abbildung 9.11.7-2: Ökobilanzdaten Variante Ökologisch, Energie- und Stofffluss	307
Abbildung 9.11.7-3: Materialanteile Variante Ökologisch, absolut	308
Abbildung 9.11.7-4: Materialanteile Variante Ökologisch, prozentual	309
Abbildung 9.11.7-5: Volumenanteile Variante Ökologisch, prozentual	310

# 1 Einführung

## 1.1 These

Die **Ökologische Diskussion** der letzten Jahrzehnte hat insbesondere in Deutschland dazu geführt, dass die hiermit verbundenen Themen in unserer Gesellschaft eine zunehmend hohe Akzeptanz erfahren haben. Dennoch wird das somit gestiegene Energieeinspar- und Marktdurchdringungspotential oft nur unzureichend realisiert.

**Energiesparen** muss eben auch **finanzierbar** sein. Hierzu sind Ansätze erforderlich, die die Mehrkosten von energiesparender Technik durch eine Kompensation in anderen Bereichen ermöglichen. Idealerweise erfolgt das in der Form, dass die **Bedürfnisse** des **Nutzers** dennoch gleichermaßen befriedigt oder sogar z.B. durch eine aus den veränderten Randbedingungen der Umwelt abgeleitete **Ästhetik** bereichert werden. Schließlich werden Gebäude nicht zum Energiesparen gebaut, sondern vorrangig zum Aufenthalt und zum Wohlfühlen. Die konsequente Reduktion von Ressourcen bietet hier vor allem neue Chancen.

Des Weiteren ändern sich unsere Anforderungen an Wohnen fortlaufend. Im Sinne einer nachhaltigen und damit langfristigen Nutzung müssen Wohngebäude daher in hohem Maße **flexibel** sein und so auch die funktionalen Bedürfnisse des Nutzers optimal erfüllen. Bisher weitgehend unbeachtet geblieben, ist vor allem eine Lebenszyklusbetrachtung eines Gebäudes im Hinblick auf seine Energie- und Ressourcenverbräuche. Durch die maßgebliche Reduktion in der Nutzungsphase bei energieeffizienten Gebäuden kann bereits heute ein höherer Primärenergieaufwand durch die Herstellung und den Gebäudeunterhalt entstehen.

## 1.2 Zielsetzung

Im Forschungsantrag wurden für das +++Haus auf Grundlage dieser These Anforderungen definiert, die sich in folgenden vier Punkten zusammenfassen lassen:

- hohe Flexibilität und Anpassbarkeit zur Sicherstellung einer dauerhaften Nutzbarkeit
- Erzielung eines Energieüberschusses unter Berücksichtigung der Energie für Herstellung, Nutzung, Rückbau und Entsorgung sowie für Mobilität
- Umweltverträglichkeit über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes
- hohe Wirtschaftlichkeit zur Erreichung einer Breitenwirkung

Im Rahmen der Bearbeitung wurden diese Anforderungen geschärft und in folgender Kernaussage zusammengefasst:

***Das +++Haus will eine hohe Lebensqualität ermöglichen, die dauerhaft und auch bei ganzheitlicher Betrachtung im Lebenszyklus nicht zu Lasten der Umwelt geht.***

***Herauszufinden, wie dieses Ziel am wirtschaftlichsten erreicht werden kann, ist die Aufgabe des Forschungsprojekts.***

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte zwar am Beispiel der für die Bundesrepublik Deutschland prägenden Einfamilienhaustypologie, vor dem Hintergrund der immanenten ökologischen Nachteile dieses Bautyps wurde im Projektansatz jedoch bereits von Beginn an auch auf eine möglichst hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bauaufgaben wert gelegt. Vor allem das Bauen im Bestand im Rahmen von Nachverdichtungen, Aufstockungen, Anbauten, etc. aber auch der mehrgeschossige Wohnungsbau stellen in diesem Zusammenhang wichtige Themenfelder dar.

## 1.3 konzeptioneller Rahmen

### 1.3.1 Kontext

Für die strukturierte Erarbeitung von Lösungen war es aufgrund der vielschichtigen Anforderungen bzgl. des Energieüberschusses und der Umweltverträglichkeit insbesondere vor dem Hintergrund der Tatsache, dass der komplette Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung, Rückbau und Entsorgung des Gebäudes) berücksichtigt werden sollte, zunächst erforderlich, eine einheitliche Bewertungslogik zu definieren. Für eine detailliertere Beschreibung und Herleitung der +++Haus Bewertungssystematik sei hier auch auf das Kapitel xx ganzheitliches Bewertungssystem für das +++Haus verwiesen. Als Anhaltspunkte für die Definition der Bewertungssystematik dienten hierfür folgende, bestehende Standards des energiesparenden Bauens:

- Passivhaus
- EffizienzhausPlus
- AktivPlus
- Ökobilanzen

Auf dieser Grundlage bestehen für eine ganzheitliche Betrachtungsweise zunächst mehrere Möglichkeiten der Bewertung. In energetischer Hinsicht kann diese anhand primärenergetischer und/oder endenergetischer Kennwerte erfolgen. Alternativ hierzu kann eine Bewertung auf Basis von Umweltwirkungskategorien erfolgen, wobei sich im Sinne einer Komplexitätsminimierung insbesondere die Kategorie Treibhauspotential (GWP) als etablierte Leitgröße anbietet. Die verschiedenen Ansätze bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile und eignen sich infolgedessen teilweise gut, teilweise nur bedingt für eine ganzheitliche Betrachtungsweise. Es sei vorweggenommen, dass sich im Zuge der Projektbearbeitung die Erkenntnis durchgesetzt hat, dass sich eine Bewertung anhand des sich für das Gesamtgebäude absolut ergebenden Treibhauspotentials am geeignetsten erweist. Als Vergleichsmaßstab wurde dabei definiert, dass alle Konzepte so konfiguriert sein müssen, dass sie zu einer rechnerischen CO<sub>2</sub>-Neutralität gelangen. Letztlich wurde nachgewiesen, dass alle Konzeptvarianten aus Konstruktion und Gebäudetechnik, die diese Anforderung erfüllen, auch den Anforderungen eines EffizienzhausPlus oder aktivplus Standards genügen bzw. diesen teilweise auch deutlich übererfüllen. Eine rechnerische CO<sub>2</sub>-Neutralität ist somit ein deutlich schärferes Kriterium, als dies eine ausgeglichene Endenergie- oder Primärenergiebilanz darstellt.

### 1.3.2 Grenzen energetischer Betrachtungsweisen

Um zu erläutern, warum für das +++Haus ein CO<sub>2</sub>-bilanzieller Ansatz präferiert wurde, soll im Folgenden kurz dargelegt werden, wo die Grenzen und Schwierigkeiten von Betrachtungen sowohl mittels Primärenergiebilanzen, als auch mittels Endenergiebilanzen liegen.

#### Grenzen der Primärenergiebilanz

Die primärenergetische Betrachtungsweise ist eng mit einer von Effizienzbestreben getriebenen Minimierung des Energiebedarfs von Gebäuden verbunden. Über die Multiplikation der nach Energieträger getrennten Endenergiebedarfe mit entsprechenden Primärenergiefaktoren soll dabei dem Umstand Rechnung getragen werden, dass je nach Energieträger in vorgeschalteten Prozessen unterschiedlich hohe Verluste entstehen. Auch wenn die Festlegung von Primärenergiefaktoren nicht immer inhaltlich vollständig transparent ist und sich diese den Vorwurf gefallen lassen muss teilweise auch politisch motiviert zu sein, so ist das zu Grunde

liegende Konzept grundsätzlich nachvollziehbar und führt für Systeme, in denen es ausschließlich um die Bedarfsseite geht auch zu plausiblen Ergebnissen. Problematisch wird es an dem Punkt, wo Energieüberschüsse aus erneuerbaren Energiequellen bilanziert werden sollen. Dies gilt insbesondere für Photovoltaikstrom, da Strom im Vergleich zu fossilen Brennstoffen zumindest nach den Definitionen des EffizienzhausPlus Standards einen sehr hohen Primärenergiefaktor hat (2,8 im Vergleich zu 1,1). Dies führt in der Konsequenz dazu, dass es primärbilanziell in vielen Fällen sinnvoller ist für die Wärmeerzeugung eine unökologische Energiequelle mit vergleichsweise geringem Primärenergiefaktor zu wählen und eine gleiche Menge an Photovoltaikstrom mit einem vergleichsweise hohen Primärenergiefaktor zu erzeugen und ins Netz einzuspeisen. Dass dies nicht nachhaltig sein kann, dürfte einleuchtend sein. Dieser Effekt verstärkt sich, wenn man einen Energieüberschuss erzielen möchte, um beispielsweise auch bei Einbezug der für die Konstruktion erforderlichen Herstellungenergie eine ausgeglichene Bilanz zu erreichen. Auch wenn es in der Praxis alleine schon aus mangelnder Flächenverfügbarkeit in der Regel nicht zu solchen extremen Ansätzen kommen dürfte, so bleibt dies doch eine konzeptionelle Schwäche, dass Konzepte die fossile Energieträger zur Wärmeerzeugung nutzen und PV-Strom ins Netz einspeisen besser bewertet werden, als solche, die den erzeugten Strom zur Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen nutzen. Aus diesem Grund erscheint ein primärbilanzieller Ansatz für eine Bewertung von Gebäuden mit aktiven Komponenten und über den gesamten Lebenszyklus als nur sehr eingeschränkt tauglich.

## Grenzen der Endenergiebilanz

Eine endenergetische Betrachtungsweise ist hingegen eng mit einer konsistenzgetriebenen Herangehensweise verbunden, deren oberste Maxime es daher ist, den energetischen Kreislauf von Gebäuden zu schließen - also in energetischer Hinsicht mindestens so viel Energie zu erzeugen, wie das Gebäude benötigt. Unter der Annahme, dass man ohnehin über energieeffiziente Gebäude und tendenziell auch über erneuerbare Energieträger spricht, erscheint dies zunächst grundsätzlich nachvollziehbar. Für die reine Betrachtung der Nutzungsphase ist ein endenergetischer Ansatz daher auch grundsätzlich gut geeignet. Kritisch ist jedoch, dass eine derartige Betrachtungsweise dazu verleitet, zu übersehen, dass auch eine Versorgung mit erneuerbaren Energiequellen Auswirkungen auf die Umwelt hat und daher unter anderem die Frage nach der verträglichen Größe weiterhin zu stellen ist. Darüber hinaus ist es aufgrund der Tatsache, dass die Ökobilanzen in energetischer Hinsicht nur Angaben zum Primärenergieeinsatz beinhalten nur mithilfe von Annahmen, deren Validität schwierig abzuschätzen ist, möglich, die Daten aus der Herstellungs-, Rückbau- und Entsorgungsphase mit der Nutzungsphase zusammen zu bringen. Eine endenergetische Bewertung über alle Lebenszyklusphasen hat daher zum einen ganz praktische Schwierigkeiten in der Umsetzung, greift aber vor allem inhaltlich zu kurz. Letzterer Aspekt ist somit auch der entscheidende Grund, warum eine endenergetische Betrachtungsweise für eine ganzheitliche Bewertung nur als sehr eingeschränkt tauglich angesehen werden kann.

## systemische Grenzen

Insgesamt lässt sich darüber hinaus feststellen, dass bei allen energetischen Betrachtungen grundsätzlich eine relativ große inhaltliche Distanz zu dem eigentlichen zentralen Aspekt besteht: der Minimierung von negativen Umwelteinflüssen. Energie ist schlichtweg kein Umwelteinfluss. Energetische Betrachtungen erweisen sich daher bildlich gesprochen gewissermaßen als Schlüssellochoperationen, deren Limitationen man umgehen kann, wenn man sich die Mühe macht und die Tür zu Betrachtungen aus dem Blickwinkel der Umweltwirkungen aufstößt. Da man die hierfür erforderlichen Ökobilanzen bei der Beschäftigung mit der Her-



stellungs-, Rückbau und Entsorgungsphase ohnehin erstellen muss und sich die Energieflüsse aus der Nutzungsphase zumindest für das Treibhauspotential relativ einfach übersetzen lassen, spricht daher vieles dafür, die CO<sub>2</sub>-Bilanz als maßgebliches Kriterium für die ganzheitliche Bewertung von Gebäuden zu verwenden. Wie bereits erläutert werden hierdurch im Ergebnis alle anderen energetischen Anforderungen ohnehin (über-)erfüllt.

### **1.3.3 CO<sub>2</sub>-bilanzieller Vergleichsmaßstab und wirtschaftliche Bewertung**

Aus diesem Grund wurde die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Gebäudes für das +++Haus als maßgeblicher Bewertungsmaßstab festgelegt. Die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz setzt sich dabei zusammen aus den CO<sub>2</sub> Emissionen, die aus der Konstruktion des Gebäudes über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Rückbau und Entsorgung resultieren und den Emissionen, die während der Nutzung (Betrachtungszeitraum: 50 Jahre) entstehen. Für die Konstruktionsvarianten sind demnach Ökobilanzen nach DIN EN 15978 zu erstellen, denen dann die Werte für das verursachte Treibhauspotential (GWP) entnommen werden können. Dabei ist zunächst für die Nutzungsphase der jeweils nach Energieträgern differenzierte Endenergiebedarf der unterschiedlichen Technikkonzepte zu ermitteln. Diese Werte können dann mit Hilfe von CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren (vgl. [Großklos, 2014]) in entstehende CO<sub>2</sub>-Emissionen umgerechnet werden. Aus der Summe dieser Werte ergeben sich die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebäudes, wie sie in Folge der Herstellung, der Nutzung, des Rückbaus und der Entsorgung entstehen. Die Werte für die CO<sub>2</sub>-Bilanz werden dabei aus oben genannten Gründen auf Gebäudeebene ermittelt und lassen sich auf dieser Grundlage sehr einfach auch für unterschiedliche Belegungsdichten in personen- und zeitbezogene Angaben (pro Bewohner und Jahr) umrechnen.

Um einen Vergleichsmaßstab zu haben, gegen den für die verschiedenen Konzepte Kosten ermittelt werden können, wurde festgelegt, dass die ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen von allen Konzepten zu kompensieren sind. Die sich so ergebende, rechnerische CO<sub>2</sub>-Bilanz ist somit einheitlich gleich null. Dass eine solche "vermeintliche" CO<sub>2</sub>-Neutralität nicht unproblematisch ist, wird im Detail in Kapitel xx diskutiert. Langfristig wesentlich sinnvoller wäre es, ohne Kompensationsmaßnahmen auszukommen und - da dann eine CO<sub>2</sub>-Neutralität nicht möglich ist - ein pro Kopf bezogenes, umweltverträgliches CO<sub>2</sub>-Budget für das Wohnen zu ermitteln. Da dies mit heutiger Datenlage aber nicht leistbar ist, wurde eine rechnerische CO<sub>2</sub>-Neutralität für das +++Haus als Vergleichsmaßstab definiert.

## 2 Zusammenfassung

### 2.1 ganzheitliches Bewertungssystem für das +++Haus

#### 2.1.1 Entwicklung des nachhaltigen Bauens

Analysiert man die Entwicklung der energetischen Standards seit den Achtziger Jahren, so stellt man zunächst fest, dass sich vor allem der Betrachtungshorizont schrittweise immer mehr erweitert hat. So war die Entwicklung der Passivhäuser zunächst sehr stark auf die Energiebedarfsminimierung in der Nutzungsphase fokussiert. Ziel war es dabei den Heizwärmebedarf eines Gebäudes so weit wie möglich zu minimieren, sodass eine klassische Gebäudeheizung in der Regel entfallen und die Beheizung im Wesentlichen mit passiven solaren und inneren Wärmequellen erfolgen kann. Dies findet sich im Passivhaus Standard in der Form wieder, als dass der verbleibende Heizwärmebedarf auf die Menge begrenzt wird, die gerade noch wirtschaftlich über ein einfaches Nachheizregister in der ohnehin notwendigen Lüftungsanlage erzeugt werden kann ( $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ). Erreicht wurde dieses Ziel neben einer Optimierung der thermischen Hülle und der Anlagentechnik über eine intelligente Gebäudekonfiguration, die sich die Ausrichtung zur Sonne zu Nutze macht. Es handelt sich hierbei primär um reine Effizienzstrategien, die in Summe das Ziel verfolgen, die zum Betrieb des Gebäudes erforderlichen Ressourcen zu minimieren.

#### Entwicklung des energiesparenden Bauens

Primärenergiebedarf Heizung ( $\text{kWh/m}^2\text{a}$ )

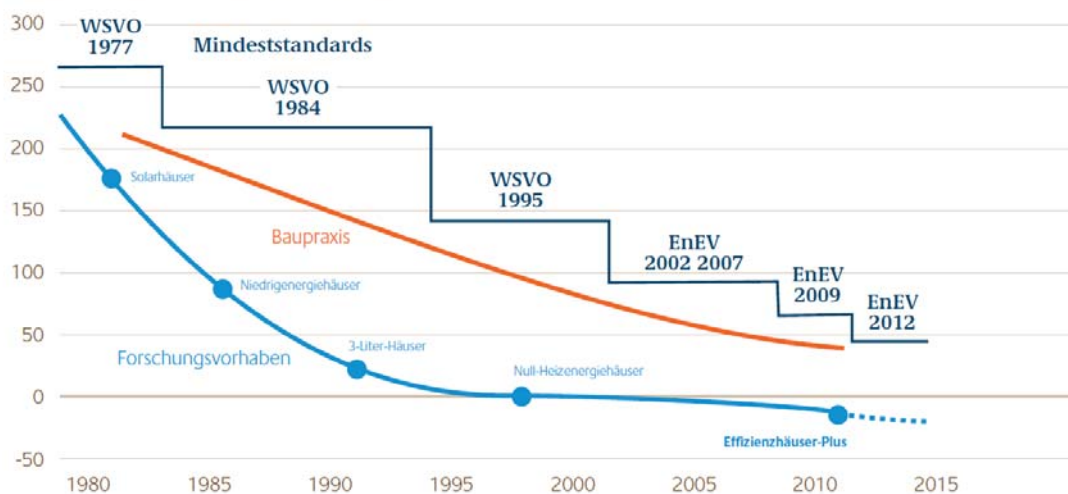


Abbildung 2.1.1-1: Entwicklung des energiesparenden Bauens, [Fraunhofer IBP, 2011]

Dieser Fokus ist vor dem Hintergrund der damals sehr hohen Energieverbräuche zur Beheizung von Gebäuden absolut nachvollziehbar und folgerichtig. Die Beheizung stellte den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf des Gebäudes dar und versprach somit insbesondere mittels Maßnahmen zur Bedarfsreduktion (Dämmung, Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, Erhöhung der Luftdichtheit, ...) die zunächst schnellsten Erfolge im Sinne einer Energieeinsparung. Gleichzeitig ist festzustellen, dass auch der Passivhaus-Standard bereits versuchte über den reinen Heizwärmebedarf hinaus zu schauen und daher Vorgaben zum max. zulässigen Primärenergiebedarf einschließlich Haushaltsstrom ( $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ) gemacht hat. Im Zuge der fortschreitenden Entwicklung des energiesparenden Bauens stieß dieser hauptsächlich bedarfsbezogene Ansatz jedoch unweigerlich an seine Grenzen, da eine weitere

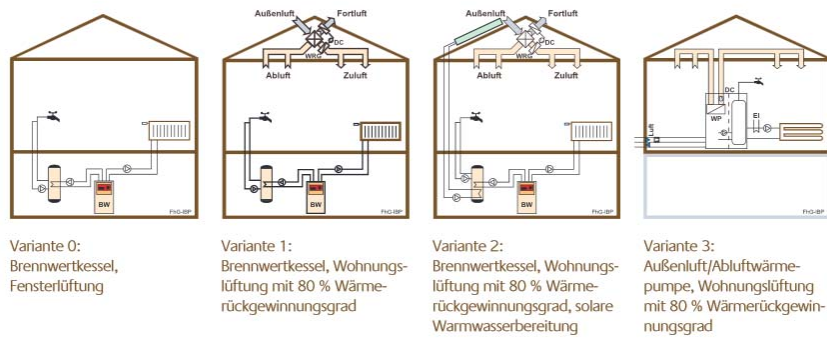
Verbesserung ab einem gewissen Punkt nur noch mit unverhältnismäßigem Aufwand möglich ist. Stichwort: immer mehr Dämmung führt zu immer weniger absoluten Ersparnisse beim Heizwärmebedarf.

### 2.1.2 vom Passivhaus zum EffizienzhausPlus

Dieser Aspekt mündete in einer Kritik der Passivbauweise und hatte zur Folge, dass energetische Standards entwickelt wurden, die neben einer effizienten Gebäudehülle und Anlagentechnik nun vor allem zum Ziel hatten, erneuerbare Energiequellen in das Gebäudekonzept einzubinden und so in der Nutzungsphase mehr Energie zu erzeugen, als die Gebäude benötigen. Der vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und dem Fraunhofer IRB entwickelte und geförderte EffizienzhausPlus Standard hat sich dabei bisher am stärksten etabliert. Alleine schon aus wirtschaftlichen Gründen führen Plusenergiestandards nicht dazu, dass nun etwa das Pendel in Bezug auf die Qualität der thermischen Hülle, etc. komplett zurück schwingen würde und man nach nun etwas deutlich weniger als vorher dämmen würde. Dennoch wurde der Fokus folgerichtig von der Effizienz der Gebäudehülle und der Anlagentechnik auf eine in der Nutzung ausgeglichene Energiebilanz verlagert. Es handelt sich somit auch um eine Erweiterung reiner Effizienzstrategien des Passivhausstandards um Maßnahmen, die sich mit der Konsistenz, also dem Schließen von Kreisläufen beschäftigen. Diese konzeptionelle Erweiterung in Bezug auf die angewendeten Nachhaltigkeitsstrategien bringt gleichzeitig auch eine Ausweitung des Betrachtungsraums von der Energiebedarfs- auf die Erzeugungsseite mit sich. Im Folgenden können mögliche Energieüberschüsse erwirtschaftet und gezielt zur Deckung des durch das Wohnen indirekt erzeugten Energiebedarfs genutzt werden. So zielen Plusenergie Standards in der Regel darauf ab, mindestens so viel Energie zu erzeugen, wie beispielsweise für die individuelle Mobilität (z.B. in Form eines Elektrofahrzeugs) erforderlich ist.

Vermutlich aufgrund der Tatsache, dass man sich bis dato neben der Heizenergie mit dem Primärenergiebedarf beschäftigt hatte, formuliert der EffizienzhausPlus Standard das Ziel sowohl einer ausgeglichenen Primärenergie- als auch einer Endenergiebilanz. Dass die Endenergiebilanz dabei in der Regel das härtere Kriterium ist, wird deutlich, wenn man sich zum Beispiel die exemplarischen Berechnungen des [Fraunhofer IBP, 2011, S.18-19] anschaut. Für die Größe der erforderlichen Photovoltaikanlage ist hier maßgeblich der Endenergiebedarf des Gebäudes verantwortlich. Die ausgeglichene Primärenergiebilanz ergibt sich dann in der Regel von selbst. So ist es vor dem Hintergrund der vom EffizienzhausPlus Standard vorgegebenen Primärenergiefaktoren bei Erzeugung des Energieüberschusses mit Photovoltaik zumindest nicht möglich, einen Unterschuss in der Primärenergiebilanz bei mindestens ausgeglichener Endenergiebilanz zu erzielen.

Die hohe Qualität der thermischen Gebäudehülle und die möglichst ökologische (erneuerbare) Energieerzeugung sind zunächst also keine Voraussetzung zur Erreichung des Standards. Sie resultieren jedoch zwangsläufig aus den nur begrenzt zur Verfügung stehenden Flächen für Photovoltaik. Insofern lässt sich feststellen, dass die vom Standard geforderte ausgeglichene Primärenergiebilanz nicht nur irrelevant ist, sondern dass die sich ergebenden Werte auch irreführend sein können. Wird beispielsweise die begrenzte Flächenverfügbarkeit außer Acht gelassen und angenommen, dass ein Bauherr die für ein Gebäude mit Gas-Brennwert-Therme zusätzlich erforderliche Photovoltaikfläche an anderer Stelle auf dem Grundstück (z.B. im Garten) errichtet, resultiert bei gleichen Werten in der Endenergiebilanz eine deutlich bessere Primärenergiebilanz. Die Sinnhaftigkeit erscheint jedoch äußerst fragwürdig, wenn nicht gar kontraproduktiv (vgl. Abbildung 2.1.2-1).



Variante	Ohne Berücksichtigung von Photovoltaik				Primärenergiebedarf (ohne PV) [kWh/m²a]	Benötigte Photovoltaikfläche [m²]	Mit Berücksichtigung von Photovoltaik	
	Endenergiebedarf [ kWh/m²a]						Endenergiebedarf [kWh/m²a]	Primärenergiebedarf [kWh/m²a]
	Heizung und WW	Hilfsenergie	Haushalt und Licht	Gesamt				
0 Brennwertkessel	84,9	2,7	20,0	107,6	138,6	124	-0,2	-154,1
1 Brennwertkessel+ Lüftung	67,0	4,9	20,0	91,9	126,2	106	-0,2	-122,0
2 Brennwertkessel + solare WW + Lüftung	48,4	5,4	20,0	73,8	108,9	85	-0,1	-88,1
3 Außenluft-Wärmepumpe + Lüftung	12,7	3,7	20,0	36,4	87,4	42	-0,1	-6,5

Abbildung 2.1.2-1: Effizienzhaus-Plus Varianten im Vergleich [Fraunhofer IBP, 2011, S.19]

### 2.1.3 Problematik von Primärenergiebilanzen

Dass die Werte der Primärenergiebilanzen wenig aussagekräftig bzw. in weiten Teilen irreführend sind, hängt mit den für die Bilanzierung festgelegten Primärenergiefaktoren zusammen. Woran dies im Detail liegt, lässt sich anhand der folgenden Beispiele einfach darstellen. Im EffizienzhausPlus Standard wird für die meisten fossilen Brennstoffe ein Primärenergiefaktor von 1,1 festgelegt. Sowohl für aus dem Stromnetz bezogenen, als auch für eingespeisten Strom wird ein Primärenergiefaktor von 2,8 festgelegt. Eigengenutzter PV-Strom wird definitiv nicht bilanziert.

Demzufolge erreicht ein System, in dem die erforderliche Energie - z.B. 1kWh für eine Wärmepumpe - durch eine Photovoltaikanlage in voller Höhe gedeckt wird, eine Primärenergiebilanz von 0kWh, da eigengenutzter PV-Strom nicht bilanziert wird. Für ein System, das 1kWh Gas für eine Brennwert-Therme benötigt und gleichzeitig 1kWh selbst erzeugten Stroms ins Netz einspeist, errechnet sich hingegen eine Primärenergiebilanz von -1,7kWh ( 1,0 kWh x 1,1 - 1,0 kWh x 2,8 ). Selbst unter der Berücksichtigung, dass das System mit Wärmepumpe aufgrund seiner Funktionsweise realistisch betrachtet nur ca. 50% der Energie des Systems mit Gas-Brennwert-Therme benötigt und die andere Hälfte des PV-Stroms zusätzlich ins Netz einspeisen kann ergibt sich dafür weiterhin nur ein Wert von -1,4 kWh (-0,5 kWh x 2,8). Im Vergleich mit der Primärenergiebilanz von -1,7kWh des Systems mit Gas-Brennwert-Therme erscheint es also nach der Logik der Primärenergiebilanz sinnvoller, einen unökologischen, fossilen Energieträger zu verwenden und Strom einzuspeisen, als diesen für eine effizientere

Wärmepumpe zu Nutzen und nur den Rest einzuspeisen. Dies widerspricht aber deutlich dem ökologischen Sachverstand und führt somit die Absurdität von Bewertungen auf Grundlage von Primärenergiebilanzen aufgrund der Problematik von Primärenergiefaktoren vor Augen.

#### 2.1.4 vom EffizienzhausPlus zum aktivplus Haus

Unter anderem die Kritik an der Primärenergiebilanz hat zur Entwicklung alternativer Plusenergiestandards wie z.B. dem aktivplus Standard geführt. Dieser fokussiert sich, in Bezug auf die Energie ausschließlich auf die Endenergiebilanz und lässt die Primärenergie außer Betracht. Darüber hinaus wird eine Reihe von weiteren Kriterien definiert, die eine möglichst ganzheitliche Betrachtungsweise zum Ziel haben. Für den aktivplus Standard wurden neben den energetischen Anforderungen auch Kriterien aus den Themenfeldern "Nutzer", "Vernetzung" und "Lebenszyklus" definiert, was zunächst vorrangig dazu führen soll, dass sich Planer auch mit diesen Punkten beschäftigen. Eine Abfrage erfolgt in diesen Bereichen auf rein informativer Ebene. Allerdings muss man an dieser Stelle erwähnen, dass der aktivplus Standard sich ohnehin nicht als Zertifizierungssystem, sondern vielmehr als Planungswerkzeug für eine Versorgung von Einzelgebäuden und Stadtquartieren mit erneuerbaren Energien versteht. Ziel des Standards ist es darüber hinaus, die Aspekte der Nutzerzufriedenheit in den Fokus zu rücken und mittels Befragungen und Monitorings zu ermitteln.

Im Bereich der informativen Kriterien des aktivplus Standards lassen sich Ansätze von strategischen Erweiterungen erkennen. So wird zum Beispiel versucht, Planern und Bauherren zu motivieren, sich neben der Effizienz und Konsistenz auch mit der Suffizienz von Gebäuden als drittem Weg der Nachhaltigkeit auseinanderzusetzen. Dies lässt sich zum Beispiel am Thema Nutzerstrombedarf erkennen, der neben einem flächen- und/oder personenbezogenen Ansatz die Möglichkeit bietet den individuellen Nutzerstrombedarf sehr detailliert zu berechnen und so zum Beispiel zu berücksichtigen, dass ein Haushalt ggf. bewusst auf energieintensive Geräte verzichtet, bzw. diese vielleicht nicht benötigt oder sich anderweitig besonders energiebewusst verhält. Des Weiteren wird auch das Thema Flächeneffizienz behandelt, auch wenn dies zunächst nur als informatives Kriterium erfolgt. Mit dem Themenfeld Lebenszyklus wird darüber hinaus erneut eine Erweiterung des Betrachtungsraums vorgenommen, der neben der Nutzungsphase des Gebäudes nun auch die Herstellung, den Rückbau und die Entsorgung des Gebäudes umfasst. Aufgrund der Komplexität des Themas Lebenszyklus verbleibt der aktivplus Standard allerdings auch in diesem Punkt auf der Ebene informativer Kriterien. In der Bearbeitung des Forschungsprojekts wurde festgestellt, dass eine Vielzahl der Fragestellungen aus den Themenfeldern Nutzer und Lebenszyklus des aktivplus Standards sich inhaltlich mit den Forschungsschwerpunkten des +++Haus Projekts überschneiden. Aus diesem Grund hat das +++Haus auch an der im Sommer 2015 durchgeführten 1. Pilotphase des aktivplus e.V. teilgenommen.

Letztlich lässt sich feststellen, dass sowohl der EffizienzhausPlus Standard als auch die aktuell quantitativ bewerteten (energetischen) Kriterien des aktivplus Standards hinsichtlich des Optimierungspotentials von Gebäuden an eine Grenze stoßen, da sich ab Erreichen einer ausgeglichenen Energiebilanz weitere Verbesserungen nur noch über ein Mehr an erneuerbarer Energieerzeugung erzielen lassen. Ob ein Gebäude wirklich dadurch besser wird, dass man zum Beispiel noch weitere Photovoltaikanlagen in den Garten stellt und damit indirekt Gebäude mit großen Dachflächen (=hohem Flächenverbrauch) forciert, erscheint daher mehr als fragwürdig. Dies lässt sich auch anhand der Berechnungen zur Endenergiebilanz sowohl nach EffizienzhausPlus, als auch nach aktivplus Standard nachvollziehen. So schneiden die Varianten mit weniger ökologischen Bauweisen aufgrund der aus der +++Haus Logik her erforderlichen, größeren Photovoltaikflächen und der Tatsache, dass der Energiebedarf für Herstellung, Rückbau und Entsorgung in diesen Standards nicht berücksichtigt wird, deutlich besser

ab. Insofern erscheint es, wenn man zu einer ganzheitlichen Betrachtung von Gebäudekonzepten gelangen möchte, als zwingend erforderlich, mindestens die der Nutzung vorausgehenden und nachfolgenden Lebenszyklusphasen (Herstellung, Rückbau, Entsorgung) auch quantitativ mit zu betrachten. Genau dieses Ziel wurde unter anderem mit dem +++Haus Projekt verfolgt.

### 2.1.5 Problematik von Endenergiebilanzen

Gebäude die in Ihrer Nutzung mehr Energie erzeugen, als sie verbrauchen werden oftmals mit Bezeichnungen wie "das Haus als (grünes) Kraftwerk" plakativ beworben. Ein wesentliches Manko von endenergiebilanzbezogenen Betrachtungen ist es nach Auffassung der Verfasser aber, dass diese Bilder suggerieren, dass Gebäude dieser Art automatisch umweltverträglich seien und dass das Problem der Klimaerwärmung damit gewissermaßen gelöst wäre. Selbst wenn man die Herstellungs- Rückbau- und Entsorgungsphase in solchen Bilanzen mit berücksichtigen würde, was heute in der Regel nicht erfolgt, ist dies jedoch schlichtweg nicht richtig. Auch erneuerbare Energiequellen haben zum Teil nicht unerhebliche Umweltwirkungen. Dabei muss man noch nicht mal auf die in der Fachwelt heftig umstrittene Klimaneutralität von Holzpellet-Heizungen o.ä. abzielen. Auch Photovoltaikanlagen verursachen je kWh erzeugtem Strom CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Größenordnung von 50-100 g/kWh, die im Herstellungsprozess der Photovoltaikmodule begründet liegen. Für die weiteren Umweltwirkungskategorien von Photovoltaikzellen liegen nicht einmal Datensätze in ausreichender Qualität vor.

Endenergetische Betrachtungen alleine lassen daher annehmen, dass es sich bei Gebäuden mit einer ausgeglichenen Bilanz oder sogar einem Überschuss um einen geschlossenen (konsistenten) Kreislauf handelt, der somit beliebig skaliert werden kann ohne schädlich für die Umwelt zu sein. Dies kann zu so irrsinnigen Annahmen verleiten, wie z.B. dass man auch die nicht gegebene Umweltverträglichkeit eines schlecht gedämmten Gebäudes sich damit "erkaufen" kann, dass man ein weiteres Gebäude daneben stellt, welches den Energiebedarf beider aus erneuerbaren Energiequellen deckt, wie es zum Beispiel im Projekt B10 der E-Lab Projekt GmbH der Fall ist. Für den hier gegebenen Sonderfall, dass es sich bei dem Bestandsgebäude um ein Denkmal handelt, mag dies ja durchaus vertretbar sein. Übertragen auf den allgemeinen Gebäudebestand kann ein solches Konzept, das aus rein endenergetischen Betrachtungen heraus motiviert ist, daher nach Auffassung der Verfasser nur begrenzt zur Lösung der ökologischen Herausforderungen beitragen. Auf der strategischen Ebene reduziert sich eine rein endenergetische Betrachtungsweise aber, so wie das Passivhaus sich fast ausschließlich auf Effizienzstrategien verlässt, ausschließlich auf Konsistenzstrategien. Die Frage des ausreichenden Maßes spielt in beiden Konzepten keinerlei Rolle. Suffizienzstrategien werden nicht abgebildet und somit im Zweifelsfall konterkariert. Es besteht die Gefahr, dass das eigentliche Ziel, Umwelteinflüsse zu minimieren verfehlt wird.

### 2.1.6 allgemeine Problematik von flächenbezogenen Betrachtungen

Ein wesentliches Manko ist es in diesem Zusammenhang auch, dass die energetischen Werte - unabhängig davon ob Heizwärmebedarf, Primärenergie oder Endenergie - in der Regel in Relation zur Energiebezugsfläche angegeben werden. Dies geschieht meist mit dem Hinweis auf die bessere Vergleichbarkeit unterschiedlicher Gebäudetypen, konterkariert aber, wie bereits im vorangehenden Abschnitt deutlich wurde, jegliche Anstrengung Gebäude möglichst klein und Grundrisse möglichst effizient zu machen. So hat ein kleineres Gebäude bei gleicher Nutzeranzahl zwar absolut gesehen aufgrund des geringeren zu beheizenden Volumens einen geringeren Energiebedarf. In Relation zur Energiebezugsfläche ergibt sich aber dennoch ein höherer Wert, da z.B. der gleichbleibende Energiebedarf für Warmwasser auf eine geringere Fläche verteilt werden muss. Eine derartige Betrachtung ist daher im Prinzip genauso sinnlos,

wie es eine Angabe des Benzinverbrauchs von Personenfahrzeugen in Relation zu deren Gewicht und/oder des Strömungswiderstandsbeiwerts wäre. Interessanterweise stellt für PKW auch niemand derartige Vergleiche unter dem Hinweis an, dass diese dann besser mit Lastkraftwagen zu vergleichen wären.

Da es ohnehin keinen Sinn macht, ein Einfamilienhaus mit einem Bürogebäude oder einen Kindergarten zu vergleichen, ist es wesentlich sinnvoller Vergleiche nur innerhalb einer Gruppe tatsächlich vergleichbarer Gebäude anzustellen und als Bezugsmaßstab die jeweils passende funktionale Einheit zu wählen. Für Bürogebäude kann das zum Beispiel der einzelne Arbeitsplatz sein. Für Wohngebäude kann eine Angabe je Bewohner sinnvoll sein. Vergleicht man nur Einfamilienhäuser für 4-Personen miteinander ist es auch vorstellbar, dass man als Vergleichseinheit das Haus als Ganzes wählt. Flächenbezogene Auswertungen machen jegliche Suffizienzstrategie zunichte.

### **2.1.7 Ziele für eine weitergehende, ganzheitliche Bewertung**

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es in der Entwicklung des energiesparenden Bauens zunächst vor allem zu einer schrittweisen Erweiterung des Betrachtungsraums gekommen ist. Zur anfänglichen Betrachtung des Heizwärmebedarfs ist der Bedarf für die weiteren Wärmeanwendungen, die Lüftung und den Haushaltsstrom hinzugekommen. Weiterhin wurden auch aktive erneuerbare Energiequellen in die Betrachtung mit einbezogen. Passive Gewinne in Folge solarer Einstrahlung, etc. wurden auch vorher bereits mit berücksichtigt. Hieraus ergab sich in vielen Konzepten der Wunsch, auch den indirekt mit dem Wohnen verbundenen Energiebedarf für Mobilität mit zu betrachten. An dieser Stelle endet aktuell oftmals der Betrachtungsraum. Die Herstellung, der Rückbau und die Entsorgung der Gebäude werden in der Regel nicht oder nur informativ betrachtet. Eine vollständige Lebenszyklusanalyse stellt momentan noch ein Forschungsfeld dar, welches nur in einzelnen Projekten ernsthaften Eingang in die Bewertung findet.

Mit der Erweiterung des Betrachtungsraums einhergehend lässt sich ein Wandel in Bezug auf die relevanten Messgrößen feststellen. Von der Fokussierung des Passivhaus Standards auf den Heizwärmebedarf und den Primärenergiebedarf kommen aktuelle Energiestandards vor allem auf Grundlage der Endenergiebilanz zu Ihren Einordnungen von Gebäuden.

Legt man ein Modell von drei Wegen zur Nachhaltigkeit (vgl. xxx) - Effizienz, Konsistenz und Suffizienz - zu Grunde, so lässt sich neben der inhaltlichen Erweiterung vor allem auch eine strategische Diversifizierung feststellen. Effizienzstrategien werden heutzutage in der Regel gemeinsam mit Konsistenzstrategien diskutiert. Zumindest sollte dies für Gebäude gelten, die heute mit dem Anspruch besonderer Nachhaltigkeit errichtet oder saniert werden. Für die Mehrzahl aktueller Neubauten bzw. Sanierungen, dürfte hingegen weiterhin eher gelten, dass man sich auf Effizienzstrategien in dem Umfang beschränkt, wie sie vom Gesetzgeber gefordert werden. Suffizienzstrategien werden in der Praxis nach Einschätzung der Verfasser nur in den seltensten Fällen praktiziert und finden wie gezeigt auch erst neuerdings und dann auch meist nur auf der Grundlage von informativen Kriterien Eingang in die energetischen Standards.

### **2.1.8 Problematik der Integration von über die Nutzung hinausgehenden Lebenszyklusphasen**

Vor diesem Hintergrund erfolgte die wesentliche Zielsetzung für das Forschungsprojekt. Es wurde daher untersucht, wie sich auch die Lebenszyklusphasen Herstellung, Rückbau und Entsorgung im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung mit einbeziehen lassen. Hierzu wurden zunächst die erforderlichen Ökobilanzen von ersten Konzeptvarianten erstellt. Da

Ökobilanzen in der Regel den erforderlichen Primärenergiebedarf getrennt nach erneuerbar und nicht erneuerbar ausweisen, erscheint es zunächst als eine naheliegende Möglichkeit, den nicht erneuerbaren Anteil über einen zu definierenden Betrachtungszeitraum von beispielsweise 50 Jahren zu verteilen, und dann über eine entsprechende Dimensionierung der Energieerzeugung zu ermöglichen, dass ein Gebäude neben dem sonstigen gewünschten Bedarf (Haushaltsstrom, Mobilität, etc.) weiterhin insgesamt eine ausgeglichene Primärenergiebilanz erreicht. Dies entspricht auch dem Vorgehen, wie es im Forschungsantrag zunächst formuliert wurde.

Auf Basis der Festlegungen des EffizienzhausPlus Standards ist dies theoretisch auch möglich. Allerdings kann es jedoch in der Konsequenz auch dazu führen, dass ökologischere Formen der Energieerzeugung rechnerisch schlechter erscheinen, wie zuvor am Beispiel der Primärenergiefaktoren einer Gas-Brennwert-Therme in Kombination mit einer PV-Anlage aufgezeigt wurde. Dass diese Widersprüchlichkeit nicht unerheblich ist, zeigt der Vergleich der unterschiedlichen Technikkonzepte am Beispiel der Bauweise "Ökonomisch" des +++Hauses.

Bauweise "Ökonomisch"	Endenergiebedarf ohne PV	Primärenergiebedarf ohne PV	erforderliche Kapazität PV für EffizienzhausPlus*	Endenergiebedarf mit PV	Primärenergiebedarf mit PV
Variante 1a	52,71 kWh/m <sup>2</sup> a	147,58 kWh/m <sup>2</sup> a	10,0 kWp 59,73 m <sup>2</sup>	0,00 kWh/m <sup>2</sup> a	0,00 kWh/m <sup>2</sup> a
Variante 1b	44,71 kWh/m <sup>2</sup> a	125,18 kWh/m <sup>2</sup> a	8,4 kWp 50,67 m <sup>2</sup>	0,00 kWh/m <sup>2</sup> a	0,00 kWh/m <sup>2</sup> a
Variante 2	49,11 kWh/m <sup>2</sup> a	137,50 kWh/m <sup>2</sup> a	9,3 kWp 55,65 m <sup>2</sup>	0,00 kWh/m <sup>2</sup> a	0,00 kWh/m <sup>2</sup> a
Variante 3	67,21 kWh/m <sup>2</sup> a	107,43 kWh/m <sup>2</sup> a	12,7 kWp 76,17 m <sup>2</sup>	0,00 kWh/m <sup>2</sup> a	-80,75 kWh/m <sup>2</sup> a
Variante 4	73,71 kWh/m <sup>2</sup> a	114,58 kWh/m <sup>2</sup> a	13,9 kWp 83,53 m <sup>2</sup>	0,00 kWh/m <sup>2</sup> a	-91,80 kWh/m <sup>2</sup> a

Abbildung 2.1.8-1: flächenbezogener Primär- und Endenergiebedarf der +++Haus Varianten

\*Endenergiebilanz = 0 kWh/m<sup>2</sup>a

Variante 1a: 3 kW Wärmepumpe Quelle Erdsonde mit Elektrodurchlauferhitzer mit Lüftung mit WRG, Variante 1b: 3 kW Wärmepumpe Quelle Erdsonde mit ca. 300l Warmwasserspeicher mit Lüftung mit WRG, Variante 2: Luftwärmepumpe für Heizen und Warmwasser mit Lüftung mit WRG, Variante 3: Gas-Brennwertgerät mit solaren Brauchwasserunterstützung mit Lüftung mit WRG, Variante 4: Gas-Brennwertgerät mit Elektrodurchlauferhitzer mit Lüftung mit WRG (für eine detailliertere Erläuterung vgl. 7.2.2 Energieversorgung).

Für die Variante 3 mit der unökologischsten Energieerzeugung (Gas-Brennwert-Therme und Elektrodurchlauferhitzer) ergibt sich in der Bilanz ein Energieüberschuss von 686.375 kWh, der nach dieser Logik für die nicht erneuerbare Primärenergie aus der Konstruktion des Gebäudes und/oder Mobilität zur Verfügung stünde. Das ist enorm, wenn man bedenkt, dass selbst das Referenzgebäude in mineralischer Bauweise im Vergleich "nur" ein PENRT von insgesamt ca. 195.000 kWh erreicht.

Nun könnte man einwenden, dass ja Gebäude mit unterschiedlich großen Photovoltaikanlagen miteinander verglichen werden. Interessanterweise verringert sich der verzerrende Effekt der Primärenergiefaktoren zwar, wenn man die Werte um den Einfluss der PV-Dimension bereinigt, er bleibt aber weiterhin in nicht unerheblichem Umfang bestehen. Dimensioniert man die PV-Anlage der Variante 1b beispielsweise ebenfalls auf 12,7 kWp, so ergibt sich eine Primärenergiebilanz von -63,08 kWh/m<sup>2</sup>a. Es bleibt somit ein Delta von ca. 17,67 kWh/m<sup>2</sup>a



bzw. absolut 150.195 kWh übrig. Dies ist immer noch mehr, als für die Errichtung des Gebäudes in Holzbauweise erforderlich wäre.

Somit erscheint eine ganzheitliche Betrachtung aller Lebenszyklusphasen auf Basis von Primärenergiebilanzen zumindest bei Verwendung der in den etablierten energetischen Standards definierten Primärenergiefaktoren als wenig aussagekräftig und erweist sich daher für die Zwecke des Forschungsprojekts als unbrauchbar.

Alternativ ist es denkbar die Ökobilanzdaten des Gebäudes auf der Ebene der Endenergiebilanz mit den Daten aus der Nutzungsphase zusammenzuführen. Allerdings ist dies nur näherungsweise möglich, da man für die Umrechnung des PENRT Werts aus der Ökobilanz einen durchschnittlichen Primärenergiefaktor annehmen müsste ohne jedoch genau abschätzen zu können, inwieweit diese Abschätzung realistisch ist. Lässt man diese Unwägbarkeit zunächst außer Betracht, ergibt sich am Beispiel des +++Hauses, aus den für die unterschiedlichen Bauweisen ermittelten PENRT Werten ein Delta von max. 140.000 kWh. Bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren würde dies einem Mehr-/Minderbedarf an Photovoltaikkapazität von ca. 2,8 kWp entsprechen. Aus der Differenz zwischen der mineralischen und der ökonomischen (herkömmlichen Holz-) Bauweise in Höhe von ca. 95.000 kWh ergibt sich ein Mehrbedarf bzw. ein Einsparpotential an Photovoltaikkapazität von ca. 1,9 kWp.

Bauweise	PENRT	Differenz
Ausbalanciert	79.557 kWh	-113.434 kWh
Mineralisch	192.991 kWh	
Ökologisch	53.009 kWh	-139.982 kWh
Ökonomisch	98.248 kWh	-94.743 kWh

Abbildung 2.1.8-2: nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf für die Konstruktion der +++Haus Varianten

Die nach dieser Logik errechneten Werte sind zwar trotz der aufgezeigten konzeptionellen Schwächen einigermaßen plausibel, bleiben nach Auffassung der Verfasser aber relativ spekulativ und sind deshalb unbefriedigend. Aus der Überlegung heraus, dass man in einer derartigen Betrachtung auch den wesentlichen Teil der Ökobilanzen - nämlich die wertvollen Ergebnisse für die Umweltwirkungskategorien - außer Betracht lässt und lediglich einen Datensatz aus der Sachbilanzebene verwendet, hat letztlich zu der Erwägung geführt, dass im Rahmen des Forschungsprojekts die Integration in umgekehrter Richtung vorgenommen wurde. Die Energiebilanz der Nutzungsphase wurde daher in die Wirkungskategorien der Ökobilanz übersetzt, was zumindest für die Leitgröße Treibhauspotential (GWP) relativ einfach möglich ist, da für die verschiedenen Energieträger (Gas, PV-Strom, ...) relativ gute Daten bzgl. der resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen vorhanden sind (vgl. [Großklos, 2014]).

Letztlich ist dies auch der Tatsache geschuldet, dass es kein Selbstzweck ist, Energieströme von Gebäuden in qualitativer und quantitativer Hinsicht zu beeinflussen, sondern es darum gehen muss die (schädlichen) Wirkungen auf die Umwelt zu minimieren. Eine rein energiebasierte Herangehensweise lässt, wie bereits erläutert außer Betracht, dass es sich auch bei den sogenannten erneuerbaren Energiequellen nicht um in sich geschlossene - also konsistente - Systeme ohne Einfluss auf die Umwelt handelt. So erzeugt auch eine Kilowattstunde Photovoltaik-Strom eine CO<sub>2</sub>-Emission, die gegenüber dem deutschen Strommix zwar um einen Faktor 7-9 kleiner sein mag, aber eben nicht gleich Null ist. Insofern führt auch eine rein end-energetische Betrachtung letztlich nicht zu einem für die Umwelt wirkungsneutralen Gebäude

de. Im Gegenteil kann diese auch zu kontraproduktiven Annahmen führen, wie man sie selbst in Fachdiskussionen stellenweise erlebt. In zum Teil sehr unterschiedlicher Ausprägung wird teilweise der Gedanke formuliert, dass der Energiebedarf eines Gebäudes von untergeordneter Bedeutung sei, wenn nur die Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien sichergestellt ist. Tatsächlich ist jedoch das Gegenteil der Fall. Es macht weiterhin sowohl hochgradig Sinn, den Energiebedarf von Gebäuden zu minimieren (Stichwort Gebäudehülle, Anlageneffizienz, etc.), als auch die Ökobilanz der Bauweise zu optimieren. Vor diesem Hintergrund erscheint es daher von essentieller Bedeutung, sich Gebäudekonzepte künftig viel mehr aus dem Blickwinkel von Wirkungskategorien anzuschauen, als sich ausschließlich auf eine rein energetische Optimierung zu verlassen.

Ein weiterer Grund, sich insbesondere mit der Herstellungsphase auseinanderzusetzen liegt in dem unterschiedlichen Zeitpunkt der jeweiligen Emissionen begründet. Der Einsatz energie- und damit emissionsintensiver Baustoffe verursacht unmittelbar innerhalb eines sehr kurzen Zeitraums (Produktionszeit) große Umweltwirkungen. Die Emissionen aus der Nutzung verteilen sich hingegen gleichmäßig über einen vergleichsweise langen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Diesen Umstand können zwar auch Ökobilanzen in ihrer heutigen Form nicht abbilden, jedoch sollte dies vor dem Hintergrund des Ziels der kurzfristigen Reduktion von Treibhausemissionen umso mehr ein Grund sein, die Wirkungen aus der Herstellung sehr intensiv zu analysieren und Gebäude dahingehend zu optimieren. So haben die Berechnungen des Forschungsprojekts beispielsweise ergeben, dass sich für die ökologischste Technologie (Erdwärmepumpe mit 300 l Warmwasserspeicher) in der Nutzung eine verbleibende Emission von nur 28,5 t CO<sub>2</sub>-äqv. (über 50 Jahre) ergibt. Gleichzeitig kann durch eine Holzbauweise gegenüber einer mineralischen Bauweise (Referenzstandard) zwischen 38,5 und 58,4 t CO<sub>2</sub>-äqv. einsparen. Eine vorrangige Optimierung der Konstruktion macht vor diesem Hintergrund deutlich mehr Sinn, als Gebäudehülle und/oder Technologiekonzept weiter zu verbessern.

GWP ohne Kompensation	
Gebäude "Ökonomisch"	25,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Gebäude "Ausbalanciert"	19,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Gebäude "Ökologisch"	5,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Gebäude mineralisch	63,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 2.1.8-3: Treibhauspotential der Konstruktion der +++Haus Varianten

GWP Nutzung ohne Kompensation	
Variante 1a	33,60 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Variante 1b	28,50 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Variante 2	31,05 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Variante 3	117,94 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Variante 4	100,74 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 2.1.8-4: Treibhauspotential der Nutzungsphase der +++Haus Varianten (Technikkonzepte)

### 2.1.9 Treibhauspotentialgetriebene Bewertung des +++Hauses

Der Grund warum Ökobilanzen in der Breite noch keinen nennenswerten Eingang in den Planungs- und Baualltag gefunden haben, ist deren hohe Komplexität. Die Datenlage für handelsübliche Baumaterialien hat sich in den letzten Jahren zwar enorm verbessert (vgl. [BMUB, 2013]), für den Bereich der technischen Gebäudeausrüstung (Photovoltaikanlagen, Batteriespeicher etc.) besteht allerdings noch großer Forschungsbedarf.

Dennoch zeigen die Ergebnisse des Forschungsprojektes, dass Komplexität und lückenhafte Datenqualität nicht dazu führen sollen, das Thema Ökobilanzen zu meiden. Viel zielführender erweist es sich, einen Schwerpunkt auf die Betrachtung der Kategorie des Treibhauspotentials zu legen und die weiteren Wirkungskategorien untergeordnet zu untersuchen bzw. - sofern möglich - in einer nachgelagerten Betrachtung zu analysieren, ob es durch die vorgenommenen Optimierungen ggf. zu Lastverschiebungen zwischen Wirkungskategorien gekommen ist. Aus diesen Gründen wurde das Treibhauspotential (GWP) über alle Lebenszyklusphasen hinweg als zentrale Messgröße zur Beurteilung der unterschiedlichen, im Rahmen des Forschungsprojekts analysierten Gebäude- und Technikkonzepte definiert.

Für die Gebäudekonstruktion können die Werte über Ökobilanzen ermittelt werden. Für die Nutzungsphase sind die Werte getrennt nach Energiequellen aus dem jeweiligen Energiebedarf zu errechnen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde dabei mit folgenden Emissionswerten gerechnet:

Treibhausgasemissionen	
Gas	261 g CO <sub>2</sub> -äqv./kWh Endenergie
Netzstrom (Strommix Deutschland)	617 g CO <sub>2</sub> -äqv./kWh Endenergie
Photovoltaik Strom (Durchschnittswert)	75 g CO <sub>2</sub> -äqv./kWh Endenergie
Gutschrift eingespeister PV-Strom	542 g CO <sub>2</sub> -äqv./kWh Endenergie

Abbildung 2.1.9-1: Treibhauspotential unterschiedlicher Energiequellen, Quelle: [Großklos, 2014]

Bei der Gutschrift für überschüssigen und in das Netz eingespeisten Photovoltaikstrom handelt es sich um die Differenz aus den Emissionen des PV-Stroms und des Netzstroms. Netzverluste wurden dabei vernachlässigt. Hierbei ist zu beachten, dass zu erwarten ist, dass die Treibhausgasemissionen des deutschen Strommixes im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energiequellen in Zukunft kontinuierlich sinken werden und die Gutschrift daher degressiv erfolgen muss. Für die Berechnungen des Forschungsprojekts wurde daher angenommen, dass sich die Treibhausgasemissionen über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren dem heutigen Wert von Photovoltaik Strom angleichen werden und die Gutschrift je kWh von heute 542 g CO<sub>2</sub>-äqv./kWh Endenergie kontinuierlich auf 0 g CO<sub>2</sub>-äqv./kWh Endenergie absinken wird. Die Gutschrift wurde daher mit einem Faktor 0,5 multipliziert, um so einen Rechenwert zu erhalten, der ihren degressiven Verlauf berücksichtigt.

Die Summe dieser Werte aus der Ökobilanz der Konstruktion und der Nutzung ergeben ein Gesamttreibhauspotential anhand dessen die verschiedenen Gebäudekonzepte im Folgenden aussagekräftig miteinander verglichen werden können.

### 2.1.10 Problematik der vermeintlichen CO<sub>2</sub>-Neutralität

Zur Optimierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz besteht zunächst die Möglichkeit die Emissionen direkt zu senken. Dies kann zum Beispiel durch eine bewusste Baustoffwahl, eine Minimierung des Energiebedarfs, eine Optimierung der Energieträgerwahl, etc. erfolgen. Durch derartige Maßnahmen lässt sich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Gebäudes gegenüber herkömmlichen Gebäuden maßgeblich senken. So wurde zum Beispiel für das mineralische Referenzgebäude mit Gas-Brennwert-Therme und Elektrodurchlauferhitzer ein CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von 181,6 t CO<sub>2</sub>-äqv. ermittelt, wohingegen die ökologischste Konstruktion mit Erdwärmepumpe und Photovoltaik nur einen Fußabdruck von 33,7 t CO<sub>2</sub>-äqv. aufweist. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz wird sich dennoch niemals auf ein neutrales Niveau oder darunter absenken lassen. Dies hat zum einen, wie bereits erläutert, damit zu tun, dass auch erneuerbare Energieträger CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen und zum anderen, dass auch Gebäude, die nahezu vollständig aus Holz bestehen immer noch viele Bauteile aufweisen, die nicht durch Baustoffe mit negativer CO<sub>2</sub>-Bilanz (z.B. Dachabdichtung, Gründungsbauteile, Versorgungsleitungen, ...) ersetzt werden können, so dass durch diese die numerisch negative Bilanz der Holzmengen überschritten wird. Insofern ist es aus Sicht der Verfasser außerordentlich problematisch von CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäuden zu sprechen. Warum dies so ist, soll im Folgenden noch detaillierter erläutert werden.

CO <sub>2</sub> -Fußabdruck ohne Kompensationsmaßnahmen	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Gebäude "Ökonomisch"	58,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	53,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	56,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	143,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	125,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Gebäude "Ausbalanciert"	52,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	47,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	50,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	137,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	120,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Gebäude "Ökologisch"	38,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	33,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	36,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	123,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	105,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Gebäude mineralisch	97,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	92,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	94,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	181,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	164,4 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 2.1.10-1: Treibhauspotential der Konstruktion und der Nutzungsphase der +++Haus Varianten, ohne Berücksichtigung der Kompensationsmaßnahmen aus Photovoltaik

Wird eine neutrale oder negative CO<sub>2</sub>-Bilanz angestrebt, so lässt sich diese aus den oben genannten Gründen letztlich nur über Maßnahmen erreichen, die man als kompensatorisch bezeichnen kann. Legt man darüber hinaus als Bilanzraum die Grundstücksgrenze fest (was Möglichkeiten von Zertifikatehandel, etc. bewusst ausschließt), so sind Kompensationen vor allem in der Nutzungsphase möglich. Die Überkapazität einer Photovoltaikanlage stellt zum Beispiel eine solche kompensatorische Maßnahme dar, da durch den überschüssigen, in das Netz eingespeisten Strom, außerhalb des Bilanzraums Strom des deutschen Strommixes ersetzt wird und sich hierfür die oben bereits erläuterte Gutschrift ergibt. Der bei realistischer Betrachtung sich ergebende degressive Charakter dieser Gutschrift wurde zuvor bereits erläutert. Hieraus ergibt sich wiederum, dass das Erreichen eines CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäudes auf diesem Wege nur solange möglich ist, wie die Stromproduktion in Deutschland mehr Emissionen verursacht, als der erzeugte Photovoltaik-Strom. Die sich ergebende CO<sub>2</sub>-Neutralität ist sachlich und rechnerisch zwar nicht falsch, sie beschreibt aber vielmehr die Tatsache, dass man über das eigene Gebäude hinaus etwas unternimmt um die Emissionen eines anderen Gebäudes etwas weniger zu verringern. Die Emissionen des eigenen Gebäudes werden dadurch jedoch weder weiter vermindert, noch wird auf diesem Wege eine echte CO<sub>2</sub>-Neutralität erreicht - weder für das eigene, noch für das "andere" Gebäude.

Ebenfalls als kompensatorische Maßnahmen kann man ab einem gewissen Grad Konstruktionen betrachten, die einen "übermäßigen" Holzeinsatz verfolgen. Letztlich lässt sich die Ökobilanz eines Gebäudes mit jedem zusätzlichen Kubikmeter Nadelholz, den man verbaut rechnerisch um ca. 300 kg CO<sub>2</sub>-äqv. und mit jedem Kubikmeter Laubholz um ca. 450 kg CO<sub>2</sub>-äqv. senken (vgl. Datensätze für kammergetrocknetes Nadel- bzw. Laubschnittholz [Rüter et al., 2012, S.118+127]). Dass dies als Strategie auf die Spitze getrieben, ab einem gewissen Punkt im Widerspruch zum ressourcenschonenden Bauen und nachhaltiger Forstwirtschaft steht dürfte einleuchtend sein. Dass es darüber hinaus eine sehr teure Methode der Emissionskompensation ist und im Übrigen zu einer erhöhten Emission in den Umweltkategorien Versauerungspotential (AP) und Überdüngungspotential (EP) führt, zeigt sich bereits, wenn man nur die im Rahmen des Forschungsprojekts untersuchten Holzkonstruktionsvarianten miteinander vergleicht. Die Variante "Ökologisch" weist in Folge des vergleichsweise großen Holzeinsatzes in der Gebäudehülle (10 cm Brettsperrholz) zwar ein deutlich geringeren GWP Wert auf, führt aber gleichzeitig zu deutlich höheren EP und AP Werten.

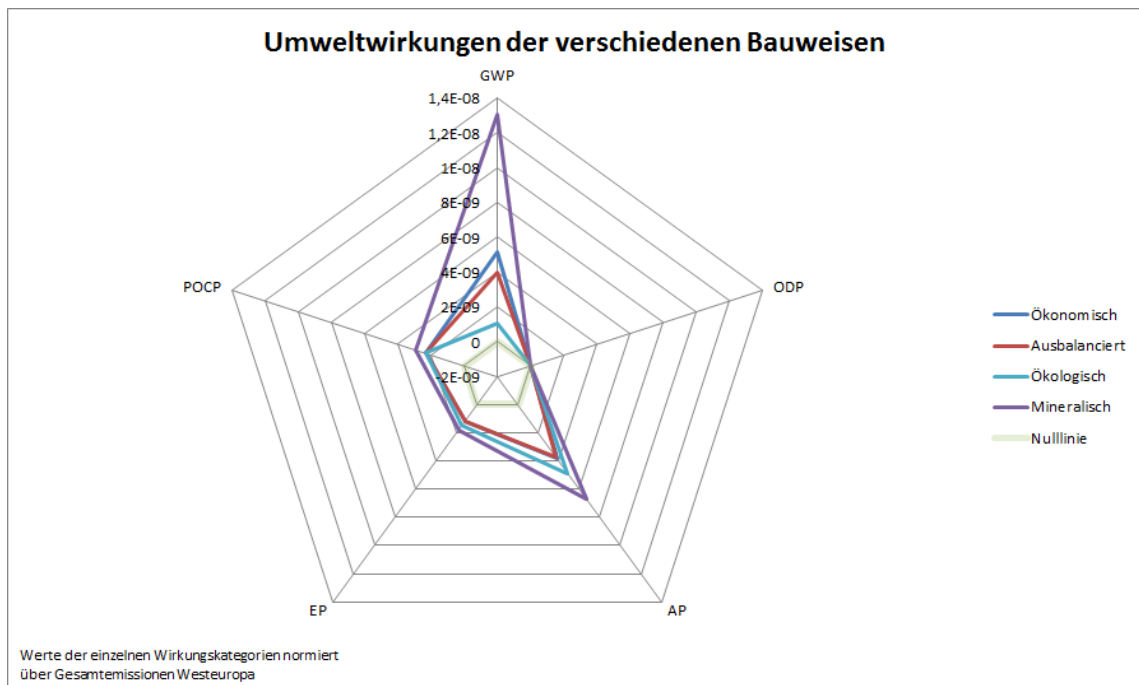


Abbildung 2.1.10-2: Umweltwirkungen der Konstruktion der +++Haus Varianten

Für diese "konstruktive" Kompensationsmaßnahme gilt, dass das negative Treibhauspotential von Holz über den gesamten Lebenszyklus nur deshalb rechnerisch entsteht, weil für das Szenario einer thermischen Verwertung des Holzes am Ende des Lebenszyklus andere Energieträger mit höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen verdrängt werden und sich hieraus eine Gutschrift ergibt. Auch dieser Effekt ist somit degressiv und daher von begrenzter Dauer. Dies wird auch deutlich, wenn man alternativ ein stoffliches Verwertungsszenario ansetzt, welches langfristig im Sinne von geschlossenen Kreisläufen und Ressourceneffizienz erstrebenswert wäre (vgl. [Gärtner et al., 2013, S.vi-vii]). Dieses führt dazu, dass auch Holz ein wenn auch im Vergleich zu anderen Baustoffen recht geringes aber eben positives Treibhauspotential aufweist. Oftmals wird dieser Zusammenhang dadurch verunklart, dass lediglich die Module A1-A3 angesetzt werden, in denen Holz immer einen negativen Wert aufweist, da es in seiner Herstellungsphase (genauer während der zurückliegenden Anwachsphase) der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzieht.

Hiermit wird aber so getan, als ob das Holz für eine unendlich lange Zeit in eingebautem Zustand verbleibt, was wiederum der Realität nicht gerecht wird.

GWP	cradle to gate (A1-A3)	Abfallwirtschaft (C3)	Verwertung (D)	Summe (A1-A3, C3, D)
kammergetrocknetes Nadel-schnittholz energetische Verwertung	-735,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	797,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-360,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-298,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.
kammergetrocknetes Nadel-schnittholz stoffliche Verwertung	-735,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	797,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-12,30 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	49,70 kg CO <sub>2</sub> -äqv.
kammergetrocknetes Laub-schnittholz energetische Verwertung	-1.120,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	1.250,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-579,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-449,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.
kammergetrocknetes Laub-schnittholz stoffliche Verwertung	-1.120,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	1.250,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-21,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	109,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.

Abbildung 2.1.10-3: Treibhauspotential von Nadel- und Laubholz bei verschiedenen Entsorgungsszenarien

### 2.1.11 Umweltverträgliches CO<sub>2</sub>-Budget

Letztlich muss man feststellen, dass ein tatsächlich CO<sub>2</sub>-neutrales Gebäude nur dasjenige sein kann, welches nicht gebaut wird. Eine mithilfe von kompensatorischen Maßnahmen erreichte CO<sub>2</sub>-Neutralität ist auch wenn es erstrebenswert sein mag, etwas zu leisten, dass zu Verbesserungen über das eigene Gebäude hinaus beiträgt, letztlich irreführend, da der Begriff suggeriert, dass sich mit derartigen Konzepten die Herausforderungen des Klimawandels einfach lösen lassen. Dabei ist es aber, wie bereits erläutert, keineswegs sichergestellt, dass sich bei einer Ausrichtung des gesamten Gebäudebestands nach diesen Konzepten eine Klimaverträglichkeit für das Gesamtsystem ergibt

Die schlechte Nachricht ist daher zunächst, dass tatsächliche CO<sub>2</sub>-Neutralität gar nicht möglich ist. Die gute ist aber, dass, diese als Ziel aber auch gar nicht erstrebenswert ist. Es ist vielmehr notwendig die weltweiten CO<sub>2</sub> Emissionen auf ein für unseren Planeten verträgliches Maß zu reduzieren. Hierbei geht es letzten Endes um Verteilungsgerechtigkeit der zur Verfügung stehenden Ressourcen ohne dabei die natürlichen Ressourcen unseres Planeten auszu-beuten. Ein solcher Ansatz wird z.B. mit dem von Mathis Wackernagel und William Rees entwickelten Konzept des ökologischen Fußabdrucks (vgl. [wiki: Ökologischer Fußabdruck]) verfolgt. Der ökologische Fußabdruck gibt dabei die für die Ermöglichung eines bestimmten Lebensstils erforderliche Fläche in globalen Hektar pro Person (gha/Person) an. Im Jahr 2011 lag der weltweite ökologische Fußabdruck bei 2,65 gha/Person [NFA, 2015]. Dem ökologischen Fußabdruck auf der Bedarfsseite kann dann auf der Angebotsseite die Biokapazität gegenübergestellt werden. Mit dieser wird die bioproduktive Fläche ebenfalls gemessen in gha/Person angegeben. Im Jahr 2011 lag diese bei 1,72 gha/Person [NFA, 2015]. Subtrahiert man den ökologischen Fußabdruck von der Biokapazität, so ergibt sich ein Biokapazitätsdefizit (negativer Wert) bzw. eine Biokapazitätsreserve (positiver Wert). Für das Jahr 2011 betrug das globale Biokapazitätsdefizit 0,9 gha/Person [NFA, 2015]. Stellt man die beiden Werte ins Verhältnis, so erhält man die Anzahl Planeten, die erforderlich wären, um unseren Lebensstil nachhaltig zu ermöglichen. Im Jahr 2011 wären hierfür 1,5 Planeten erforderlich gewesen [NFA, 2015].

Auf der Bedarfsseite fällt dabei auf, dass die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen für über die Hälfte (1,46 gha/Person  $\hat{=}$  55%) des ökologischen Fußabdrucks verantwortlich sind. Das entspricht bereits ca. 85% der zur Verfügung stehenden Biokapazität.

Region	Income Group	Population (millions)	Cropland Footprint	Grazing Footprint	Forest Product Footprint	Carbon Footprint	Fish Footprint	Built up land	Total Ecological Footprint	Cropland	Grazing land	Forest land	Fishing ground	Built up land	Total biocapacity	Biocapacity (Deficit) or Reserve	Number of Earths required	Number of Countries required
Ecological Footprint in 2011 (global hectares per person)									Biocapacity in 2011 (global hectares per person)									
<b>World</b>		<b>6.998,0</b>	<b>0,56</b>	<b>0,21</b>	<b>0,26</b>	<b>1,46</b>	<b>0,08</b>	<b>0,07</b>	<b>2,65</b>	<b>0,56</b>	<b>0,21</b>	<b>0,73</b>	<b>0,15</b>	<b>0,07</b>	<b>1,72</b>	<b>(0,9)</b>	<b>1,5</b>	
Africa		1009,4	0,4	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	1,2	0,3	0,3	0,4	0,1	0,1	1,2	0,0	0,7	1,0
Asia-Pacific		3.842,4	0,4	0,1	0,2	0,9	0,1	0,1	1,8	0,4	0,1	0,2	0,1	0,1	0,9	(0,3)	1,0	2,0
EU - 27		502,2	0,9	0,2	0,5	2,1	0,1	0,1	4,1	1,0	0,1	0,7	0,2	0,1	2,3	(1,8)	2,4	1,8
Latin America		538,4	0,6	0,5	0,4	0,8	0,1	0,1	2,5	0,7	0,7	3,5	0,3	0,1	5,3	2,8	1,4	0,5
Middle East/Central Asia		398,3	0,6	0,1	0,2	1,4	0,0	0,1	2,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	1,0	(1,5)	1,4	2,5
North America		349,5	1,1	0,3	0,7	4,5	0,1	0,1	6,7	1,6	0,2	2,2	0,6	0,1	4,7	(2,0)	3,3	1,4
Other Europe		238,7	1,0	0,1	0,4	2,2	0,1	0,1	3,9	1,0	0,3	2,9	0,6	0,1	5,0	1,1	2,3	0,8
Low Income (LI)		824,9	0,3	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	1,0	0,3	0,2	0,4	0,1	0,1	1,1	0,2	0,6	0,9
Lower-Middle Income (LM)		2.479,2	0,4	0,0	0,1	0,4	0,1	0,1	1,1	0,4	0,1	0,2	0,1	0,1	0,8	(0,3)	0,6	1,3
Upper-Middle Income (UM)		2.532,5	0,6	0,2	0,3	1,4	0,1	0,1	2,8	0,6	0,3	1,2	0,2	0,1	2,3	(0,3)	1,5	1,1
High Income (HI)		1.100,2	0,9	0,2	0,5	3,1	0,2	0,1	5,1	1,1	0,2	1,1	0,4	0,1	3,0	(2,1)	3,0	1,7

Abbildung 2.1.11-1: globaler Ökologischer Fußabdruck und Biokapazität, Quelle: [NFA, 2015]

Nun ist das Verhältnis aus ökologischem Fußabdruck und Biokapazität zwar sehr anschaulich, da es deutlich macht in welchem Maße wir unseren Planeten überlasten. Um einen Zusammenhang zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Gebäudes herzustellen, ist aber eine Übersetzung in der Form erforderlich, dass man eine Angabe benötigt, welche pro Kopf CO<sub>2</sub>-Emissionen noch zulässig wären, damit der ökologische Fußabdruck die Biokapazität nicht übersteigt und unser Planet somit in der Lage ist unsere CO<sub>2</sub>-Emissionen dauerhaft zu absorbieren. Diesbezüglich kommt das Umweltbundesamt zu der Auffassung, dass eine jährliche CO<sub>2</sub>-Emission von 2,5 t CO<sub>2</sub>-äqv./Person verträglich wären [Umweltbundesamt, 2015]. Der wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderungen hält eine jährliche Emission von 2,7 t CO<sub>2</sub>-äqv./Person für zulässig, um das 2°C Ziel in Bezug auf die Erderwärmung einzuhalten [WBGU, 2009].

### 2.1.12 Alternativen zur Neutralität als Bewertungsmaßstab

Der Charme von ausgeglichenen Bilanzen ist zunächst einmal der einer äußerst positiven Außenwirkung. Dass ein Gebäude mehr Energie erzeugt, als es benötigt klingt erst mal gut. Dies dürfte auch der Grund sein, warum sich der Begriff der CO<sub>2</sub>-Neutralität einer inflationären Popularität erfreut, die in den wenigsten Fällen einer kritischen Überprüfung standhält. Nichts desto trotz ist eine vermeintliche Neutralität als Zielvorgabe auch vor dem Hintergrund einer gleichzeitigen wirtschaftlichen Zielsetzung interessant, da man, wenn man die Neutralität als Vergleichbarkeitsbedingung definiert, ermitteln kann mit welchen Mitteln man dieses Ziel am wirtschaftlichsten erreichen kann. Die Vorteile liegen dabei vor allem in der sehr guten Kommunizierbarkeit. Modelle wie der Passivhaus Standard, welche lediglich eine Obergrenze für einen bestimmten Wert vorgeben (z.B. max. 15 kWh/m<sup>2</sup>a für den Heizwärmebedarf), haben immer das Problem, dass eine Art "Wettbewerb" um den niedrigsten Wert entstehen kann ohne dass dies immer sinnvoll erscheint. Mit mehr finanziellen Mitteln ist dabei immer auch mehr zu erzielen. Der Punkt, ab dem das ggf. nicht mehr sinnvoll ist, ist nicht immer einfach zu bestimmen. Auch gute Gebäude kämpfen somit immer ein Stück weit damit, dass es theoretisch und praktisch bessere gibt. Die Bezahlbarkeit bzw. Wirtschaftlichkeit steht dabei weniger im Fokus.

Insofern wurde im Rahmen des Forschungsprojekt ebenfalls zunächst eine rechnerische CO<sub>2</sub>-Neutralität als Vergleichsmaßstab angesetzt - wohl wissend, dass es sich hierbei um eine nicht unproblematische Hilfskonstruktion handelt. Dieser Ansatz lässt als entscheidenden Vorteil zunächst einmal zu, dass für unterschiedliche Konzepte ermittelt werden kann, mit welchen Kosten sie verbunden sind. Auf dieser Grundlage kann dann verglichen werden, welches der wirtschaftlichste Weg ist.

Ein alternativer Ansatz wäre es, das zulässige Budget als Vergleichsmaßstab vorzugeben und dann mit unterschiedlichen Konzepten zu ermitteln, mit welchem sich das in Bezug auf die Umweltwirkungen beste Gebäude erreichen lässt.

Ein dritter, methodologisch sicherlich am Besten geeigneter Weg wäre es, im Kontext des erläuterten ökologischen Fußabdrucks zu ermitteln, welche CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf in Folge des Wohnens zulässig wären, um sicherzustellen, dass der ökologische Fußabdruck eines Menschen die pro Person zur Verfügung stehende Biokapazität nicht übersteigt. Damit eine derartige Betrachtung auch langfristig Sinn macht, müsste man zusätzlich die erläuterten Kompensationsmaßnahmen (z.B. Überkapazitäten aus PV, energetische Verwertungsszenarien, etc.) ausschließen. Auf Grundlage der Komplexität der Fragestellung und der hierfür nicht ausreichenden Datenlage ist eine solche Definition im Rahmen des Forschungsprojekts allerdings derzeit nicht leistbar. Aus diesem Grund wurde, wie erläutert der Ansatz der rechnerischen CO<sub>2</sub>-Neutralität gewählt.

### 2.1.13 Bewertung der +++Haus Konzepte nach den etablierten Plusenergiestandards

Um das Konzept des +++Hauses mit Gebäuden des EffizienzhausPlus Standards vergleichen zu können, wurde für die einzelnen Varianten eine energetische Bewertung nach den Vorgaben des Standards vorgenommen.

#### EffizienzhausPlus

Netto-Endenergiebilanz der +++Haus Konzepte nach EffizienzhausPlus Standard					
	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Ökonomisch	-25,49 kWh/m <sup>2</sup> a	-23,27 kWh/m <sup>2</sup> a	-23,98 kWh/m <sup>2</sup> a	-14,60 kWh/m <sup>2</sup> a	-20,63 kWh/m <sup>2</sup> a
Ausbalanciert	-22,96 kWh/m <sup>2</sup> a	-20,75 kWh/m <sup>2</sup> a	-21,45 kWh/m <sup>2</sup> a	-12,08 kWh/m <sup>2</sup> a	-18,11 kWh/m <sup>2</sup> a
Ökologisch	-16,85 kWh/m <sup>2</sup> a	-14,63 kWh/m <sup>2</sup> a	-15,34 kWh/m <sup>2</sup> a	-5,96 kWh/m <sup>2</sup> a	-11,99 kWh/m <sup>2</sup> a
Mineralisch	-42,21 kWh/m <sup>2</sup> a	-40,00 kWh/m <sup>2</sup> a	-40,70 kWh/m <sup>2</sup> a	-31,32 kWh/m <sup>2</sup> a	-37,36 kWh/m <sup>2</sup> a

Netto-Primärenergiebilanz der +++haus Konzepte nach EffizienzhausPlus Standard					
	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Ökonomisch	-71,36 kWh/m <sup>2</sup> a	-65,16 kWh/m <sup>2</sup> a	-67,14 kWh/m <sup>2</sup> a	-121,63 kWh/m <sup>2</sup> a	-149,58 kWh/m <sup>2</sup> a
Ausbalanciert	-64,29 kWh/m <sup>2</sup> a	-58,09 kWh/m <sup>2</sup> a	-60,07 kWh/m <sup>2</sup> a	-114,56 kWh/m <sup>2</sup> a	-142,51 kWh/m <sup>2</sup> a
Ökologisch	-47,17 kWh/m <sup>2</sup> a	-40,97 kWh/m <sup>2</sup> a	-42,95 kWh/m <sup>2</sup> a	-97,44 kWh/m <sup>2</sup> a	-125,38 kWh/m <sup>2</sup> a
Mineralisch	-118,19 kWh/m <sup>2</sup> a	-111,99 kWh/m <sup>2</sup> a	-113,97 kWh/m <sup>2</sup> a	-168,46 kWh/m <sup>2</sup> a	-196,40 kWh/m <sup>2</sup> a

Abbildung 2.1.13-1: Primär- und Endenergiebilanz der +++Haus Varianten nach EffizienzhausPlus Standard

**WICHTIG!!!:** Die vermeintlich guten Werte für die weniger nachhaltigen Konstruktions- und Technikvarianten sind im Wesentlichen auf die aus dem Ziel der rechnerischen CO<sub>2</sub>-



Neutralität resultierenden größeren PV-Flächen zurück zu führen. Für die Primärenergiebilanzen ergeben Sie sich darüber hinaus auch aus den insbesondere für die Gutschrift verzerrenden Effekten der Primärenergiefaktoren. Für das Verständnis bzw. die Interpretation der Daten ist es daher wichtig zu berücksichtigen, dass es sich aufgrund der sich zum Teil ergebenden, irrsinnig großen Flächenbedarfe und Kosten, bei diesen vielmehr um theoretische Konzepte handelt, die in der Praxis keinerlei Anwendung finden dürften.

Im Ergebnis erzielen alle Varianten nach EffizienzhausPlus Standard einen Endenergieüberschuss. Auch hier fällt auf, dass die Ergebnisse der Primärenergiebilanz wenig aussagekräftig sind und insbesondere die vermeintlich sehr guten Werte der ökologischen Bauweisen und Technikkonzepte nicht die Realität abbilden sondern vielmehr diese verzerren.

## AktivPlus

Netto-Endenergiebilanz der +++Haus Konzepte nach aktivplus Standard					
	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Ökonomisch	-26,08 kWh/m <sup>2</sup> a	-23,86 kWh/m <sup>2</sup> a	-24,57 kWh/m <sup>2</sup> a	-15,19 kWh/m <sup>2</sup> a	-21,22 kWh/m <sup>2</sup> a
Ausbalanciert	-23,55 kWh/m <sup>2</sup> a	-21,34 kWh/m <sup>2</sup> a	-22,04 kWh/m <sup>2</sup> a	-12,66 kWh/m <sup>2</sup> a	-18,70 kWh/m <sup>2</sup> a
Ökologisch	-17,43 kWh/m <sup>2</sup> a	-15,22 kWh/m <sup>2</sup> a	-15,93 kWh/m <sup>2</sup> a	-6,55 kWh/m <sup>2</sup> a	-12,58 kWh/m <sup>2</sup> a

Abbildung 2.1.13-2: Endenergiebilanz der +++Haus Varianten nach AktivPlus Standard

**WICHTIG!!!:** Die vermeintlich guten Werte für die weniger nachhaltigen Konstruktions- und Technikvarianten sind im Wesentlichen auf die aus dem Ziel der rechnerischen CO<sub>2</sub>-Neutralität resultierenden größeren PV-Flächen zurück zu führen. Für das Verständnis bzw. die Interpretation der Daten ist es daher wichtig zu berücksichtigen, dass es sich aufgrund der sich zum Teil ergebenden, irrsinnig großen Flächenbedarfe und Kosten, bei diesen vielmehr um theoretische Konzepte handelt, die in der Praxis keinerlei Anwendung finden dürften.

Im Ergebnis erzielen alle +++Haus Konzepte eine negative Netto-Endenergiebilanz und entsprechen somit den aktivplus Kriterien entsprechen, bzw. übererfüllen diese.

Für beide Standards lassen sich aus den erzielten Energieüberschüssen der Gebäude zum Beispiel theoretische Fahrleistungen mit E-Fahrzeugen errechnen. Es ergeben sich zwischen den beiden Standards geringfügig abweichende Werte, die auf den unterschiedlichen, zu Grunde liegenden Nutzerstrombedarf zurück zu führen sind.

äqv. Fahrleistung nach EffizienzhausPlus Standard					
	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Ökonomisch	21.664 km/a	19.782 km/a	20.383 km/a	12.411 km/a	17.539 km/a
Ausbalanciert	19.517 km/a	17.635 km/a	18.236 km/a	10.265 km/a	15.393 km/a
Ökologisch	14.318 km/a	12.437 km/a	13.037 km/a	5.066 km/a	10.194 km/a

Abbildung 2.1.13-3: äqv. Fahrleistung der +++Haus Varianten nach aktivplus Standard \*Annahme: Energiebedarf E-Fahrzeug = 20 kWh/100 km, AN=170 m<sup>2</sup>

Auch für die Fahrleistungen gilt, dass sich die höheren Fahrleistungen der unökologischeren Varianten nur aufgrund der aus dem Ziel der rechnerischen CO<sub>2</sub>-Neutralität resultierenden größeren PV-Flächen ergeben. Mit mehr Photovoltaik ist selbstverständlich immer mehr Fahrleistung möglich. Eine Qualität des Gebäudes wird dadurch aber nicht beschrieben. Erneut sei auf die zum Teil irrsinnigen Flächenbedarfe und Kosten der besonders vorteilhaft erscheinenden Konzepte hingewiesen. Solche Darstellungen sind daher, auch wenn sie für Gebäude im PlusenergieStandard gerne erstellt werden, gänzlich ungeeignet die ökologische Qualität eines Gebäudes zu veranschaulichen.

## 2.2 Ergebnisse in Bezug auf die Konstruktion des +++Hauses

Aus den im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Untersuchungen resultiert, dass sich durch ein Gebäude in Holzbauweise gegenüber einem mineralischen Referenzgebäude je nach Bauweise zwischen 60% und 92% der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Herstellung, Rückbau und Entsorgung einsparen lassen. In absoluten Zahlen entspricht dies zwischen 38,5 t CO<sub>2</sub>-äqv. und 58,4 t CO<sub>2</sub>-äqv. an ersparten Emissionen. Der klassische Holzrahmenbau (Variante "Ökonomisch") ist dabei die wirtschaftlichste Bauweise zur Erreichung eines CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäudes. Der Kostenvorteil gegenüber dem mineralischen Massivbau wird sich bei angestrebter rechnerischer CO<sub>2</sub>-Neutralität in der Zukunft mit ökologischer werdender Stromproduktion weiter verstärken. Eine weitere CO<sub>2</sub>-bilanzielle Optimierung des Holzbaus z.B. durch einen gesteigerten Holzeinsatz (Variante "Ausbalanciert" und "Ökologisch") führt zwar zu verringerten CO<sub>2</sub>-Emissionen, ist aber im Vergleich zu einer Kompensation des ökologischen Nachteils über zusätzliche Photovoltaikflächen nicht wirtschaftlich. Dennoch kann es sich aufgrund der in der Regel für Photovoltaik nur begrenzt zur Verfügung stehenden Flächen als sinnvoll erweisen, eine Optimierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz über die Verwendung von Baumaterialien anzustreben. Für das +++Haus ist dies unter der Maßgabe, dass die ökologischste Energieversorgung gewählt wird und die südlich angebauten Balkone realisiert werden, jedoch nicht erforderlich.

Generell handelt es sich sowohl bei der die Steigerung des Holzanteils, als auch bei der Schaffung von Überkapazitäten der PV-Anlage um Kompensationsmaßnahmen, die aus diesem Grund nur so lange neutralisierend funktionieren, wie die allgemeine Stromproduktion unökologischer ist, als die Produktion von Photovoltaikstrom bzw. durch die energetische Verwertung von Holz andere, weniger ökologische Energieträger verdrängt werden können. Die Steigerung des Holzanteils bzw. der absoluten Holzmengen im Gebäude geht aufgrund des erhöhten Materialbedarfs aber mit einer geringen Lastverschiebung zu Ungunsten des Überdüngungspotentials (EP) und des Versauerungspotentials (AP) einher. Die untersuchten Holzbauweisen schneiden aber in allen Wirkungskategorien deutlich besser, als das massive Referenzgebäude ab. Für die Kompensation mittels Photovoltaik kann für die übrigen Wirkungskategorien aufgrund nicht bekannter Daten keine Aussage gemacht werden. Auch führt ein

übermäßig gesteigerter Holzkonsum ab einem gewissen Punkt dazu, dass der Bedarf nicht mehr aus nachhaltiger Forstwirtschaft gedeckt werden kann. Da dies aber eine Voraussetzung für die vorgenommene ökologische Bewertung von Holz ist, ist eine Kompensation der CO<sub>2</sub>-Bilanz über gesteigerte Holzanteile nur ein begrenzt sinnvoller Weg, der sicherlich nicht dazu geeignet ist, mögliche Optimierungen in anderen Bereichen zu ersetzen.

Zur langfristigen Ermöglichung von umweltverträglichen Gebäuden wird es daher unabdingbar sein, auch eine quantitative Begrenzung vorzunehmen und somit Suffizienzstrategien umzusetzen. Für eine detailliertere Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf die Konstruktion sei insbesondere auf die Kapitel 7.1 Materialien und Bauteile und 7.2.1 Bauweise verwiesen.

### 2.3 Ergebnisse für die Energieversorgung des +++Hauses

Für die Energieversorgung des +++Hauses lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen: Durch die Verwendung von erneuerbaren Energiequellen lassen sich ca. 75 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung des Gebäudes einsparen. In absoluten Zahlen entspricht dies ca. 89,4 t CO<sub>2</sub>-Äqv. an ersparten Emissionen. Dabei sind die Konzepte mit erneuerbaren Energiequellen, wenn als Vergleichsmaßstab eine rechnerische CO<sub>2</sub>-Neutralität der Gebäude angelegt wird, auch in den Investitionskosten wirtschaftlicher, als die Konzepte mit fossilen Energieträgern. Es ist somit auch aus wirtschaftlicher Sicht deutlich sinnvoller die CO<sub>2</sub> Emissionen der Nutzungsphase tatsächlich zu senken, als diese über zusätzliche Photovoltaik Kapazitäten zu kompensieren. Dieser Zusammenhang wird durch eine ökologischer werdende Stromproduktion in der Zukunft weiter verstärkt, da dann zur Kompensation immer größere Photovoltaikkapazitäten erforderlich werden, die somit größere Investitionskosten erzeugen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die heute zur Kompensation der CO<sub>2</sub>-Bilanz erforderliche Photovoltaik-Kapazität für die Konzepte mit erneuerbaren Energiequellen gegenüber denen mit fossilen Energieträgern bereits um 4-5 kWp niedriger liegt. Dies entspricht einem Flächenminderbedarf von ca. 24-30 m<sup>2</sup>.

Für eine detailliertere Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf die Energieversorgung sei insbesondere auf das Kapitel 7.2.2 Energieversorgung verwiesen.

### 2.4 Abhängigkeiten zwischen thermischer Hülle und Energieversorgung

Für alle Bauteile, die einen Einfluss auf die Qualität der thermischen Hülle haben, ergibt sich, dass die Frage nach deren Sinnhaftigkeit aus wirtschaftlicher und CO<sub>2</sub>-bilanzieller Sicht nur im Zusammenhang mit dem gewählten System der Energieversorgung beantwortet werden kann. Dies liegt darin begründet, dass der durch die Verschlechterung oder Verbesserung der Hülle erhöhte oder gesenkte Transmissionswärmeverluste und damit erhöhte oder gesenkte Energiebedarf sich abhängig von der Energieversorgung unterschiedlich stark auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen auswirkt. Der Einfluss aus den veränderten Transmissionswärmeverlusten ist daher den unterschiedlichen Treibhauspotentialen der Konstruktionsvarianten gegenüber zu stellen und in seiner Gesamtheit zu bewerten.

So hängt z.B. die Frage was für eine Art von Ständer sich am positivsten auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirkt massiv vom gewählten Technikkonzept ab. Für Technikkonzepte, die auf fossilen Energieträgern basieren, wirkt sich ein Holz-Stegträger am positivsten aus. Für Technikkonzepte, die erneuerbare Energien nutzen, wirken sich hingegen Ständer aus 60 mm Balkenschichtholz oder 80 mm KVH am positivsten aus.

Ebenso ist es vom gewählten Technikkonzept abhängig, ob die Realisierung eines transparenten Fassadenmaterials aus wirtschaftlicher und CO<sub>2</sub>-bilanzieller Sicht sinnvoll ist. Für Tech-

nikkonzepte, die auf erneuerbare Energiequellen setzen ist eine transmissiv genutzte, solaraktive Fassade aufgrund der vergleichsweise schlechten GWP Werte des Polycarbonats hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Bilanz nicht sinnvoll. Die Einsparungen fallen geringer aus, als die Mehremissionen für Herstellung, Unterhalt und Entsorgung gegenüber einer Putz- oder Lärchenholzschaalung. Für Technikkonzepte, die auf fossile Energieträger setzen, ist eine transmissiv genutzte, solaraktive Fassade allerdings sehr interessant. Am Beispiel des +++Hauses können so ca. 7,4 t CO<sub>2</sub>-Äqv. eingespart werden. Gleichzeitig können durch eine solaraktive Fassade im Vergleich zu einer Putzfassade je nach Technikkonzept aber z.B. auch zwischen 1,5 m<sup>2</sup> und 4,3 m<sup>2</sup> Photovoltaikfläche eingespart werden.

Des Weiteren besteht dieser Zusammenhang auch in Bezug auf die wirtschaftliche Dämmstärke des Gebäudes. Je ökologischer die Energieerzeugung des Gebäudes ist, desto geringer ist das wirtschaftliche Optimum für die Dämmstärke. Für Technikkonzepte mit fossilen Energieträgern liegt das wirtschaftliche Optimum der Dämmstärke zwischen 0,15 und 0,18 W/m<sup>2</sup>K abhängig vom gewählten Dämmstoff. Für Technikkonzepte auf Basis von erneuerbaren Energiequellen liegt das wirtschaftliche Optimum der Dämmstärke hingegen zwischen 0,19 und 0,25 W/m<sup>2</sup>K ebenfalls abhängig vom gewählten Dämmstoff. Auch hierfür gilt, dass die Relevanz einer Optimierung der Dämmstärke mit besser werdender CO<sub>2</sub>-Bilanz des deutschen Strommixes in Zukunft zunimmt und sich die wirtschaftlichen Optima allgemein in Richtung höherer Dämmstärken verschieben werden.

Für eine detailliertere Diskussion der genannten Abhängigkeiten sei insbesondere auf die Kapitel 7.3 Methoden zur Erreichung einer ausgeglichene CO<sub>2</sub>-Bilanz, 7.1.3 Ständerwerk, 7.1.5 solaraktive Fassadenbekleidung, 7.1.6 Fensterqualität und 7.1.7 Optimierung der Außenwanddämmung verwiesen.

### 3 Fazit

*Wir müssen neue konsistente Wege gehen, wir werden dabei mit unseren Mitteln und Möglichkeiten effizient haushalten, und am Ende müssen wir uns zufrieden geben.*

[Huber, 2000, S.14]

Neben diesem Zitat, das sich im Rahmen der Projektbearbeitung auf einer konzeptionellen Ebene als sehr zutreffend heraus gestellt hat, lassen sich die Ergebnisse des Forschungsprojekts auch auf einer sehr praxisbezogenen Ebene in folgender Kernaussage subsumieren:

**Die zur Erreichung von ganzheitlich umweltverträglichen Gebäudekonzepten erforderlichen Schritte, lassen sich in Ihrer Wichtigkeit sehr eindeutig ordnen. Im Planungsprozess empfiehlt es sich daher diese mit der folgenden Priorität zu berücksichtigen:**

- 1. Aufbauend auf einem heute üblichen hohen Dämmstandard ist als erster wichtigster Schritt ein möglichst emissionsarmes Technikkonzept zu wählen und so die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzungsphase zu reduzieren.**
- 2. Hiernach ist es von entscheidender Bedeutung durch Vermeidung von emissionsintensiven Baustoffen auch die aus der Konstruktion resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen zu minimieren.**
- 3. Als letzter Schritt ist es erforderlich durch weitergehende Optimierungen und/oder Kompensationsmaßnahmen die Gesamtemissionen des Gebäudes auf ein umweltverträgliches Niveau abzusenken.**

In Bezug auf den ersten Schritt hat sich für das ++Haus herausgestellt, dass Technikkonzepte, die für die Wärmeerzeugung auf Wärmepumpen zurückgreifen einen zudem hinsichtlich der Investitionskosten sehr wirtschaftlichen Weg darstellen. Diese Konzepte (Variante 1a, 1b und 2) sind in der Lage die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gesamtgebäudes um einen Betrag in einer Größenordnung von ca. 90 t CO<sub>2</sub>-äqv. zu senken.

Hinsichtlich der Bauweise hat sich gezeigt, dass es aus wirtschaftlicher Sicht sinnfälliger ist, sich von einer mineralischen Bauweise zu lösen und das Gebäude z.B. in der heute üblichen Holzrahmenbauweise zu errichten. Hierüber lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebäudes um weitere ca. 40 t CO<sub>2</sub>-äqv. reduzieren.

Über diese beiden relativ einfachen Schritte, lässt sich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Gebäudes insgesamt von 181,6 t CO<sub>2</sub>-äqv. (Variante 3/mineralisch) auf 53,6 t CO<sub>2</sub>-äqv. (Variante 1b/ökologisch) erst danach ist es wie im 3. Schritt beschrieben sinnvoll darüber nachzudenken, ob und wenn ja in welcher Form weitergehende Optimierungen im Hinblick auf die Konstruktion, das Technikkonzept, die Qualität der thermischen Hülle, die Gebäudedimension oder Kompensationsmaßnahmen sinnfälliger sind, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf ein umweltverträgliches Niveau zu bringen.

Legt man zu Grunde, dass es das Ziel sein muss unsere pro Kopf CO<sub>2</sub>-Emissionen von heute ca. 10 t CO<sub>2</sub>-äqv. pro Person und Jahr ungefähr um 75% auf ca. 2,5 t CO<sub>2</sub>-äqv. pro Person und

Jahr gesenkt werden müssten um einigermaßen umweltverträglich zu sein, so stellt man für das Wohnen fest, dass wenn diesen Faktor vereinfacht für alle Emissionsbereiche einheitlich annimmt, dass man mit dem +++Haus und den oben genannten Schritten diesem Ziel bereits sehr nahe kommt. Die genannten Einsparungen liegen in einer Größenordnung von ca. 70%.

Für eine ehrliche Betrachtung wäre es aber selbstverständlich notwendig genauer zu untersuchen, wie viel Emissionen pro Person aktuell und perspektivisch durch das Wohnen überhaupt verursacht werden. Einfluss hierauf haben so vielfältige Faktoren wie die übliche Bauweise, die durchschnittliche, tatsächliche Nutzungsdauer von Gebäuden, der Flächenbedarf pro Kopf, etc.

CO <sub>2</sub> -Fußabdruck ohne PV-Kompensation	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Gebäude "Ökonomisch"	58,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	53,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	56,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	143,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	125,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Gebäude "Ausbalanciert"	52,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	47,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	50,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	137,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	120,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Gebäude "Ökologisch"	38,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	33,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	36,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	123,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	105,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Gebäude mineralisch	97,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	92,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	94,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	181,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	164,4 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 2.1.13-1: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der +++Haus Varianten über einen Nutzungszeitraum von 50 Jahre, absolut ohne PV-Kompensationsmaßnahmen

CO <sub>2</sub> -Fußabdruck pro Person und Jahr* ohne PV-Kompensation	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Gebäude "Ökonomisch"	0,29 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,27 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,28 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,72 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,63 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a
Gebäude "Ausbalanciert"	0,26 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,24 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,25 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,69 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,60 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a
Gebäude "Ökologisch"	0,19 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,17 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,62 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,53 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a
Gebäude mineralisch	0,49 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,46 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,47 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,91 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,82 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a

Abbildung 2.1.13-2: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der +++Haus Varianten pro Person und Jahr ohne PV-Kompensationsmaßnahmen \*Belegungsdichte 4 Bewohner, Betrachtungszeitraum 50 Jahre

CO <sub>2</sub> -Fußabdruck pro Person und Jahr* ohne PV-Kompensation	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Gebäude "Ökonomisch"	0,42 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,38 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,40 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	1,02 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,90 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a
Gebäude "Ausbalanciert"	0,38 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,34 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,36 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,98 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,86 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a
Gebäude "Ökologisch"	0,28 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,24 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,26 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,88 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,76 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a
Gebäude mineralisch	0,69 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,65 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	0,68 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	1,30 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a	1,17 t CO <sub>2</sub> -Äqv./Person*a

Abbildung 2.1.13-3: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der +++Haus Varianten pro Person und Jahr ohne PV-Kompensationsmaßnahmen \*durchschnittliche Belegungsdichte 2,8 Bewohner (50 Jahre 2 Personen + 2 Personen 20 Jahre), Betrachtungszeitraum 50 Jahre

Anteil tatsächlicher CO <sub>2</sub> -Fußabdruck für Wohnen pro Person und Jahr an umweltverträglichem CO <sub>2</sub> -Fußabdruck gesamt*	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Gebäude "Ökonomisch"	16,8%	15,2%	16,0%	40,8%	36,0%
Gebäude "Ausbalanciert"	15,2%	13,6%	14,4%	39,2%	34,4%
Gebäude "Ökologisch"	11,2%	9,6%	10,4%	35,2%	30,4%
Gebäude mineralisch	27,6%	26,0%	27,2%	52,0%	46,8%

Abbildung 2.1.13-4: Anteil des CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Bewohners einer +++Haus Variante (für Wohnen) an einem theoretischen, umweltverträglichen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (personen- und jahresbezogen)

Dass dieses Ergebnis bereits so positiv ausfällt hat dabei sicherlich entscheidend damit zu tun, dass mit dem Projektansatz ein wesentlicher Aspekt vorweggenommen wurde, indem im Entwurf bereits ein möglichst kleines, flächeneffizientes Gebäudes konzipiert wurde. Auch hier zeigt sich erneut, dass es eben von zentraler Bedeutung ist, dass die Frage nach dem verträglichen Maß nicht unbeantwortet bleibt und dadurch alle vorangegangenen Anstrengungen im Zweifel zu Nichte gemacht werden. Denn generell gilt, dass Gebäude im Endeffekt niemals CO<sub>2</sub>-neutral sein können, weshalb Ihr Einfluss auf die Umwelt so beschränkt werden muss, dass unser Planet den Effekt nachhaltig absorbieren kann. Mit einem Gebäude von 200 m<sup>2</sup> Wohnfläche, dass von nur einer Person alleine bewohnt wird, kann dies, wie man aus den Ergebnissen des +++Hauses erahnen kann jedoch selbst dann nicht gelingen, wenn man es vollständig und massiv aus Holz, sowie mit einer gigantischen Überkapazität an Photovoltaik realisieren würde. Aus diesem Grund ist es dringend erforderlich von flächenbezogenen Betrachtungen Abstand zu nehmen und am Beispiel des Wohnungsbaus zu einer Auseinandersetzung mit je Person (Bewohner) bilanzierten Emissionen zu gelangen.

Schaut man sich andererseits an, dass der sehr flächeneffiziente Entwurf des +++Hauses als mineralisches Gebäude mit einer Gas-Brennwerttherme (Var. Mineralisch/3) bei einer realistischen durchschnittlichen Belegungsdichte von 2,8 Personen bereits zu einer Emission von ca. 1,3 t CO<sub>2</sub>-äqv./Person\*Jahr führt, so sieht man allerdings auch, dass eine reine Beschränkung in der Größe eben auch nicht ausreicht ein für unseren Planeten verträgliches Niveau zu

erreichen. 1,3 t CO<sub>2</sub>-äqv. entsprechen schließlich bereits 52% von dem, was allgemein als verträglich angesehen wird. Das +++Haus in der Bauweise Ökonomisch und der Technik Variante 1b schafft es die Emissionen je Bewohner immerhin auf 0,38 t CO<sub>2</sub>-äqv. und somit ca. 15% dessen was als verträglich angesehen wird abzusenken.

Abschließend sei noch angemerkt, dass es nur auf Basis von einer Bewertung nach Umweltwirkungen möglich war, zu dieser Erkenntnis zu gelangen. Noch im Wettbewerb des dem Projekt zu Grunde liegenden Entwurfs, der sehr stark von primärenergetischen Bewertungskriterien bestimmt war haben die Verfasser selber die Haltung bekommen, dass es aus wirtschaftlichen Überlegungen sinnvoll sei, die Wärmeversorgung bei einer vergleichsweise hochwertigen Gebäudehülle mit einer kleinen Gas-Brennwerttherme zu realisieren. Die Erkenntnis, dass sich dies für die Umweltverträglichkeit jedoch als Irrweg erweist, hat sich erst im Rahmen der Projektbearbeitung zunehmend durchgesetzt und ist letztlich erst mit einer CO<sub>2</sub>-bilanziellen Bewertung vollständig sichtbar geworden.



## 4 Ziele

Im Förderantrag für das +++Haus wurde neben konkreten wirtschaftlichen und energetischen Zielvorgaben bereits eine erste Konkretisierung inhaltlicher Themenschwerpunkte in Anlehnung an das System zur Bewertung von Nachhaltigkeit des Bundes BNB [BMVBS, 2013-I] vorgenommen. Im Zuge der Projektbearbeitung wurde die Definition der Ziele des +++Hauses in Anlehnung an die [DIN EN 15643-1:2010-12] strukturiert.

### 4.1 Ökologische Qualität - Umwelt

#### Wirkungen auf die globale Umwelt

Die Wichtigkeit dieses Themenbereichs hat im Rahmen der Projektbearbeitung deutlich an Relevanz gewonnen. Die ökobilanzielle Betrachtung hat sich wie erläutert im Gegensatz zu den energetischen Ansätzen für die Sicherstellung des übergeordneten Projektziels als wesentlich geeigneter herausgestellt. Wie erläutert wurde die rechnerische CO<sub>2</sub>-Neutralität für das +++Haus als Vergleichsmaßstab definiert.

#### Ressourceninanspruchnahme

Der Aspekt des sparsamen Ressourceneinsatzes wird im Wesentlichen dadurch gewährleistet, dass neben der Nutzungsphase auch die Herstellungs- Rückbau- und Entsorgungsphase des Gebäudes Teil der Bewertungsgrundlage ist. Darüber hinaus findet sich dieser Aspekt darin wieder, dass eine Optimierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz über einen gesteigerten Holzeinsatz kritisch beleuchtet wird. Der Aspekt der gemessen am durchschnittlichen Einfamilienhaus hohen Flächeneffizienz war bereits in dem Entwurf, welcher dem Forschungsantrag zu Grunde lag, implementiert. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde daher darauf geachtet, dass diese Qualität aufrechterhalten wurde. Darüber hinaus wurden insbesondere im Kontext des Arbeitspakets Aussenwand Möglichkeiten analysiert, die nutzbare Fläche des Gebäudes bei gleichbleibender Größe der wärmeübertragenden Aussenoberflächen zu steigern.

### 4.2 Soziale Qualität - Mensch/Gesundheit

#### Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit

Aufgrund der Tatsache, dass es sich durch die aus ökobilanzieller Sicht gebotene Optimierung der Konstruktion in Bezug auf die potentiell schadstoffemittierenden Flächen im Wesentlichen um Holzkonstruktionen handelt, wurde das Thema im Wesentlichen für Holzwerkstoffe untersucht.

#### Gestaltungsqualität

Auch unter diesem Aspekt war es die wesentliche Anforderung, die gestalterischen Qualitäten aus dem zugrunde liegenden Entwurf zu wahren. Im Rahmen des Arbeitspakets Außenwand wurden des Weiteren Konstruktionen untersucht, die neben der beschriebenen flächenmaximierenden Wirkung auch einen funktional-gestalterischen Mehrwert bieten.

## **Funktionalität**

Die Themen Barrierefreiheit, Flächeneffizienz, Umnutzungsfähigkeit und Anpassbarkeit waren bereits zentrale Entwurfsgedanken in der Erarbeitung des zugrunde liegenden Entwurfs. Diese Qualitäten galt es daher im Rahmen der Projektbearbeitung zu erhalten.

### **4.3 Ökonomische Qualität - finanzielle Mittel**

#### **Lebenszykluskosten**

Dieser Aspekt wurde zum einen in der Form berücksichtigt, als dass bei der Auswahl von sichtbar verbleibenden Bauteilen und Oberflächen berücksichtigt wurde, dass diese nach Möglichkeit ohne nennenswerten Pflege- und Unterhaltsaufwand dauerhaft ansehnlich bleiben bzw. ein gutes Alterungsverhalten aufweisen. Über die Definition des unter dem Punkt ökologische Qualität genannten CO<sub>2</sub>-bilanziellen Vergleichsmaßstab ist es möglich, aufgrund der im Punkte Treibhauspotential gewährleisteten Vergleichbarkeit, die ökologische Fragestellung in eine ökonomische zu überführen und zu ermitteln, auf welchem Weg sich das gesetzte ökologische Ziel am wirtschaftlichsten erreichen lässt.

#### **Wertentwicklung**

Bei der Bauteilfügung wurde Wert darauf gelegt, dass Verbindungen einfach gelöst werden können, sodass eine möglichst zerstörungsfreie Anpassung ermöglicht wird. Dies stellt sicher, dass sowohl für Änderungen anfallende Kosten als auch der damit verbundene Ressourceneinsatz minimiert werden kann.

### **4.4 Technische Qualität - Objekt**

#### **Qualität der technischen Ausführung**

Die wesentlichen Aspekte dieses Themenschwerpunkts werden indirekt bereits durch die unter den anderen Punkten bereits genannten Themen: Alterungsfähigkeit von Materialien, Unterhaltsaufwand, Trennbarkeit von Baustoff- und Bauteilverbindungen sowie Verwertbarkeit von Baustoffen und Bauteilen adressiert.

## 5 Strategien

Um die angestrebte, möglichst hohe Übertragbarkeit der grundlegenden Ergebnisse und Strategien zu ermöglichen, wurde zunächst eine Einordnung auf einer konzeptionellen Ebene (Metastrategien) vorgenommen. Hierzu diente das im deutschsprachigen Kontext maßgeblich von [Huber, 2000] geprägte Konzept von drei grundsätzlichen Nachhaltigkeitswegen: Effizienz, Konsistenz und Suffizienz. Im Folgenden soll auf diese drei Metastrategien kurz eingegangen werden, um zu verdeutlichen, wie diese im Kontext des +++Haus Konzepts verstanden wurden. Des Weiteren erfolgte eine thematische Einordnung der konkreten Effizienz-, Suffizienz und Konsistenzstrategien in eine zweidimensionale Matrix aus Maßstabsebene (Gebäude, Raum, Bauteil, Baustoff) und Lebenszyklusphase (Herstellung/Errichtung, Nutzung, Entsorgung - vgl. [DIN EN 15804:2012-04, Bild 1]). Dies geschah zu Projektbeginn vor allem mit der Absicht möglichst sicherzustellen, dass keine wichtigen Optimierungspotentiale übersehen werden.

### 5.1 Effizienz

Bei dieser Strategie handelt es sich, wie [Otto, 2007] anschaulich nachweist um die führende, mit der Nachhaltigkeitsdiskussion verbundene Nachhaltigkeitsstrategie. Sie beschreibt einen technisch dominierten, quantitativen Lösungsansatz, der sich mit der Optimierung des Ressourcenverbrauchs eines Produkts pro Funktionseinheit beschäftigt (vgl. [Huber, 2000] und [wiki: Ökologieorientierte Betriebswirtschaftslehre]). So wird ein im Sinne von Effizienz optimiertes Einfamilienhaus beispielsweise möglichst wenig Heizenergie pro m<sup>2</sup> Wohnfläche verbrauchen. Die absolute Größe des Gebäudes spielt in dieser Betrachtung keine Rolle. Die Wirksamkeit von Effizienzstrategien stößt daher dort an Ihre Grenzen, wo Einsparungen in Folge gesteigerter Effizienz dazu genutzt werden, den Bedarf zu erhöhen, was in der Literatur in der Regel als Reboundeffekt beschrieben wird. Die Tatsache, dass im Zuge der Nachhaltigkeitsdebatte der letzten Jahrzehnte insbesondere Effizienzstrategien aufgegriffen wurden, lässt sich unter anderem darauf zurückführen, dass der technologieorientierte Ansatz zur Erhöhung der Ressourceneffizienz zumindest konzeptionell auf einer Linie mit ökonomischen Optimierungsprozessen liegt und sich die Einsparung von Ressourcen in vielen Fällen nicht nur ökologisch, sondern eben auch ökonomisch auszahlen [Huber, 2000, S. 2ff].

EFFIZIENZ	Herstellung / Errichtung	Nutzung	Entsorgung
Gebäude	Vereinfachung der Gebäudegeometrie	Optimierung A/V-Verhältnis	
Raum	Erhöhung des Vorfertigungsgrads		
Bauteil	Verwendung von standardisierten Bauteilen Verwendung von Leichtbauweisen	Verbesserung der thermischen Qualität der Außenhülle Einbau optimierter Heizungssysteme lebenserwartungsgerechte Kombination von Bauteilschichten	Verwendung von standardisierten Bauteilen Verwendung von Leichtbauweisen
Baustoff	Vermeidung von ressourcenintensiven Baustoffen	Verwendung langlebiger Baustoffe	

Abbildung 2.1.13-1: Effizienzstrategien

## 5.2 Konsistenz

Im Gegensatz hierzu verfolgen Konsistenzstrategien einen qualitativen Ansatz und zielen auf das Schließen von Stoffkreisläufen ab. Ein unter Konsistenzaspekten optimiertes Gebäude wird somit ausschließlich aus regenerativen Energiequellen beheizt. Die hierfür benötigte Energiemenge, sowie die Größe der beheizten Fläche spielt keine Rolle.

KONSISTENZ	Herstellung / Errichtung	Nutzung	Entsorgung
Gebäude		Verzicht auf versiegelte Flächen Realisierung von begrünten Dachflächen	
Raum		Nutzungsflexibilität von Grundrissen	
Bauteil	Verwendung von konstruktiven anstelle chemischer Lösungen (z.B. Holzschutz)	reversibler Einbau von Technikkomponenten	reversible Verbindungen von Bauteilen Wiederverwertbarkeit von Bauteilen Recyclinggerechte Planung
Baustoff	Verwendung von Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (Substitutionsrohstoffe) Verwendung von Rohstoffen aus geschlossenen technischen Stoffkreisläufen	Verwendung gesundheitlich unbedenklicher Baustoffe	reversible Verbindung von Bauteilschichten

Abbildung 2.1.13-1: Konsistenzstrategien

[Huber, 2000] argumentiert, dass der Konsistenzansatz aus systemischen Gründen den Effizienz- und auch den nachfolgend beschriebenen Suffizienzstrategien überlegen ist und Entwicklungsanstrengungen daher auf diesen Ansatz fokussiert werden sollten. Die Argumentation ist allerdings in den zeitlichen Kontext des Jahres 2000 einzuordnen und wurde nach Auf-

fassung der Verfasser sicherlich auch deshalb so extrem formuliert, um die zum damaligen Zeitpunkt starke Fokussierung auf reine Effizienzstrategien herauszufordern und in Frage zu stellen. [Huber, 2000] ist bei aller Berechtigung der Forderung nach einer Fokussierung auf konsistente Stoffkreisläufe entgegen zuhalten, dass auch geschlossene Stoffkreisläufe quantitativ beschränkt sind und somit Effizienz- und Suffizienzstrategien niemals vollständig obsolet werden. Am Beispiel der Forst- und Holzwirtschaft lässt sich dies anschaulich darlegen. So bietet Holz als nachwachsender Baustoff bei entsprechender Gestaltung des Materiallebenszyklus das Potential eines geschlossenen Stoffkreislaufs. Die quantitative Beschränkung liegt jedoch dort, wo die Holznachfrage nicht mehr aus nachhaltiger Holzwirtschaft gedeckt werden kann. Hinzu kommt, dass sich Stoff- und Energiekreisläufe zumindest momentan in vielen Fällen noch nicht absolut verlustfrei schließen lassen. Auch wenn das Argument Hubers nachvollzogen werden kann, dass Effizienzsteigerungen den Druck zur Veränderung der Konsistenz von Kreisläufen senken, so erscheint es den Verfassern in der umgekehrten Betrachtung doch nicht zielführend mögliche Effizienzsteigerungen außer Acht zu lassen, um gewissermaßen den Entwicklungsdruck hinsichtlich Konsistenzsteigerungen zu erhöhen.

Ein weiterer Aspekt ist der, dass konsistente Lösungen aktuell oftmals noch mit ökonomischen Nachteilen verbunden sind. Dies spiegelt eine der Kernthesen des Forschungsprojekts wieder, dass Nachhaltigkeit eben auch bezahlbar sein muss (vgl. 2 Zusammenfassung). Hier ermöglichen nach Auffassung der Verfasser gerade Effizienz- und Suffizienzstrategien erst die Realisierung von Konsistenzstrategien.

### 5.3 Suffizienz

Bei der Suffizienz handelt es sich um einen weiteren quantitativen Lösungsansatz, der Ressourceneinsparungen allerdings nicht über Effizienzsteigerungen versucht zu realisieren, sondern am Bedarf - also am Nutzungs- bzw. Konsumverhalten - ansetzt und diesen versucht zu reduzieren. Ein ausschließlich unter Suffizienzaspekten optimiertes Einfamilienhaus (bzw. dessen beheizte Wohnfläche) ist daher möglichst klein. Der Heizwärmebedarf pro m<sup>2</sup> Wohnfläche spielt in dieser Betrachtung keine direkte Rolle. Dass beide Konzepte quantitativer Natur sind, kann man zum Beispiel auch daran erkennen, dass man ein solches Haus in gewisser Hinsicht auch als besonders flächeneffizient bezeichnen könnte. Suffizienzstrategien wird in der Literatur vielfach eine geringe Wirksamkeit unterstellt, was zum Beispiel mit einem geringen sozio-kulturellen Anschluss- und Resonanzpotential begründet wird [Huber, 2000, S.12]. In einer ausschließlich suffizienzgetriebenen Betrachtung mag dies nachvollziehbar erscheinen. Allerdings ist es in Kombination mit den anderen beiden Strategien gerade deshalb so wichtig auch über Suffizienz nachzudenken, da ansonsten die Gefahr droht, dass die Anstrengungen von Effizienz und Konsistenz zu einem wesentlichen Teil darüber zunichte gemacht werden, als dass sie zu einem gesteigerten Konsumverhalten verleiten können.

SUFFIZIENZ	Herstellung / Errichtung	Nutzung	Entsorgung
<b>Gebäude</b>		Verzicht auf ein Kellergeschoss	
		Reduktion der Gebäudegröße	
		Reduktion der Gebäudegrundfläche (Landschaftsverbrauch)	
<b>Raum</b>		Reduktion des Ausbaustandards	
<b>Bauteil</b>		Reduktion des Technisierungsgrads	
<b>Baustoff</b>		Reduktion von aufwendigen Bauteilanschlüssen	

Abbildung 2.1.13-1: Suffizienzstrategien

So lässt sich abschließen subsumieren, dass auch wenn konsistente Kreisläufe bei der Entwicklung des +++Haus Konzepts im Fokus stehen, dennoch alle drei Nachhaltigkeitsansätze Effizienz, Suffizienz und Konsistenz berücksichtigt werden. Letztlich schließt auch [Huber, 2000] bereits mit dem Satz:

*Wir müssen neue konsistente Wege gehen, wir werden dabei mit unseren Mitteln und Möglichkeiten effizient haushalten, und am Ende müssen wir uns zufrieden geben.*

[Huber, 2000, S.14]

## 6 Projektbeteiligte

### **Bewilligungsempfänger**

#### **Architektur Contor Müller Schlüter**

ACMS Architekten GmbH  
Hofaue 55, 42103 Wuppertal

Prof., Dipl.-Ing. Christian Schlüter, Architekt BDA

Projektleitung: MSc Björn Fries, Architekt

### **Kooperationspartner**

#### **Technische Gebäudeausrüstung und Energieberatung:**

##### **Gertec GmbH Ingenieurgesellschaft**

Martin-Kremmer-Str. 12, 45327 Essen

Prof., Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jörg Probst

Projektbearbeitung: MSc Heli Kasa

#### **Holzbau:**

##### **Terhalle Holzbau GmbH**

Solmsstraße 46, 48683 Ahaus-Ottenstein

Projektbearbeitung: Siegfried Rennar

### **weitere Partner**

#### **Tragwerksplanung:**

##### **Ingenieurbüro Bild**

Beratende Ingenieure VBI für Hoch-, Industrie- und Brückenbau

Emster Straße 25, 58093 Hagen

Dr.-Ing. Stefan Bild

Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. Michael Schmidt

#### **thermische Simulation:**

##### **IPJ Ingenieurbüro P. Jung GmbH**

Lüderichstraße 2/4, 51105 Köln

Dipl.-Ing. Patrick Jung

Projektbearbeitung: David Mirbach

**Gebäudetechnik:**

**Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG**

Bahnhofstr. 15, 42897 Remscheid (Lennep)

Christian Sieg

Jan Christopher Müller

Timo Wolter

**Baustoffe:**

**Binderholz Bausysteme GmbH**

Solvay-Halvic-Straße 46, 5400 Hallein, Österreich

Thilo Schubert

**Informations- und Demonstrationszentrum Holz e.V.**

Carlsauestr. 91a, 59939 Olsberg-Steinhelle

Johannes-Ulrich Blecke

**Lignatur AG**

Herisauerstrasse 30, 9104 Waldstatt, Schweiz

Ralph Schläpfer

Andreas Brencke

**Metsä Wood Deutschland GmbH**

Louis-Krages-Str. 30, 28237 Bremen

Maria Schmitt

**Pavatex GmbH**

Wangener Straße 58, 88299 Leutkirch

Olaf Altwulf

**RODECA GmbH**

Freiherr-vom-Stein-Straße 165, 45473 Mülheim an der Ruhr

Jenny Peters

Nikolas Jansen

**Wolf Bavaria GmbH**

Gutenbergstr. 8, 91560 Heilsbronn

Marco Ricchiuto



**Fertignasszellen:**

**Stengel GmbH**

Max-Eyth-Str. 15, 73479 Ellwangen

Thomas Wiedemann

## 7 Ergebnisdiskussion

### 7.1 Ökologische Zielsetzung für das +++Haus

#### 7.1.1 Ableitung eines Vergleichbarkeitskriteriums und Abgrenzung zu anderen Standards

Auf Grundlage der im Kapitel 3 formulierten, übergeordneten Ziele musste für das Forschungsvorhaben zunächst ein Kriterium definiert werden, anhand dessen die unterschiedlichen Lösungsansätze miteinander verglichen werden können. Schaut man sich andere energetische Standards an, so fällt auf, dass sich diese quantitativ auf die Nutzungsphase beschränken und dabei mittels einer energetischen Betrachtungsweise vorgehen. Schon bei der Frage, welche Art von Energie im Fokus steht, divergiert dabei stark.

#### Passivhaus

Unter einem Passivhaus wird in der Regel ein Gebäude verstanden, dass in Folge einer hochgradig gedämmten Gebäudehülle, minimierter Wärmebrücken und einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, ohne eine klassische Gebäudeheizung auskommt. In Deutschland wurde vom Passivhaus Institut in Darmstadt der PHPP-Standard (Passivhaus Projektierungs Paket) entwickelt und definiert. Wesentliche Kenngrößen sind neben Anforderungen an die Qualität der thermischen Gebäudehülle und der Lüftungsanlage, vorallem ein reduzierter Heizwärmebedarf von nicht mehr als 15 kWh/m<sup>2</sup>a, sowie ein max. Primärenergiebedarf inkl. Haushaltsstrom von 120 kWh/m<sup>2</sup>a [Passivhaus Institut, 2015].

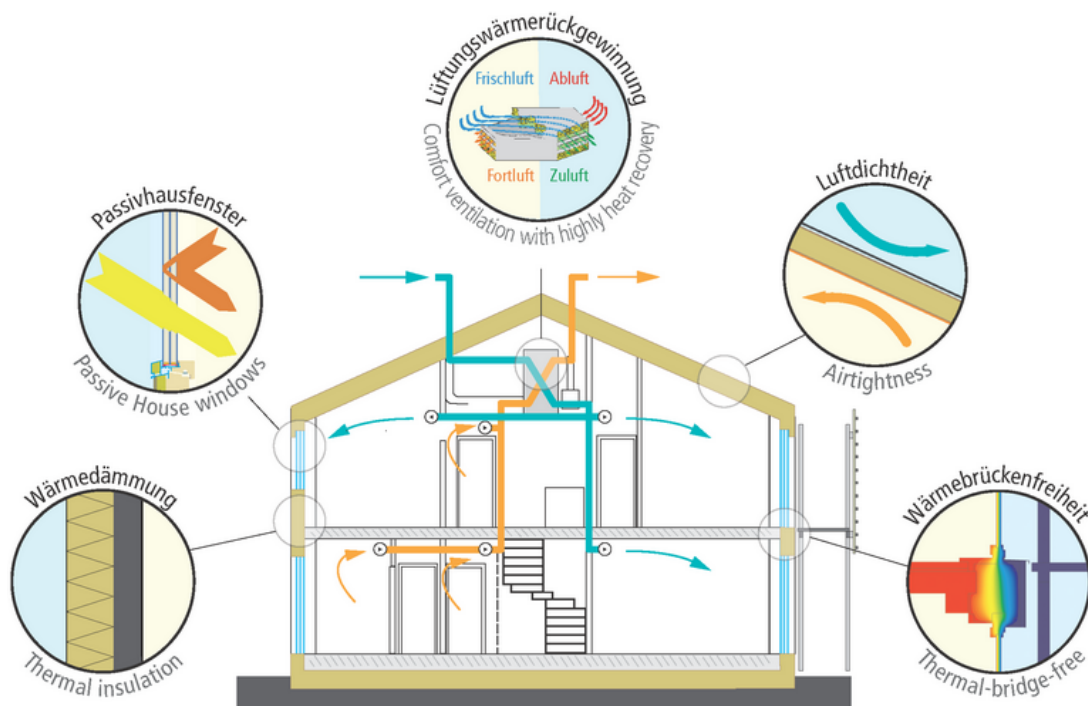


Abbildung 7.1.1-1: Prinzip eines Passivhauses, Quelle:  
[http://passiv.de/de/o2\\_informationen/o2\\_qualitaetsanforderungen/o2\\_qualitaetsanforderungen.htm](http://passiv.de/de/o2_informationen/o2_qualitaetsanforderungen/o2_qualitaetsanforderungen.htm)

Passivhaus Standard	
Strategie	Effizienzstrategie
Ziel	Heizwärmebedarfsminimierung
Fokus	Optimierung von <ul style="list-style-type: none"> <li>• thermischer Gebäudehülle</li> <li>• Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage</li> <li>• Anlagenverlusten</li> </ul>
Kenngröße	Heizwärmebedarf $\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ Primärenergiebedarf $\leq 120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ inkl. Haushaltsstrom
betrachtete Lebenszyklusphasen	Nutzung des Gebäudes <ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizung</li> <li>• Warmwasser</li> <li>• Lüftung</li> <li>• (Nutzerstrom)</li> </ul>
Betrachtungszeitraum	1 Jahr

Abbildung 7.1.1-2: Passivhaus Standard

## Effizienzhaus-Plus

Dieser Standard wurde von der Forschungsinitiative Zukunft Bau, einem Gemeinschaftsprojekt des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und des Fraunhofer IRB entwickelt und gefördert. Als Effizienzhaus-Plus gelten Gebäude, die einen negativen Jahres-Primärenergiebedarf ( $\Sigma Q_p < 0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ) als auch ein negativer Jahres-Endenergiebedarf ( $\Sigma Q_e < 0 \text{ kWh/m}^2$  aufweisen [Fraunhofer IBP, 2011]. Konkret werden folgende, weitere Anforderungen gestellt:

*Die Nachweise sind in Anlehnung an die Energieeinsparverordnung 2009 (EnEV) nach der DIN V 18599 zu führen. Für die Nachweisführung ist der mittlere Standort nach EnEV anzusetzen. Allerdings müssen in Ergänzung zur Nachweisprozedur der EnEV die End- und Primärenergiebedarfswerte für die Wohnungsbeleuchtung und für die Haushaltsgeräte und –prozesse in der Berechnung mitberücksichtigt werden. Dabei ist ein pauschaler Wert von 20 kWh/m<sup>2</sup>a (davon Beleuchtung: 3 kWh/m<sup>2</sup>a; Haushaltsgeräte: 10 kWh/m<sup>2</sup>a; Kochen: 3 kWh/m<sup>2</sup>a; sonstiges: 4 kWh/m<sup>2</sup>a) jedoch maximal 2.500 kWh/a je Wohneinheit anzunehmen.*

*Die Primärenergiefaktoren sind (abweichend von der EnEV) in Anlehnung an DIN V 18599 (2011) gemäß unten aufgeführter Tabelle 1 (nicht erneuerbarer Anteil) zu verwenden. Der netzeingespeiste Strom ist analog dem Verdrängungsstrommix zu bewerten. Als Bilanzgrenze (auch im Sinne der Einbeziehung der Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien) ist das Grundstück, auf dem das Haus errichtet wird, anzusetzen. In Erweiterung zum Bilanzraum der EnEV (unmittelbarer räumlicher Zusammenhang mit dem Gebäude) ist die Summe der auf dem Grundstück des zu bewertenden Gebäudes generierten Energie aus erneuerbaren Energiequellen anrechenbar („on-site Generation“). Die Grundstücksgrenze ist durch die dem Gebäude zuordenbare Gemarkungsgrenze im Grundbuch begrenzt. Sofern mehrere Gebäude auf einem Grundstück stehen, sind die „on-site“ generierten erneuerbaren Energiemengen*

nutzflächenanteil den einzelnen Gebäuden zuzuordnen. Das zu fördernde Haus ist durchgängig mit Geräten des höchsten Energieeffizienzlabels (in der Regel Label A++ oder besser nach der Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung vom 30. Oktober 1997 [BGBl. I S. 2616], zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 19. Februar 2004 [s. BGBl. I S. 311] –EnVKV–) und intelligenten Zählern auszustatten. Ergänzend zu dem Einzahlkennwert „Jahres-Primärenergiebedarf und Jahres-Endenergiebedarf“ ist das Verhältnis von selbstgenutzter zu generierter erneuerbarer Energie innerhalb der Bilanzgrenze auszuweisen. Die Ermittlung ist in Anlehnung an die EnEV-Bewertung auf der Basis von Monatsbilanzen durchzuführen.

[Fraunhofer IBP, 2011]

Energieträger <sup>a</sup>	Primärenergiefaktoren $f_p$		
	insgesamt	nicht erneuerbarer Anteil	
	A	B	
Fossile Brennstoffe	Heizöl EL	1,1	1,1
	Erdgas H	1,1	1,1
	Flüssiggas	1,1	1,1
	Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Biogas	1,5	0,5
	Bioöl	1,5	0,5
	Holz	1,2	0,2
Nah-/Fernwärme aus KWK <sup>b</sup>	fossiler Brennstoff	0,7	0,7
	erneuerbarer Brennstoff	0,7	0,0
Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	fossiler Brennstoff	1,3	1,3
	erneuerbarer Brennstoff	1,3	0,1
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	2,4
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8
Umweltenergie	Solarenergie	1,0	0,0
	Erdwärme, Geothermie	1,0	0,0
	Umgebungswärme	1,0	0,0
	Umgebungskälte	1,0	0,0
Abwärme innerhalb des Gebäudes	aus Prozessen, siehe 3.1.12	1,0	0,0

Abbildung 7.1.1-3: Primärenergiefaktoren in analogie zur DIN V 18599, Tabelle 1 aus [Fraunhofer IBP, 2011]

Dem Standard zu Grunde liegt also im Wesentlichen sowohl eine primärenergetische, als auch eine endenergetische Betrachtung des Gebäudes und seiner Energieströme. Dies erfordert detaillierte Vorgaben, welche Primärenergiefaktoren zu verwenden sind und wie Einspeisungen primärenergetisch zu bewerten bzw. zu verrechnen sind. Erforderlich wird dies, da in einer Bilanzierung nach [EnEV, 2014] nur diejenigen Photovoltaikerträge bilanziert werden dürfen, die zum Betrieb des Gebäudes selbst genutzt werden können (Monatsbilanzverfahren). Ein Gebäude kann demnach [EnEV, 2014] zwar einen niedrigen, aber keinen negativen Primärenergiebedarf aufweisen.

Die Problematik von Primärenergiefaktoren allgemein ist davon unabhängig im Zuge der letzten Novellierungen der EnEV deutlich geworden. Beispielsweise wurde der Primärenergiefaktor für Strom von 2,6 [EnEV, 2009] zunächst auf einen Faktor von 2,0 und ab 2016 von nur noch 1,8 abgesenkt [EnEV, 2014]. Diese Absenkung wurde in der Fachöffentlichkeit zum Teil sehr heftig diskutiert. Die Auswirkungen der Anpassungen wirken sich massiv darauf aus, welche Technologien sich in der Praxis durchsetzen. Ganz unabhängig davon, ob man die Absen-

kung der Primärenergiefaktoren nun für technisch nachvollziehbar und/oder gerechtfertigt hält oder nicht, so erscheint es doch relativ eindeutig, dass sich die Frage, wie ökologisch die Stromproduktion aktuell ist und wie eine primärenergetische Bewertung daher aussehen müsste, sich nicht in Stufen vollzieht, sondern die Entwicklung vielmehr einen kontinuierlichen Prozess darstellt.

EffizienzhausPlus	
Strategie	Effizienzstrategie Konsistenzstrategie
Ziel	Erreichen einer ausgeglichenen Energiebilanz bzw. eines Energieüberschusses z.B. zur Sicherstellung von Mobilität
Fokus	Einbindung erneuerbarer Energiequellen Ausgleich von Energiebedarf und Energieerzeugung
Kenngröße	Endenergiebilanz < 0 kWh/m <sup>2</sup> a Primärenergiebilanz < 0 kWh/m <sup>2</sup> a
betrachtete Lebenszyklusphasen	Nutzung des Gebäudes
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizung</li> <li>• Warmwasser</li> <li>• Lüftung</li> <li>• Nutzerstrom</li> </ul>
Ansatz Nutzerstrom	20 kWh/m <sup>2</sup> a max. 2.500 kWh/WE
resultierender Nutzerstrom +++Haus	2.400 kWh/a
Betrachtungszeitraum	1 Jahr

Abbildung 7.1.1-4: EffizienzhausPlus Standard

## AktivPlus

Die Kritik an Primärenergiefaktoren wird u.a. von dem in der Entwicklung befindlichen AktivPlus Standard aufgegriffen

*Der angestrebte AktivPlus Gebäude-Standard zielt zum einen auf eine dezentrale, verbrauchernahe Versorgung von Einzelgebäuden und Stadtquartieren mit erneuerbaren Energien; hierfür sollen insbesondere die Vernetzung und die Nutzung von Synergien, inklusive der E-Mobilität, gefördert werden. Zugleich sollen Aspekte der Wohnqualität wie Nutzerkomfort, optimierter und flexibler Raumbedarf, Wohngesundheit, Wohlbefinden, Raumklima und Tageslicht, transparente Darstellung der Verbräuche und Selbstbestimmtheit bei der Nutzung berücksichtigt und gefördert werden.*

[AktivPlus e.V., 2015]

Der Standard beschränkt sich bei der energetischen Betrachtung daher auf die Endenergiebilanz. Die energetischen Anforderungen eines AktivPlus Gebäudes gelten als erfüllt, wenn es in

seiner Nutzung lokal mehr Energie erzeugt, als für Beheizung, Warmwasser, Lüftung und Nutzerstrom benötigt wird und es somit einen Netto-Endenergiebedarf  $< 0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  aufweist. Diese Anforderung deckt sich zunächst mit der endenergetischen Anforderung des EffizienzhausPlus, unterscheidet sich jedoch in Bezug auf den Nutzerstrombedarf. Hier gibt es neben einem nutzflächenbezogenen Ansatzes, noch die Möglichkeit eines personenbezogenen Ansatzes, sowie die Möglichkeit den Nutzerstrombedarf mittels einer individuellen Bedarfsberechnung zu ermitteln. Neben dem Kriterium der Endenergiebilanz weist der Standard noch weitere zum Teil informative Kriterien aus den Themenfeldern Nutzer, Lebenszyklus und Vernetzung auf.

## DIE AKTIVPLUS MERKMALE



Abbildung 7.1.1-5: Die aktivplus Merkmale

AktivPlus	
<b>Strategie</b>	Effizienzstrategie Konsistenzstrategie (Suffizienzstrategie)
<b>Ziel</b>	Erreichen einer ganzheitlichen, über die Energiebilanz hinausgehenden Betrachtungsweise
<b>Fokus</b>	Einbindung erneuerbarer Energiequellen Ausgleich von Energiebedarf und Energieerzeugung informativ Auseinandersetzung mit weiteren Nachhaltigkeitsaspekten
<b>Kenngröße</b>	Endenergiebilanz < 0 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>betrachtete Lebenszyklusphasen</b>	<p style="text-align: center;">Nutzung des Gebäudes</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizung</li> <li>• Warmwasser</li> <li>• Lüftung</li> <li>• Nutzerstrom</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (Herstellung, Rückbau und Entsorgung des Gebäudes)</li> </ul>
<b>Ansatz Nutzerstrom</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• personenbezogener Ansatz: 500 kWh/a * (Personenzahl + 1,4)</li> <li>• flächenbezogener Ansatz: 500 kWh/a * (AN/50 + 1,4)</li> <li>• oder nach individueller Berechnung</li> </ul> <p>AN=Nutzfläche nach EnEV (0,32 * Ve) Ve=Bruttovolumen des Gebäudes</p>
<b>resultierender Nutzerstrom +++Haus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• personenbezogener Ansatz: 2.700 kWh/a</li> <li>• flächenbezogener Ansatz: 1.900 kWh/a</li> </ul>
<b>Betrachtungszeitraum</b>	1 Jahr

Abbildung 7.1.1-6: AktivPlus Standard

## +++Haus

Als wesentliches Ziel für das +++Haus wurde die Berücksichtigung der Herstellungs-, Rückbau und Entsorgungsphase definiert. Dies ist über die Erstellung einer Ökobilanz möglich. Will man die Ergebnisse aus der Herstellungs-, Rückbau- und Entsorgungsphase des Gebäudes gemeinsam mit der Nutzungsphase betrachten und bewerten, so kann dies auf Grundlage der Ökobilanz des Gebäudes und der energetischen Berechnungen für die Nutzung zunächst auf zwei Wegen erfolgen. Zum einen ist eine Betrachtung auf primärenergetischer Ebene möglich. Zum anderen ist eine Betrachtung auf CO<sub>2</sub>-bilanzieller Ebene möglich.

Für die primärenergetische Betrachtung ist aus der Ökobilanz sinnvollerweise der nicht erneuerbare Anteil an Primärenergie (PENRT) zu entnehmen und mit dem Primärenergiebedarf des Gebäudes (Heizung, Warmwasser, Lüftung, Nutzerstrom) über den gewählten Betrachtungszeitraum von z.B. 50 Jahren zu summieren. Strebt man als Zielwert eine Primärenergiebilanz < 0 kWh an, muss man ähnlich wie im EffizienzhausPlus Standard definieren, mit welchen Primärenergiefaktoren zu rechnen ist und wie die Einspeisung von Überschüssen aus Photovoltaik zu bewerten ist.

Vor dem Hintergrund sowohl dieser Problematik als auch der bereits erläuterten Kritik an primärenergetischen Betrachtungen allgemein, erscheint den Verfassern der zweite Weg über die Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Bilanz zielführender. Wünschenswert wäre es natürlich sich nicht alleine auf das Treibhauspotential zu fokussieren und eine Betrachtung über sämtliche Wirkungskategorien anzustellen. Dies ist aufgrund der Datenlage für die Herstellungs-, Rückbau- und Entsorgungsphase auch durchaus möglich. Für die Betrachtung der Nutzungsphase ist dies aufgrund fehlender Daten der Umweltwirkungen der unterschiedlichen Energieträger nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Auch fehlen momentan zum Beispiel für eine Vielzahl von haustechnische Anlagen noch vollständige EPD Datensätze, was z.B. eine Bewertung aller Umweltwirkungen von Photovoltaikstrom erschwert. Für das Treibhauspotential ist die Datenlage dagegen relativ gut dokumentiert, sodass sich die Energieströme CO<sub>2</sub>-bilanziell bewerten lassen.

Für das +++Haus wurde daher eine CO<sub>2</sub>-Bilanz über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung (Heizung, Warmwasser, Lüftung, Nutzerstrom), Rückbau und Entsorgung als Vergleichskriterium mit einem Zielwert von < 0 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. und einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren gewählt. Wie sich zeigen wird, weisen die untersuchten Gebäudekonzepte durch die Erfüllung dieser Vorgabe alle ebenfalls eine nutzungsphasenbezogene Endenergiebilanz < 0 kWh auf.

Parallel zum Abschluss des Forschungsprojekts nimmt das +++Haus Konzept derzeit an einer Pilotphase des AktivPlus e.V. teil, in dem verifiziert werden soll, inwieweit die Anforderungen des Standards vollständig erfüllt werden.

+++Haus	
<b>Strategie</b>	Effizienzstrategie Konsistenzstrategie Suffizienzstrategie
<b>Ziel</b>	Ermöglichung eines bezahlbaren Wohnkomforts, der nicht zu Lasten der Umwelt geht.
<b>Fokus</b>	Minimierung von Umweltwirkungen Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen
<b>Kenngröße</b>	CO <sub>2</sub> -Bilanz < 0 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>betrachtete Lebenszyklusphasen</b>	Herstellung des Gebäudes Nutzung des Gebäudes <ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizung</li> <li>• Warmwasser</li> <li>• Lüftung</li> <li>• Nutzerstrom</li> </ul> Rückbau des Gebäudes Entsorgung des Gebäudes
<b>Ansatz Nutzerstrom +++Haus</b>	2.500 kWh/a
<b>Betrachtungszeitraum</b>	50 Jahre

Abbildung 7.1.1-7: +++Haus



### 7.1.2 Bewertung der +++Haus Konzepte nach etablierten Plusenergiestandards

Variante	ohne Berücksichtigung von Photovoltaik				mit Berücksichtigung von PV +++Haus				
	Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> a]	Primärenergiebedarf ohne PV [kWh/m <sup>2</sup> a]	Konstruktion "Dünnemisch"	Endenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> a]	Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> a]	äquivalente verif. Fabrikleistung [kW/a]	äquiv. verif. Fabrikleistung nach Abzug PEKART Konstruktion [kW/a]		
	Holz	Hilfsenergie	Haushalt und Licht Gasart	[kWh]	[m <sup>2</sup> ]				
	Heizung und WW elektrisch								
<b>Bewertung nach EffizienzhausPlus</b>									
Var 1a	33,00	5,00	14,71	147,58	14,8	88,62	-25,49	21,664	11,864
Var 1b	25,00	5,00	14,71	135,13	12,8	77,04	-23,27	19,782	9,982
Var 2	29,40	5,00	14,71	137,50	13,8	82,83	-23,98	20,383	10,583
Var 3	47,50	5,00	14,71	107,43	15,5	92,71	-14,90	12,411	2,611
Var 4	54,00	5,00	14,71	114,53	17,8	106,92	-20,53	17,639	7,739
<b>Bewertung nach aktivplus</b>									
Var 1a	33,00	5,00	14,12	52,12	14,8	88,62	-25,08	22,164	12,364
Var 1b	25,00	5,00	14,12	44,12	12,8	77,04	-23,86	20,282	10,482
Var 2	29,40	5,00	14,12	48,52	13,8	82,83	-24,57	Kein Kriterium	11,083
Var 3	47,50	5,00	14,12	65,62	15,5	92,71	-15,19	12,911	3,111
Var 4	54,00	5,00	14,12	73,12	17,8	106,92	-21,22	18,039	8,239

Abbildung 7.1.2-1: Bewertung des +++Hauses nach etablierten Plusenergiestandards

## 7.2 Materialien und Bauteile

### 7.2.1 Kriterien zur Baustoffwahl – Bewertungsmatrix

- Eine Optimierung der Ökobilanz eines Gebäudes erfolgt sinnvollerweise zunächst anhand der Leitgröße Treibhauspotential (GWP).
- Über eine Normierung der Ergebnisse und nachgeschaltete Betrachtung der weiteren Wirkungskategorien können Lastverschiebungen erkannt und verhindert werden.
- Für Material- und Baustoffvarianten lassen sich für das GWP absolute Einsparpotentiale und spezifische Optimierungskosten ermitteln. Anhand dieser Kenngrößen kann material- und bauteilübergreifend abgeschätzt werden, in welchen Bereich Geldmittel zur Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen am effektivsten eingesetzt werden können.

Die Bewertung der unterschiedlichen Baustoffe beinhaltet zunächst die "harten" Faktoren Kosten und Umweltwirkungen. Die Betrachtung der Umweltwirkungen fokussiert sich zunächst auf das Treibhauspotential (GWP) als Leitgröße und betrachtet die weiteren Umweltwirkungen in nachgeschalteter Form. Diese Vorgehensweise hat sich auch in der Fachwelt aufgrund der ansonsten sehr großen Komplexität von Ökobilanzen etabliert [El khoulou et al., 2014, S.15]. Um darüber hinaus eine somit erforderliche, mehrdimensionale Optimierung in ökologischer und ökonomischer Hinsicht zu erleichtern, wurden für alle untersuchten Materialien, Bauteile und Konstruktionsalternativen zwei verschiedene Kenngrößen entwickelt. Die Kenngrößen absolutes Einsparpotential GWP (in kg CO<sub>2</sub>-Äqv.) und spezifische Optimierungskosten wurden ermittelt und werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

#### **absolutes Einsparpotential GWP**

Für die unterschiedlichen Bauteile des Gebäudes lässt sich hinsichtlich des Treibhauspotentials, je Baustoffvariante ein absolutes Einsparpotential ermitteln. Dieses ergibt sich aus der im Gebäude verbauten Menge des jeweiligen Bauteils und dem Hebel, der zwischen dem GWP des jeweiligen Baustoffs und der kostengünstigsten Variante (Referenzwert) besteht. Theoretisch ist eine solche Betrachtung auch für weitere Wirkungskategorien möglich. Das Treibhauspotential wird jedoch, wie eingangs bereits erläutert zunächst als Leitgröße herangezogen. Die weiteren Umweltwirkungen werden nachgeschaltet betrachtet.



Abbildung 7.2.1-1: induzierte Mehr-/Minderkosten auf Bauteilebene

### induzierte absolute Mehrkosten

Der kostengünstigste Baustoff wird als Referenzwert angesetzt. Hier lässt sich hier erkennen, dass die Baustoffwahl üblicherweise nach rein ökonomischen Gesichtspunkten erfolgt. Dies

spiegelt sich darin wieder, dass die kostengünstigste Variante auch diejenige ist, die in der Bauindustrie die breiteste Anwendung findet. So ist zum Beispiel im Bereich des Holzrahmenbaus die kostengünstigste Variante, den inneren Raumabschluss herzustellen, eine OSB-Platte. Alle weiteren Varianten induzieren daher im Vergleich Mehrkosten. Die Gesamtmehrkosten einer Variante lassen sich ebenfalls über die im Gebäude verbaute Menge des jeweiligen Bauteils absolut bewerten. Die absoluten induzierten Mehrkosten werden lediglich als Zwischenwert benötigt, um die zweite Kenngröße "spezifische Optimierungskosten" errechnen zu können.

### spezifische Optimierungskosten

Zunächst lässt sich im Vergleich von Einsparpotentialen und induzierten Mehrkosten feststellen welche Varianten trotz höheren Kosten keine Verbesserung in der Ökobilanz mit sich bringen und folglich weder wirtschaftlich noch ökologisch sind. Für die verbliebenen Varianten lassen sich als Quotient aus Mehrkosten und Einsparpotential spezifische Optimierungskosten errechnen. Auch diese Größe lässt sich theoretisch für alle Umweltwirkungen ermitteln erfolgt hier aber aus bereits genannten Gründen zunächst am Beispiel des Treibhauspotentials in der Einheit EUR pro eingespartem kg CO<sub>2</sub>-Emission (EUR/kg CO<sub>2</sub>-Äqv.). Im Vergleich der unterschiedlichen Materialien, Bauteil- und Konstruktionsvarianten treten deutlich unterschiedliche Werte hervor. Es gibt somit sowohl Maßnahmen, mit denen sich ökologische Verbesserungen zu relativ geringen als auch zu sehr hohen Kosten erreichen lassen (s. auch unten folgende Beispiele). Die Größe kann folglich zur Abwägung herangezogen werden, wo verfügbare Geldmittel zur Einsparung von Emissionen am sinnfälligsten eingesetzt werden kann. Im folgenden wird sich darüber hinaus noch zeigen, wie über die gleiche Größe auch eine Einschätzung möglich ist, wann ein Ausgleich der CO<sub>2</sub> Bilanz über die Baustoffwahl und wann über andere Kompensationsmaßnahmen sinnvoll erscheint (vgl. Kapitel 6.3.2).

In Bezug auf den Holzbau lässt sich so zum Beispiel feststellen, dass durch die Materialwahl für den Raumabschluss der Aussenwand mit 10 cm Brettsperrholz ca. 2,4 t CO<sub>2</sub> Emissionen einsparen lassen, diese aber mit spezifischen Optimierungskosten von 5,42 EUR/kg CO<sub>2</sub>-Äqv. relativ kostenintensiv sind. Im Gegensatz hierzu lässt sich durch eine Holzweichfaserdämmung der Aussenwand sowohl absolut ein deutlich höheres Einsparpotential von ca. 9,8 t CO<sub>2</sub> Emissionen realisieren, als auch erfolgt dies zu relativ geringen spezifischen Optimierungskosten von 0,40 EUR/kg CO<sub>2</sub>-Äqv. Es macht daher sowohl in absoluter als auch relativer Hinsicht mehr Sinn sich bei der Reduktion des Treibhauspotentials der Konstruktion des Gebäudes eher auf die Dämmstoffwahl, als auf den Raumabschluss zu fokussieren.



Abbildung 7.2.1-2: spezifische Optimierungskosten auf Bauteilebene

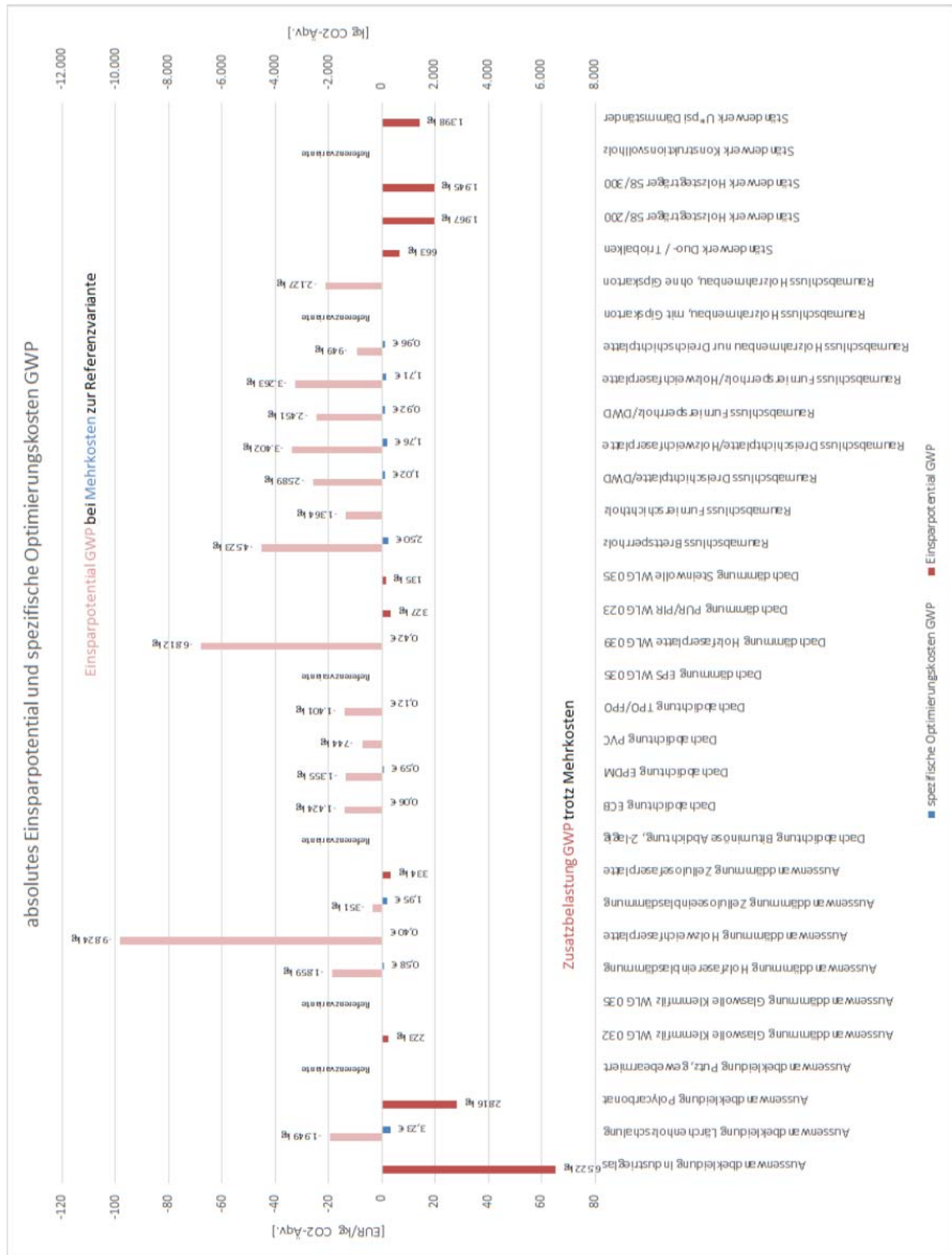


Abbildung 7.2.1-3: absolutes Einsparpotential und spezifische Optimierungskosten auf Bauteilebene

### Berücksichtigung der weiteren Wirkungskategorien (Vermeidung von Lastverschiebungen)

Wie bereits erwähnt, stellt das Treibhauspotential nur eine von vielen Wirkungskategorien dar. Zwar kann das GWP in der Regel (insbesondere in Bezug auf den Holzbau) als maßgebliche Leitgröße angesehen werden, dennoch läuft eine einseitige Fokussierung auf diese Kate-

gorie immer Gefahr, vermeintlich bessere Optionen zu favorisieren, die bei genauerer Betrachtung lediglich eine Verschiebung von Lasten zu Ungunsten einer anderen Wirkungskategorie darstellen. Um zunächst eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Wirkungskategorien überhaupt herzustellen, ist es erforderlich die ermittelten Werte zu normieren.

Eine Normierung ist optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung einer Ökobilanz (vgl. [DIN EN ISO 14040:2009-11], [DIN EN ISO 14044:2006-10]). Eine Normierung ist hier erfolgt, indem die jeweiligen Werte Wirkungskategorien ins Verhältnis zur jeweiligen westeuropäischen Gesamtemissionen gesetzt wurden. Eine Normierung unterscheidet sich von einer Gewichtung und trifft keine Aussage darüber, welche Kategorie ggf. von größerer Wichtigkeit ist. Eine solche Gewichtung wäre grundsätzlich subjektiv und nur in Form eines gesellschaftlichen Konsens oder ähnlichem verhandelbar. Die ermittelten, normierten Werte beschreiben daher lediglich, wie stark das jeweilige Material zur Gesamtemission einer Wirkungskategorie im Verhältnis zu den Gesamtemissionen der anderen Wirkungskategorien beiträgt. Somit lassen sich relevante Lastverschiebungen deutlich aufzeigen.

Die Erfordernis einer Normierung sei an dieser Stelle am Beispiel von Steinwolle im Vergleich zu einem EPS Dämmstoff erläutert. Beide Dämmstoffe weisen bei relativ ähnlichen GWP Werten (2,94 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. für Steinwolle zu 3,12 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. für EPS bei R=1,0m<sup>2</sup>K/W) in absoluten Zahlen gemessen zunächst deutlich unterschiedliche Emissionen in Bezug auf das Ozonabbaupotential (ODP) auf. Der Wert für Steinwolle weist bei gleichem Wärmedurchgangswiderstand eine um den Faktor 33 höhere Emission auf (9,9E-8 kg R11 äqv. im Vergleich zu 3,5E-9 kg R11 äqv. bei R=1,0m<sup>2</sup>K/W). In der normierten Betrachtung (vgl. Grafik) fällt jedoch auf, dass beide Materialien nicht wesentlich zur europäischen Gesamtemission beitragen. Die Ursachen für die europäischen Emissionen im Bereich des ODP sind folglich in anderen Bereichen zu suchen. Die Unterschiede in diesem Bereich können folglich bei der Entscheidung zwischen diesen beiden Baustoffen vernachlässigt werden.

Im Gegensatz hierzu fallen die großen Unterschiede in den Werten für das Versauerungspotential (AP) und das bodennahe Ozonbildungspotential (POCP) in einer normierten Darstellung deutlich ins Gewicht. Im Falle von EPS Dämmstoffen tragen diese sogar deutlich stärker zu den europäischen Gesamtemissionen in Bezug auf das POCP als sie es in Bezug auf das GWP tun.

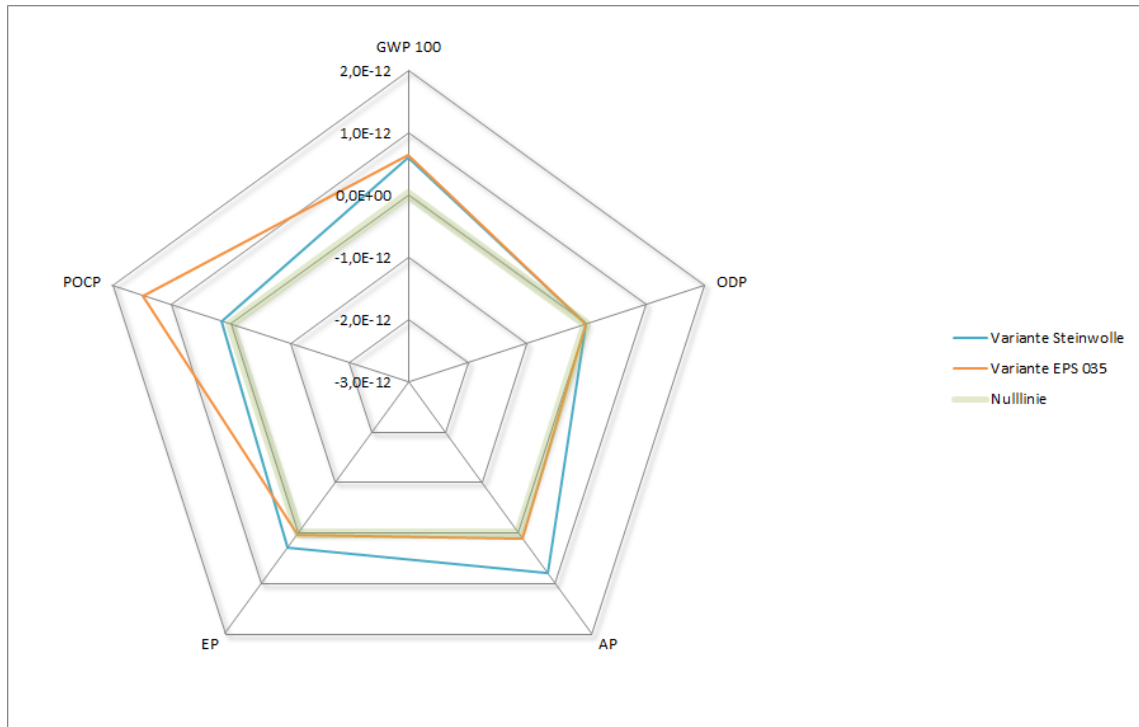


Abbildung 7.2.1-4: normierte Bewertung der Umweltwirkungskategorien zur Bewertung von möglichen Lastverschiebungen

## 7.2.2 Dämmstoffwahl

- Wenn die für einen bestimmten U-Wert erforderliche Bauteildicke nicht relevant ist, sind Holzrahmenbaufilze aus Mineralfaser einer schlechteren Wärmeleitgruppe (z.B. WL 040 anstelle WL 032) die ökologischere und wirtschaftlichere Wahl.
- Eine Vielzahl der Umweltproduktdeklarationen (EPDs) der Hersteller verbergen diese Unterschiede, da die Dämmstoffe in relativ grobe Rohdichtegruppen zusammengefasst werden, als deklarierte Einheit Kubikmeter verwendet werden und die Produktdatenblätter keine Angaben zu konkreten Rohdichten enthalten, sodass selbst eine sinnvolle Interpolation der Daten nicht möglich ist.

### schlechtere WL, bessere Ökonomie, bessere Ökologie

Klemmfalze aus Mineralfaser zählen im Holzrahmenbau zu den vielfach verwendeten Dämmstoffen. In den letzten Jahren wurden diese hinsichtlich Ihrer Wärmeleitfähigkeit im weiter verbessert. Was sich vordergründig als Vorteil darstellt, ist bei genauerer Betrachtung sowohl aus ökologischer, als auch aus ökonomischer Sicht von Nachteil. Was die Ökobilanz der unterschiedlichen Wärmeleitgruppen angeht, so hat dies vor allem damit zu tun, dass die geringere Wärmeleitfähigkeit mit einem höheren Materialeinsatz erreicht wird. Bedauerlicherweise werden die zugrunde liegenden Zusammenhänge aus Sicht der Verfasser in der Art und Weise, wie die Umweltproduktdeklarationen (EPDs) für Mineralfaserdämmstoffe üblicherweise aufgestellt werden nahezu vollständig verschleiert. So werden die unterschiedlichen Dämm-



stoffe der Hersteller in der Regel nur in recht grobe Rohdichtebereiche unterteilt und die deklarierte Einheit auf  $1 \text{ m}^3$  festgelegt (vgl. z.B. [EPD-DRW-2012111-D], [EPD-DRW-2012121-D], [EPD-DRW-2012131-D]). Informationen zu den konkreten Rohdichten der einzelnen Produkte sind in den Produktdatenblättern in der Regel nicht enthalten und ließen sich auch auf mehrfache Nachfrage beim Hersteller nicht in Erfahrung bringen. Man war dort lediglich bereit eine Zuordnung einzelner Produkte zu den unterschiedlichen EPDs vorzunehmen. Da die Rohdichtegruppen allerdings sehr grob gefasst sind, führt dies dazu, dass vergleichbare Produkte entweder alle in die gleiche Gruppe fallen und Unterschiede sich somit der Betrachtung komplett entziehen. In Einzelfällen liegen Produkte auch in der Nähe der Grenzwerte von zwei Gruppen, was dazu führen kann, dass lediglich ein oder zwei Produkte in eine andere Gruppe rutschen, was die Ergebnisse wiederum nur noch mehr verzerrt und somit unbrauchbar macht.

Die EPD [EPD-SDT-2012112-D] des Herstellers Schwenk für Glaswollefilze bildet hier eine positive Ausnahme und hat, aufgrund der großen Unterschiede der Produkte im Bereich der Rohdichte, als deklarierte Einheit  $1 \text{ kg}$  definiert. Am Beispiel dieser EPD lässt sich daher auch einfach nachvollziehen, welchen negativen Einfluss die Verringerung der Wärmeleitfähigkeit auf die Ökobilanz des Dämmstoffs hat. Um die unterschiedlichen Materialien trotz ihrer unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten miteinander vergleichen zu können ist es zunächst notwendig, die Ökobilanzdaten ins Verhältnis zum Wärmedurchlasswiderstand ( $R$ ) zu setzen. Als Vergleichsgröße würde ein Widerstand von  $R = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$  gewählt.

U = 0,14 W/m²K	Wärmeleitfähigkeit λ	d	R	Kosten Wand/m²	GWP (R = 1 m²K/W)	GWP Dämmung (Gefächanteil 77%)	Differenz	GWP Ständer (KVH)	GWP gesamt	Differenz		
<b>Glaswollefilz WLG 040</b>	0,040 W/mK	0,28 m	6,97 m²K/W	keine	1,258 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	6,754 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	Referenz	-0,913 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-16,931 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-10,177 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	Referenz	-3,029 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Glaswollefilz WLG 035</b>	0,035 W/mK	0,24 m	6,97 m²K/W	51,24 EUR	1,428 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	7,667 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	+0,913 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-14,815 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-7,148 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	3,029 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	Referenz	2,655 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Glaswollefilz WLG 032</b>	0,032 W/mK	0,22 m	6,97 m²K/W	52,08 EUR	1,686 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	9,053 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	+2,298 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-13,545 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-4,493 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	5,684 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	Referenz	2,655 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 7.2.2-1: Ökobilanzdaten von Holzrahmenbauklemmfilz in unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten

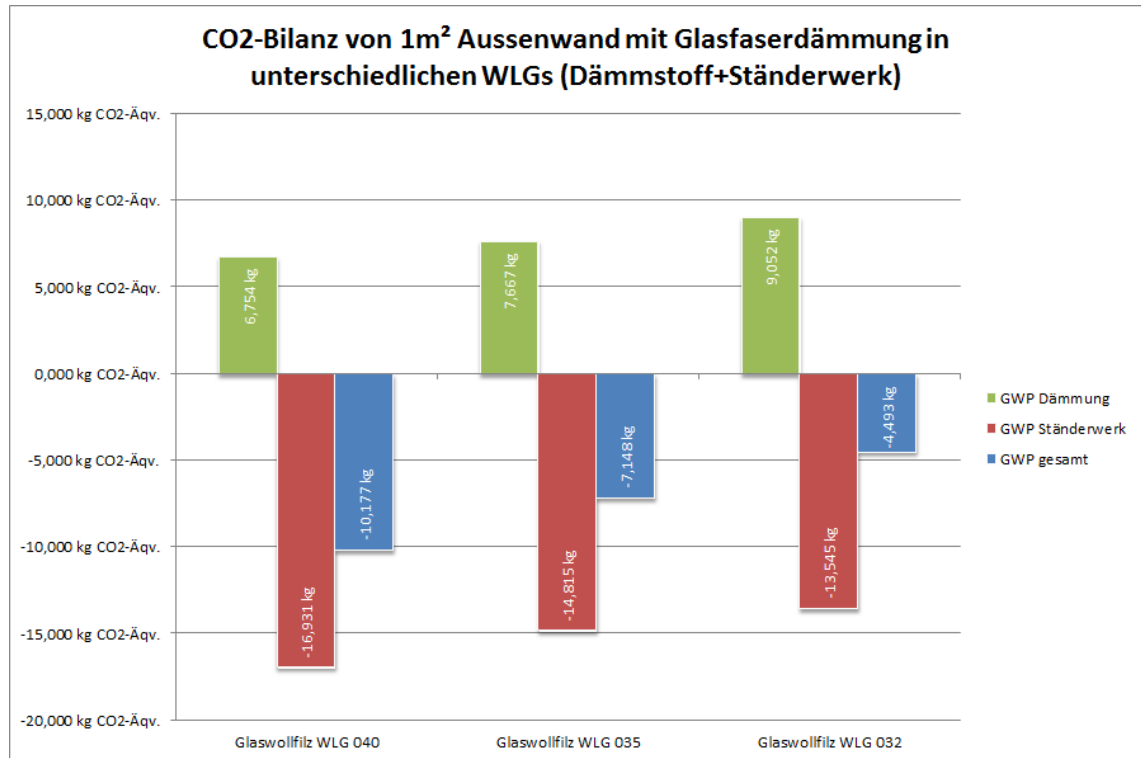


Abbildung 7.2.2-2: CO<sub>2</sub>-Bilanz von Holzrahmenbauwänden mit Klemmfilzdämmung in unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten

### 7.2.3 Ständerwerk

- Gelingt es die Ständer aus der Dämmebene zu verlagern, können je nach Dämmstärke und Ständerbreite zwischen 22% und 33% der Dämmstärke eingespart werden.
- Durch die Verlagerung des Ständerwerks aus der Dämmebene kann so viel Dämmstoff gespart werden, dass die Konstruktion mit der vergleichsweise kostenintensiven Holzweichfaserdämmung annähernd kostenneutral zur Holzrahmenbauwand mit Glasfaserdämmung im Ständerzwischenraum realisiert werden kann. Hierdurch können für das +++Haus nahezu 8,5 t CO<sub>2</sub>-Äqv. eingespart werden.
- Die Frage was für eine Art von Ständer sich am positivsten auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirkt hängt massiv vom gewählten Technikkonzept ab.
- Für Technikkonzepte, die auf fossilen Energieträgern basieren, wirkt sich ein Holz-Stegträger am positivsten aus.
- Für Technikkonzepte, die erneuerbare Energien nutzen, wirken sich Ständer aus 60 mm Balkenschichtholz oder 80 mm KVH am positivsten aus.

### strukturelle Wärmebrücken des Holzbaus

Die Wahl des Ständerwerks hat neben den in Kapitel AP 04.3 Ständerwerk / Unterkonstruktion aufgezeigten Vor- und Nachteilen hinsichtlich der Kosten und der Ökobilanz, da es sich bei den Ständern um Wärmebrücken handelt auch Einfluss auf den U-Wert der Aussenwand. [Borsch-Laaks, 2013-II] erläutert richtigerweise, dass es für den Holzbau aus bauphysikalischer Sicht eine gute aber auch eine schlechte Nachricht gibt: "Holz hat im Vergleich zu den verwendeten Dämmstoffen nur eine um den Faktor 3-4 größere Wärmeleitfähigkeit und stellt somit eine vergleichsweise geringe Wärmebrücke dar. Gleichzeitig gibt es diese Wärmebrücke im Holzbau aber in großen Mengen" [Borsch-Laaks, 2013-II].

Vor diesem Hintergrund macht es Sinn, sich die strukturelle Wärmebrücke des Holzbaus anzuschauen und zu analysieren, in wie weit, sich diese verringern lässt. Einen Ansatz der Holzindustrie diesbezüglich stellen Holz-Stegträger dar. Hierbei handelt es sich um zu einem I-Profil zusammengesetzte Querschnitte aus in der Regel OSB-Platten (Steg) und Furnierschichtholz (Gurte). Die Wärmebrücke des Ständers wird daher auf die Stärke des Stegs (in der Regel 10 mm) minimiert. Hierbei bleibt wie [Horn, 2003] aufzeigt allerdings vielfach außer Betracht, dass die Wärmeleitfähigkeit von Holz und gerichteten Holzwerkstoffen von der Faserrichtung abhängt. Durch Messungen weist er nach, dass OSB Platten parallel zur Faser (Fasern liegen parallel zur Plattenrichtung) eine um einen Faktor von 2,3 höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen, als quer zur Platte. Für die Berechnung der Wärmebrücke ist somit für den Steg mit einem  $\lambda = 0,29 \text{ W/mK}$  zu rechnen. Dies wirkt sich negativ auf den zunächst auf der Hand liegenden Vorteil von Stegträgern aus. Des Weiteren weist [Borsch-Laaks, 2013-II] darauf hin, dass es in der Praxis bei Holz-Stegträgern in Verbindung mit Mattendämmstoffen aus geometrischen Gründen oftmals zu Hohlräumbildungen im Bereich der Stege kommt. Dies lässt sich effektiv nur durch Schütt- oder Einblasdämmungen oder durch Stegträger mit vorgefertigter Flankendämmung verhindern. Letztere sind allerdings vergleichsweise kostenintensiv.

[Borsch-Laaks, 2013-II] weist unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von [Horn, 2003] nach, dass die mit Stegträgern ausgeführte Wand einen U-Wert von ca. 111% des U-Wertes des Gefachs aufweist. Eine Konstruktion mit 6 cm breiten Vollholzständern kommt nach seinen Berechnungen demnach auf einen U-Wert in Höhe von ca. 119% des Gefachwertes. Diese Angaben zu Grunde liegt allerdings ein idealisierter, sehr niedriger Ständeranteil von unter 10% der Fläche. Dieser erscheint bei einem Ständerabstand von 62,5 cm und einer Ständerbreite von 6 cm zunächst plausibel. Betrachtet man allerdings tatsächliche Holzrahmenbauwände, so liegt der Ständeranteil aufgrund von statisch erforderlichen Randbohlen, Fensereinfassungen, etc. oft deutlich höher. In der Praxis hat sich nach Einschätzung der Verfasser ein Bedarf von ca. 2,85 m Ständer / m<sup>2</sup> Außenwand als brauchbarer Mittelwert herausgestellt. Dies entspricht bei einem 6 cm Ständer (Balkenschichtholz) einem Ständeranteil von ca. 17%. Für einen 8 cm Ständer (KVH) ergibt sich ein Ständeranteil von ca. 23 %.

Setzt man diese Ständeranteile an, so ergeben sich deutlich größere Unterschiede in den Einflüssen der Ständer auf den U-Wert der Außenwand. Betrachtet man darüber hinaus die Transmissionswärmeverluste, so ergeben sich für den Stegträger bei gleicher Dämmstärke ca. 11% mehr Transmissionswärmeverluste gegenüber der vollgedämmten Außenwand (z.B. WDVS). Für den Balkenschichtholzständer in 6 cm Breite liegt der Wert bei ca. +27%. Der Ständer aus 8 cm KVH kommt sogar auf ca. +36%.

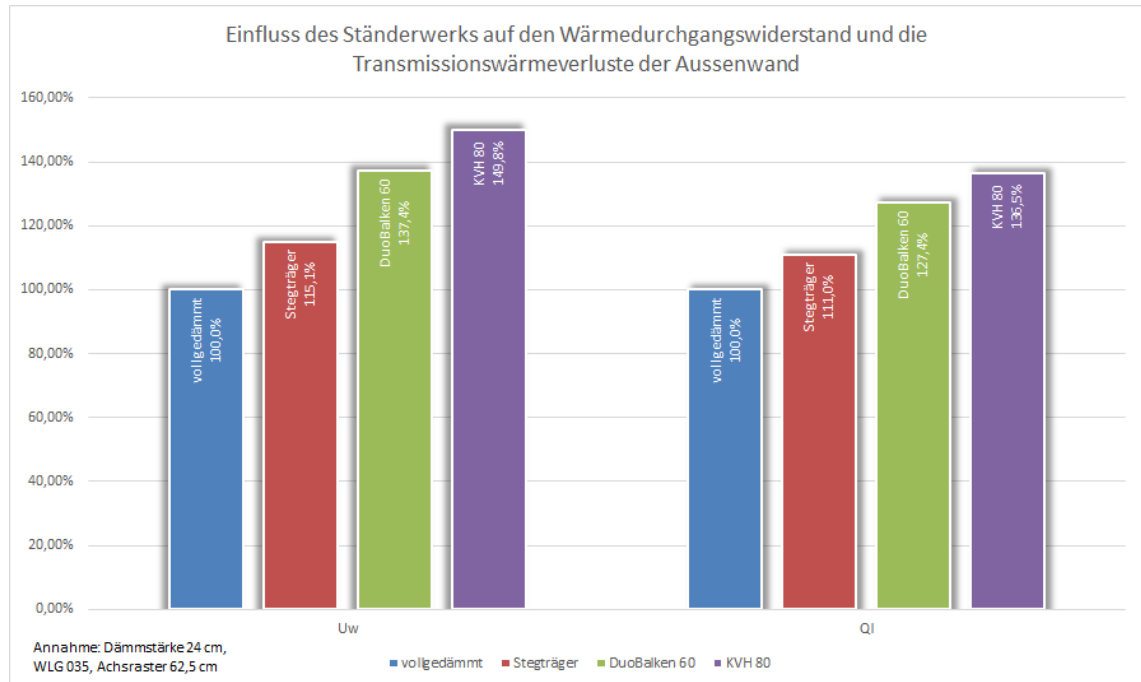


Abbildung 7.2.3-1: Einfluss des Ständerwerks auf den Wärmedurchgangswiderstand und die Transmissionswärmeverluste der Aussenwand

Der Einfluss auf die Ökobilanz des Gebäudes ist nun wieder sehr stark abhängig von dem gewählten Technikkonzept, da sich die zusätzlichen Transmissionswärmeverluste je nach gewählter Energiequelle unterschiedlich stark auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirken.

Betrachtet man zunächst nur den Einfluss auf das Treibhauspotential in Folge des zusätzlichen Heizwärmebedarfs, so zeigt sich zunächst, dass sich insbesondere für Technikkonzepte mit fossilen Energieträgern nach einer Volldämmung die Konstruktion mit Holz-Stegträgern am positivsten auswirkt. So erzeugen für eine Aussenwand mit 24 cm Dämmung die Holzstegträger in der Beheizung mit Gas für vergleichsweise moderate Mehremissionen von ca. 5,7 t CO<sub>2</sub>-Äqv. Im Vergleich hierzu erzeugen die Ständer aus Balkenschichtholz (6 cm) bzw. die KVH (8 cm) bereits Mehremissionen von ca. 15,3 bzw. 20,4 t CO<sub>2</sub>-Äqv..

Bei einer Beheizung mit erneuerbaren Energiequellen, ist der Unterschied weniger drastisch. Aber auch hier ist bei einer reinen Betrachtung des Treibhauspotentials in Folge der Beheizung die Konstruktion mit Stegträgern nach der Volldämmung die beste Lösung.

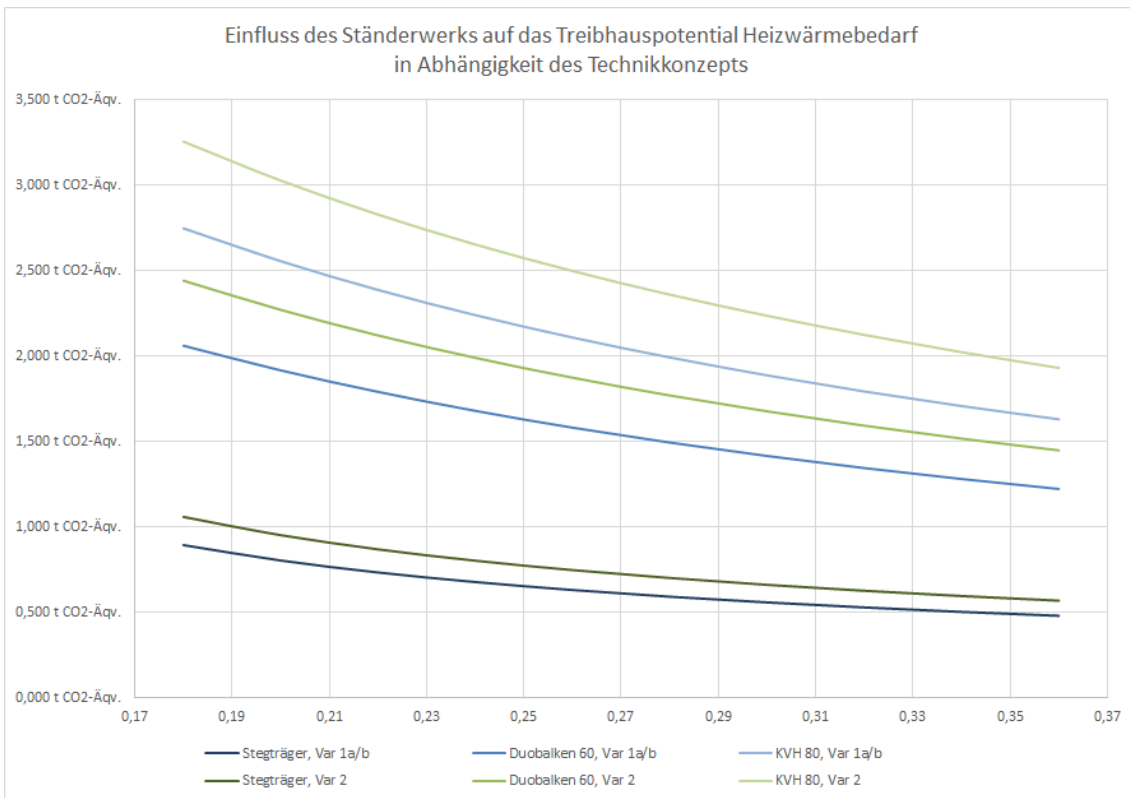


Abbildung 7.2.3-2: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential aus dem Heizwärmebedarf in Abhängigkeit des Technikkonzepts

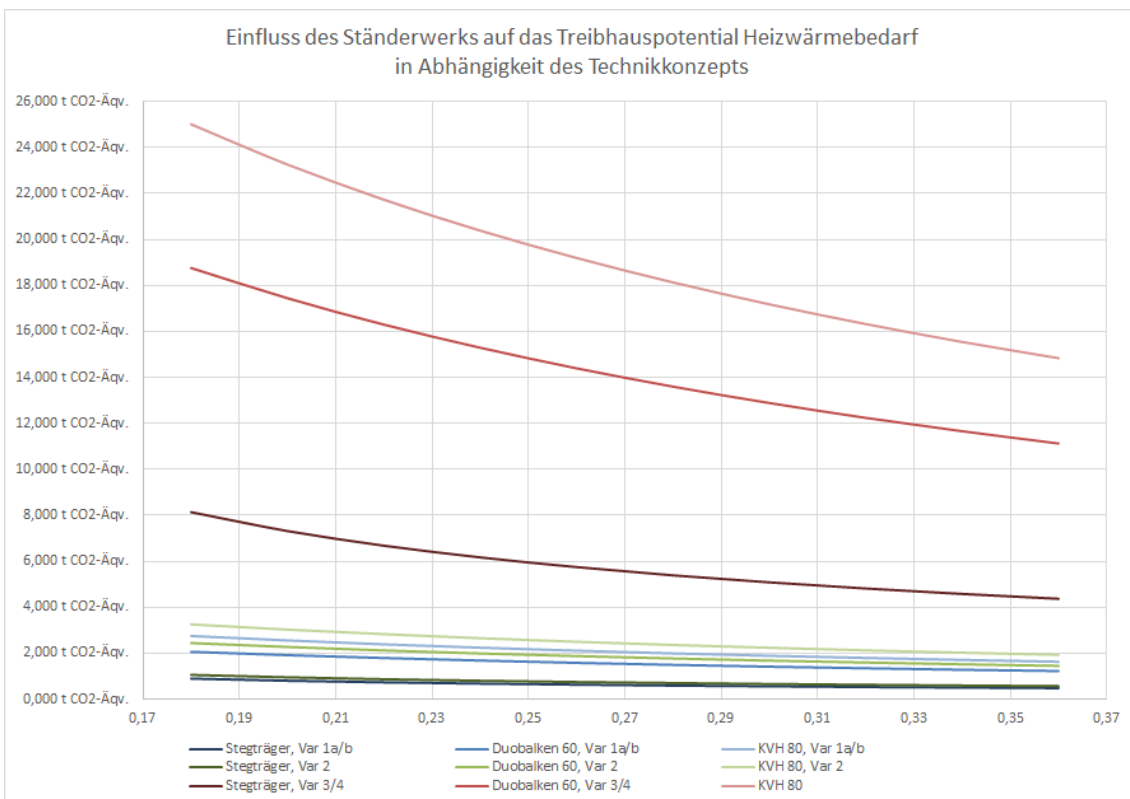


Abbildung 7.2.3-3: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential aus dem Heizwärmebedarf in Abhängigkeit des Technikkonzepts

Neben dem Treibhauspotential in Folge der Beheizung wirkt sich die Ständerwahl aber natürlich auch auf das Treibhauspotential aus der Herstellung der Wand aus.

So haben die Ständer unterschiedliche Werte. Am Beispiel eines Ständers mit einer zu überbrückenden Höhe von 24 cm zeigt sich dies wie folgt:

<b>Stegträger 58/240</b>	0,310 kg CO <sub>2</sub> -Äqv. je lfdm
<b>Balkenschichtholz 60/240</b>	-3,248 kg CO <sub>2</sub> -Äqv. je lfdm
<b>KVH 80/240</b>	-5,118 kg CO <sub>2</sub> -Äqv. je lfdm

Abbildung 7.2.3-4: CO<sub>2</sub>-Bilanz unterschiedlicher Holzrahmenbauständer

Hinzu kommt, dass durch den Ständer jeweils unterschiedliche Mengen an Dämmstoff ersetzt werden. Für einen Glaswollfilz der WLG035 liegt das Treibhauspotential bei 40,800 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. je m<sup>3</sup>. Betrachtet man das mit, so ergibt sich ein Abzug von:

<b>Stegträger 58/240</b>	-0,158 kg CO <sub>2</sub> -Äqv. je lfdm
<b>Balkenschichtholz 60/240</b>	-0,588 kg CO <sub>2</sub> -Äqv. je lfdm
<b>KVH 80/240</b>	-0,783 kg CO <sub>2</sub> -Äqv. je lfdm

Abbildung 7.2.3-5: Unterschiede in der CO<sub>2</sub>-Bilanz unterschiedlicher Holzrahmenbauständer durch größere oder geringere Mengen Dämmstoff

Somit ergeben sich Gesamtwerte von:

<b>Stegträger 58/240</b>	0,151 kg CO <sub>2</sub> -Äqv. je lfdm
<b>Balkenschichtholz 60/240</b>	-3,835 kg CO <sub>2</sub> -Äqv. je lfdm
<b>KVH 80/240</b>	-5,901 kg CO <sub>2</sub> -Äqv. je lfdm

Abbildung 7.2.3-6: CO<sub>2</sub>-Bilanz unterschiedlicher Holzrahmenbauständer unter Berücksichtigung des Dämmstoffs

In der Gesamtbetrachtung für unterschiedliche Dämmstärken stellt sich das dann wie folgt dar. Es zeigt sich, dass der Holz-Stegträger sich nicht nennenswert auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirkt, die Vollholzständer die Emissionen aber deutlich absenken.

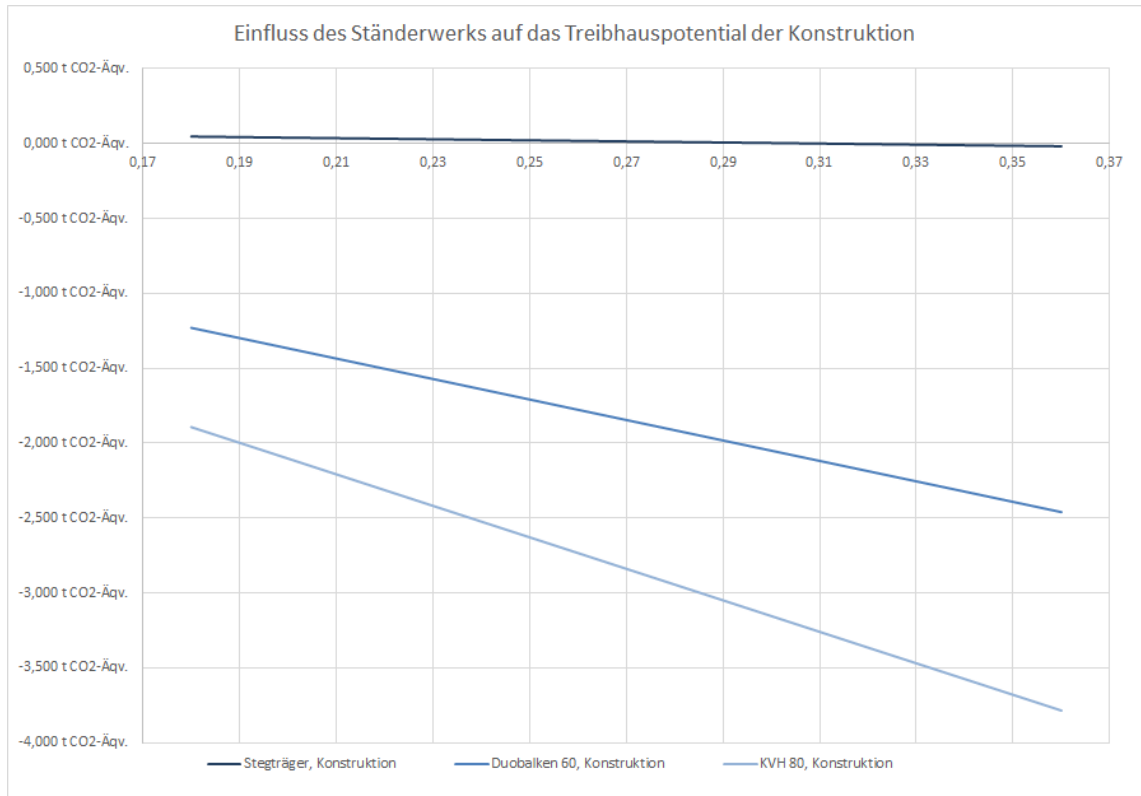


Abbildung 7.2.3-7: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential der Aussenwand (Konstruktion) in Abhängigkeit der Dämmstärke

Betrachtet man nun den Einfluss auf das Treibhauspotential von Beheizung des Gebäudes und Herstellung der Ständer gemeinsam, so führt dies für die Gebäude mit Technikkonzepten, die auf erneuerbare Energiequellen setzen zu überraschenden Ergebnissen. Wohingegen für die Technikkonzepte mit fossilen Energieträgern, die Mitbetrachtung der Herstellung der Ständer lediglich zu einer Abschwächung der Gesamteffekte führt, die Grundsätzlichkeiten aber unverändert erhalten bleiben, kehren sich die Verhältnisse für Technikkonzepte, die erneuerbare Energiequellen nutzen, vollständig um.



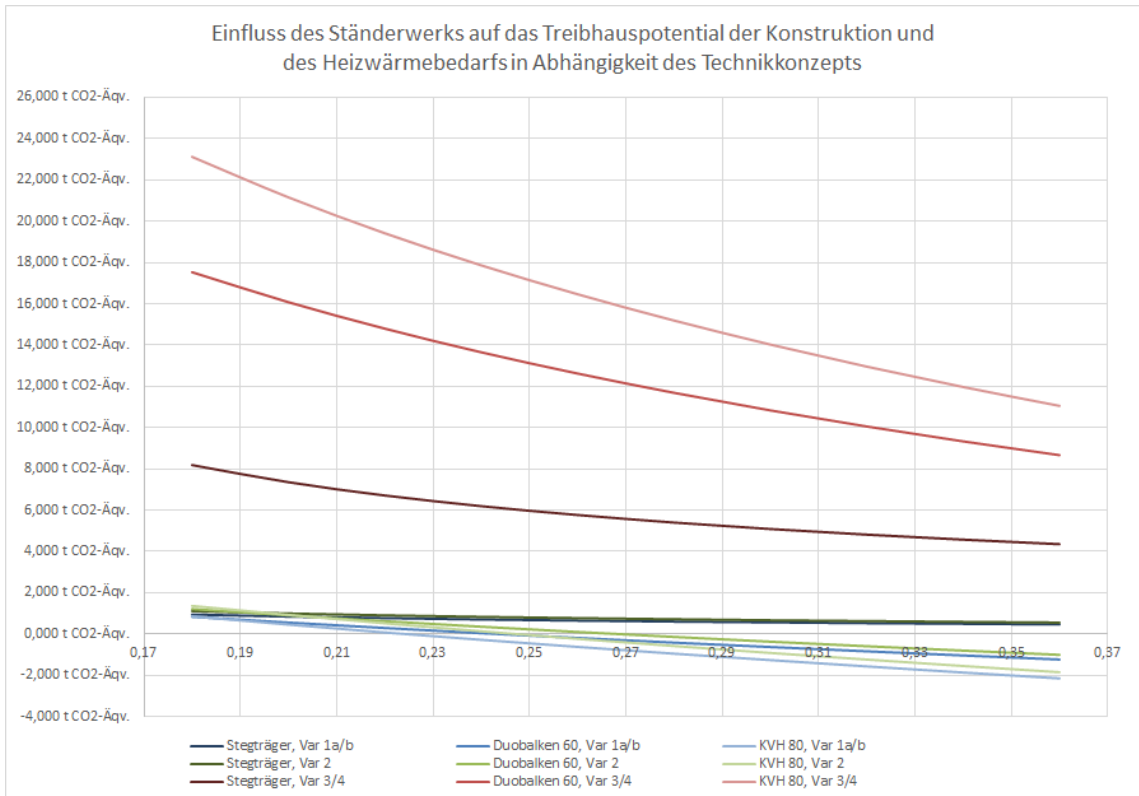


Abbildung 7.2.3-8: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential der Aussenwand (Konstruktion + Nutzungsphase) in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Technikkonzepts

Die Konstruktion mit Stegträgern ist für diese Konzepte nur noch für Dämmstärken unterhalb von 16 cm (Var 1a/b) bzw. 21 cm (Var 2) die vorteilhafteste Lösung. Für größere Dämmstärken erweist sich der 80 mm Vollholzständer aus KVH als die bessere Lösung.

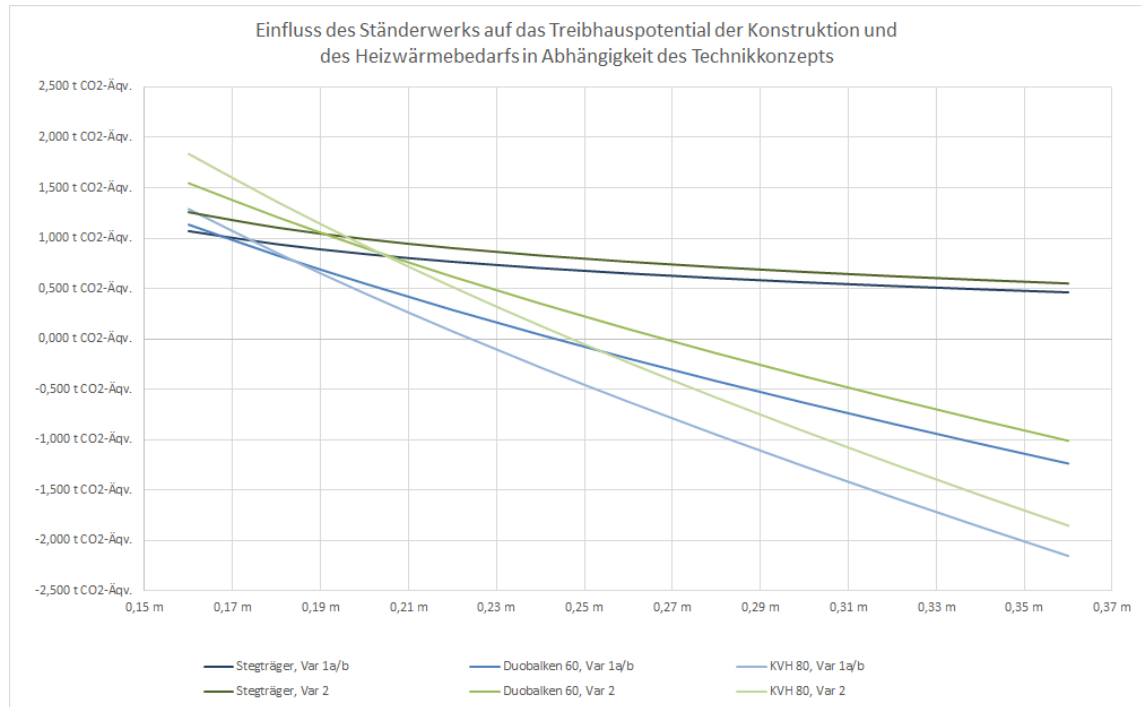


Abbildung 7.2.3-9: Einfluss des Ständerwerks auf das Treibhauspotential der Aussenwand (Konstruktion + Nutzungsphase) in Abhängigkeit der Dämmstärke und des Technikkonzepts (ohne Varianten mit fossilen Energieträgern)

Dennoch bleibt die Erkenntnis, dass die Verwendung von Ständern (insbesondere aus Balkenschichtholz oder KVH) innerhalb der Dämmebene einen durchaus nennenswerten Einfluss auf die Transmissionswärmeverluste der Aussenwand in Höhe von ca. 27% bzw. 35% hat (vgl. Abbildung 7.2.3-1). Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Forschungsprojekts die Überlegung angestellt, ob es nicht auch im Holzrahmenbau möglich ist, eine Konstruktion zu finden, mit der eine Volldämmung ohne Wärmebrücken ähnlich der eines Wärmedämmverbundsystems gelingt. Einer solchen Herangehensweise folgend könnten ggü. einer Konstruktion mit Ständern aus Balkenschichtholz je nach gewählter Dämmstärke zwischen 22,8 und 27,1% der Dämmstärke eingespart werden, wenn es gelingt die strukturelle Wärmebrücke zu eliminieren. Vor dem Hintergrund der Überlegungen zu der untersuchten transparenten Fassadenbekleidung aus Polycarbonatplatten, die auch über zwei Geschosse ( $h=5,5$  m) gespannt werden können und lediglich mit Windsogankern gesichert werden müssen erscheint es bei einer geeigneten Dämmstoffwahl durchaus als möglich, das Ständerwerk nur einseitig zu beplanken, nach innen sichtbar zu belassen und die Dämmung außenseitig aufzubringen. Für die Unterkonstruktion der Polycarbonatplatten wäre dann nur jeweils unten und oben ein Auflager erforderlich, dass sich im Attika und Sockeldetail weitestgehend wärmebrückenfrei realisieren lassen sollte. Die erforderliche Windsogsicherung könnte bei entsprechendem Nachweis durch eine Verschraubung in die Holzweichfaserdämmung erfolgen.

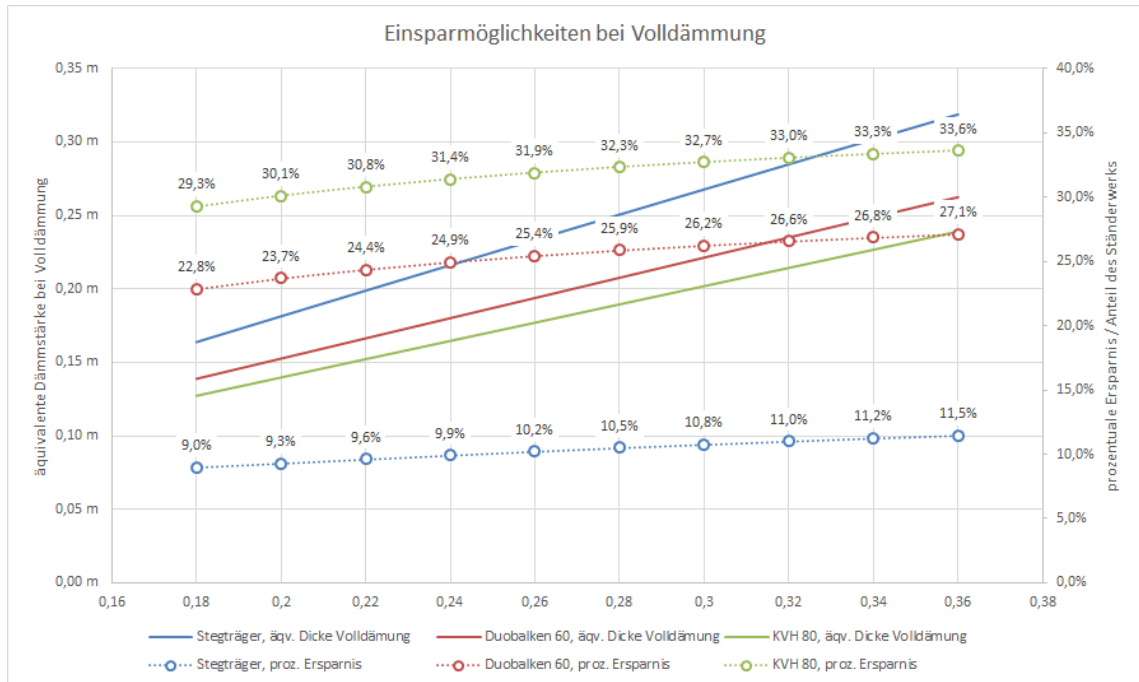


Abbildung 7.2.3-10: Einsparmöglichkeiten der Bauteildicke bei Volldämmung in Abhängigkeit vom ansonsten gewählten Holzrahmenbauständer (absolut und prozentual)

Eine solche Konstruktion hat darüber hinaus den Vorteil, dass die Höhe der Ständer nicht mehr nach der Bauphysik (Dämmstoffstärke) bemessen werden muss, sondern auf das statisch erforderliche Minimum reduziert werden kann. Die Vernagelung der Luftdichtheits- und Aussteifungsebene (hier zunächst OSB) auf den Ständern kann nicht sichtbar von außen erfolgen. Dies würde auch bei einem Ersatz der OSB durch optisch ruhigere und ansprechendere Holzwerkstoffe (z.B. Dreischicht- oder Furniersperrholzplatten) zu einem sauberen Erscheinungsbild führen. Weitere Vorteile bestünden in der Form, als dass die frei im Innenraum stehenden Ständer dazu verwendet werden könnten, Regalbretter und weitere Möblierungsgegenstände aufzunehmen. Aufgrund der Tatsache, dass die Gebäude, Raum- und Fensterabmessungen des +++Hauses sauber auf das Konstruktionsraster von 62,5 cm abgestimmt wurden entstünde bei entsprechender Gestaltung solcher Möblierungsergänzungen eine eigenständige Ästhetik, die direkt aus den bauphysikalischen, ökologischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten abgeleitet ist. Solche Elemente zu entwickeln, ist nach Auffassung der Verfasser enorm wichtig, damit über solche Maßnahmen etwas entstehen kann, was ein Nutzer als einen Mehrwert erfährt und was somit einem Gefühl, dass Ökologie etwas mit Verzicht zu tun haben muss entgegen gewirkt werden kann. Dieses Thema sollte daher im Anschluss an das Forschungsvorhaben dringend vertieft werden.

Schaut man sich die Kosten einer klassischen Holzrahmenbauwand mit Glaswollfilzdämmung zwischen den Ständern im Vergleich zu der mit Holzweichfaser außenseitig vollgedämmten Konstruktion an, so stellt man fest, dass der eigentlich große Preisunterschied zwischen Holzweichfaser- und Glaswollfilzdämmung aufgrund der ermöglichten Materialersparnis stark reduziert wurde. Für die untersuchten Dämmstärken belaufen sich die Mehrkosten auf maximal 1,7% - 4,2%. Je besser der U-Wert, desto kleiner fällt der Mehrpreis aus.

Die absoluten Mehrkosten für die gesamte Aussenwand des +++Hauses belaufen sich selbst für die Außenwandkonstruktion mit dem geringsten Dämmstandard ( $U=0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $d=16\text{cm}$  für Zwischenständerdämmung bzw.  $d=14 \text{ cm}$  für Volldämmung) nur auf weniger als 400,00 EUR. Für eine Aussenwand mit einem U-Wert von  $0,14$  belaufen sich die Mehrkosten nur auf ca. 320 EUR.

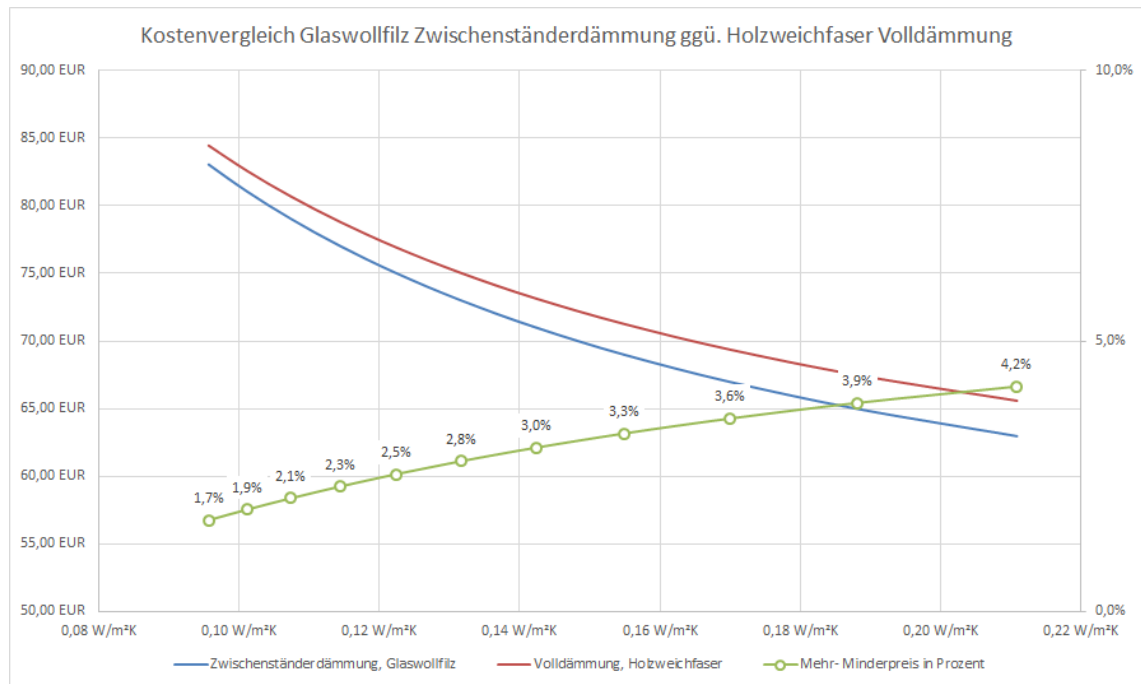


Abbildung 7.2.3-11: Kostenvergleich Glaswollefilz-Zwischenständerdämmung ggü. Holzweichfaser Volldämmung in Abhängigkeit vom gewählten U-Wert

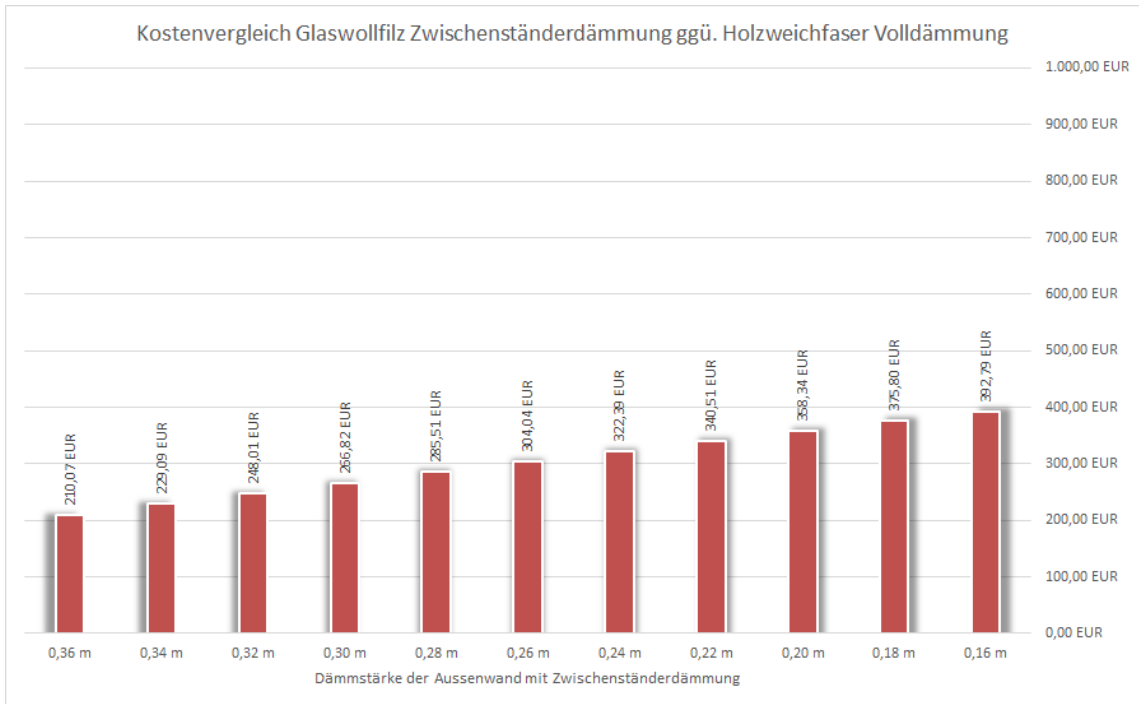


Abbildung 7.2.3-12: absolute Mehrkosten für das +++Haus bei Holzweichfaser Voldämmung anstelle Glaswollefilz Zwischenständerdämmung

Diesem geringen Mehrpreis gegenüber steht allerdings eine enorme Einsparung in der Herstellung des Gebäudes von 8,46 t CO<sub>2</sub>-Äqv. gegenüber. Das entspricht spezifischen Optimierungskosten von 3,8 cent pro kg CO<sub>2</sub>-Äqv. und ist damit extrem kostengünstig.

	GWP pro m <sup>2</sup> Aussenwand	GWP Aussenwand +++Haus	Einsparung	Mehrkosten	spezifische Optimierungskosten
<b>Zwischenständerdämmung</b> Glaswollefilz, d=24cm Balkenschichtholz 6o/24o	-0,748 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-0,11 t CO <sub>2</sub> -Äqv.			
<b>Voldämmung</b> Holzweichfaserdämmung, d=20cm Balkenschichtholz 6o/16o	-57,143 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-8,57 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-8,46 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	322,39 EUR	3,8 cent / kg CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 7.2.3-13. Absolute CO<sub>2</sub>-Ersparnis für das +++Haus bei Holzweichfaser Voldämmung anstelle Glaswollefilz Zwischenständerdämmung

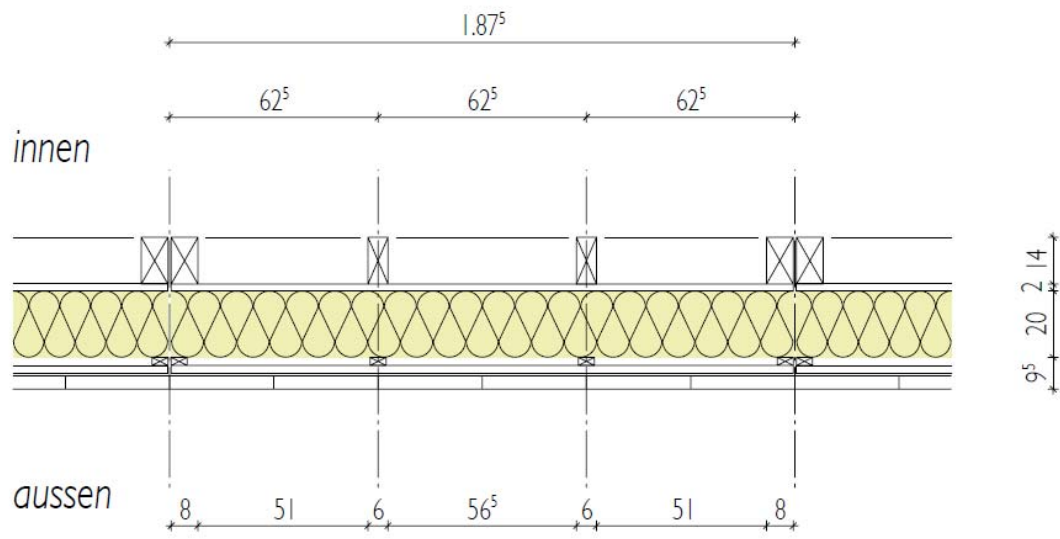


Abbildung 7.2.3-14: alternativer Aussenwandaufbau für das +++Haus bei Holzweichfaser Volldämmung anstelle Glaswollefilz Zwischenständerdämmung

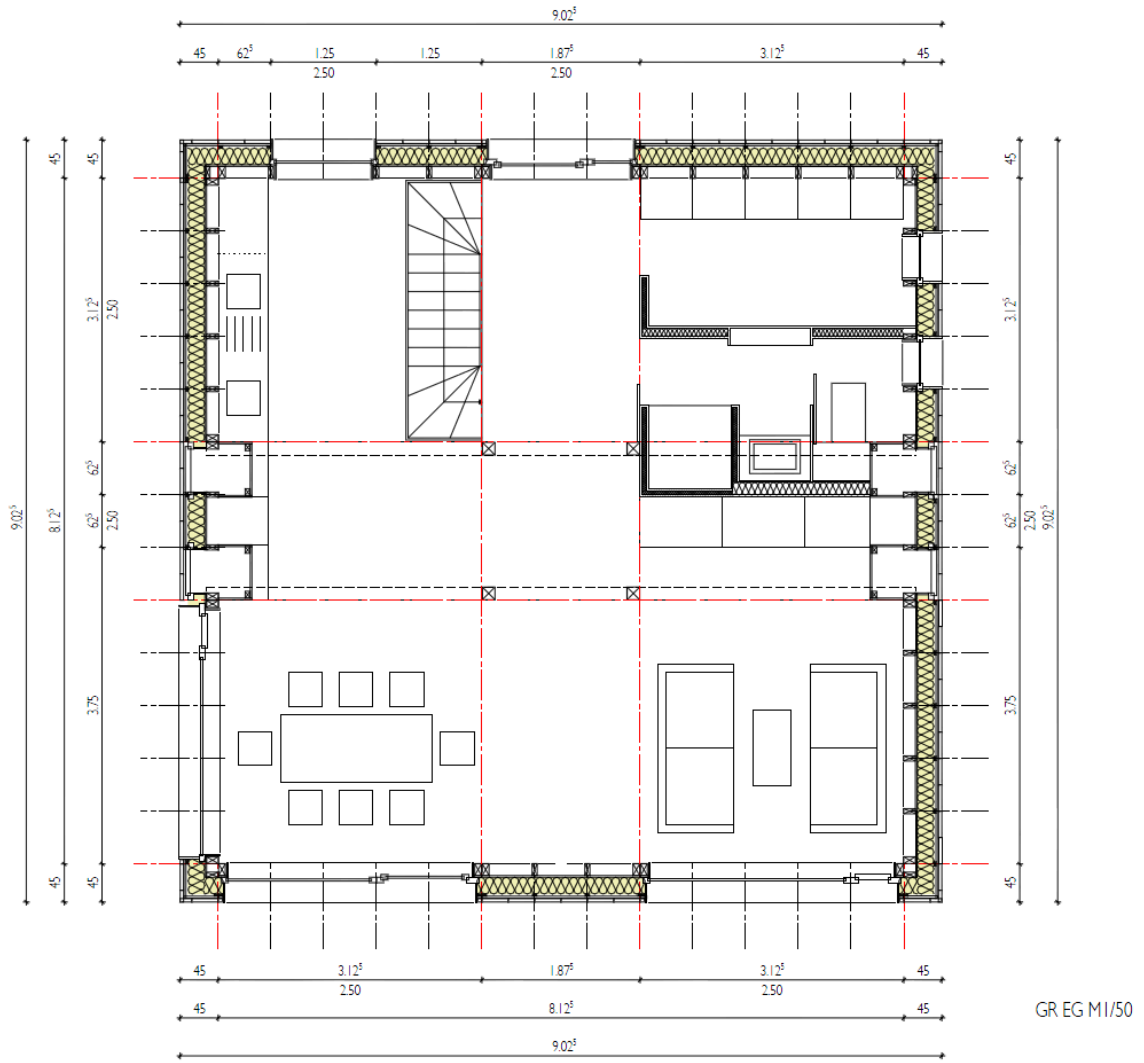


Abbildung 7.2.3-15: alternativer Aussenwandaufbau in der Grundrissdarstellung EG

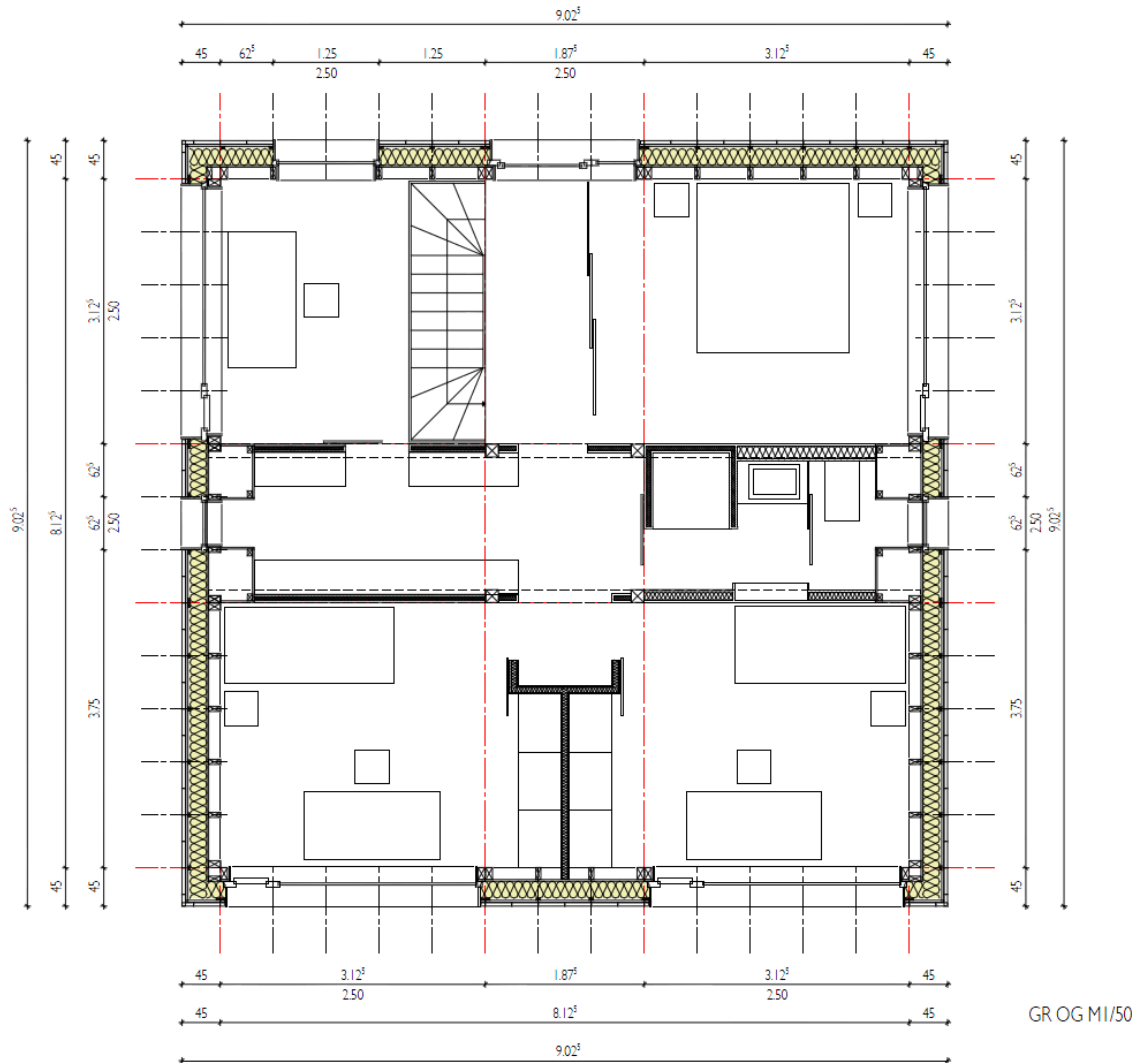


Abbildung 7.2.3-16: alternativer Aussenwandaufbau in der Grundrissdarstellung EG

#### 7.2.4 Gipskartonbekleidung Aussenwand

- Die klassische Holzrahmenbauwand aus Gipskarton, OSB, Vollholzständer, Glasfaserdämmung und Unterdeckplatte aus MDF hat in Herstellung, Unterhalt und Entsorgung einen um den Faktor 25 kleineren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck als eine ungedämmte 17,5 cm Kalksandsteinwand.
- Dennoch emittiert sie in Ihrem Lebenszyklus mehr CO<sub>2</sub>, als das Sie bindet.
- Durch Weglassen der Gipskartonbekleidung können Ökologie der Außenwand verbessert und Kosten gespart werden.
- Die Dämmstoffwahl ermöglicht es, die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Außenwand in Holzrahmenbauweise entscheidend zu verbessern.



## Ökobilanz der einzelnen Bestandteile

Betrachtet man die Bestandteile einer klassischen Holzrahmenbauwand (Gipskarton, OSB, Glasfaserdämmung, Holzständer, MDF) hinsichtlich Ihres Treibhauspotentials, so fällt auf, dass lediglich die Ständer und in geringem Umfang die OSB Platte mehr CO<sub>2</sub> in Ihrem Lebenszyklus binden, als Sie emittieren (vom Wert her negative CO<sub>2</sub>-Bilanz). Sowohl die Dämmung, als auch in geringem Umfang die Unterdeckplatte aus MDF weisen eine vom Wert her positive und in Ihrer Wirkung somit negative CO<sub>2</sub>-Bilanz auf. Die auf der Innenseite vorallem aus optischen Gründen montierte Gipskartonplatte sorgt am Ende dafür, dass die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz der Wandkonstruktion einen positiven Wert ausweist und somit negativ zum Treibhauseffekt beiträgt auch wenn der Wert mit ca. 1,2 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. / m<sup>2</sup> Aussenwand nicht hoch ausfällt und sicher deutlich besser ist als der von mineralischen Bauweisen. Zum Vergleich: eine ungedämmte Kalksandsteinwand in 17,5 cm Stärke weist bereits ein um den Faktor 25 höheres Treibhauspotential von 29,85 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. auf. In der Betrachtung der nicht erneuerbaren Primärenergie (PENRT) stellt sich dies nicht ganz so negativ dar, was vorallem daran liegt, dass die MDF Platte zwar einen schlechten GWP Wert hat, bzgl. des PENRT aber einen negativen Wert aufweist. Dennoch wird an diesem Bauteil deutlich, dass es bei Verwendung von Bauteilen, die sich nicht mit nachwachsenden Rohstoffen realisieren lassen (hier Gipskarton) auch im Holzbau mit einfachen Mitteln nicht möglich ist, eine CO<sub>2</sub>-Neutralität des Bauteils zu erreichen. Diese so weit verbreitete Wandkonstruktion wird daher auch dem Image des vermeintlich "CO<sub>2</sub>-neutralen" Holzbaus nur bedingt gerecht.

Insofern erscheint es als sinnvolle Strategie, sich bei der Auswahl der einzelnen Materialien zunächst die Frage zu stellen, ob einzelne Schichten mit negativem Einfluss auf die Ökobilanz nicht schlichtweg weg gelassen werden können. Die innere Gipskartonbekleidung stellt mit Sicherheit ein solches Element dar, durch dessen Weglassen, man die Ökobilanz verbessern und Kosten sparen kann. Gleichwohl erfordert dies, über die Art der Fügung neu nachzudenken, damit auch eine optisch ansprechende Lösung entsteht. Ansätze hierzu finden sich in den vorangegangenen, sowie weiteren Kapiteln (vgl. z.B. 6.1.3 Ständerwerk).

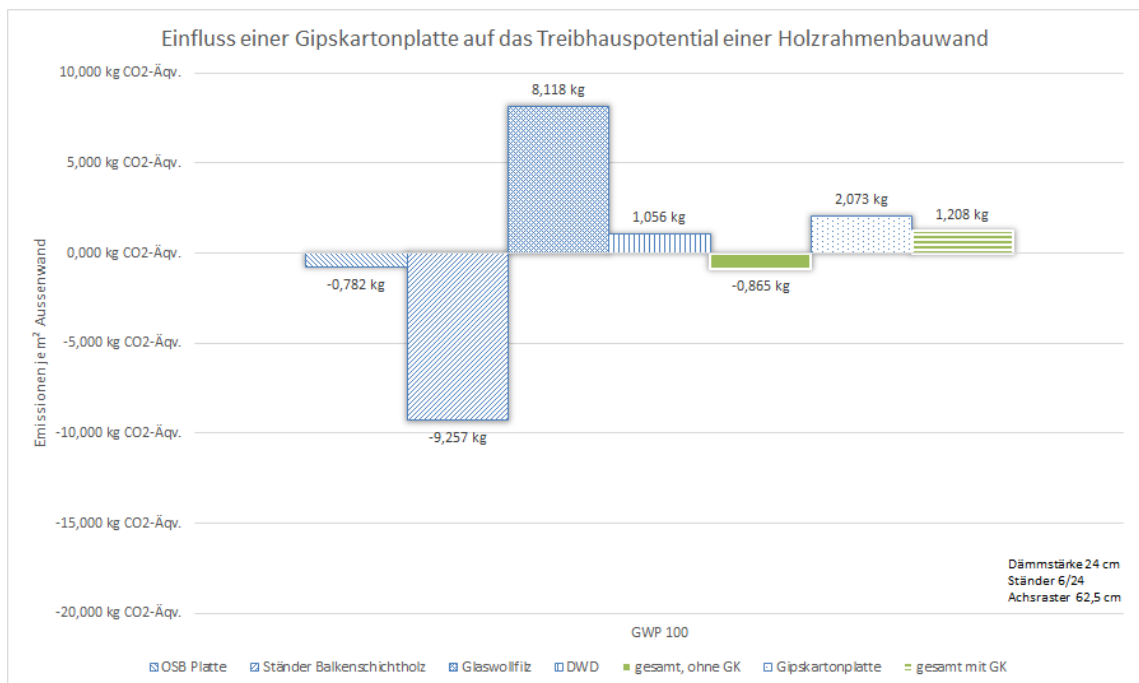


Abbildung 7.2.4-1: Einfluss einer Gipskartonplatte auf das Treibhauspotential einer Holzrahmenbauwand

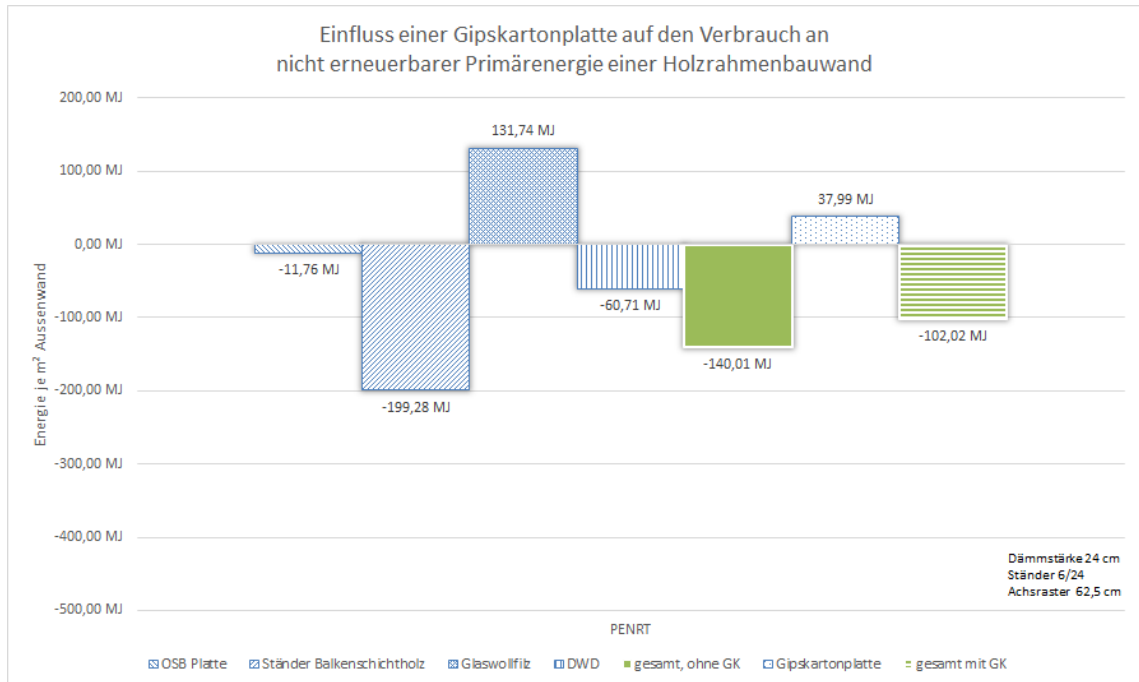


Abbildung 7.2.4-2: Einfluss einer Gipskartonplatte auf die nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand einer Holzrahmenbauwand

Betrachtet man als Alternative zur Glasfaserdämmung eine Holzfasereinblasdämmung, so wird deutlich, welcher großer Hebel hierin liegt. Der Tausch der Dämmung führt im Endergebnis selbst bei Verwendung einer inneren Beplankung mit Gipskartonplatten zu einem deutlich negativen GWP Wert, mit dem sich unvermeidbare Emissionen aus anderen Bauteilen ein Stück weit kompensieren lassen.

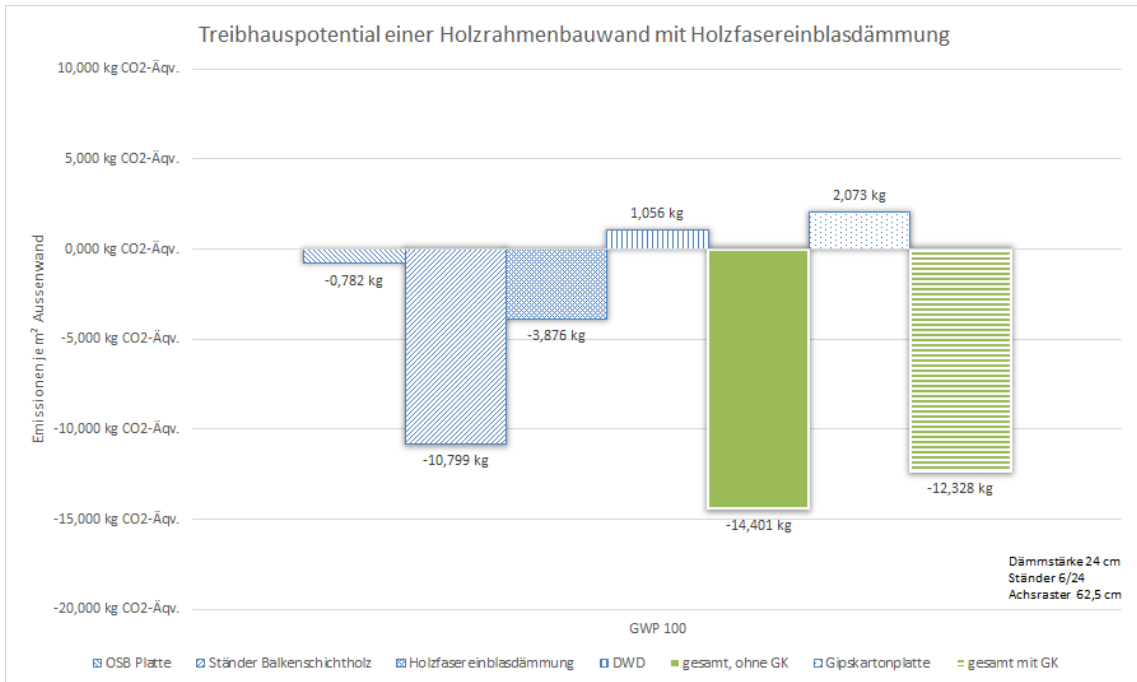


Abbildung 7.2.4-3: Treibhauspotential einer gipskartonbekleideten Holzrahmenbauwand mit Holzfasereinblasdämmung

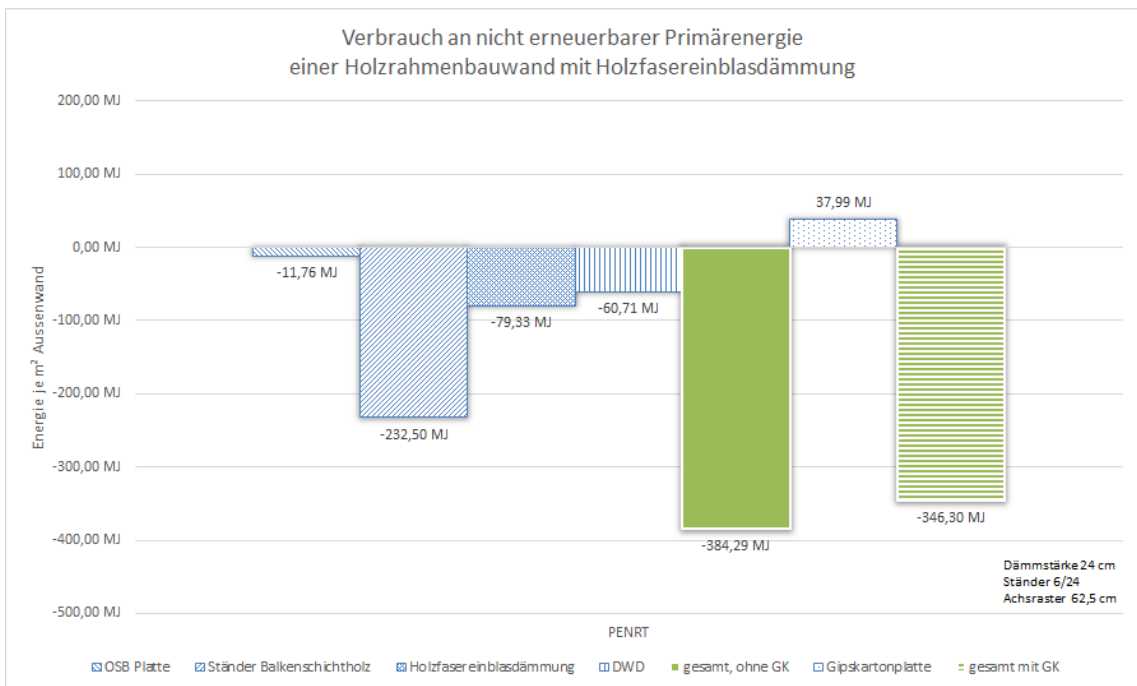


Abbildung 7.2.4-4: nicht erneuerbarer Primärenergieaufwand einer gipskartonbekleideten Holzrahmenbauwand mit Holzfasereinblasdämmung

### 7.2.5 solaraktive Fassadenbekleidung

- Durch ein transparentes Fassadenmaterial und eine regelbare Hinterlüftungsebene lassen sich Wärmegewinne erzielen, die sowohl zur Verringerung der Lüf-

tungswärmeverluste, als auch der Transmissionswärmeverluste genutzt werden können.

- Die erzielbaren Einsparungen bei den Lüftungswärmeverlusten werden durch die Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage so stark kannibalisiert, dass sich eine Nutzung der solaraktiven Fassade auch im Hinblick auf die sich in diesem Zusammenhang ergebenden, hygienischen Fragestellungen in diesem Sinne nicht lohnt. Ohne eine Wärmerückgewinnung wären die sich ergebenden Einsparungen zwar deutlich größer aber dennoch schlechter als eine Wärmerückgewinnung alleine, weshalb auch dies als nicht sinnvoll bewertet werden muss.
- Eine Nutzung zur Reduktion von Transmissionswärmeverlusten ergibt im Gegensatz hierzu deutliche Einsparmöglichkeiten, die eine solaraktive Fassade in diesem Sinne attraktiv erscheinen lassen.
- Ob sich eine solaraktive Fassade, die auf transmissive Gewinne setzt auch in der Gesamtbetrachtung der CO<sub>2</sub>-Bilanz lohnt, hängt stark vom gewählten Technik-konzept ab.
- Für Technikkonzepte, die auf erneuerbare Energiequellen setzen ist eine transmissiv genutzte, solaraktive Fassade aufgrund der vergleichsweise schlechten GWP Werte des Polycarbonats hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Bilanz nicht sinnvoll. Im Vergleich zur Putz- oder Lärchenholzschalung fallen die Einsparungen gegenüber den Mehremissionen für Herstellung, Unterhalt und Entsorgung jedoch geringer aus.
- Für Technikkonzepte, die auf fossile Energieträger setzen, ist eine transmissiv genutzte, solaraktive Fassade allerdings sehr interessant. Am Beispiel des +++Hauses können so ca. 7,4 t CO<sub>2</sub>-Äqv. eingespart werden.
- Durch eine solaraktive Fassade lassen sich im Vergleich zu einer Putzfassade je nach Technikkonzept zwischen 1,5 m<sup>2</sup> und 4,3 m<sup>2</sup> Photovoltaikfläche einsparen

## Reduktion von Transmissionswärmeverluste und/oder Lüftungswärmeverluste

Im Rahmen der Arbeitspakete AP 04 Außenwand und AP 08.3 solaraktive Fassade wurden neben der Analyse der eigentlichen Außenwandkonstruktion (unterschiedliche Wandaufbauten) mittels einer umfangreichen Simulation auch die unterschiedlichen solaraktiven Effekte untersucht, die erzielt werden können, wenn als Fassadenbekleidung ein transparentes Material gewählt wird, dessen Hinterlüftungsebene in der Heizperiode verschließbar ausgeführt wird, sodass die entstehende Wärme für das Gebäude genutzt werden kann.

Es wurden sowohl die transmissive Möglichkeit (Nutzung zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste der Wand) als auch der konvektive Möglichkeit (Nutzung zur Vorwärmung der angesaugten Außenluft/Zuluft - Reduzierung der Lüftungswärmeverluste) zur Wärmenutzung untersucht. Grundsätzlich konnten für beide Effekte sowohl nominal als auch prozentual durchaus nennenswerte Einsparungen ermittelt werden. Die transmissive Nutzung erzielt dabei auch aufgrund der Tatsache, dass diese auf der gesamten opaken Fassadenfläche von ca. 150 m<sup>2</sup> genutzt werden kann die höheren Einsparungen. Es lassen sich so über 40% der Transmissionswärmeverluste einsparen. Bei konvektiver Nutzung lassen sich dagegen 12,3 % der Lüftungswärmeverluste einsparen. Allerdings ist dies mit einer geringeren Fläche von nur 5,4 m<sup>2</sup> der Aussenwand möglich. Dieser Wert ist im Vergleich zu einer konventionellen Wärmerückgewinnung einer Lüftungsanlage relativ gering. Im simulierten Beispiel konnte der

Wärmetauscher der Lüftungsanlage ca. 82% der Lüftungswärmeverluste zurückgewinnen. Aus diesem Grund würde man auf diese Form der Rückgewinnung jedoch nicht verzichten wollen, was dazu führt, dass bei einer Kombination der Vorwärmung der Außenluft in der Fassade mit einer WRG der Lüftungsanlage die zusätzliche Einsparung durch die solaraktive Fassade auf unter 2% der gesamten Lüftungswärmeverluste absinkt.

	nominal	prozentual
<b>Ersparnis Transmissionswärmeverluste</b>	26.160,5 kWh	-40,1%
<b>Ersparnis Lüftungswärmeverluste</b>	19.075,0 kWh	-12,3%
<b>Ersparnis Lüftungswärmeverluste bei gleichzeitiger Nutzung einer Lüftungsanlage mit WRG</b>	3.035,0 kWh	-2,0%

Abbildung 7.2.5-1: Einsparpotentiale unterschiedlicher Wärmeverluste bei Realisierung einer solaraktiven Fassade

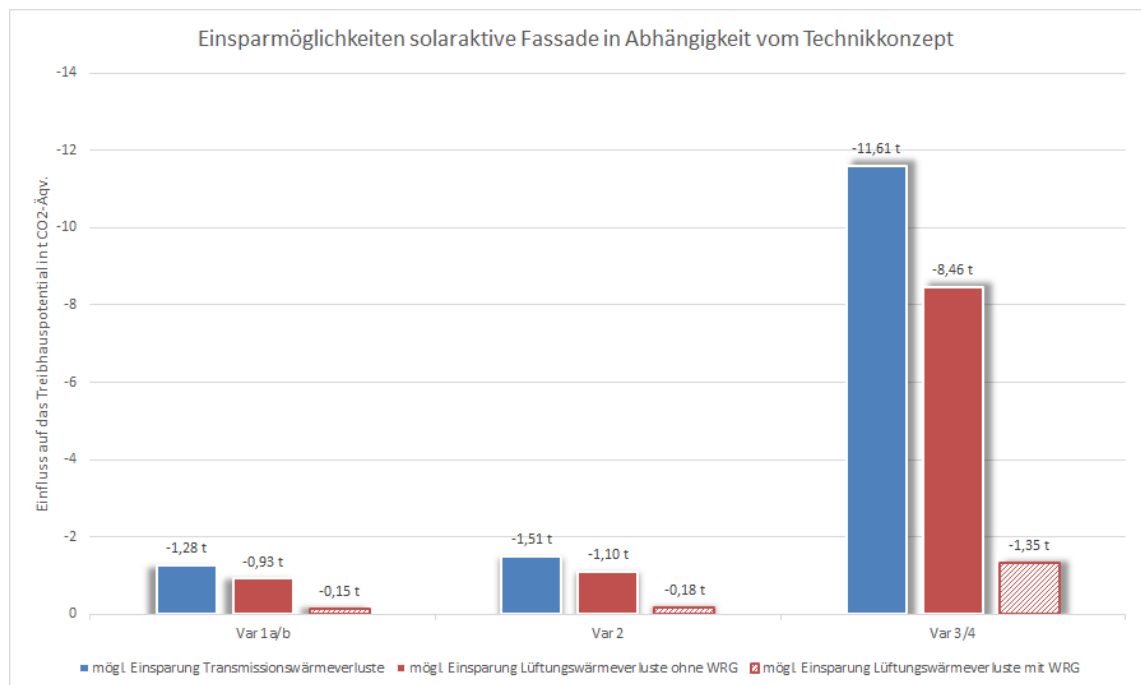


Abbildung 7.2.5-2: Einsparmöglichkeiten einer solaraktiven Fassade in Abhängigkeit vom Technikkonzept

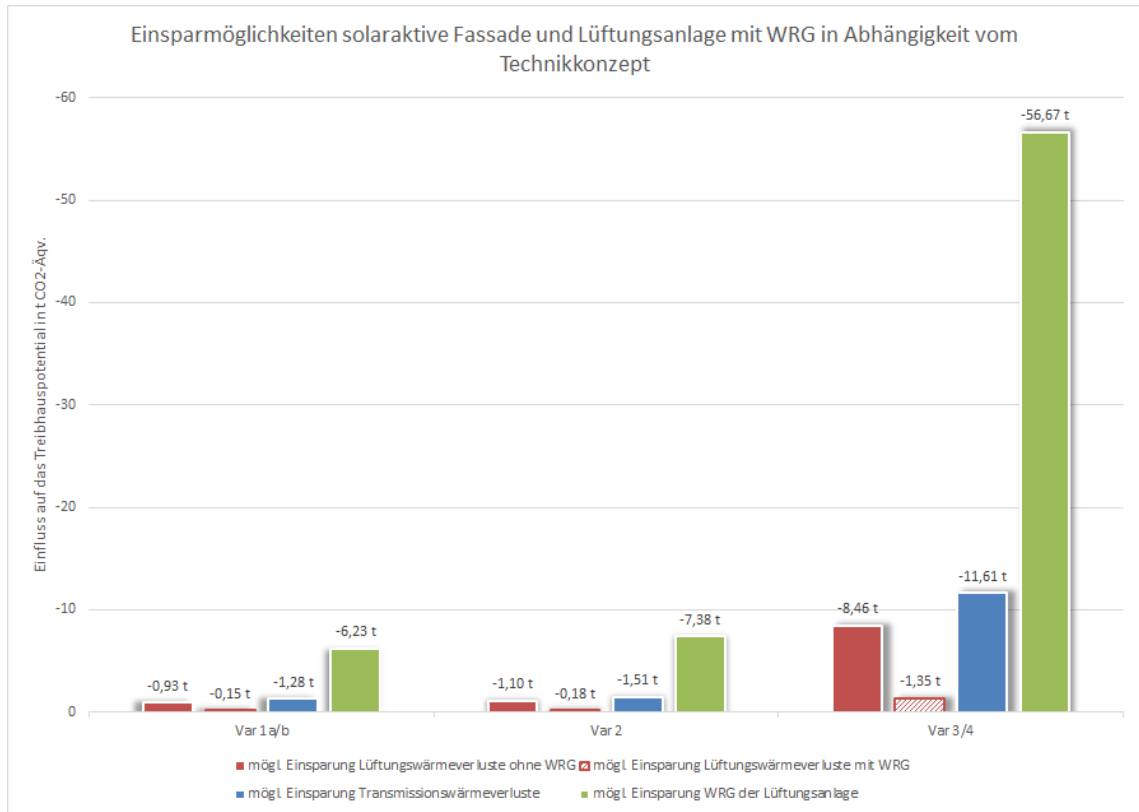


Abbildung 7.2.5-3: Einsparmöglichkeiten einer solaraktiven Fassade in Kombination mit einer Lüftungsanlage mit WRG in Abhängigkeit vom Technikkonzept

Im Folgenden Diagramm sind die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten der Nutzung aufgezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Nutzung der solaraktiven Fassade zur Reduktion der Transmissionswärmeverluste am meisten rechnet. Zwar kommt die Variante in der eine Teilfläche von einem Meter Breite auf der Südfassade zur Vorwärmung der Außenluft und nur der Rest der Fassade zur Reduktion der Transmissionswärmeverluste bei gleichzeitiger Nutzung einer WRG genutzt wird auf die höchste Einsparung. Allerdings liegt der Unterschied zur reinen Nutzung zur Reduktion von Transmissionswärmeverlusten und gleichzeitiger WRG über die gesamte Nutzungsdauer von 50 Jahren nur in der Größenordnung von 100 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. Dieser sehr geringe Vorteil lohnt angesichts der nicht ganz unproblematischen, hygienischen Fragestellungen, die mit der Nutzung des Hinterlüftungsspalts als Außenluftkanal einhergehen, den Aufwand nicht, sodass die reine Nutzung der solaraktiven Fassade zur Reduktion Transmissionswärmeverluste nach Ansicht der Verfasser zu präferieren ist.

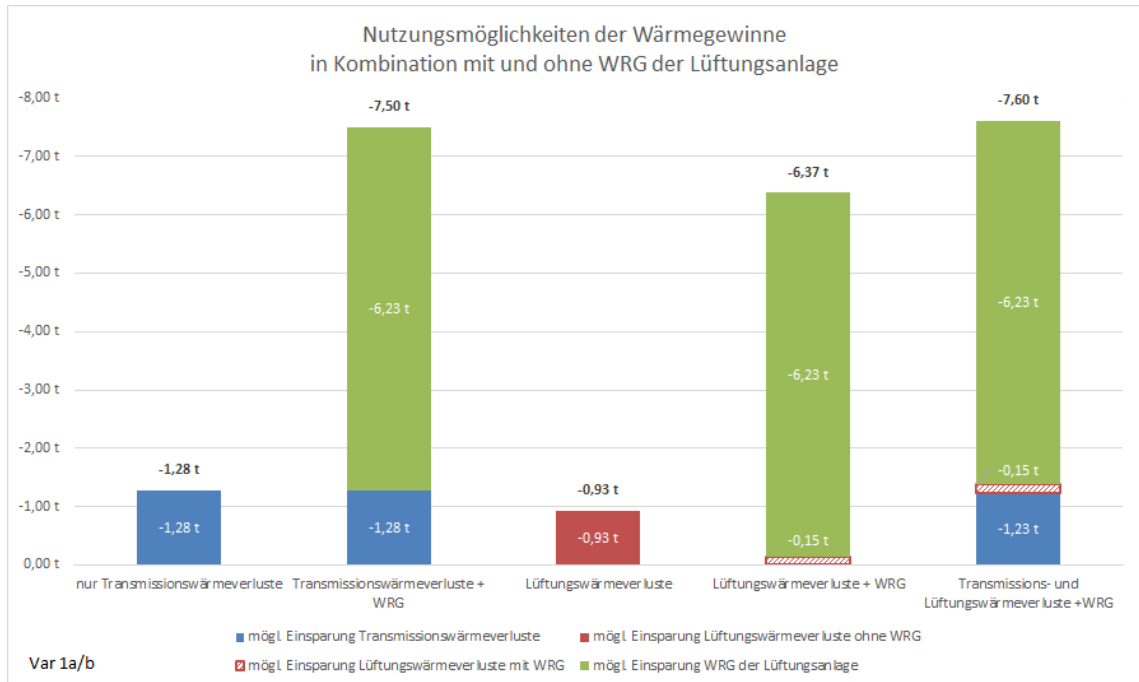


Abbildung 7.2.5-4: Nutzungsmöglichkeiten der Wärmegewinne in Kombination mit und ohne WRG der Lüftungsanlage

## CO<sub>2</sub>-Bilanz von Polycarbonat und einer solaraktiven Fassade insgesamt

Die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Polycarbonat-Stegplatten ist sowohl im Vergleich zu einem gewebearmierten Putz, als auch zu einer Leistenschalung aus Lärchenholz schlechter. Hierbei wurde bei der Wahl der Platten sogar schon ein sehr materialsparendes Profil mit nur 3 cm Dicke und einem Flächengewicht von nur 3,4 kg gewählt. Dennoch hat die Polycarbonat-Platte ein um den Faktor 4,6 höheres Treibhauspotential. Mit einer Lärchenholzschalung, die naturgemäß ein negatives Treibhauspotential aufweist, kann es gar nicht mithalten. Dieser materialbedingte ökologische Nachteil muss daher in der Nutzungsphase mindestens kompensiert werden, damit die solaraktive Fassade zu einem Gewinn wird.

Material	GWP
Acrylglas PMMA (gegossen)	48,61 kg CO <sub>2</sub> äqv.
Industrieglas (1-fach Verglasung)	24,46 kg CO <sub>2</sub> äqv.
Leistenschalung Lärche	-7,86 kg CO <sub>2</sub> äqv.
Polycarbonat Hohlkammerplatten	23,90 kg CO <sub>2</sub> äqv.
Putz, gewebearmiert	5,14 kg CO <sub>2</sub> äqv.

Abbildung 7.2.5-5: CO<sub>2</sub>-Bilanz von Fassadenbekleidungsmaterialien im Vergleich

Insofern ist die Frage, ob sich eine solaraktive Fassade in der Gesamtbetrachtung positiv auf die Ökobilanz auswirkt, erneut stark von dem gewählten Technikkonzept abhängig. Es zeigt sich, dass für die Technikkonzepte mit erneuerbaren Energiequellen eine Kompensation des materialbedingten Nachteils durch den Vorteil in der Nutzungsphase nicht kompensiert werden kann, da die Mehremissionen aus Herstellung und Entsorgung der Fassade die Einsparun-

gen aus der Nutzungsphase übersteigen. Für diese Technikkonzepte schneidet sowohl die Putzfassade, als auch die Lärchenholzschalung, die beide keine solaren Gewinne erzielen können, besser in der CO<sub>2</sub>-Bilanz ab. Völlig anders sieht die Situation für die Technikkonzepte mit fossilen Energieträgern aus. Da sich hier die in der Nutzung ersparten Transmissionswärmeverluste aufgrund des höheren Treibhauspotentials des Energieträgers deutlich stärker auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirken, schneidet die solaraktive Fassade mit Abstand am besten ab. Die solaraktive Fassade spart hier um einen Faktor 6,7 mehr Emissionen, als die in der Herstellung und Entsorgung so positiv abschneidende Lärchenholzschalung.



	Endenergie Heizen	Anlagenaufwand	Ersparte Endenergie durch Polycarbonat	GWP Energieträger	GWP Transmissionswärmeverluste (Differenz)	GWP Polycarbonat	GWP Lärchenschalung	GWP Putz	GWP Polycarbonat (Differenz zu Putz)	GWP gesamt (Polycarbonat)	GWP gesamt (Lärchenschalung)	GWP gesamt (Putz)
<b>Var 1a</b>	13 kWh/m <sup>2</sup> a	0,65	-17.004,30 kWh	0,08 kg CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh	-1,275 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	3,59 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	2,81 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	4,128 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Var 1b</b>	13 kWh/m <sup>2</sup> a	0,65	-17.004,30 kWh	0,08 kg CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh	-1,275 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	3,59 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	2,81 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	4,128 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Var 2</b>	15 kWh/m <sup>2</sup> a	0,77	-20.143,60 kWh	0,08 kg CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh	-1,511 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	3,59 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	2,81 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	3,892 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Var 3</b>	34 kWh/m <sup>2</sup> a	1,70	-44.472,90 kWh	0,26k g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh	-11,61 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	3,59 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	2,81 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-6,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Var 4</b>	34 kWh/m <sup>2</sup> a	1,70	-44.472,90 kWh	0,26 kg CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh	-11,61 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	3,59 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	2,81 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-6,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-1,18 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,77 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 7.2.5-6: Ökobilanzdaten von solaraktiven Fassaden in der Gesamtbetrachtung

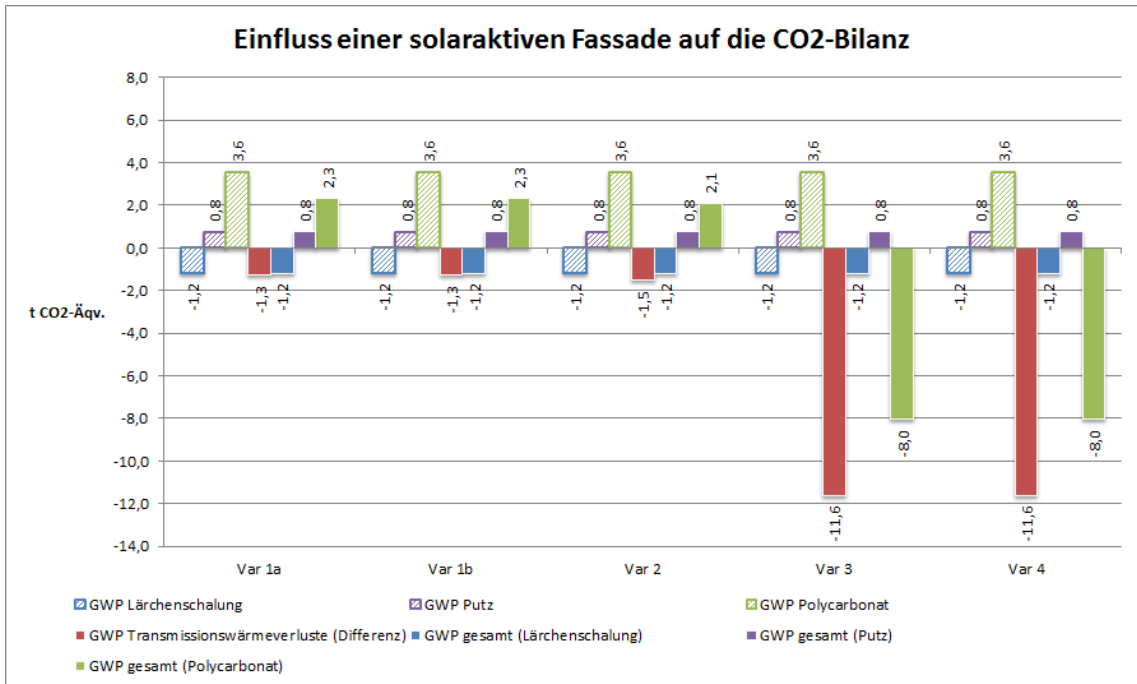


Abbildung 7.2.5-7: Einfluss einer solaraktiven Fassade auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz

Unabhängig von der CO<sub>2</sub>-Bilanz kann die solaraktive Fassade aber in allen Fällen dazu genutzt werden, den erforderlichen Bedarf an Photovoltaik zu senken. Gegenüber der Putzfassade können mit der Polycarbonatfassade in Abhängigkeit vom gewählten Technikkonzept zwischen 1,5 m<sup>2</sup> (0,25 kWp) und 4,3 m<sup>2</sup> (0,72 kWp) eingespart werden. Dies kann unter Umständen ein Grund zur Wahl einer solchen Fassade sein, da die Dachfläche in vielen Konstellationen geringer ist als die zum Erreichen der CO<sub>2</sub>-Neutralität erforderliche Photovoltaik-Kapazität dies erfordern würde.

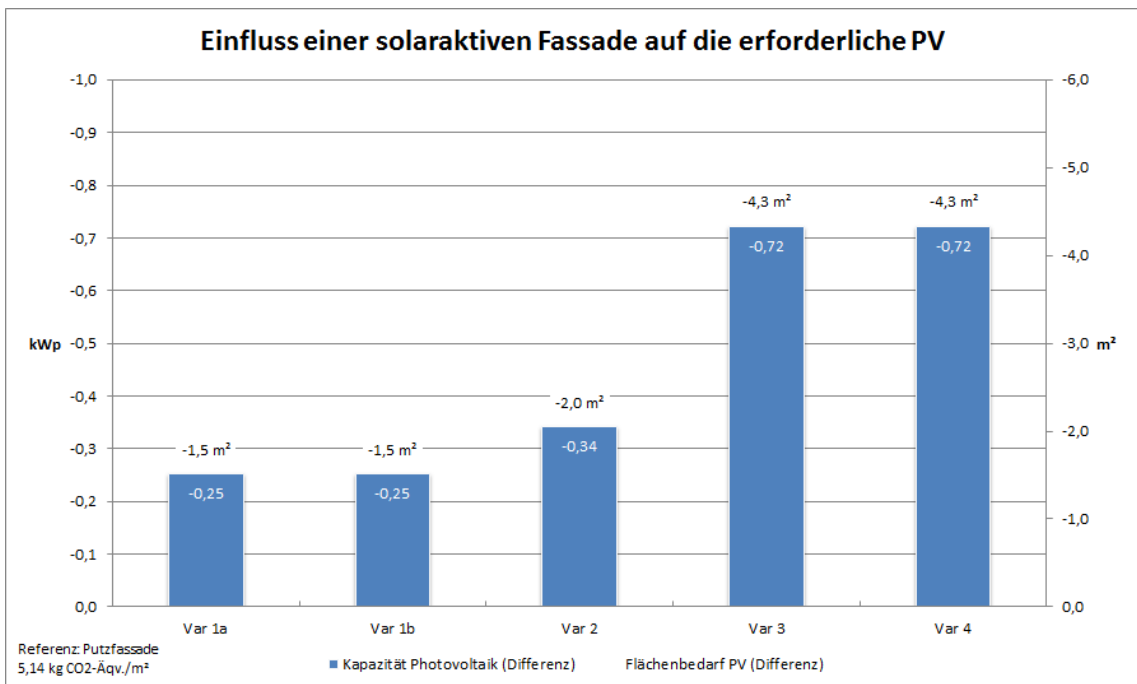


Abbildung 7.2.5-8: Einfluss einer solaraktiven Fassade auf die erforderliche Photovoltaikfläche

## Ausblick solaraktive Fassaden aus alternative Materialien

Da solaraktive Fassaden z.B. aus Polycarbonatplatten nach Auffassung der Verfasser durchaus das Potential haben, zu einem modernen Erscheinungsbild des Holzbaus beizutragen, wäre es nach Auffassung der Verfasser durchaus lohnenswert in dieser Richtung weiter zu forschen und durch alternative Materialien den Beitrag zum Treibhauspotential aus Herstellung und Entsorgung deutlich zu senken. Denkbar wäre dies grundsätzlich durch die Verwendung von Polycarbonat aus Recyclingmaterial, sowie mittels materialsparender Kunststofffolien (z.B. ETFE, o.ä.). Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten in dieser Hinsicht jedoch keine marktreifen Produkte oder Systeme gefunden werden. Ziel muss es sein ein Material zu finden, das in Herstellung und Entsorgung ein GWP  $< 14 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv./m}^2$  aufweist. Ab diesem Wert wäre eine solaraktive Fassade in der Gesamtbetrachtung auch für Technikkonzepte auf Basis von erneuerbaren Energiequellen gleichwertig mit einer Putzfassade, die keine solaren Gewinne erzielen kann. Ab einem GWP  $< 0,66 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv. / m}^2$  wäre sie auch der Lärchenholzschalung überlegen.

Denkbar wären zum Beispiel auch technische Textilien mit einem niedrigen Hellbezugswert. Solche Textilien werden in der Architektur bereits vielfach verwendet und haben typischerweise GWP Werte ab  $4,0 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv. / m}^2$ . Theoretisch müssten sich Luftschichten hinter dunklen Membranen ähnlich aufheizen, wie hinter transparenten Schichten. Wie sich dies genau verhält wäre allerdings im Rahmen einer thermischen Simulation zu überprüfen.

### 7.2.6 Fensterqualität

#### Referenzfenster

Um das Ziel eines Heizwärmebedarfs von ca.  $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  zu erreichen wurde für das Referenzfenster eine Dreifachverglasung mit einem  $U_g=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ein Rahmen mit einem  $U_f=1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$  und ein Randverbund mit einem  $\psi=0,039 \text{ W/mK}$  gewählt. Der Gebäude Entwurf sieht grundsätzlich bodentiefe Fenster in Höhe von  $2,5 \text{ m}$  vor. Die Breite der Elemente variiert in  $0,625 \text{ m}$  Feldschritten zwischen  $1$  und  $4$  Feldern ( $0,625 \text{ m}$  bis  $2,5 \text{ m}$ ). Als repräsentative Abmessung wurde daher ein Fenster mit den Maßen von  $2,5 \text{ m} \times 1,25 \text{ m}$  gewählt. Für diese Abmessungen resultiert in ein  $U_w=0,86 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Die Art der Verglasung stellt das einfachste Dreischeiben-Isolierglas dar, das mittlerweile relativ kostengünstig eingekauft werden kann und sich demnach mehr und mehr zum Industriestandard entwickelt.

Verschiedene Studien kommen zu dem Ergebnis, dass Holzfenster im Vergleich zu Holz-Aluminium-Fenstern, Kunststofffenstern und Aluminiumfenstern die beste Ökobilanz haben. Im Rahmen der auf der Basis der tatsächlichen Abmessungen und Anforderungen für dieses Projekt erstellten Kalkulationen hat sich gezeigt, dass für die gewählten Fensterformate zwischen Holz und Kunststoffen annähernd Preisgleichheit besteht. Dabei ist ergänzend anzumerken, dass die großen Fensterformate im Bereich von Kunststoffen teilweise nicht ohne zusätzliche Teilungen möglich waren, die sich zum einen gestalterisch, als auch bauphysikalisch in Folge des erhöhten Rahmenanteils negativ auswirken würden. Aus diesem Grund wurden für das +++Haus in allen Varianten Holzfenster gewählt. Ergänzt werden muss aus verschiedenen Projekterfahrungen heraus an dieser Stelle jedoch, dass die erwähnte annähernde Preisneutralität keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit hat. Insbesondere bei Standardfensterformaten zeigt sich oftmals, dass die Holzfenster ca.  $10\text{-}25\%$  teurer sind, als Kunststofffenster.

Mit Holzfenstern ist die o.g. Rahmenqualität mit einem  $U_f=1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$  relativ einfach mit einem 78 mm Profil zu erreichen. Im Bereich von Kunststofffenstern wäre ein solcher Rahmenwert bereits mit Mehrkosten verbunden, sodass sich auch hierüber die Wahl der Holzfenster nochmals begründen lässt.

### besserer oder schlechterer Wärmeschutz der Fenster

Ausgehend von dem oben beschriebenen Referenzfenster wurde nun untersucht, ob es bei gleichbleibendem Ziel eines CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäudes wirtschaftlicher wäre, den Dämmstandard der Fenster weiter anzuheben oder im Gegensatz dazu abzusenken und so die zur Kompensation erforderliche PV-Anlage entweder zu verringern oder zu vergrößern. Um diese Frage beantworten zu können, wurden zunächst die ersparten oder zusätzlichen Transmissionswärmeverluste über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren errechnet.

	$U_w$	$U_g$	$U_f$	psi	Ql	Ql <sub>50</sub>	Differenz Ql <sub>50</sub>
Zweischeiben-Isolierverglasung	1,21 W/m <sup>2</sup> K	1,10 W/m <sup>2</sup> K	1,24 W/m <sup>2</sup> K	0,040 W/mK	113,2 kWh/a	5657,8 kWh	5657,8 kWh
Dreischeiben-Isolierverglasung	0,86 W/m <sup>2</sup> K	0,70 W/m <sup>2</sup> K	1,12 W/m <sup>2</sup> K	0,039 W/mK	81,7 kWh/a	4086,2 kWh	0,0 kWh
Dreischeiben-Isolierverglasung	0,84 W/m <sup>2</sup> K	0,70 W/m <sup>2</sup> K	1,00 W/m <sup>2</sup> K	0,039 W/mK	79,9 kWh/a	3996,3 kWh	-89,8 kWh
Dreischeiben-Isolierverglasung	0,83 W/m <sup>2</sup> K	0,70 W/m <sup>2</sup> K	0,94 W/m <sup>2</sup> K	0,039 W/mK	79,0 kWh/a	3951,4 kWh	-134,7 kWh
Dreischeiben-Isolierverglasung	0,66 W/m <sup>2</sup> K	0,50 W/m <sup>2</sup> K	0,94 W/m <sup>2</sup> K	0,039 W/mK	63,8 kWh/a	3188,1 kWh	-898,1 kWh

Abbildung 7.2.6-1: kummulierte Transmissionswärmeverluste über Fensterflächen des +++Hauses über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren in Abhängigkeit vom U-Wert

Aus diesen Transmissionswärmeverlusten ergeben sich nun in Abhängigkeit des gewählten Anlagenkonzepts sehr unterschiedliche Einflüsse auf die primäre CO<sub>2</sub> Bilanz des Gebäudes und folglich auf die erforderliche PV-Anlagen Dimension. Die Unterschiede liegen zum einen darin begründet, dass zum Ausgleich der Transmissionswärmeverluste (Heizwärmebedarf) unterschiedliche Endenergiemengen erforderlich sind und zum anderen, dass diese, je nachdem ob sie aus fossilen oder erneuerbaren Energiequellen stammen, unterschiedliche spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen.

	endenergiebezogene Anlagenaufwandszahl (kwh End / kWh Heizwärme)	Energieträger	spezifische CO <sub>2</sub> -Emission (kg CO <sub>2</sub> -Äqv/kWh End)
Variante 1a	0,65	Strom aus PV	0,075
Variante 1b	0,65	Strom aus PV	0,075
Variante 2	0,77	Strom aus PV	0,075
Variante 3	1,7	Gas	0,261
Variante 4	1,7	Gas	0,261

Abbildung 7.2.6-2: Anlagenaufwandszahl, Energieträger und spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Technikkonzepte

	0,66 W/m <sup>2</sup> K	0,83 W/m <sup>2</sup> K	0,84 W/m <sup>2</sup> K	0,86 W/m <sup>2</sup> K	1,21 W/m <sup>2</sup> K
Var 1a	-3,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-0,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-0,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	19,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Var 1b	-3,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-0,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-0,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	19,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Var 2	-3,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-0,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-0,4 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	23,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Var 3	-29,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-4,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-3,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	187,4 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
Var 4	-29,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-4,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-3,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	0,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	187,4 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 7.2.6-3: CO<sub>2</sub>-Emissionen infolge von Transmissionswärmeverlusten über die Fensterflächen in Abhängigkeit vom U-Wert und dem gewählten Technikkonzept

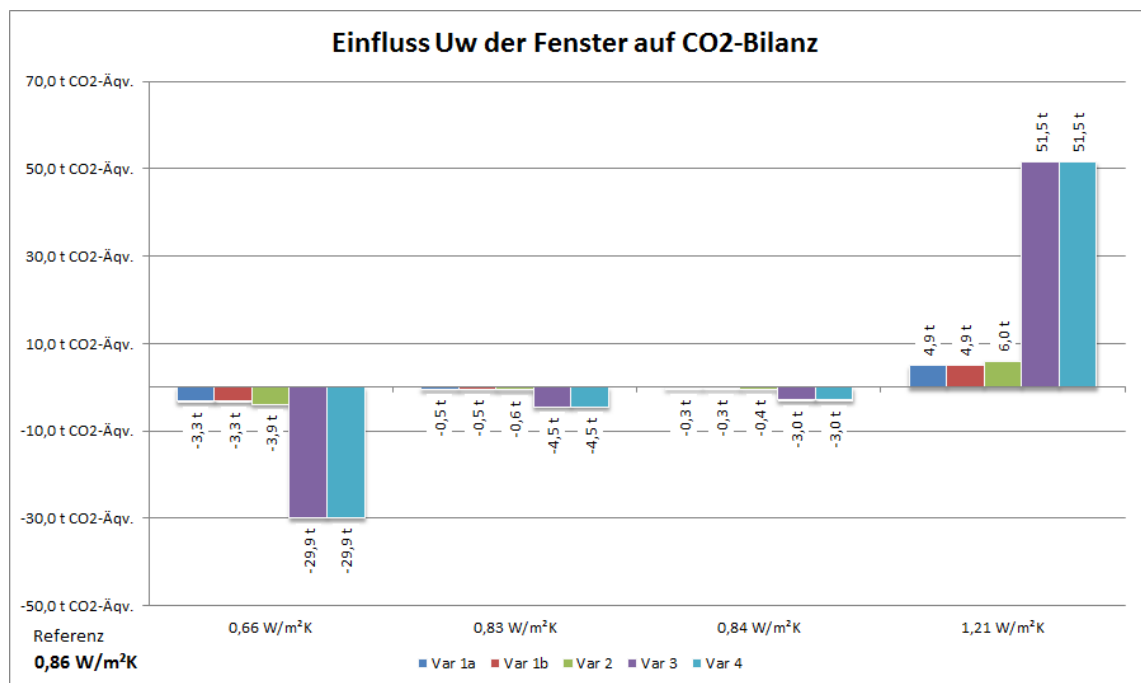


Abbildung 7.2.6-4: Einfluss des U-Werts der Fenster auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz in Abhängigkeit vom Technikkonzept

Hierbei wurde berücksichtigt, dass eine Zweischeibenverglasung im Vergleich zu einer Dreischeibenverglasung in der Herstellung zunächst geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen. Wie

[Albrecht et al., 2008] zu entnehmen ist, liegt der Unterschied bei ca. 11,11 kg CO<sup>2</sup>-Äqv/m<sup>2</sup>. Es folgen sehr unterschiedliche Einflüsse auf die zum Erreichen der gewünschten CO<sub>2</sub>-Neutralität erforderlichen PV-Anlagendimensionen.

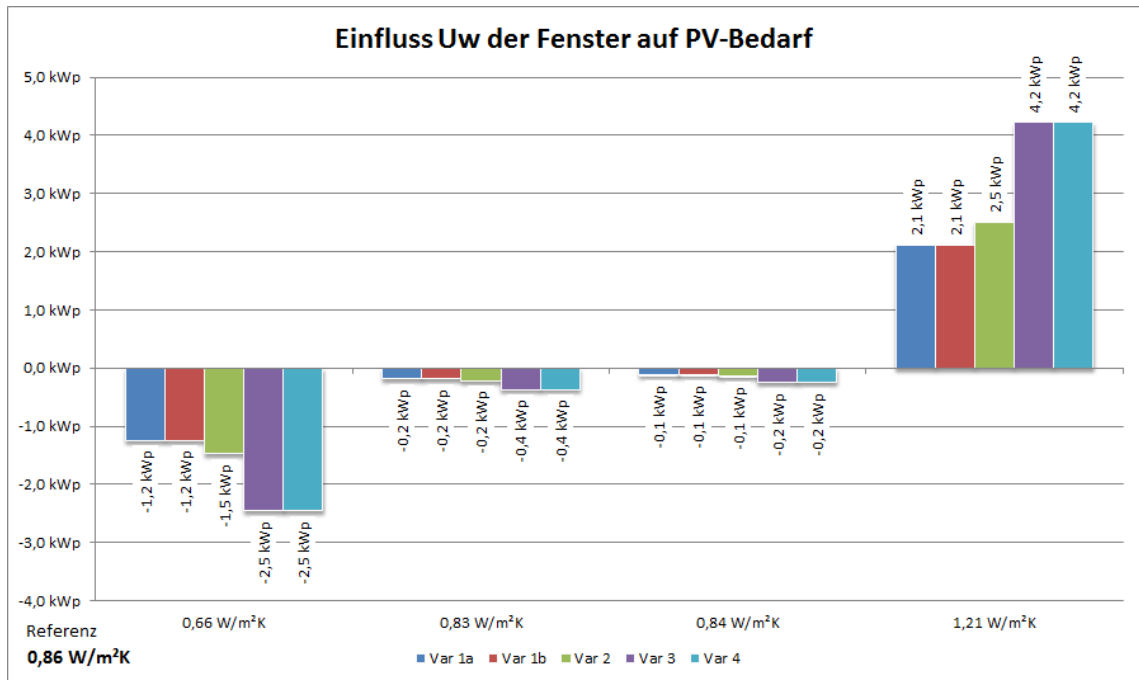


Abbildung 7.2.6-5: Einfluss des U-Werts der Fenster auf die erforderliche Photovoltaikfläche in Abhängigkeit vom Technikkonzept

Stellt man nun die Mehr-/Minderkosten für die Fenster und die Mehr-/Minderkapazitäten der PV-Anlage gegenüber, so ergeben sich Gesamt-Mehr-/Minderkosten für die betrachtete Fensterqualität im Verhältnis zur Referenzvariante.

	Uw	Mehr-/Minderkosten
Zweischeiben-Isolierverglasung	1,21 W/m²K	-27,18 EUR/m²
Dreischeiben-Isolierverglasung	0,86 W/m²K	0,00 EUR/m²
Dreischeiben-Isolierverglasung	0,84 W/m²K	19,56 EUR/m²
Dreischeiben-Isolierverglasung	0,83 W/m²K	29,51 EUR/m²
Dreischeiben-Isolierverglasung	0,66 W/m²K	36,91 EUR/m²

Abbildung 7.2.6-6: Mehr-/Minderkosten für Fenster in unterschiedlichen Dämmqualitäten

<b>Kosten Photovoltaik</b>	1.280,00 EUR/kWp
----------------------------	------------------

Abbildung 7.2.6-7: Kosten Photovoltaik

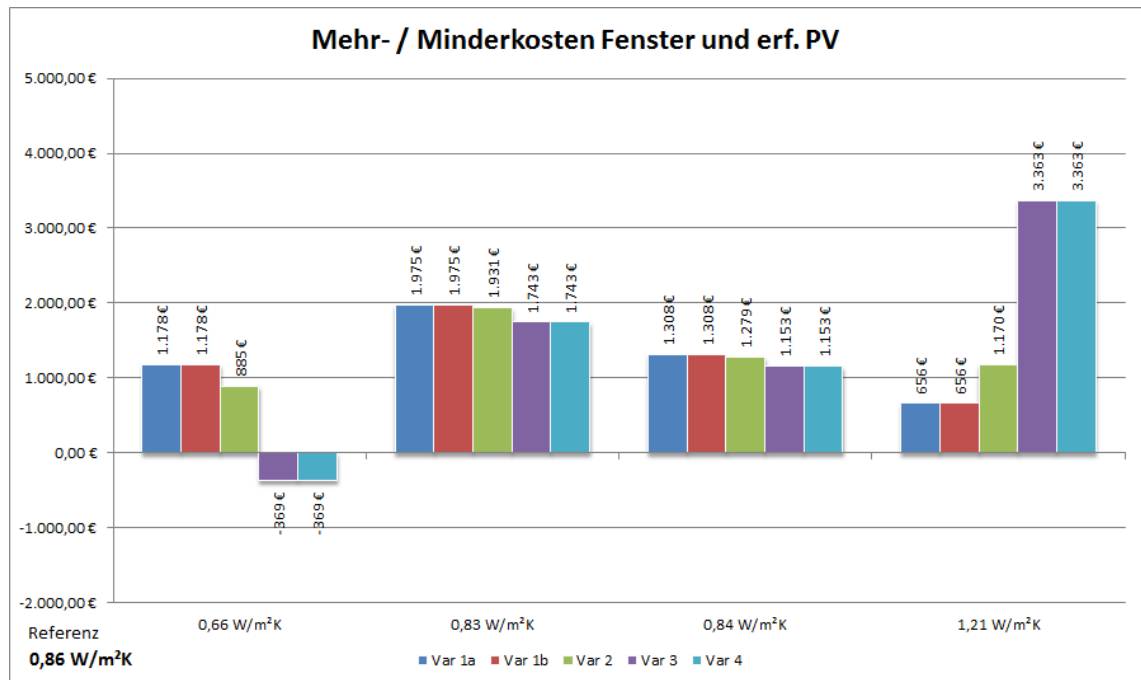


Abbildung 7.2.6-8: Mehr-/Minderkosten für Fenster in unterschiedlichen Dämmqualitäten einschließlich der resultierenden Mehr-/Minderfläche PV

Es zeigt sich deutlich, dass die Frage der Wirtschaftlichkeit einer Bauteiloptimierung stark von dem gewählten Technikkonzept abhängt. Für alle betrachteten Technikkonzepte lässt sich feststellen, dass eine Reduzierung des Dämmstandards auf eine Zweischeibenverglasung in der Logik des +++Hauses, allein schon aus wirtschaftlichen Gründen keinen Sinn ergibt und zu nicht unerheblichen Mehrkosten von bis zu ca. 3.400 EUR führen. Diese Tendenz wird sich mit zunehmender Verbesserung des deutschen Strommixes noch weiter steigen.

Für die Fenstervarianten mit erhöhtem Wärmeschutz ergeben sich bei aktuellem deutschem Strommix allerdings zunächst ebenfalls Gesamt-Mehrkosten. Lediglich für die deutlich verbesserte Varianten mit einem  $U_g=0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  und einem  $U_w=0,66 \text{ W/m}^2\text{K}$  ergeben sich bereits jetzt für die Technikkonzepte, die auf fossilen Energieträgern basieren Gesamt-Minderkosten. Auch hier verschärft ein besser werdender Strommix die Relevanz der Bauteiloptimierung. Ab einer spezifischen  $\text{CO}_2$ -Emission des deutschen Strommixes von  $200 \text{ g CO}_2\text{-äqv/kWh}$  (aktuell:  $617 \text{ g CO}_2\text{-äqv./kWh}$ ) wird eine deutliche Optimierung des Wärmeschutzes der Fenster auf  $U_w=0,66 \text{ W/m}^2\text{K}$  auch für die Konzepte mit regenerativen Energiequellen wirtschaftlicher.

### 7.2.7 Optimierung der Aussenwanddämmung

- Je ökologischer die Energieerzeugung des Gebäudes ist, desto geringer ist das wirtschaftliche Optimum für die Dämmstärke.
- Für Technikkonzepte mit fossilen Energieträgern liegt das wirtschaftliche Optimum des U-Werts der Aussenwand zwischen  $0,15$  und  $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$  abhängig vom gewählten Dämmstoff.
- Für Technikkonzepte auf Basis von erneuerbaren Energiequellen liegt das wirtschaftliche des U-Werts der Aussenwand zwischen  $0,19$  und  $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$  abhängig vom gewählten Dämmstoff.

- **Betrachtet man die Heizkosten mit, erhöht sich der wirtschaftliche U-Wert der Aussenwand. Das Optimum verschiebt sich um bis zu  $0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$  in Richtung geringerer U-Werte.**
- **Die Relevanz einer Optimierung der Dämmstärke nimmt sowohl in Zukunft mit besser werdender CO<sub>2</sub>-Bilanz des deutschen Strommixes zu.**
- **Die Berücksichtigung der Heizkosten im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung unterstreicht zusätzlich die Relevanz der Optimierung von Dämmstärken.**

## Abhängigkeiten der Dämmstoffwahl

Für die Dämmung der Aussenwand gibt es, wie für alle Bauteile mit wärmedämmender Funktion, über die direkten Einflüsse auf Ökonomie (Kosten des Dämmstoffs) und Ökologie (Ökobilanz des Dämmstoffs) hinaus, Abhängigkeiten zum gewählten Technikkonzept, die wiederum Einfluss auf die Gesamtkosten und den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Gebäudes haben. Es stellt sich neben der Frage nach der Materialität des Dämmstoffs, die Frage in welcher Dämmstärke dieser optimaler Weise auszuführen ist. Wie in Kapitel 7.0 diskutiert wird, soll als Vergleichsmassstab an alle Haus- und Technikkonzepte eine Neutralität in der CO<sub>2</sub>-Bilanz angelegt werden. Diese wird letztlich immer über eine jeweils entsprechende Dimensionierung der hierfür erforderlichen Photovoltaik-Kapazität erreicht. Vor diesem Hintergrund ist die Frage nach der Dämmstoffqualität und -quantität letztlich eine ökonomische Frage, die sich anders formuliert auch so ausdrücken lässt: "Mit welchem Dämmstoff in welcher Stärke lässt sich in Abhängigkeit vom gewählten Technikkonzept das Ziel einer neutralen CO<sub>2</sub>-Bilanz am kostengünstigsten erreichen. In einem ersten Schritt wurde hierzu zunächst die reinen Investitionskosten für die Aussenwand und die sich ergebenden, erforderlichen Kompensationsmaßnahmen ermittelt. Verbrauchskosten werden erst nachgelagert in die Betrachtung mit einbezogen

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge, wurde eine Berechnungsmethodik entwickelt, über die sich für die unterschiedlichsten Parameter Kosten errechnen lassen. Die entwickelte Formel wird im folgenden noch kurz vorgestellt. Dieser Ansatz wurde mit dem Ziel gewählt, die Zusammenhänge so aufzubereiten, dass die Erkenntnisse auch auf andere Projekte übertragen werden können bzw. Grafiken bei sich in der Zukunft ändernden Parametern einfach aktualisiert werden könnten. Theoretisch bestünde auch eine Anschlussmöglichkeit, als dass auf Grundlage der Berechnungsformel z.B. ein Exceltool entwickelt werden könnte, welches für unterschiedlichste Eingangsparameter eine grafische Auswertung ermöglichen würde.

Als Ausgangspunkt der Analyse wurde der Wärmedurchgangskoeffizient der Aussenwand aufgrund des zunächst angestrebten Heizwärmebedarfs von ca.  $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  auf  $U=0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$  festgelegt. In Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des gewählten Dämmstoffes führt dies zu unterschiedlichen, erforderlichen Dämmstoffdicken. Der gewünschte U-Wert und die Materialwahl beeinflussen also direkt sowohl die Herstellungskosten, als auch die Anteile der Ökobilanz aus der Herstellung und Entsorgung der Aussenwand.

Daneben führt eine Verringerung oder Erhöhung des U-Wertes aber auch zu einem veränderten Transmissionswärmeverlust des Gebäudes (vgl. Abbildung 7.2.7-1), der sich zum einen in einem höheren oder geringeren Energiebedarf niederschlägt, zum anderen aber auch in einer schlechteren bzw. besseren CO<sub>2</sub>-Bilanz der Gebäudebeheizung auswirkt. Da sich beides auf die erforderliche Photovoltaik-Kapazität auswirkt, entstehen durch die Wahl der Aussenwand an dieser Stelle induzierte Mehr- und Minderkosten (Installationskosten Photovoltaik).



U <sub>w</sub>	Q <sub>l,50</sub>	d WL <sub>G035</sub>	d WL <sub>G039</sub>	d WL <sub>G040</sub>
0,07 W/m <sup>2</sup> K	80.825 kWh	0,49 m	0,55 m	0,56 m
0,08 W/m <sup>2</sup> K	87.560 kWh	0,43 m	0,48 m	0,49 m
0,09 W/m <sup>2</sup> K	94.296 kWh	0,38 m	0,43 m	0,44 m
0,10 W/m <sup>2</sup> K	101.031 kWh	0,34 m	0,38 m	0,39 m
0,11 W/m <sup>2</sup> K	107.767 kWh	0,31 m	0,35 m	0,36 m
0,12 W/m <sup>2</sup> K	114.502 kWh	0,29 m	0,32 m	0,33 m
0,13 W/m <sup>2</sup> K	121.238 kWh	0,26 m	0,29 m	0,30 m
0,14 W/m <sup>2</sup> K	127.973 kWh	0,24 m	0,27 m	0,28 m
0,15 W/m <sup>2</sup> K	134.708 kWh	0,23 m	0,25 m	0,26 m
0,16 W/m <sup>2</sup> K	141.444 kWh	0,21 m	0,24 m	0,24 m
0,17 W/m <sup>2</sup> K	148.179 kWh	0,20 m	0,22 m	0,23 m
0,18 W/m <sup>2</sup> K	154.915 kWh	0,19 m	0,21 m	0,22 m
0,19 W/m <sup>2</sup> K	161.650 kWh	0,18 m	0,20 m	0,20 m
0,20 W/m <sup>2</sup> K	168.386 kWh	0,17 m	0,19 m	0,19 m
0,21 W/m <sup>2</sup> K	175.121 kWh	0,16 m	0,18 m	0,18 m
0,22 W/m <sup>2</sup> K	181.856 kWh	0,15 m	0,17 m	0,18 m
0,23 W/m <sup>2</sup> K	188.592 kWh	0,15 m	0,16 m	0,17 m
0,24 W/m <sup>2</sup> K	195.327 kWh	0,14 m	0,16 m	0,16 m
0,25 W/m <sup>2</sup> K	202.063 kWh	0,13 m	0,15 m	0,15 m
0,26 W/m <sup>2</sup> K	208.798 kWh	0,13 m	0,14 m	0,15 m
0,27 W/m <sup>2</sup> K	215.533 kWh	0,12 m	0,14 m	0,14 m
0,28 W/m <sup>2</sup> K	222.269 kWh	0,12 m	0,13 m	0,14 m
0,29 W/m <sup>2</sup> K	229.004 kWh	0,11 m	0,13 m	0,13 m
0,30 W/m <sup>2</sup> K	235.740 kWh	0,11 m	0,12 m	0,13 m
0,31 W/m <sup>2</sup> K	242.475 kWh	0,11 m	0,12 m	0,12 m
0,32 W/m <sup>2</sup> K	249.211 kWh	0,10 m	0,12 m	0,12 m
0,33 W/m <sup>2</sup> K	255.946 kWh	0,10 m	0,11 m	0,11 m
0,34 W/m <sup>2</sup> K	262.681 kWh	0,10 m	0,11 m	0,11 m
0,35 W/m <sup>2</sup> K	269.417 kWh	0,09 m	0,10 m	0,11 m

Abbildung 7.2.7-1: Transmissionswärmeverluste und erforderliche Dämmstärken in Abhängigkeit vom U-Wert und der WL<sub>G</sub> des Dämmstoffs

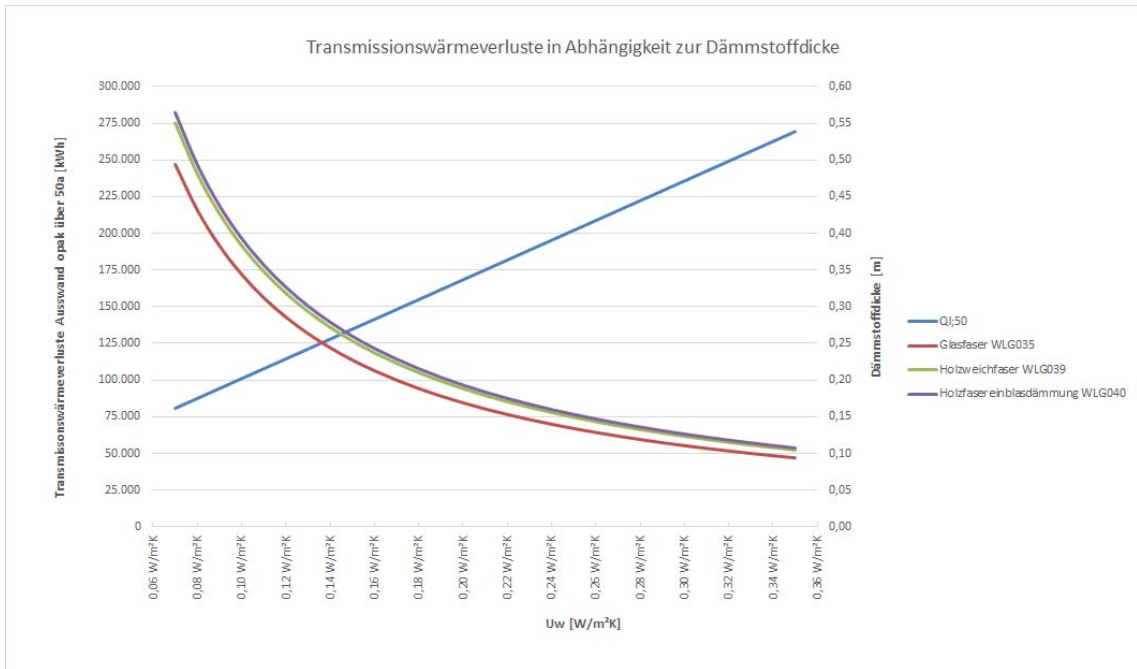


Abbildung 7.2.7-2: Transmissionswärmeverluste in Abhängigkeit zur Dämmstoffdicke

Die beiden Kostenarten (Herstellungskosten Aussenwand und Installationskosten Photovoltaik) stehen dabei in einem wechselseitigen Verhältnis. Die Herstellungskosten der Aussenwand steigen proportional zur Dämmstoffdicke. Die Installationskosten der erforderlichen PV verhalten sich dagegen antiproportional. Die jeweiligen Gesamtkosten lassen sich für frei wählbare Parameter auf Dämmstoff- und Technikseite mit folgender Formel berechnen:

$$P_{ges} = P_W + (P_{PV;Nutz} + P_{PV;Komp})$$

$$P_W = ((d_W * p_{W;V} + p_{W;A}) * A_W)$$

$$P_{PV;Nutz} = \frac{(Q_l * A_W * a * e_{End})}{(a * Eff_{PV})} * p_{PV}$$

$$P_{PV;Komp} = \frac{\left( \frac{(GWP_{W;V} * d_W * A_W) + (Q_l * A_W * a * e_{End} * GWP_{Energie})}{GWP_{Verdrängung} * f} \right)}{(a * Eff_{PV})} * p_{PV}$$

$P_{ges}$  = Gesamtkosten

$P_W$  = Herstellungskosten der Aussenwand

$P_{PV;Nutz}$  = Installationskosten der zur Bereitstellung des induzierten Transmissionswärmeverlustes erforderlichen Photovoltaik

$P_{PV;Komp}$  = Installationskosten der zur Kompensation der durch Herstellung und Beheizung induzierten CO2 Bilanz erforderlichen Photovoltaik

$d_W$  = Dicke der Aussenwand

$p_{W;V}$  = volumenbezogener Anteil an den Herstellungskosten der Aussenwand

$p_{W;A}$  = flächenbezogener Anteil an den Herstellungskosten der Aussenwand

$A_W$  = Fläche der Aussenwand

$Q_l$  = jährlicher flächenbezogener Transmissionwärmeverlust der Aussenwand

$a$  = Betrachtungszeitraum

$e_{End}$  = endenergiebezogene Anlagenaufwandszahl

$GWP_{W;V}$  = volumenbezogenes Treibhauspotential der Aussenwand

$GWP_{Energie}$  = energiebezogenes Treibhauspotential des verwendeten Energieträgers

$GWP_{Verdrängung} = GWP_{StrommixD} - GWP_{PV}$

$GWP_{StrommixD}$  = energiebezogenes Treibhauspotential des deutschen Strommixes

$GWP_{PV}$  = energiebezogenes Treibhauspotential von mit Photovoltaik erzeugten Stroms

$f$  = Faktor zur Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung des deutschen Strommixes

$e_{End}$  = endenergiebezogene Anlagenaufwandszahl

$Eff_{PV}$  = kapazitätsbezogener, jährlicher Ertrag von Photovoltaik

$p_{PV}$  = kapazitätsbezogene Installationskosten von Photovoltaik

Da es sich bei den Gesamtkosten um eine Addition der gegenläufigen Herstellungskosten Aussenwand und Installationskosten PV handelt, lässt sich ein Optimum für die jeweilige Dämmstoffdicke errechnen. Dieses Optimum steht sowohl in Abhängigkeit zum gewählten Dämmstoff, als auch zum Technikkonzept andererseits.

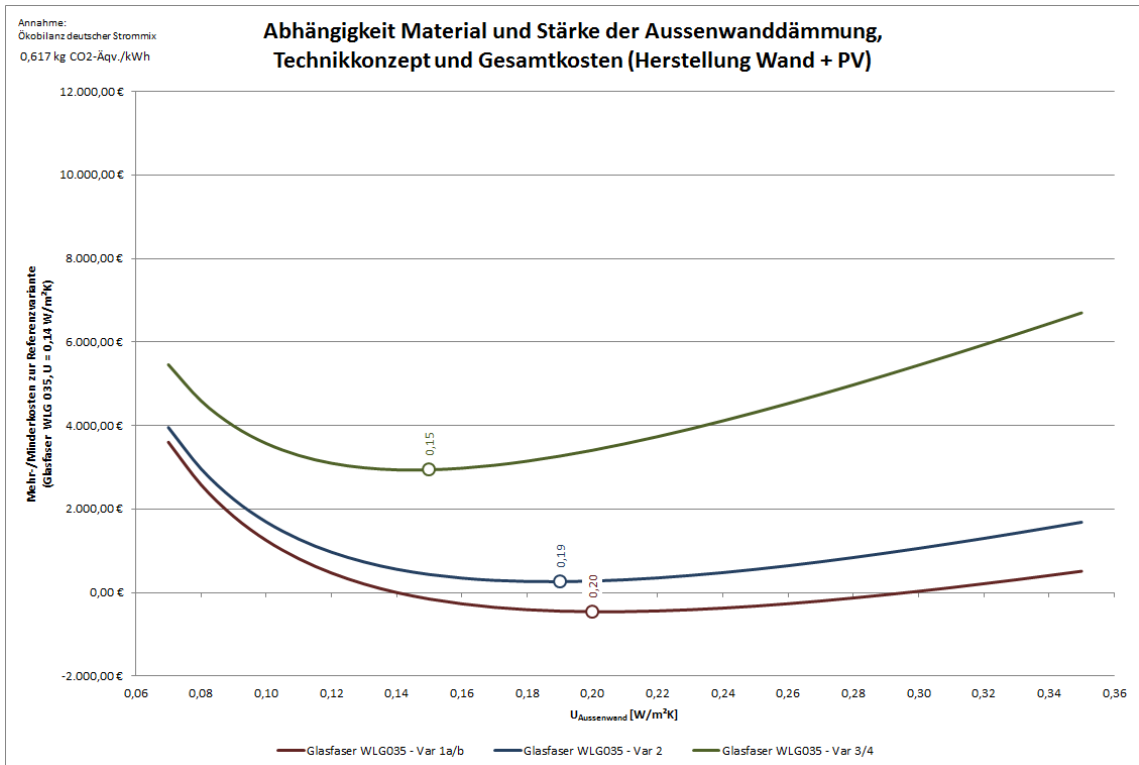


Abbildung 7.2.7-3: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV) für Glasfaserklemmfalz

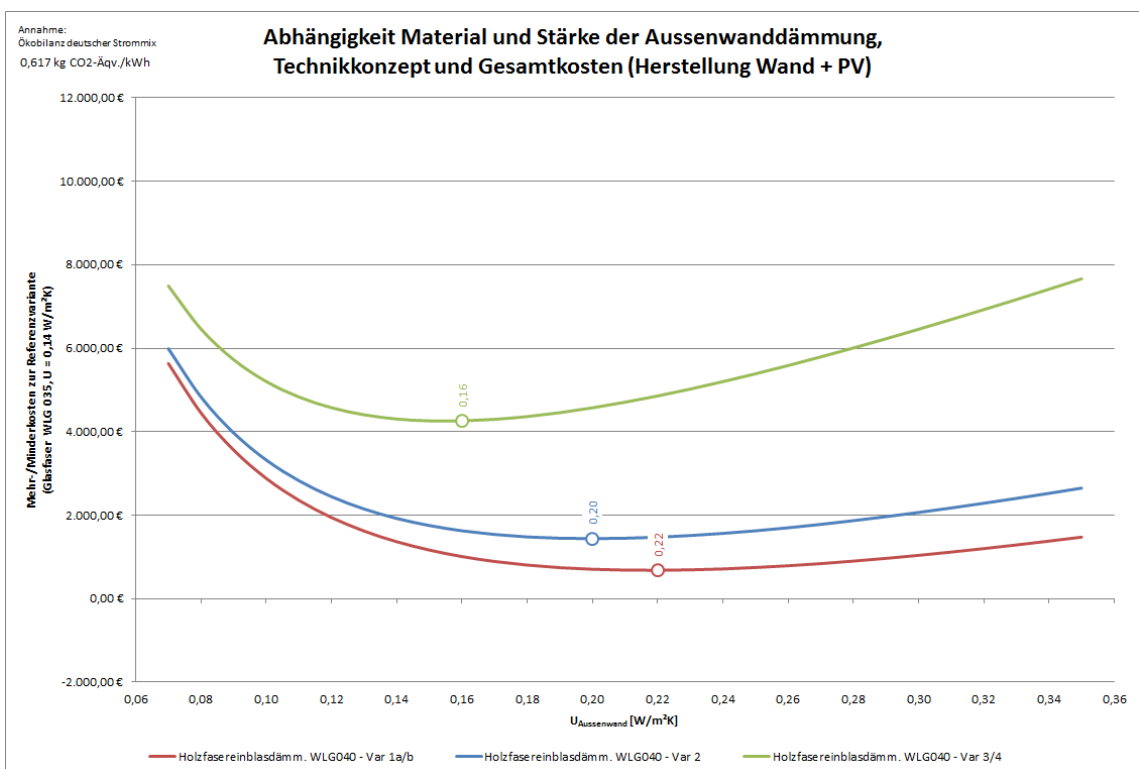


Abbildung 7.2.7-4: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV) für Holzfaserreinblasdämmung

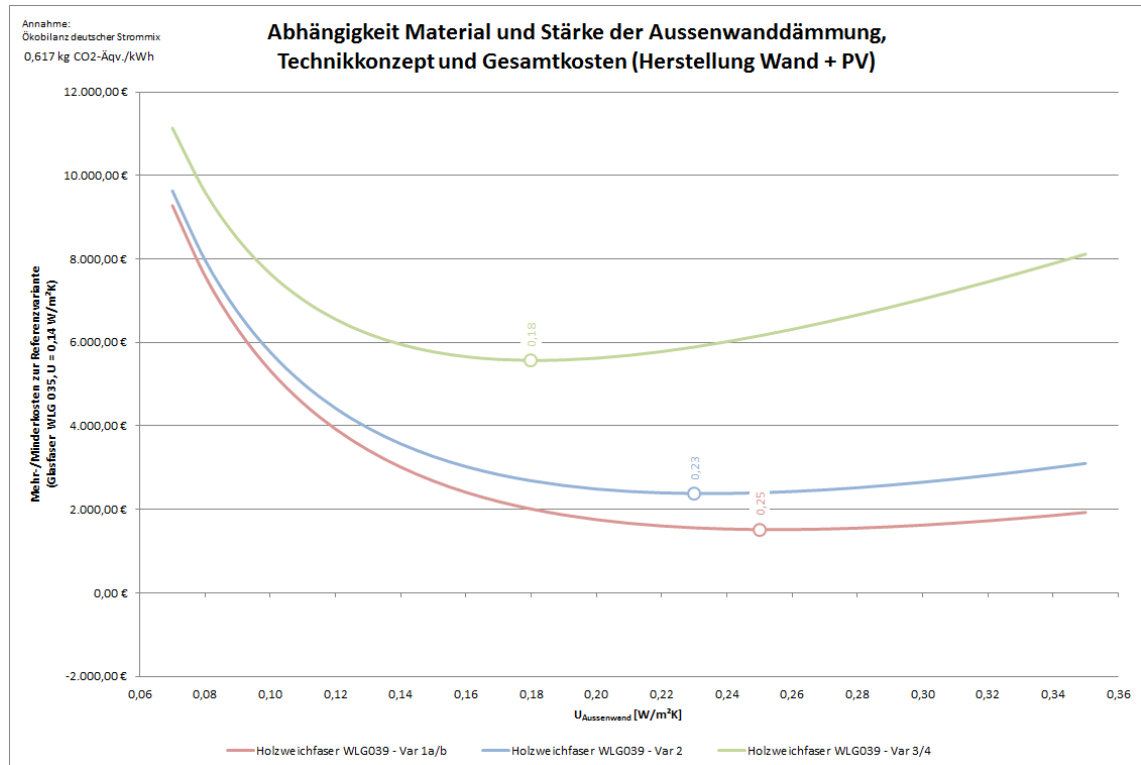


Abbildung 7.2.7-5: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV) für Holzweichfaserdämmung

Wie bereits eingangs erläutert ist Gegenstand der vorangehenden Betrachtungen ausschließlich die Investitionskostenseite. Es geht daher lediglich um die Frage, wie sich der Preis für die Herstellung eines CO<sub>2</sub>-neutralen +++Hauses optimieren lässt. Auch wenn alle diese Hauskonzepte in diesem Punkt gleichwertig sind, so weisen Sie doch unterschiedliche Energieverbräuche und damit Betriebskosten auf. Für die Konzepte, die auf PV-Strom als Energieträger basieren errechnen sich die entstehenden Kosten aufgrund der Tatsache, dass realistisch gesehen nur eine Eigenbedarfsdeckungsquote von ca. 65% erreicht werden kann, aus der Differenz zwischen Erträgen aus der Einspeisevergütung und Kosten für aus dem Netz bezogenen Strom. Für die Konzepte, die auf Gas als Energieträger basieren, entsprechen die entstehenden Kosten den Gaskosten. Beide Kosten stehen in Abhängigkeit zu den Transmissionswärmeverlusten und damit zur gewählten Dämmstoffdicke und dem jeweiligen Material.

$$P_{ges;Heiz} = P_W + (P_{PV;Nutz} + P_{PV;Komp}) + P_{Heiz}$$

$$P_{Heiz} = Q_l * a_{Heiz} * e_{End} * \left( c_{Deckung} * \left( p_{Energie;Strom} - \left( \frac{G_{2015} - G_{2035}}{2} \right) \right) \right)$$

$$P_{Heiz} = Q_l * a_{Heiz} * e_{End} * (p_{Energie;Gas})$$

$P_{ges;Heiz}$  = Gesamtkosten unter Berücksichtigung der entstehenden Heizkosten

$P_{Heiz}$  = Heizkosten

$a_{Heiz}$  = Betrachtungszeitraum der Heizkosten

$P_{PV;Nutz}$  = Installationskosten der zur Bereitstellung des induzierten Transmissionswärmeverlustes erforderlichen Photovoltaik

$c_{Deckung}$  = Eigenbedarfsdeckungsquote der Photovoltaik

$p_{Energie;Strom}$  = Strompreis

$p_{Energie;Gas}$  = Gaspreis

$G_{2015}$  = Einspeisevergütung im Jahr 2015

$G_{2035}$  = Einspeisevergütung im Jahr 2035

Betrachtet man die in den ersten 20 Jahren entstehenden Mehr- bzw. Minderkosten aus dem Betrieb der Heizung mit, so verschieben sich die Optimierungskurven auf der x-Achse in Richtung geringer U-Werte und werden zusätzlich steiler. Dies hat zur Folge, dass das jeweilige Dämmstoffoptimum größer wird und eine Optimierung somit insgesamt an Relevanz gewinnt.

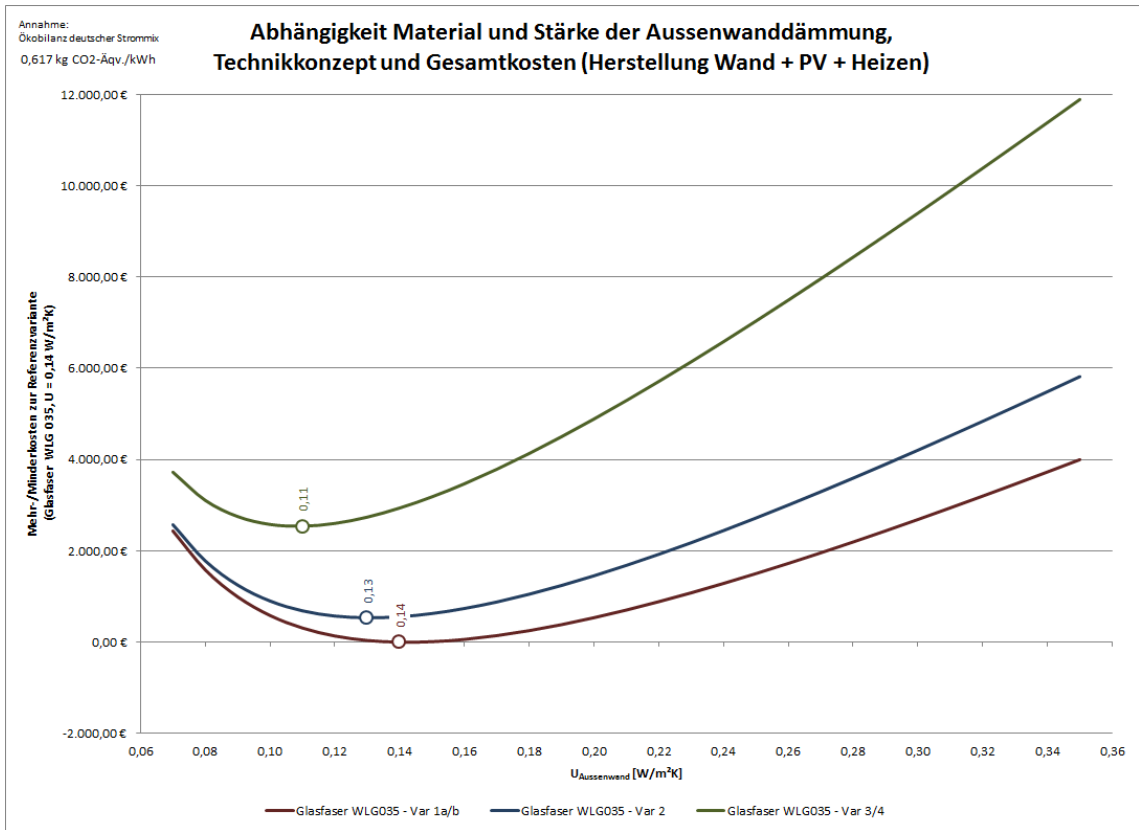


Abbildung 7.2.7-6: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Glasfaserklemmfilz

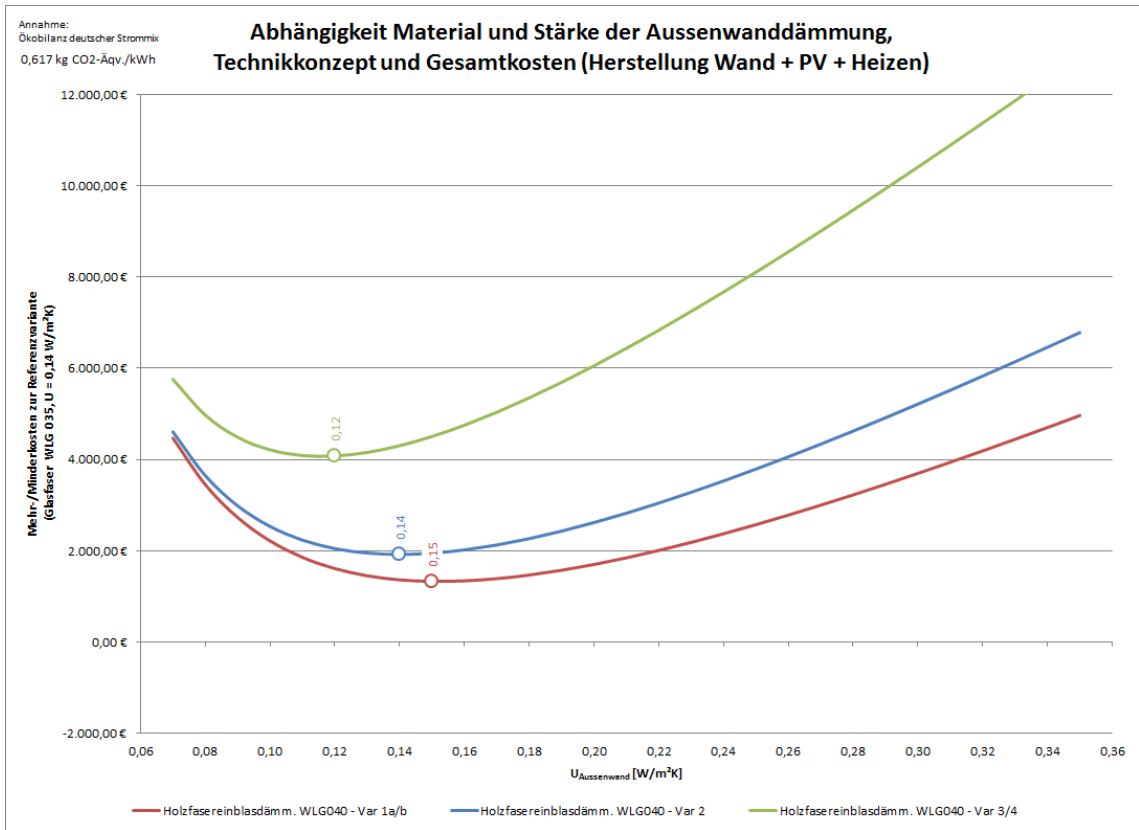


Abbildung 7.2.7-7: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Holzfasereinblasdämmung



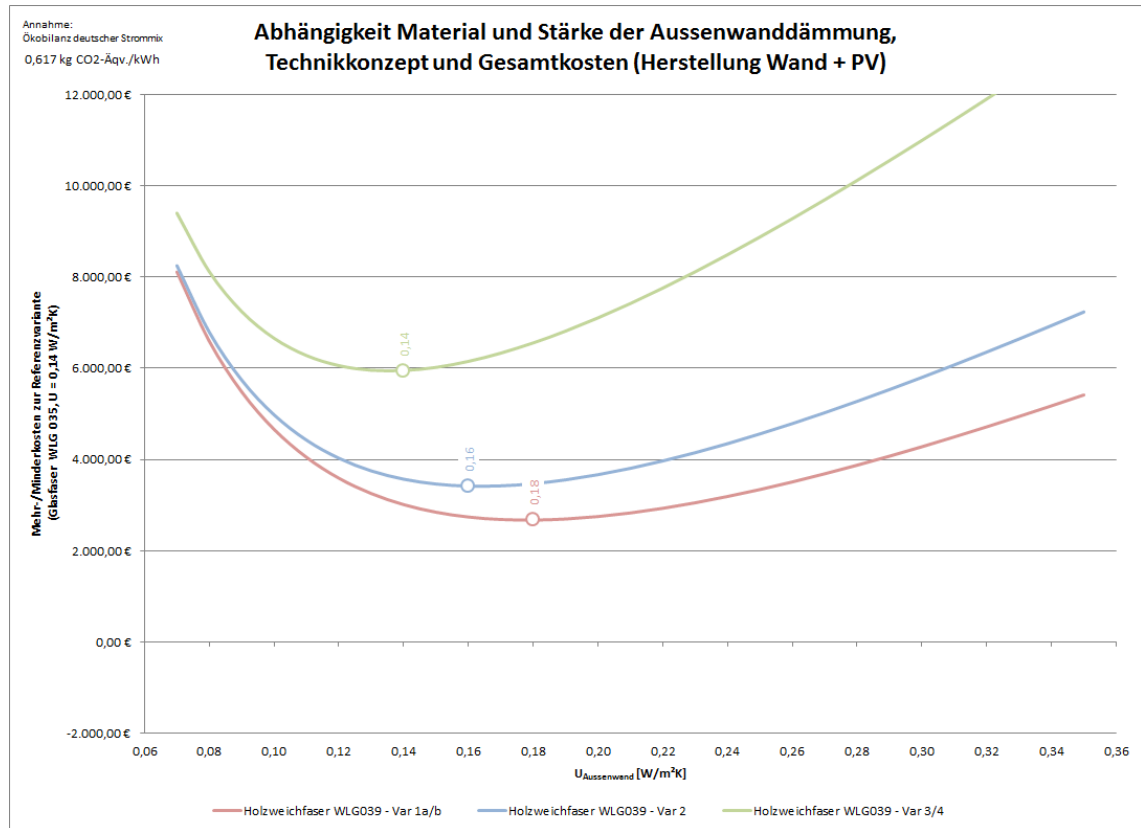


Abbildung 7.2.7-8: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Holzweichfaserdämmung

Somit ergibt sich für die einzelnen Varianten in der Zusammenschaltung der Kurven mit und ohne Heizkosten jeweils ein Bereich von wirtschaftlichen U-Werten der Aussenwand. Die Lage des Optimums hängt davon ab, wie sehr man die Nutzungskosten (Heizkosten) in die Wirtschaftlichkeitsberechnung mit einbeziehen möchte bzw. wie sehr man zukünftige Ausgaben ggf. diskontieren möchte.

Für die Varianten, die auf fossilen Energieträgern basieren, liegt dieser Korridor je nach Dämmstoff zwischen 0,11 und 0,18 W/m<sup>2</sup>K und damit im Bereich des aktuellen Passivhausstandards. Für Gebäude, die vollständig auf erneuerbare Energieträger setzen, ergibt sich ein Optimum, das je nach Dämmstoff zwischen 0,13 und 0,25 W/m<sup>2</sup>K liegt. Dies entspricht einem Dämmstandard knapp unterhalb des Passivhauses.

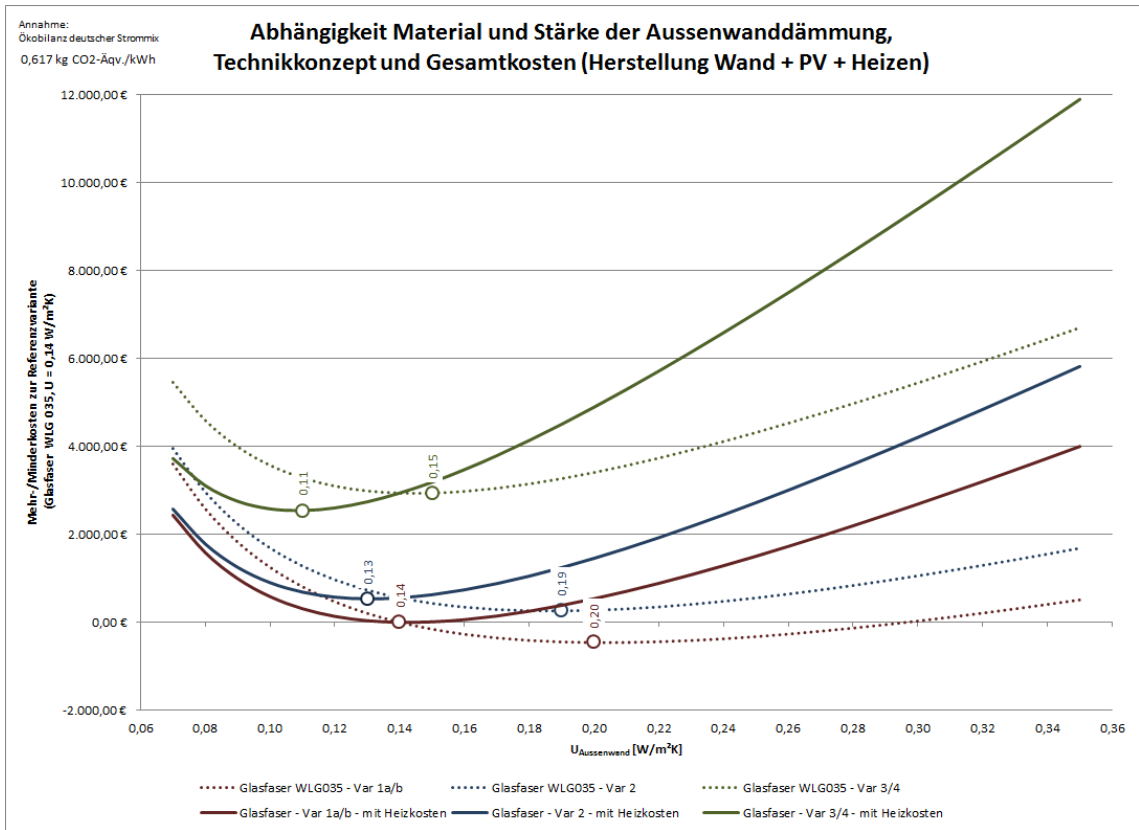


Abbildung 7.2.7-9: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Glasfaserklemmfilz

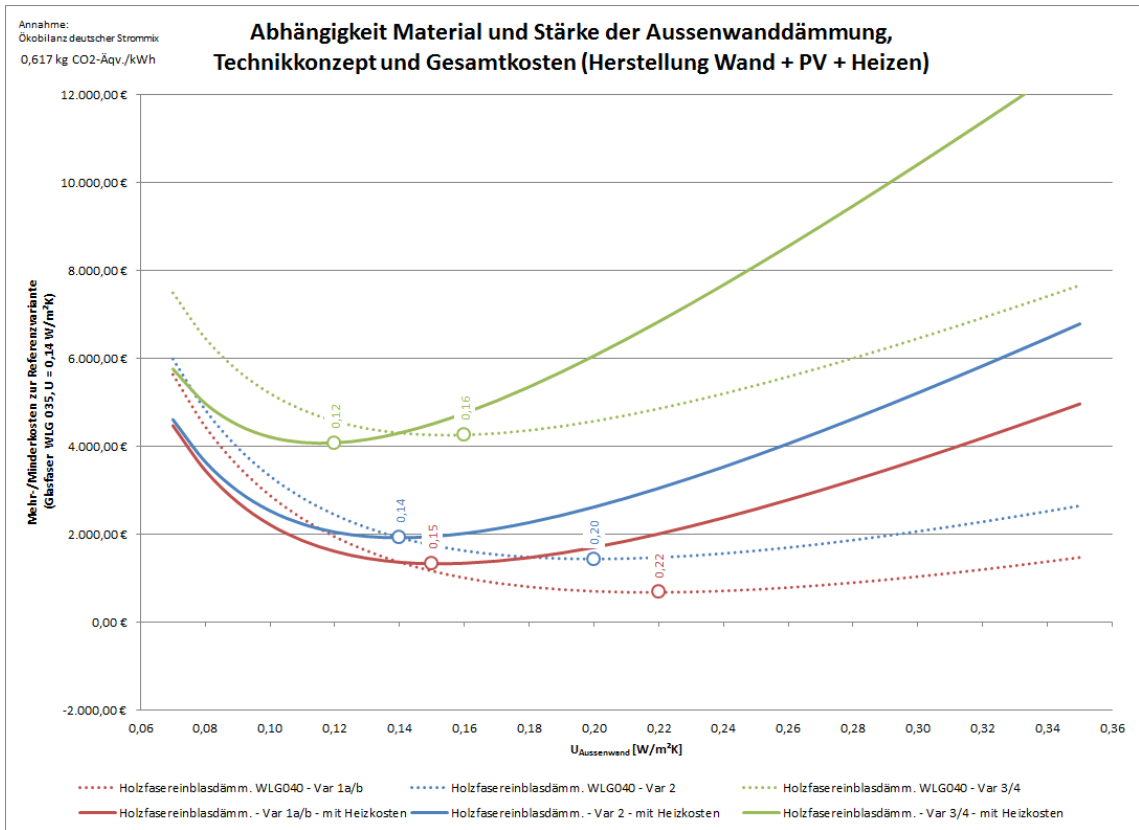


Abbildung 7.2.7-10: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Holzfasereinblasdämmung

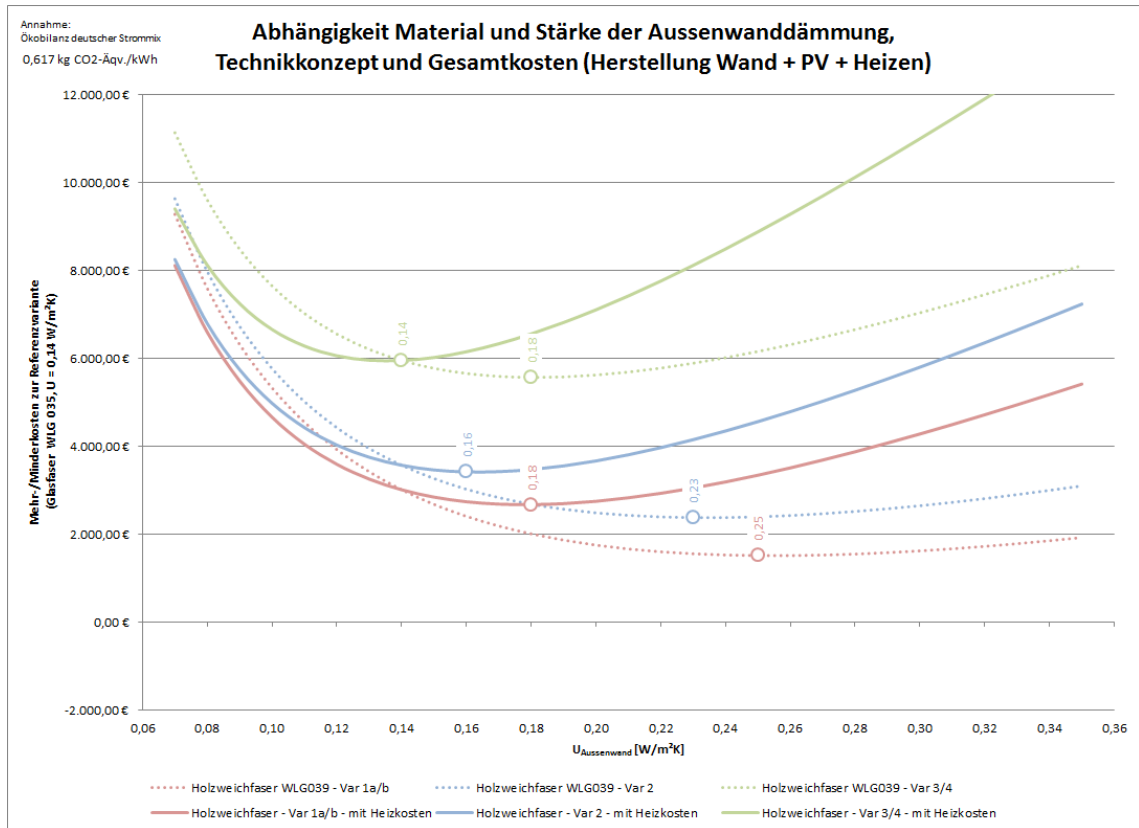


Abbildung 7.2.7-11: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV + Heizen) für Holzweichfaserdämmung

Schaut man sich an, wie sich die Kurven verändern, wenn man den Startwert für die CO<sub>2</sub>-bilanz des deutschen Strommixes verändert, so zeigt sich ein ähnlicher Effekt wie bei Einbeziehung der Heizkosten. Die Kurven verschieben sich geringfügig in Richtung kleinerer U-Werte und werden etwas steiler, sodass sich eine Relevanz der Optimierung mit der Zeit erhöhen dürfte.

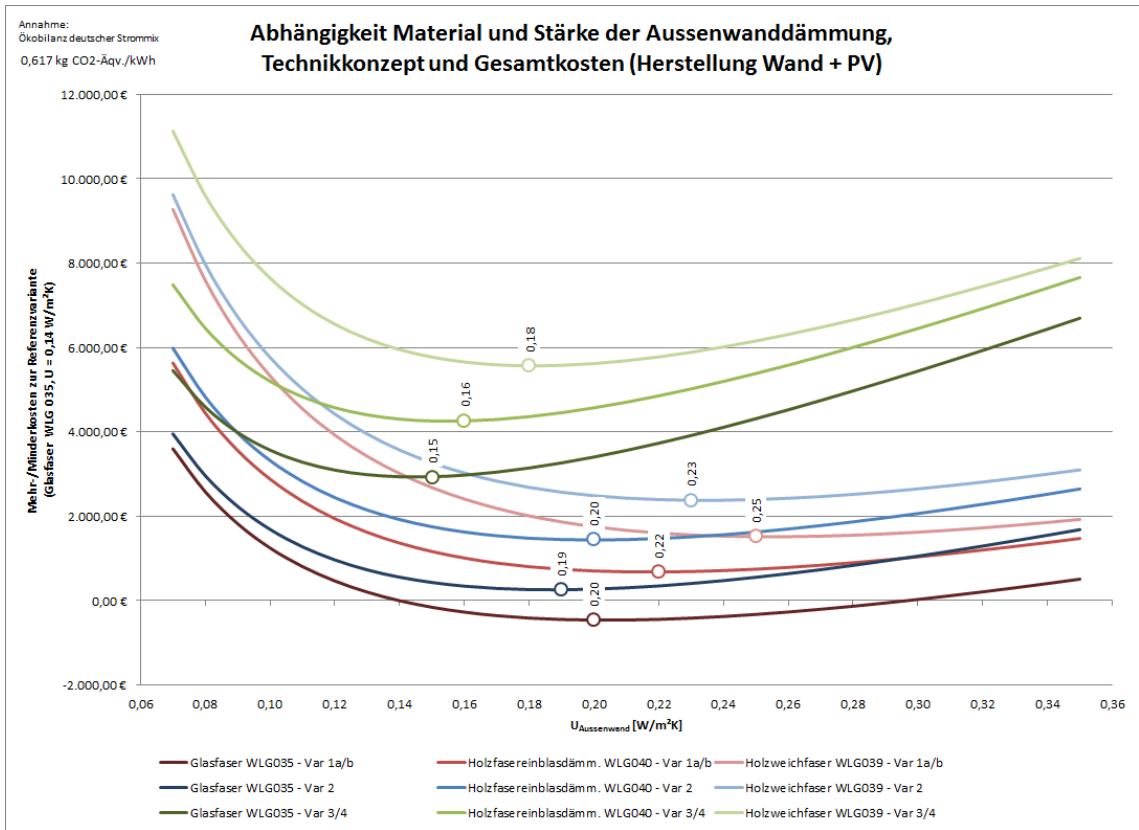


Abbildung 7.2.7-12: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV), Ökobilanz dt. Strommix 617 g CO<sub>2</sub> äqv./kWh

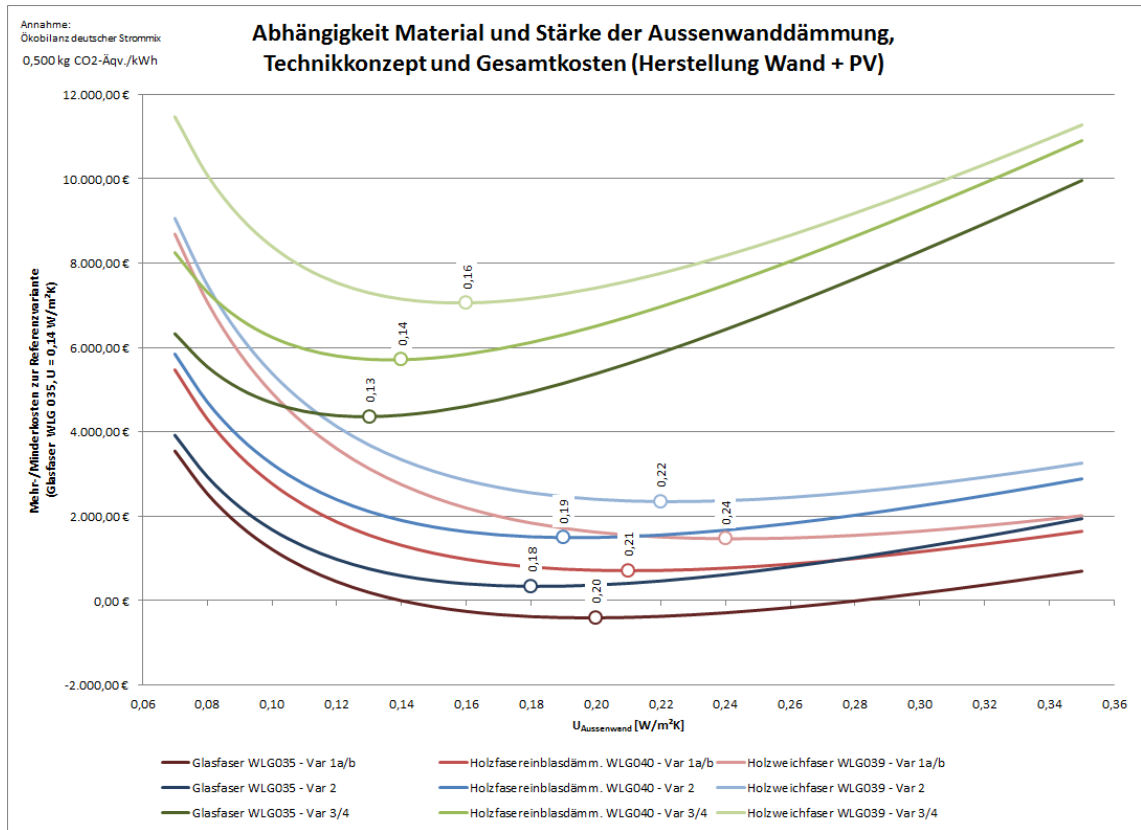


Abbildung 7.2.7-13: Abhängigkeit Material und Stärke der Aussenwanddämmung, Technikkonzept und Gesamtkosten (Herstellung Wand + PV), Ökobilanz dt. Strommix 500 g CO<sub>2</sub> äqv./kWh

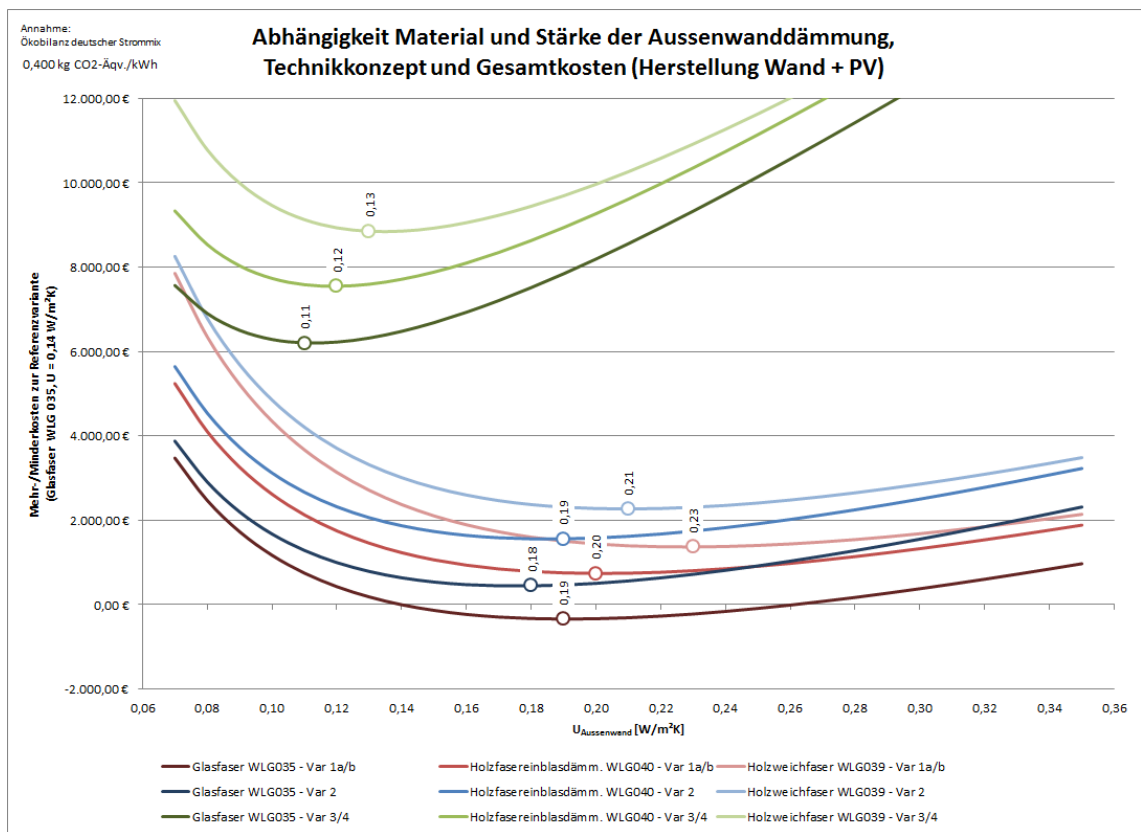


Abbildung 7.2.7-14: Ökobilanz dt. Strommix 400 g CO<sub>2</sub> äqv./kWh

## 7.3 Technologien

### 7.3.1 Bauweisen

- Durch ein Gebäude in Holzbauweise lassen sich gegenüber einem mineralischen Massivgebäude je nach Bauweise zwischen 60% und 92% der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Herstellung, Rückbau und Entsorgung einsparen. In absoluten Zahlen entspricht dies zwischen 38,5 t CO<sub>2</sub>-Äqv. und 58,4 t CO<sub>2</sub>-Äqv. an ersparten Emissionen.
- Der klassische Holzrahmenbau (Variante "Ökonomisch") ist die wirtschaftlichste Bauweise zur Erreichung eines CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäudes.
- Der Kostenvorteil wird sich in der Zukunft mit ökologischer werdender Stromproduktion weiter verstärken.
- Der optimierte Holzbau (Variante "Ausbalanciert" und "Ökologisch") führt zu verringerten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Es ist aber unwirtschaftlicher, als den ökologischen Nachteil über zusätzliche Photovoltaik zu kompensieren.
- Alle untersuchten Holzbauweisen schneiden in allen Wirkungskategorien deutlich besser, als das massive Referenzgebäude ab.
- Das mineralische Massivgebäude erfordert zur Erreichung einer neutralen CO<sub>2</sub>-Bilanz eine um ca. 4,1 kWp größere Photovoltaikkapazität als das Holzgebäude der Variante "Ökonomisch".
- Das Ozonabbaupotential kann bei Betrachtung der untersuchten Bauweisen vernachlässigt werden, da es keinen nennenswerten Einfluss auf die westeuropäischen Gesamtemissionen gibt und sich im Übrigen das Problem der sich verringerten Ozonschicht durch die massiven Anstrengung zur diesbezüglich relevanten Emissionsreduzierung drastisch verringert wenn nicht sogar gelöst hat.
- Durch eine Steigerung des Holzanteils bzw. der absoluten Holzmengen im Gebäude kann das Treibhauspotential weiter deutlich verbessert werden, allerdings geht hiermit durch den erhöhten Materialbedarf eine geringe Lastverschiebung zu Ungunsten des Überdüngungspotentials (EP) und des Versauerungspotentials (AP) einher.
- Eine Neutralisierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks wird mit ökologischer werdender Stromversorgung aus dem Stromnetz immer schwieriger werden.
- Der Optimierung bzw. Substitution von emissionsintensiven Baustoffen/Bauteilen kommt daher zukünftig eine zunehmende Bedeutung zu.
- Ein massiver Holzeinsatz zur Kompensation des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks ist mit ökologischer werdender Energieversorgung allerdings auch kein nachhaltiger Weg, da die kompensatorische Wirkung von Holz ebenfalls auf Verdrängungseffekten in der Verwertungsphase beruhen.
- Zur langfristigen Ermöglichung von CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäuden wird es unbedingt auch Suffizienzstrategien bedürfen.

## Referenzgebäude mineralische Massivbauweise

Mineralisch		
<b>Bodenplatte</b>	<b>Konstruktion</b>	Stahlbeton Bodenplatte
	<b>Dämmung</b>	Schaumglasschotter
	<b>Abdichtung</b>	Bitumenbahn
<b>Aussenwand</b>	<b>Raumabschluss</b>	Kalksandstein
	<b>Dämmung</b>	EPS (WDVS)
	<b>Aussenwandbekleidung</b>	mineralischer Putz (WDVS)
	<b>Fensterelemente</b>	Holzfenster, 3-Scheibenverglasung $U_w=0,83$
<b>Dach</b>	<b>Konstruktion</b>	Stahlbetondecke
	<b>Dampfbremse</b>	Bituminöse Dampfsperre
	<b>Dämmung</b>	Expandiertes Polystyrol (EPS) WLG 035, Gefälledämmung
	<b>Dachabdichtung</b>	Kunststoffabdichtung Polyvinylchlorid (PVC)
<b>Zwischendecke</b>		Stahlbetondecke
<b>Zwischenwände</b>		noch zu definieren

Abbildung 7.3.1-1: Bauteile des Referenzgebäudes in mineralischer Bauweise



## Konstruktionsvarianten Holzbau

		Ökologisch	Ausbalanciert	Ökonomisch
Bodenplatte	Konstruktion	Stahlbeton Bodenplatte		
	Abdichtung	Bitumenbahn		
	Dämmung	Schaumglasschotter	Extrudiertes Polystyrol (XPS) druckfest	Extrudiertes Polystyrol (XPS) - druckfest
Aussenwand	Raumabschluss	Raumabschluss Brettsperrholz	Holzrahmenbau Dreischichtplatte/ Holzweichfaserplatte	Raumabschluss Holzrahmenbau, ohne Gipskarton
	Ständerwerk	Duo- / Triobalken		
	Dämmung	Holzweichfaserplatte	Holzfasereinblasdämmung	Glaswolle Klemmfilz WLG 035
	Aussenwandbekleidung	Polycarbonat Hohlkammerplatten		
	Fensterelemente	Holzfenster, 3-Scheibenverglasung Uw=0,66	Holzfenster, 3-Scheibenverglasung Uw=0,86	Holzfenster, 2-Scheibenverglasung Uw=0,86
	Dach	Konstruktion	Brettsperrholz	Holzbalkendecke Dreischichtplatte
Dampfbremse		Bituminöse Dampfsperre		
Dämmung		Holzweichfaserplatte, Dachdämmung	Expandiertes Polystyrol (EPS) WLG 035, Gefälledämmung	Expandiertes Polystyrol (EPS) WLG 035, Gefälledämmung
Dachabdichtung		Kunststoffabdichtung thermoplastische/flexible Polyolefine (TPO/FPO)	Kunststoffabdichtung Ethylen-Copolymerisat-Bitumen (ECB)	Kunststoffabdichtung Polyvinylchlorid (PVC)
Zwischendecke	Hohlkammerelement (Lignatur easy)			
Zwischenwände	Holzständerwand 100 mm, beidseitig einfach Dreischichtplatte, Mineralfaserdämmung	Holzständerwand 110 mm, beidseitig doppelt GK, Mineralfaserdämmung	Metallständerwand 100 mm, beidseitig einfach GK, Mineralfaserdämmung	

Abbildung 7.3.1-2: Bauteile des +++Hauses in den unterschiedlichen Holzbauvarianten

### Holzbau gegenüber Massivbau (mineralisch)

Alle drei Holzbauvarianten, sowie das Referenzgebäude in mineralischer Bauweise wurden in der Lebenszyklussoftware LEGEP modelliert und in mehreren Entwicklungszyklen optimiert. Die auf diese Weise erstellten Ökobilanzen dienten als Datengrundlage für die weitergehenden Betrachtungen auf Gebäudeebene.

Stellt man die verschiedenen Holzbaukonstruktionen dem Massivbau gegenüber, so sieht man sehr schnell, dass hiermit bezogen auf das Treibhauspotential zwischen 60 und 92% der

CO<sub>2</sub> Emissionen aus der Konstruktion eingespart werden können.

	GWP			ODP	AP	EP	POCP	PERT	PENRT	Kosten Gebäude ohne Technik (netto)
<b>Ökonomisch</b>	25,109 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-38.521,00 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-60,5%	0,00146 kg R11-Äqv.	105,00 kg SO <sub>2</sub> -Äqv.	15,00 kg Phos-Äqv.	19,00 kg Ethen-Äqv.	95.553 kWh	98.248 kWh	<b>97.039,50 EUR</b>
<b>Ausbalanciert</b>	19,292 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-44.338,00 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-70,0%	0,00138 kg R11-Äqv.	103,00 kg SO <sub>2</sub> -Äqv.	15,00 kg Phos-Äqv.	19,00 kg Ethen-Äqv.	116.285 kWh	79.557 kWh	<b>109.340,71 EUR</b>
<b>Ökologisch</b>	5,203 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-58.427,00 kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	-92,0 %	0,00199 kg R11-Äqv.	134,00 kg SO <sub>2</sub> -Äqv.	19,00 kg Phos-Äqv.	19,00 kg Ethen-Äqv.	222.906 kWh	53.009 kWh	<b>136.038,66 EUR</b>
<b>Mineralisch</b>	63,630 t CO <sub>2</sub> -Äqv.			0,00233 kg R11-Äqv.	184,00 kg SO <sub>2</sub> -Äqv.	23,00 kg Phos-Äqv.	24,00 kg Ethen-Äqv.	40.174 kWh	192.991 kWh	<b>121.568,00 EUR*</b> <b>143.758,00 EUR*</b> <b>169.896,00 EUR*</b>

Abbildung 7.3.1-3: Ökobilanz und Kosten der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten

\*Kosten nach [BKl, 2015, S.302], Ein- und Zweifamilienhäuser, nicht unterkellert (Min.-, Max.- und durch Durchschnittswerte für die Kostengruppe 300, Nettowerte)

Bereits durch die klassische Holzrahmenbaukonstruktion lassen sich gegenüber dem mineralischen Massivbau 60,5 % der CO<sub>2</sub> Emissionen einsparen. In der normierten Darstellung sieht man, dass sich auch in den übrigen Wirkungskategorien Verbesserungen einstellen. Den größten Einfluss auf die westeuropäischen Gesamtemissionen haben die Bauweisen auf das Treibhauspotential (GWP). Gleichzeitig besteht hier das größte Verbesserungspotential. Es folgen in abnehmender Reihenfolge das Versauerungspotential AP, das bodennahe Ozonbildungspotential, sowie das Überdüngungspotential. Auf das Ozonabbaupotential haben alle Bauweisen nahezu keinen Einfluss.

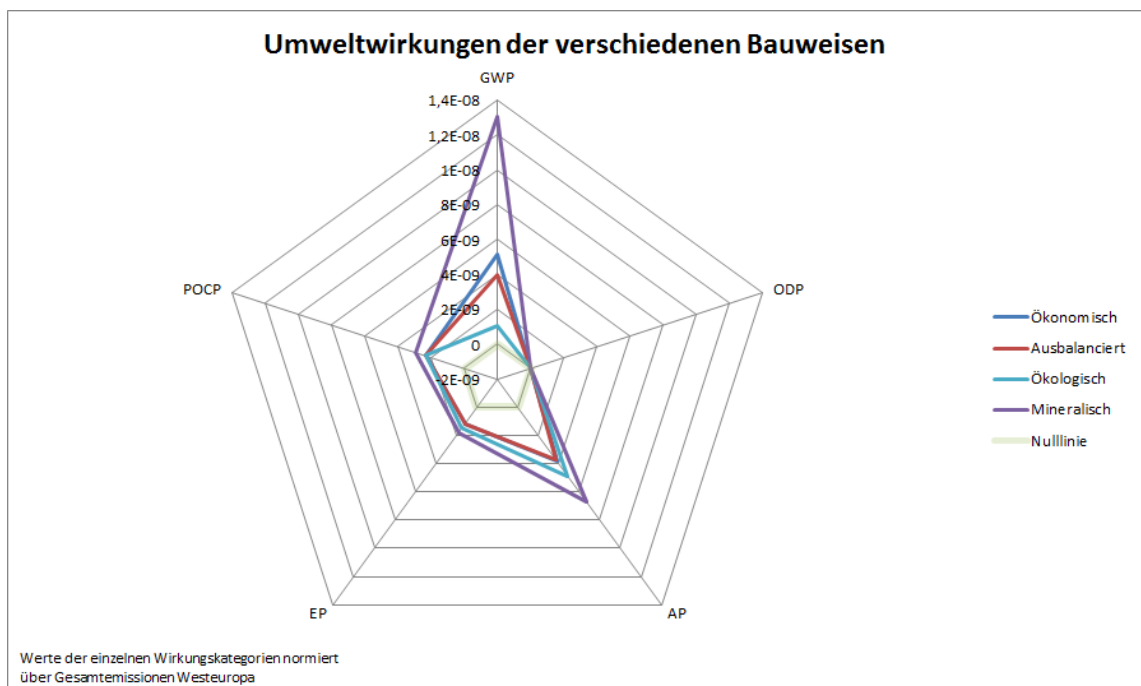


Abbildung 7.3.1-4: Umweltwirkungen der unterschiedlichen +++Haus Konstruktionsvarianten, normiert

Betrachtet man die Optimierungsmöglichkeiten durch die alternativen Holzbauweisen, so stellt man fest, dass das Treibhauspotential deutlich weiter abgesenkt werden kann (von ca. 25,1 t CO<sub>2</sub>-Äqv. auf ca. 5,2 t CO<sub>2</sub>-Äqv.). Das bodennahe Ozonbildungspotential lässt sich hingegen mit den untersuchten Bauweisen nicht maßgeblich weiter verbessern. Bezogen auf das Überdüngungs- und Versauerungspotential stellt sich durch bei Optimierung des Treibhauspotentials insbesondere für die Variante "Ökologisch" eine leichte Lastverschiebung ein. Dies ist im Wesentlichen auf den in Folge des hohen Holzanteils deutlich gestiegenen Materialeinsatz zurückzuführen.

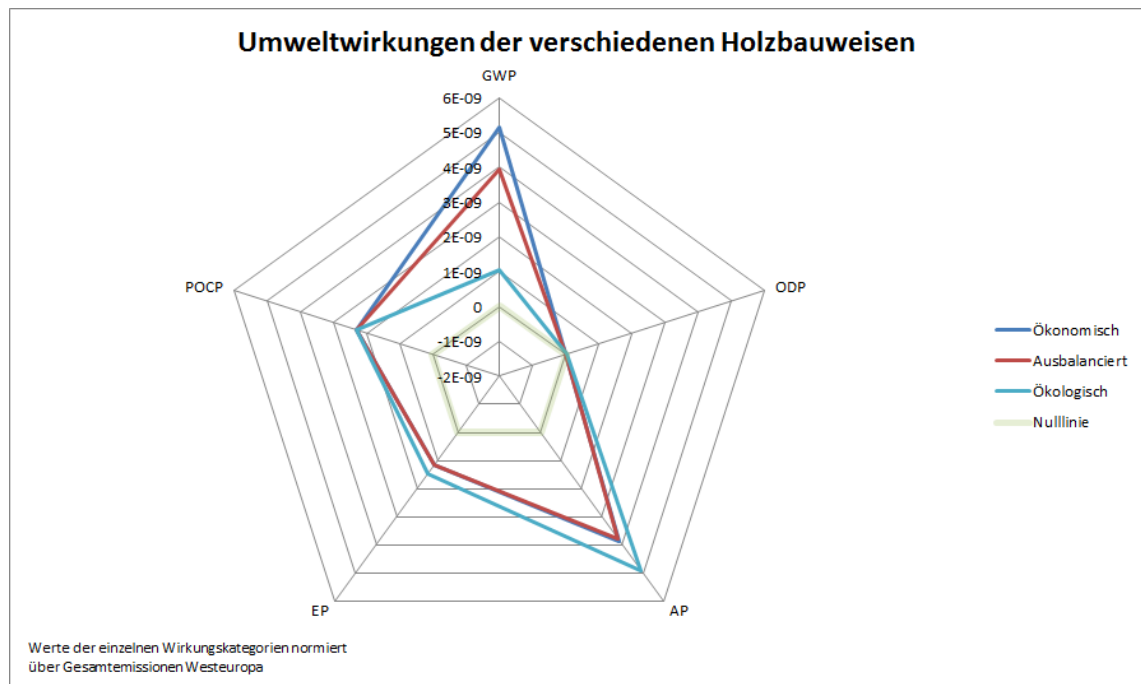


Abbildung 7.3.1-5: Umweltwirkungen der unterschiedlichen +++Haus Konstruktionsvarianten (nur Holzbau), normiert

Definitionsgemäß führen die unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke der Gebäudekonzepte zu unterschiedlich großen Photovoltaikanlagen, die die Gebäude insgesamt auf eine neutrale CO<sub>2</sub>-Bilanz bringen sollen. Insofern kann die angestrebte CO<sub>2</sub>-Neutralität auf vielfältigen Wegen erreicht werden. Betrachtet man die Kosten, dieser Gebäude- und Technikkonzepte, die insgesamt alle eine CO<sub>2</sub>-Bilanz von 0 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. aufweisen so stellt man fest, dass die unter "Ökonomisch" beschriebene Konstruktionsvariante für alle Technikkonzepte jeweils die kostengünstigste ist. Bei dieser Bauweise handelt es sich im Wesentlichen um das, was den klassischen Holzrahmenbaustandard in Deutschland repräsentiert. Eine genaue Beschreibung der Bauteilaufbauten kann der Tabelle x entnommen werden. Zum Erreichen der CO<sub>2</sub>-Neutralität sind für diese Bauweise gegenüber der mineralischen Massivbauweise ca. 4,1 kWp weniger Photovoltaikkapazität und somit fast 25 m<sup>2</sup> weniger Dachfläche erforderlich. Für eine Übersicht, wie hoch der sich aus Konstruktion und Nutzung ergebende Flächenbedarf für Photovoltaik in Relation zum Angebot ausfällt, wird auf Grafik x im Kapitel 6.3.2 Optimierung des Gebäudes und der Energieversorgung gegenüber Kompensation mittels Photovoltaik verwiesen.

Eine weitergehende Optimierung des Holzbaus, wie sie in den Konstruktionsvarianten "Ausbalanciert" und "Ökologisch" beschrieben ist, ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll, da es kostengünstiger ist, den Nachteil bzgl. des GWPs nicht über die Konstruktion, sondern über zusätzliche Photovoltaikkapazitäten zu realisieren. Lediglich die zur Verfügung stehende Fläche kann hier ein beschränkender Faktor sein und ggf. eine Optimierung über die Konstruktion rechtfertigen. Durch die Variante "Ausbalanciert" werden gegenüber der Variante "Ökonomisch" ca. 0,5 kWp weniger und durch die Variante "Ökologisch" nochmals 1,2 kWp weniger erforderlich. Das entspricht einer möglichen Flächensparnis von 3 m<sup>2</sup> und zusätzlichen 7,2 m<sup>2</sup>.

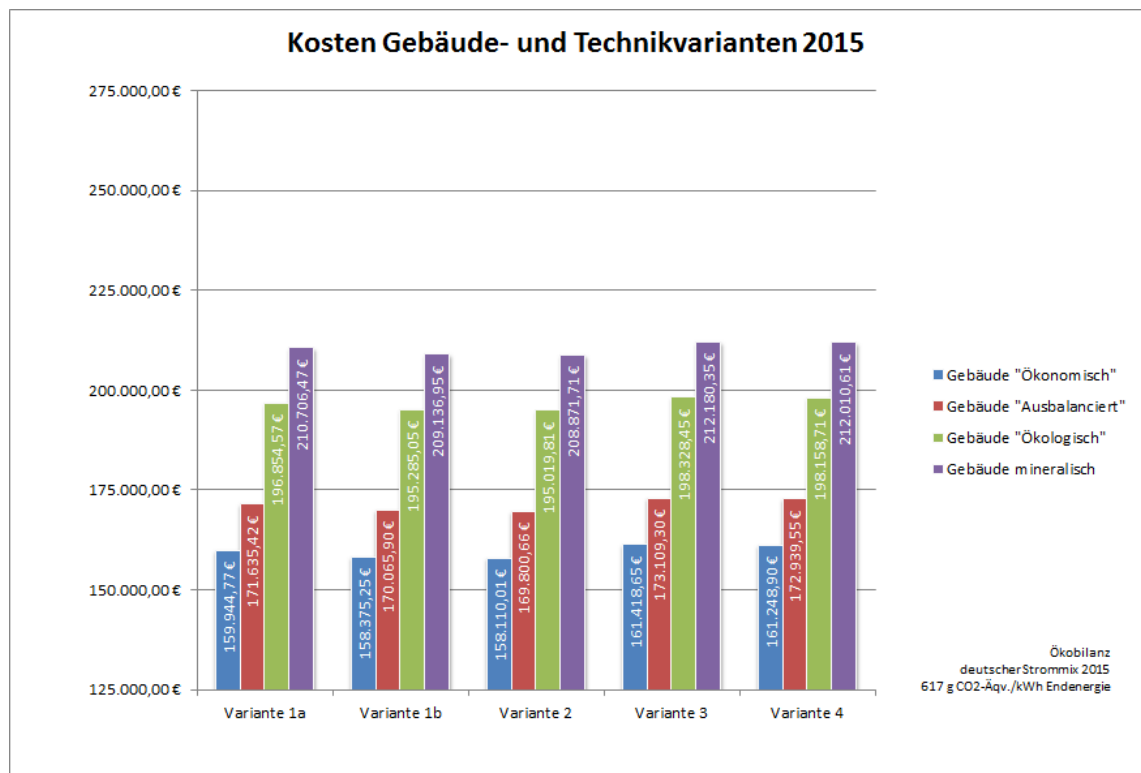


Abbildung 7.3.1-6: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2015

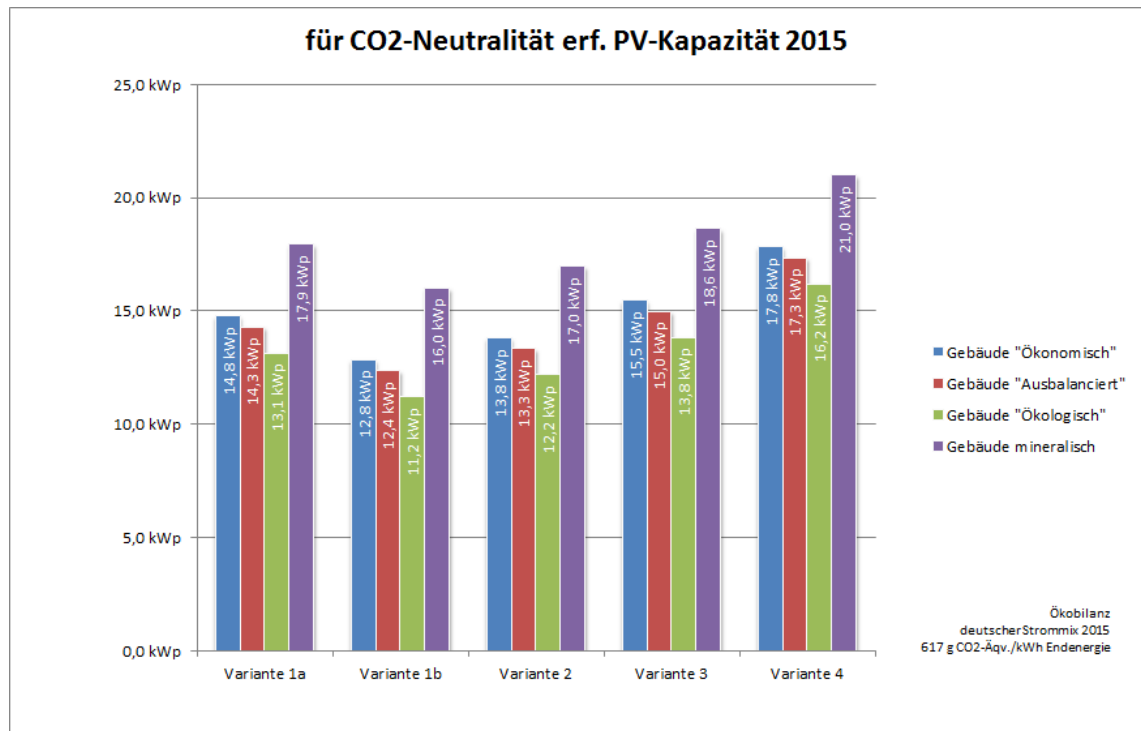


Abbildung 7.3.1-7: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2015

## Zukunftsszenarien

Die soeben erläuterten Kosten basieren hierbei auf dem Treibhauspotential des heutigen Strommixes in Höhe von ca. 617 g CO<sub>2</sub>-Äqv./kWh Endenergie, da die Kompensation über eine Verdrängung dieses Stroms durch den eingespeisten Photovoltaikstrom mit einem Treibhauspotential von ca. 75 g CO<sub>2</sub>-Äqv./kWh Endenergie erfolgt. In die Berechnung mit einbezogen wurde bereits die Annahme, dass sich auch die Ökobilanz des deutschen Strommixes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren immer mehr der Ökobilanz von Photovoltaikstrom annähern wird. Dies wirkt sich auf die zur Kompensation benötigte Photovoltaikkapazität insofern aus, als das zur Kompensation von einer gleichbleibenden Menge CO<sub>2</sub>-äqv. Emissionen, eine immer größer werdende Photovoltaikkapazität erforderlich wird. Die Betrachtung der Kompensationsmöglichkeit berücksichtigt diesen degressiven Charakter der Kompensationsmöglichkeit in der Berechnung der Investitionskosten.

Betrachtet man die Kosten daher nun für ein in der Zukunft zu errichtendes Gebäude, für das das Treibhauspotential des deutschen Strommixes bereits zum Zeitpunkt der Errichtung besser als heute sein wird, so wirkt sich dies dahingehend aus, dass der Kostenvorteil der Holzbauvariante "Ökonomisch" gegenüber dem mineralischen Massivgebäude immer weiter zunimmt, es aber erst zu einem relativ späten Zeitpunkt (GWP des deutschen Strommixes unter 100 g CO<sub>2</sub>-Äqv./kWh Endenergie) dazu führt, dass die alternativen Holzbauvarianten mit erhöhten Holzmassen wirtschaftlicher werden, als die Variante "Ökonomisch". Zu diesem Zeitpunkt wird aber die zur Kompensation erforderliche Photovoltaik-Kapazität bereits auf die Dimension von Großanlagen angewachsen und damit sowohl das Budget der allermeisten Bauherren, als auch die zur Verfügung stehenden Flächen sprengen dürfte.

Diese Betrachtung lässt dabei allerdings außer Acht, dass sich eine ökologischere Energieerzeugung und ein damit einhergehend sinkendes GWP des Strommixes auch auf die GWP Werte der Baustoffe auswirken wird. Eine konkrete Einschätzung über den Einfluss lässt sich auf Grundlage der aktuellen Datenlage der EPDs jedoch nicht vornehmen, da die GWP Werte in der Regel nicht unterscheiden nach Ihrem Anteil der jeweils durch stoffliche und/oder energetische Prozesse verursachten Emissionen ausgewiesen werden.

Allerdings führt eine Verringerung des Treibhauspotentials von Baustoffen insgesamt dazu, dass die Relevanz der Baustoffwahl eher wieder etwas abnimmt. Insofern wird sich an dem Zusammenhang, dass sich eine erste Optimierung von der Massivbauweise zur Holzbauweise in wirtschaftlicher Hinsicht lohnt, eine weitergehende Optimierung der Holzbauweise aufgrund der hohen Materialmehrkosten allerdings nicht wirtschaftlich ist, nach Einschätzung der Verfasser aller Wahrscheinlichkeit nach auch bei besser werdendem Treibhauspotential des Strommixes nichts grundlegendes ändern.

Insgesamt lässt sich also feststellen, dass im Zuge einer immer ökologischer werdenden Stromproduktion die Relevanz der Baustoffwahl einerseits an Relevanz gewinnt, es aber in der Regel aufgrund der hohen Materialpreise nicht wirtschaftlich ist, eine gute CO<sub>2</sub> Bilanz über einen übermäßigen Holzeinsatz zu erreichen. Sobald die deutsche Stromproduktion annähernd so ökologisch wie Strom aus erneuerbaren Energiequellen ist und damit eine Kompensation durch Verdrängung von Energieträgern kaum noch möglich sein wird, wird es ohnehin neuer Ansätze bedürfen, um weiterhin CO<sub>2</sub>-neutrale Gebäude errichten zu können. Nach Auffassung der Verfasser wird es aus den oben genannten Gründen dann aber erforderlich sein, sich mit den verbliebenen, emissionsintensiven Baustoffen und Bauteilen auseinanderzusetzen und zu versuchen, diese zu optimieren oder auszutauschen. Ein in Herstellung, Rückbau und Entsorgung annähernd CO<sub>2</sub>-neutrales Gebäude erscheint dann durchaus auch langfristig als realisierbar. Für die Nutzungsphase, die auch bei vollständiger Versorgung aus erneuerbaren Energiequellen nie aus sich heraus CO<sub>2</sub>-neutral sein kann, wird es nach Meinung der Verfasser daher dringend erforderlich sein, den Bedarf mittels Suffizienzstrategien zu reduzieren.

Das +++Haus versucht diesen Aspekt ein Stück weit vorwegzunehmen, indem der Flächenbedarf und damit der Bedarf an Konstruktionsmaterialien aber auch Heizenergie reduziert wurde.

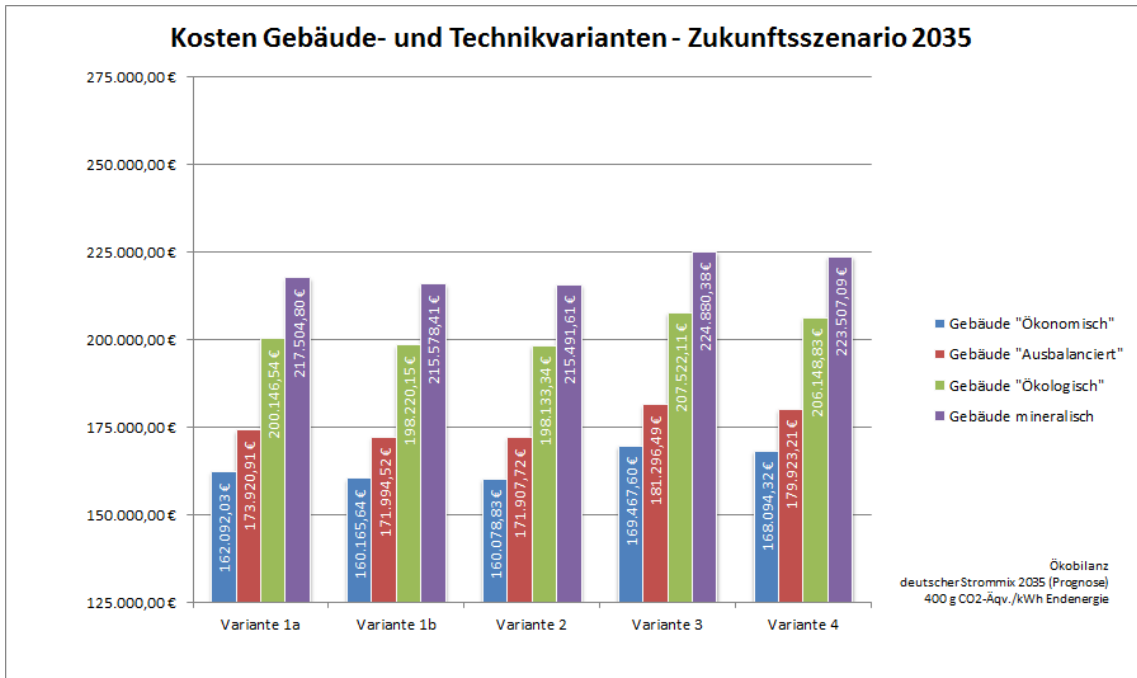


Abbildung 7.3.1-8: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2035

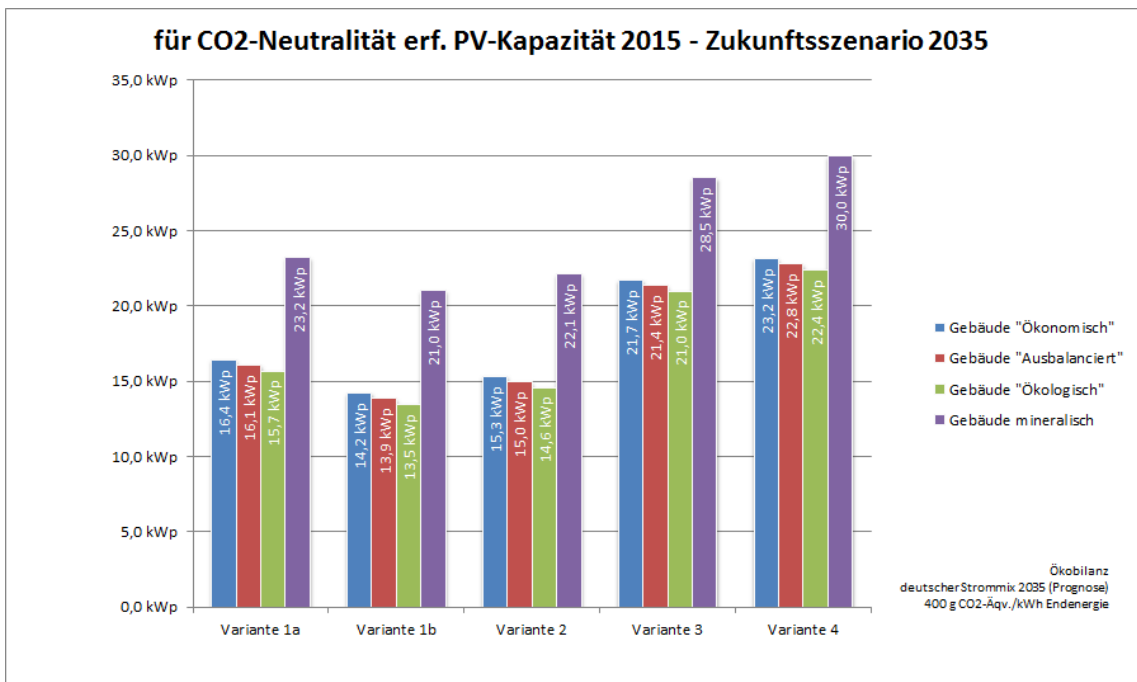


Abbildung 7.3.1-9: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2035

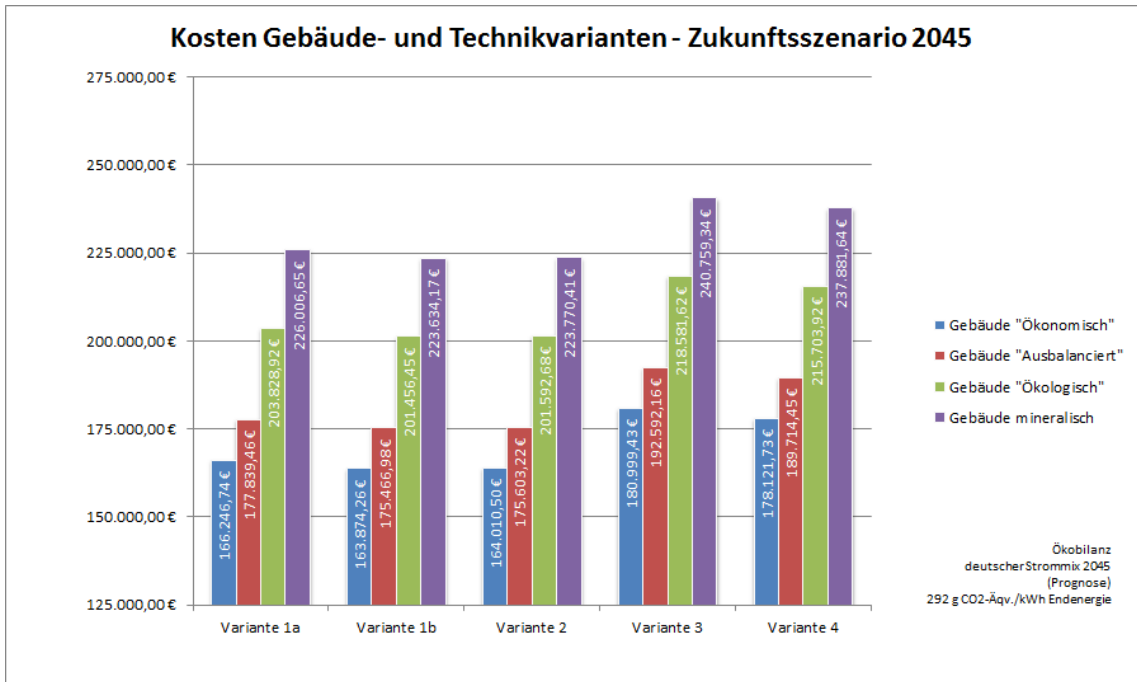


Abbildung 7.3.1-10: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2045

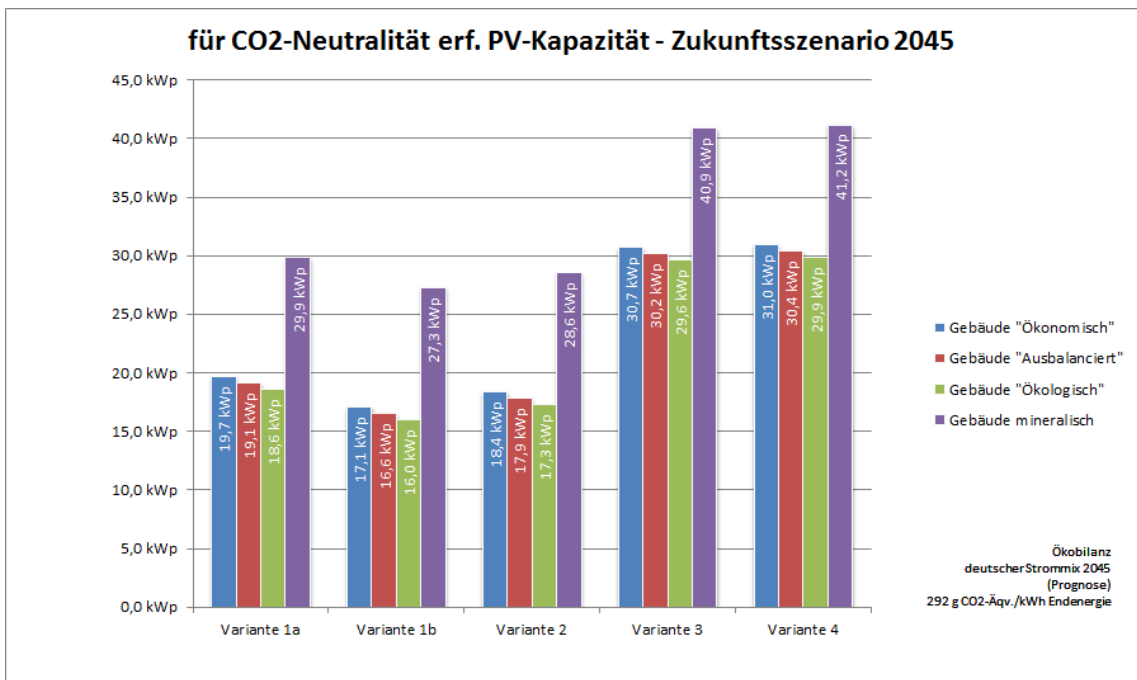


Abbildung 7.3.1-11: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2045



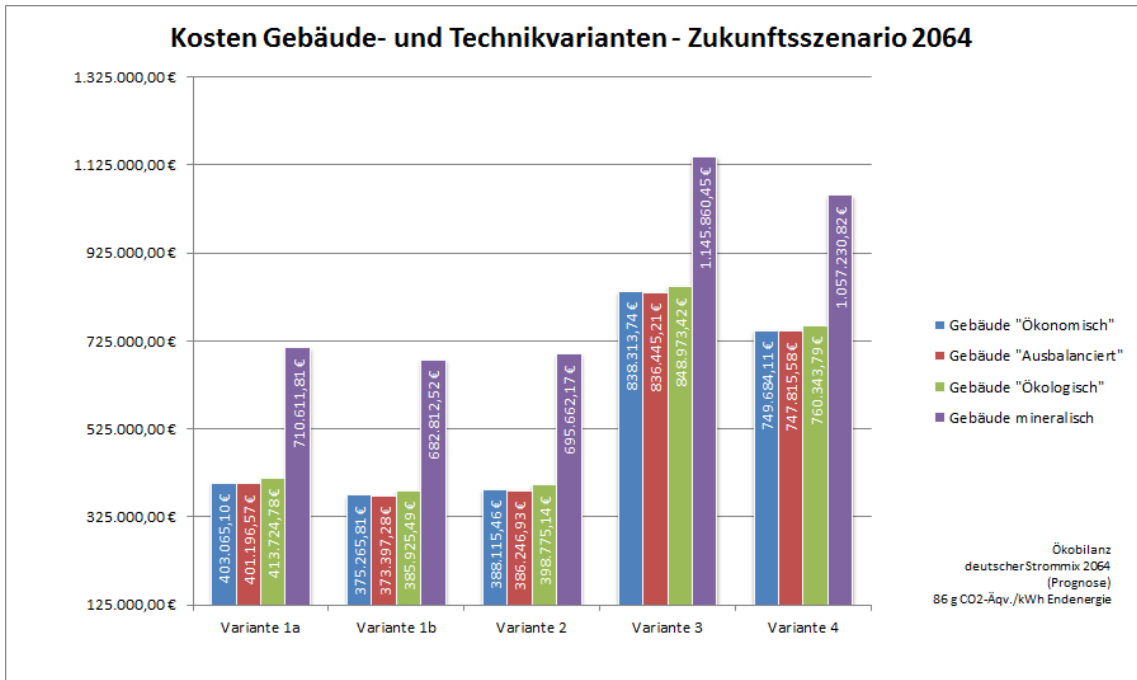


Abbildung 7.3.1-12: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2064

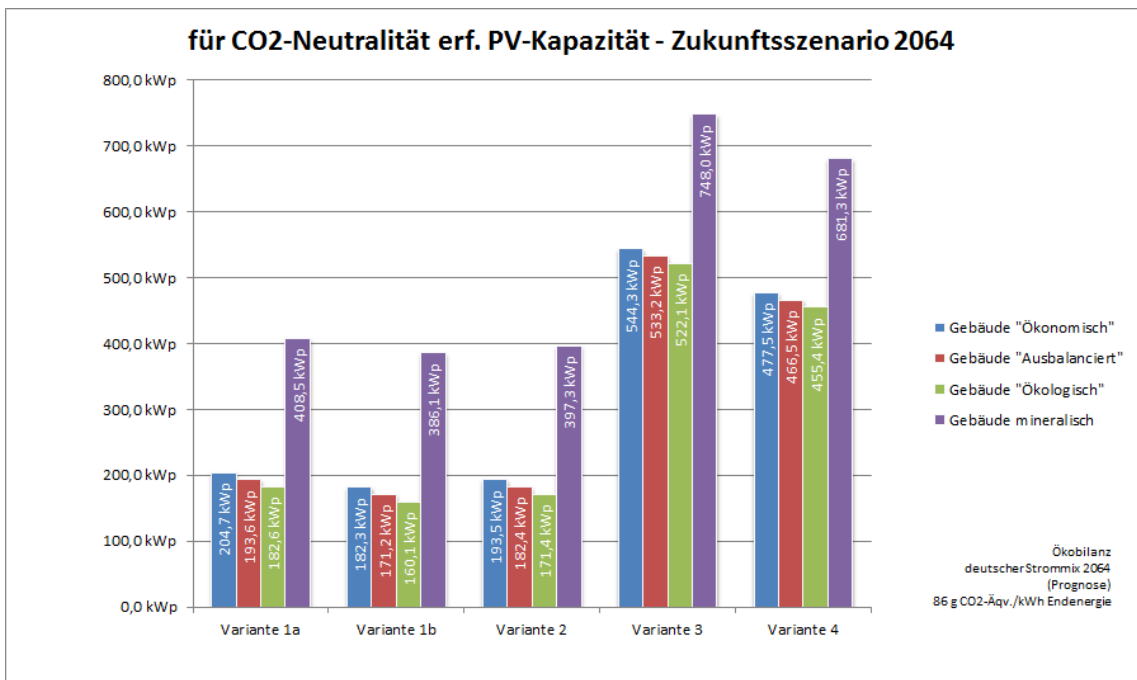


Abbildung 7.3.1-13: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2064

### 7.3.2 Energieversorgung

- Durch die Verwendung von erneuerbaren Energiequellen lassen sich ca. 75 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung des Gebäudes einsparen. In absoluten Zahlen entspricht dies ca. 89,4 t CO<sub>2</sub>-Äqv. an ersparten Emissionen.

- Die Konzepte mit erneuerbaren Energiequellen sind, wenn als Vergleichsmaßstab die CO<sub>2</sub>-Neutralität der Gebäude angelegt wird, in den Investitionskosten wirtschaftlicher, als die Konzepte mit fossilen Energieträgern.
- Es ist somit wirtschaftlicher die CO<sub>2</sub> Emissionen der Nutzungsphase tatsächlich zu senken, als diese über zusätzliche Photovoltaik Kapazitäten zu kompensieren. Dies wird durch eine ökologischer werdende Stromproduktion in der Zukunft verstärkt.
- Die zur Kompensation der CO<sub>2</sub>-Bilanz erforderliche Photovoltaik-Kapazität liegt für die Konzepte mit erneuerbaren Energiequellen gegenüber denen mit fossilen Energieträgern um 4-5 kWp niedriger.

### Möglichkeiten der Energieversorgung

	Beschreibung	GWP			Kosten inkl. erf. PV		
		absolut	Differenz absolut	Differenz prozentual	absolut	Differenz absolut	Differenz prozentual
1a	3 kW Wärmepumpe Quelle Erdsonde mit Elektrodurchlauferhitzer mit Lüftung mit WRG	33,600 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-84,341 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-70,2%	23.304,20 EUR	-3.185,68 EUR	-12,0%
1b	3 kW Wärmepumpe Quelle Erdsonde mit ca. 300l Warmwasserspeicher mit Lüftung mit WRG	28,500 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-89,441 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-75,8%	23.129,63 EUR	-3.360,25 EUR	-12,7%
2	Luftwärmepumpe für Heizen und Warmwasser mit Lüftung mit WRG	31,050 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-86,891 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-73,7%	22.166,91 EUR	-4.322,97 EUR	-16,3%
3	Gas-Brennwertgerät mit solaren Brauchwasserunterstützung mit Lüftung mit WRG	117,941 t CO <sub>2</sub> -Äqv.			26.489,88 EUR		
4	Gas-Brennwertgerät mit Elektrodurchlauferhitzer mit Lüftung mit WRG	100,742 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-17,199 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-14,6%	23.981,63 EUR	-2.508,25 EUR	-9,5%

Abbildung 7.3.2-1: Kosten und Treibhauspotential der Technikvarianten des +++Hauses

### fossile gegenüber erneuerbaren Energiequellen

Stellt man die verschiedenen Möglichkeiten der Energieversorgung gegenüber, so stellt man fest, dass mit Wärmepumpen als Energieerzeuger gegenüber der Referenztechnologie (Gas-Brennwerttherme mit solarer Brauchwasserunterstützung und Photovoltaik - Var 3) bezogen auf das Treibhauspotential zwischen 71 und 76% der CO<sub>2</sub> Emissionen aus der Nutzung eingespart werden können. Interessanterweise ist es für die CO<sub>2</sub>-Bilanz auch vorteilhafter, den Warmwasserbedarf mit Durchlauferhitzern und Photovoltaikstrom zu erzeugen. Hier wirkt sich für die solare Brauchwasserunterstützung negativ aus, dass der Restenergiebedarf aus dem Energieträger Gas erzeugt wird, was gegenüber PV-Strom eine schlechtere Ökobilanz aufweist.

GWP Nutzung (Heizen, Warmwasser, Lüften, Strom)			
	absolut	Differenz absolut	Differenz prozentual
Var 1a	33,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-84,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-71,5%
Var 1b	28,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-89,4 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-75,8%
Var 2	31,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-86,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-73,6%
Var 3	117,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.		
Var 4	100,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-17,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	-14,6%

Abbildung 7.3.2-2: Treibhauspotential (Nutzungsphase) der Technikvarianten des +++Hauses

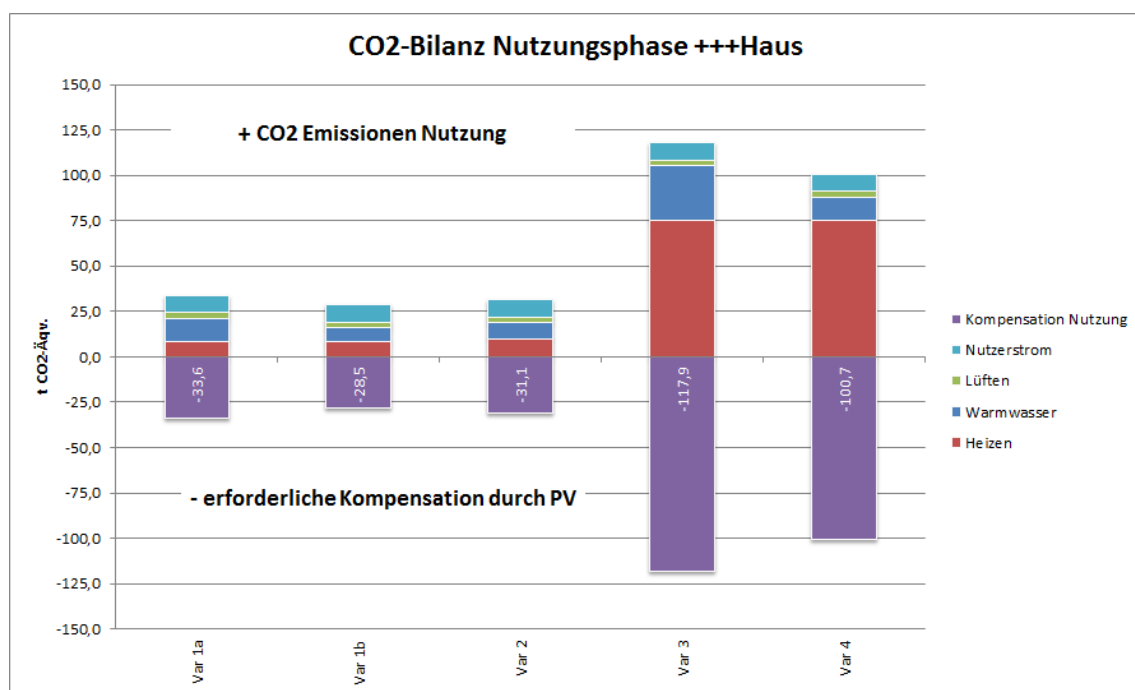


Abbildung 7.3.2-3: Treibhauspotential (Nutzungsphase) der Technikvarianten des +++Hauses

Stellt man die unterschiedlichen Möglichkeiten der Energieversorgung wirtschaftlich gegenüber, so stellt man fest, dass die Varianten, die auf Gas als Energieträger setzen trotz der zunächst günstigeren Investitionskosten aufgrund der größeren, erforderlichen Photovoltaikkapazitäten und den damit verbundenen Kosten in der Gesamtbetrachtung kostenintensiver sind. Die beiden wirtschaftlichsten Varianten besitzen eine Erdwärmepumpe in Kombination mit Warmwasserspeicher (Var 1b) bzw. eine Luft-Wasser-Wärmepumpe (Var 2). Diese beiden Konzepte kommen im Vergleich zu der reinen Gas-Brennwerttherme in Kombination mit Durchlauferhitzern (Var 4) auf eine um 5 kWp bzw. 4 kWp geringere, erforderliche Photovoltaikkapazität.

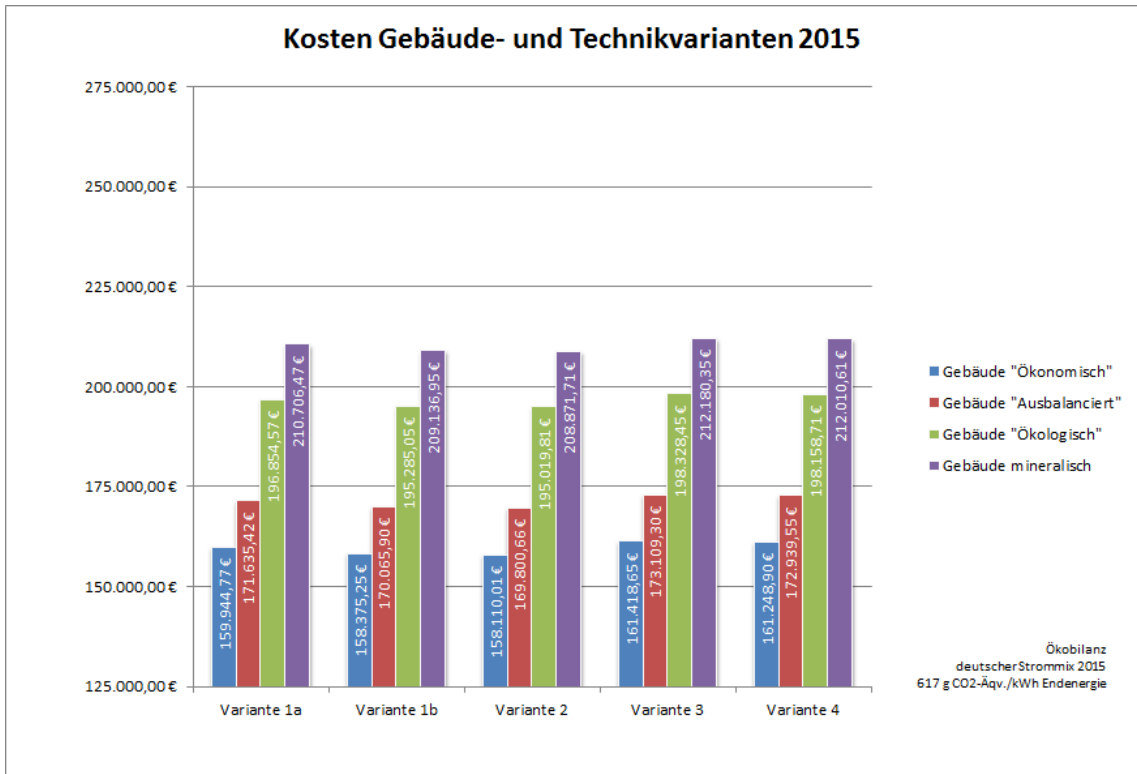


Abbildung 7.3.2-4: Gesamtkosten der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2015

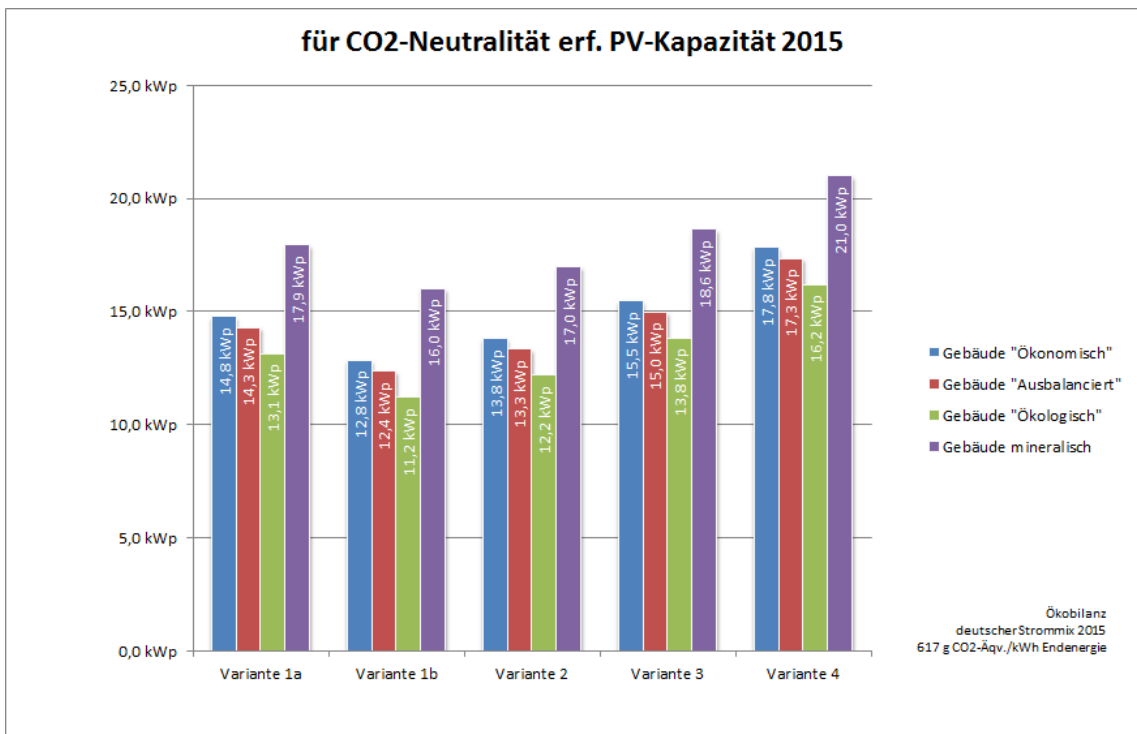


Abbildung 7.3.2-5: erforderliche PV-Flächen der +++Haus Varianten, Ökobilanz dt. Strommix 2015

## Energiebilanz und Verbrauchskosten

Schaut man sich die Energiebilanzen der verschiedenen Technikkonzepte an, so zeigt sich dass die Konzepte sich stark im jährlichen Energiebedarf unterscheiden. Die Konzepte mit erneuerbaren Energiequellen kommen auf ca. 7.600 - 9.000 kWh/a Endenergie. Die Konzepte mit fossilen Energieträgern benötigen ca. 11.400 - 12.600 kWh/a Endenergie. Alle Konzepte erwirtschaften dabei durch die PV Anlagen insgesamt einen Energieüberschuss. Die regenerativen Konzepte (Var 1a/b und Var 2) kommen auf einen Überschuss von ca. 4.000 kWh/a. Die fossilen Konzepte erwirtschaften lediglich ca. 3.500 kWh/a (Var 4) bzw. 2.500 kWh/a (Var 3). Als Energiebedarf gilt dabei der gesamte Energiebedarf unabhängig ob dieser durch Eigenproduktion oder externe Lieferung gedeckt wird. Somit zählen hierzu der Eigenverbrauch an Photovoltaikstrom, der Verbrauch an Netzstrom, sowie der Gasverbrauch. Als Energieüberschuss gilt die Überkapazität an produziertem Photovoltaikstrom abzüglich des nicht selbst erzeugten Energiebedarfs. Somit zählt hierzu der eingespeiste PV-Strom abzüglich des Verbrauchs an Netzstrom und abzüglich des Gasverbrauchs.

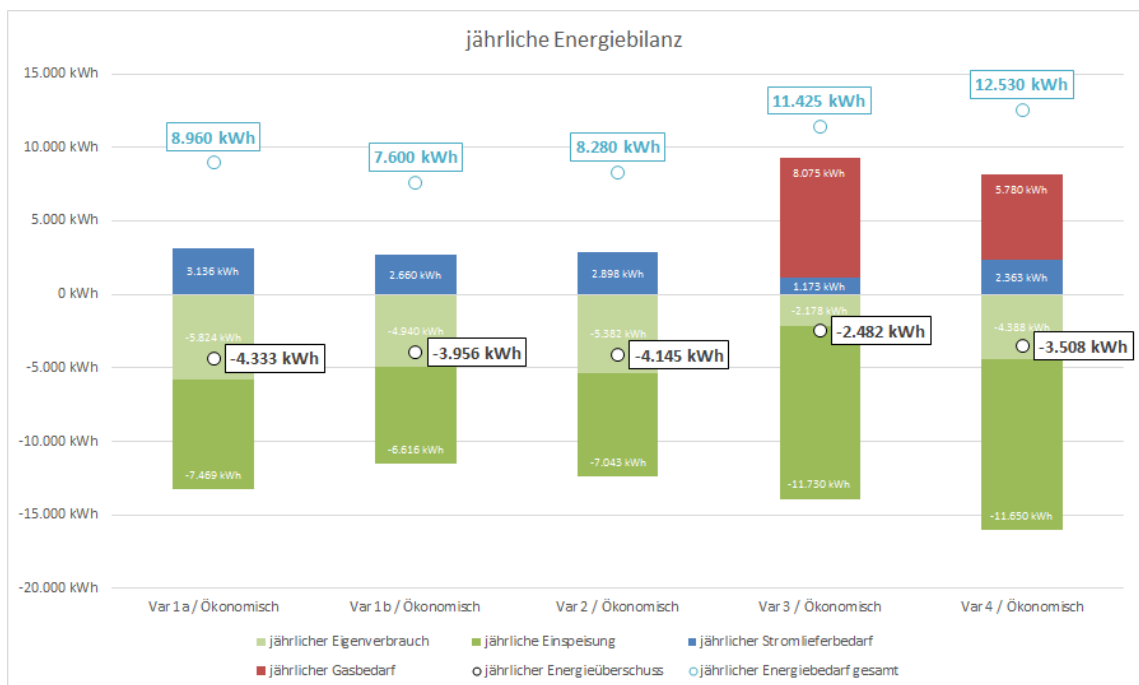


Abbildung 7.3.2-6: jährliche Energiebilanz der verschiedenen Technikkonzepte

Betrachtet man nun die Verbrauchskosten, so ist zunächst anzumerken, dass aufgrund der Festlegungen des [EEG, 2014] und der Tatsache, dass für alle untersuchten Anlagenkonzepte (Photovoltaikkapazitäten grundsätzlich über 10 kWp), neben den Kosten für Netzstrom und Gas auch Kosten für den Eigenverbrauch von Photovoltaikstrom in Höhe der EEG Umlage anfallen.

Für die Ermittlung der Verbrauchskosten wurden folgende Kosten angenommen. Für die Einspeisevergütung und EEG Umlage wurden aufgrund der gesetzlich verankerten Anpassungsmechanismen perspektivische Mittelwerte für einen Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2035 angenommen [Agora, 2015]. Für Strom- und Gaspreise wurden heutige Preise angesetzt, da eine Spekulation darüber, wie sich Energiekosten in Zukunft entwickeln werden, nicht im Fokus des Forschungsvorhabens liegt:

<b>Strompreis</b>	26,00 cent/kWh
<b>Gaspreis</b>	7,00 cent/kWh
<b>Einspeisevergütung</b>	10,85 cent/kWh
<b>EEG-Umlage auf eigenverbrauchten PV-Strom</b>	6,17 cent/kWh

Abbildung 7.3.2-7: Energiepreise

Ermittelt man auf dieser Grundlage die Verbrauchskosten für die unterschiedlichen Technikkonzepte, so fällt zunächst bei Betrachtung der reinen, direkten Kosten (ohne Erträge) auf, dass die Konzepte vergleichsweise ähnlich abschneiden. Mit Ausnahme der Var 4 fallen jährliche direkte Kosten zwischen 800,- EUR/a und 960,- EUR/a an. Die Variante 4 reißt hier mit ca. 1.130,- EUR/a nach oben aus. Zieht man nun die Erträge ab, ergibt sich aufgrund der großen Photovoltaikkapazitäten der fossilen Konzepte für diese ein absoluter Ertrag, Für die Variante 3 fällt dieser mit ca. 350,- EUR/a am größten aus. Für die Variante 4 beträgt er immerhin noch ca. 140,- EUR/a. Hierzu ist zu erläutern, dass Photovoltaikanlagen an sich wirtschaftlich sind und die Ergebnisse dahingehend verzerrt sind, als dass ein Teil der höheren Erträge aus den Mehrkosten in der Investition resultieren.

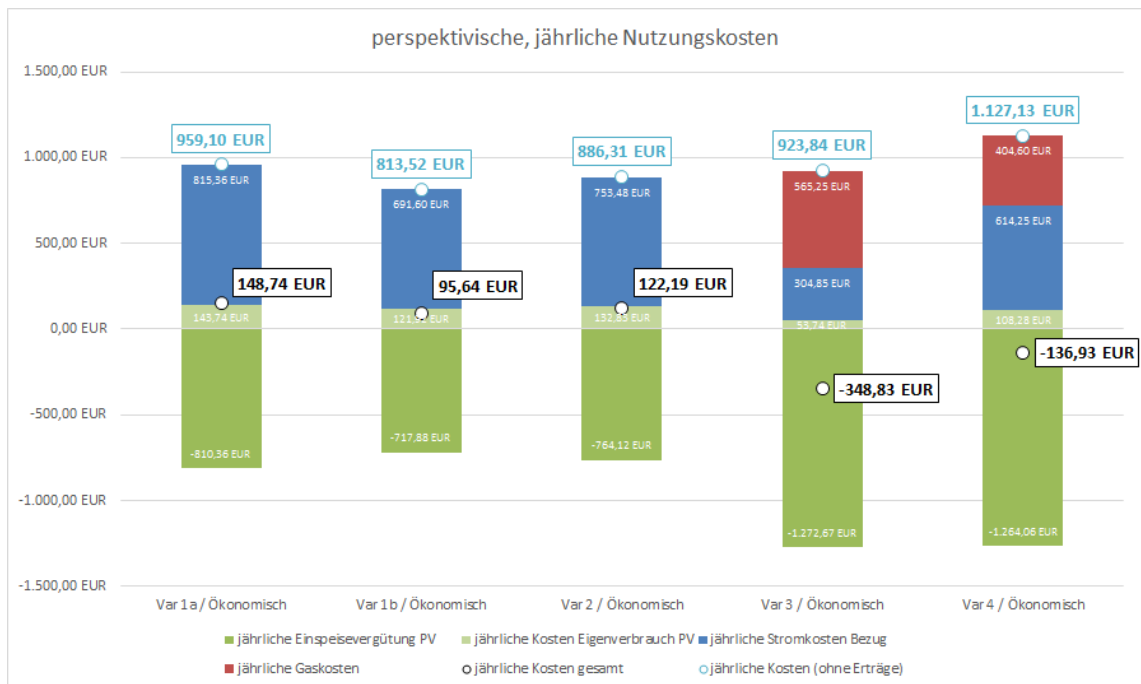


Abbildung 7.3.2-8: perspektivische, jährliche Nutzungskosten

Um die jährlichen Kosten daher von diesem Effekt zu bereinigen, muss man entweder die Erträge, die aus den Mehrkosten gegenüber der in den Investitionskosten günstigsten Variante erwirtschaftet wurden abzieht oder die aus dem zusätzlich zur Verfügung stehenden Budget im Vergleich zur in der Investition kostenintensivsten Variante addieren. Tut man dies, so ergibt sich für die Nutzungskosten folgendes Bild:

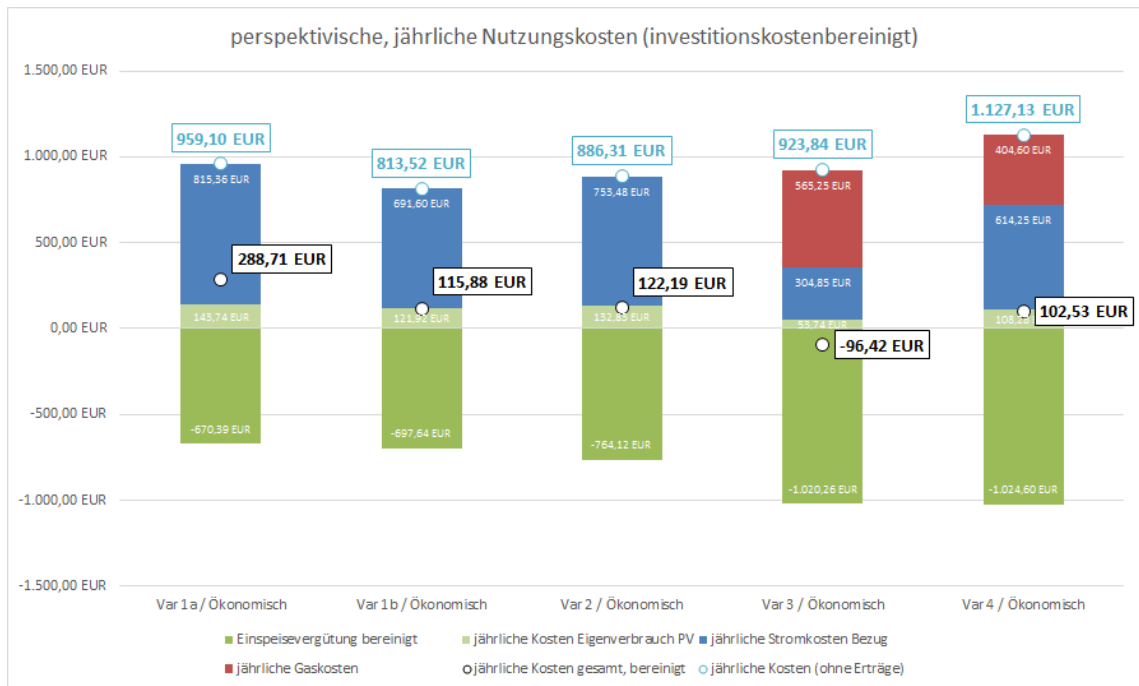


Abbildung 7.3.2-9: perspektivische, jährliche Nutzungskosten, investitionskostenbereinigt

Die jährlichen Kosten für die Varianten 1b, 2 und 4 liegen hiernach auf einem vergleichbaren Niveau von knapp über 100,- EUR/a. Die Variante 1a schlägt mit sehr hohen Kosten von ca. 290,- EUR zu Buche, was im Wesentlichen an der ineffizienten und kostenintensiven Warmwasserbereitung mit Elektrodurchlauferhitzern liegt. Einen Ausreißer nach unten stellt die Variante 3 dar, die als einzige Solarthermie in das Konzept eingebunden hat, was dazu führt, dass diese Variante investitionskostenbereinigt als Einzige einen Ertrag erwirtschaftet. Über einen Zeitraum von 20 Jahren beläuft sich dieser auf eine Summe von 1.928,40 EUR. Im Vergleich zur Variante 1b ergibt sich über die 20 Jahre sogar ein wirtschaftlicher Vorteil von 4.246,- EUR.

## 7.4 Methoden zur Erreichung einer ausgeglichene CO<sub>2</sub>-Bilanz

### 7.4.1 Kompensationsmaßnahmen vor dem Hintergrund ökologischer werdender Stromerzeugung

- Die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Gebäuden lässt sich mit einer Überkapazität an Photovoltaik zu relativ geringen Kosten von ca. 0,31 EUR je kg CO<sub>2</sub>-Äqv. Emission kompensieren.
- Die Kompensation über Photovoltaik ist in vielen Fällen wirtschaftlicher, als eine Bauteiloptimierung.
- Zur Kompensation von einer t CO<sub>2</sub>-Äqv. Emissionen ist beim GWP des aktuellen Strommixes eine Fläche von ca. 0,5 m<sup>2</sup> erforderlich.
- Die üblicherweise zur Verfügung stehenden Dachflächen beschränken die potentielle Kompensationsleistung sehr stark. Am Beispiel des +++Hauses liegt die max.

Kompensationsleistung abhängig vom gewählten Technikkonzept bei ca. 56 t CO<sub>2</sub>-Äqv.

- Mit sinkenden GWP Werten des Strommixes wird eine Kompensation mittels Photovoltaik exponentiell teurer. Gleichzeitig nimmt die potentielle Kompensationsleistung linear ab.
- Die Flächenverfügbarkeit ist gegenüber der Wirtschaftlichkeit das entscheidende Kriterium bei der Bestimmung der möglichen Kompensationsleistung über Photovoltaik.

### Kompensation von CO<sub>2</sub> Emissionen durch Verdrängung mit Photovoltaikstrom

Durch die Tatsache, dass mit einer Photovoltaikanlage erzeugter Strom ein geringeres Treibhauspotential aufweist, als der deutsche Strommix, lässt sich das Treibhauspotential des Gebäudes darüber kompensieren, dass Photovoltaik-Strom ins Netz eingespeist wird. Das Treibhauspotential des deutschen Strommixes liegt aktuell bei ca. 617 g CO<sub>2</sub>-Äqv. je kWh Endenergie [Großklos, 2014]. Das Treibhauspotential von Photovoltaik-Strom differiert je nach System [Großklos, 2014]. Für das Forschungsprojekt wurde mit einem Mittelwert von 75 g CO<sub>2</sub>-Äqv. je kWh Endenergie gerechnet.

Treibhauspotential deutscher Strommix 2014	617 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>
Treibhauspotential Photovoltaikstrom	75 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>
Treibhauspotential bei Verdrängung	-542 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>

Abbildung 7.4.1-1: Treibhauspotential von Netz- und PV-Strom

Aus diesen Werten ergibt sich ein Verdrängungseffekt von -542 g CO<sub>2</sub>-Äqv. je nicht für das Gebäude benötigter und in das Stromnetz eingespeister kWh Endenergie. Lässt man Netzverluste außer Betracht, so ist es für die Ökobilanz unerheblich, ob der für das Gebäude benötigte Strom unmittelbar verbraucht wird oder zunächst eingespeist und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgerufen wird (auf die Stromkosten hat dies im Gegensatz natürlich einen großen Einfluss).

Die Netzverluste in Deutschland sind in den letzten Jahren kontinuierlich zurückgegangen und liegen derzeit bei unter 5 %.

	2000	2005	2010	2012	2013	2014
Nettostromaufkommen	541,5 Mrd. kWh	574,3 Mrd. kWh	577,2 Mrd. kWh	570 Mrd. kWh	562,9 Mrd. kWh	543,6 Mrd. kWh
Netzverluste absolut	34,1 Mrd. kWh	30,5 Mrd. kWh	28,0 Mrd. kWh	27,6 Mrd. kWh	25,9 Mrd. kWh	24,4 Mrd. kWh
Netzverluste prozentual	6,30%	5,31%	4,85%	4,84%	4,60%	4,49%

Abbildung 7.4.1-2: Nettostromaufkommen und Netzverluste Deutschland, Quelle: [Ziesing, 2015, S.33]



Setzt man für die Netzverluste 5% an und betrachtet diese mit, so ergeben sich folgende rechnerische Treibhauspotentiale.

Treibhauspotential direkt verbrauchter Photovoltaikstrom	75 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>
Treibhauspotential eingespeister Photovoltaikstrom inkl. Abzug für 5% Netzverlust	79 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>
Treibhauspotential bei Verdrängung inkl. Abzug für 5% Netzverlust	-538 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>
Treibhauspotential eingespeister und später aus dem Netz bezogener Photovoltaikstrom inkl. Abzug für 5% Netzverlust	79 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>

Abbildung 7.4.1-3: Treibhauspotential von Photovoltaikstrom bei Direktnutzung, Einspeisung, Verdrängung sowie Einspeisung und zeitversetztem Bezug

Angesichts der geringen Unterschiede wurden die Netzverluste für die Berechnungen des Forschungsprojekts vernachlässigt und für Strom, der mittels Photovoltaikanlage erzeugt und direkt oder indirekt verbraucht wird mit einem Treibhauspotential von 75 g CO<sub>2</sub>-Äqv. je kWh Endenergie gerechnet.

Für die Kompensation von CO<sub>2</sub> mittels Photovoltaik errechnen sich bei aktuellem deutschen Strommix unter Berücksichtigung einer degressiven Entwicklung, Investitionskosten von ca. 1.280 EUR/kWp, einem jährlichen Ertrag von ca. 900 kWh/kWp, einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren und einer Lebensdauer der Photovoltaik von ca. 20 Jahren, Kosten von ca. 0,31 EUR je zu kompensierendem kg CO<sub>2</sub>-Äqv. Emissionen.

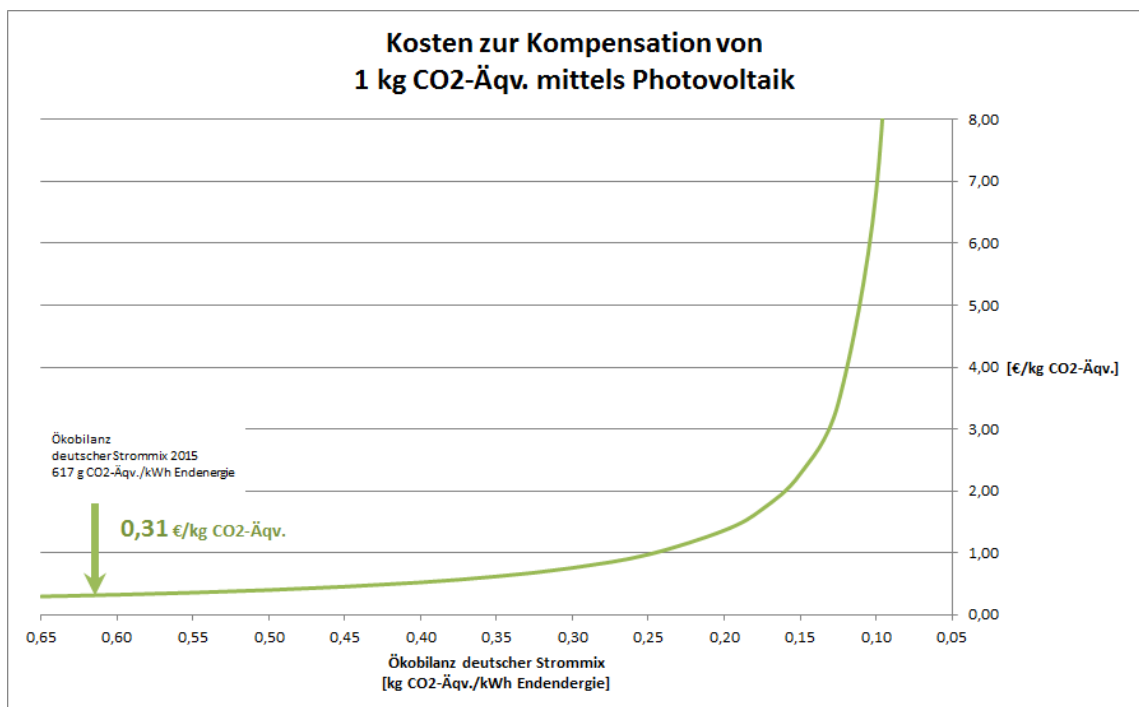


Abbildung 7.4.1-4: Kosten CO<sub>2</sub>-Emissionskompensation mittels PV

Diese liegen damit im Vergleich zu den spezifischen Optimierungskosten der Bauteile (vgl. Kapitel 7.2.1 Kriterien zur Baustoffwahl - Bewertungsmatrix) relativ niedrig und führen dazu, dass es in vielen Fällen wirtschaftlicher ist, eine Kompensation über Photovoltaik vorzunehmen, als dies über eine Bauteiloptimierung zu erreichen. Selbst bei einer Halbierung der Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes auf ca. 300 g CO<sub>2</sub>-Äqv/kWh wären die Kompensationskosten mit ca. 0,76 €/kg CO<sub>2</sub>-Äqv. immer noch vergleichsweise günstig. Schaut man sich allerdings den Flächenbedarf der Kompensation über Photovoltaik an, so errechnet sich auf Basis der gleichen Randparameter und einem Flächenverbrauch von ca. 6 m<sup>2</sup>/kWp ein Bedarf von aktuell ca. 0,5 m<sup>2</sup> je zu kompensierender t CO<sub>2</sub>-Äqv. Emissionen bzw. 1,19 m<sup>2</sup>/t CO<sub>2</sub>-Äqv.. Somit lässt sich zusammenfassen, dass eine Kompensation aktuell in vielen Fällen die kostengünstigere Kompensationsmaßnahme ist, die in der Praxis allerdings sehr stark durch die zur Verfügung stehenden Flächen limitiert wird.

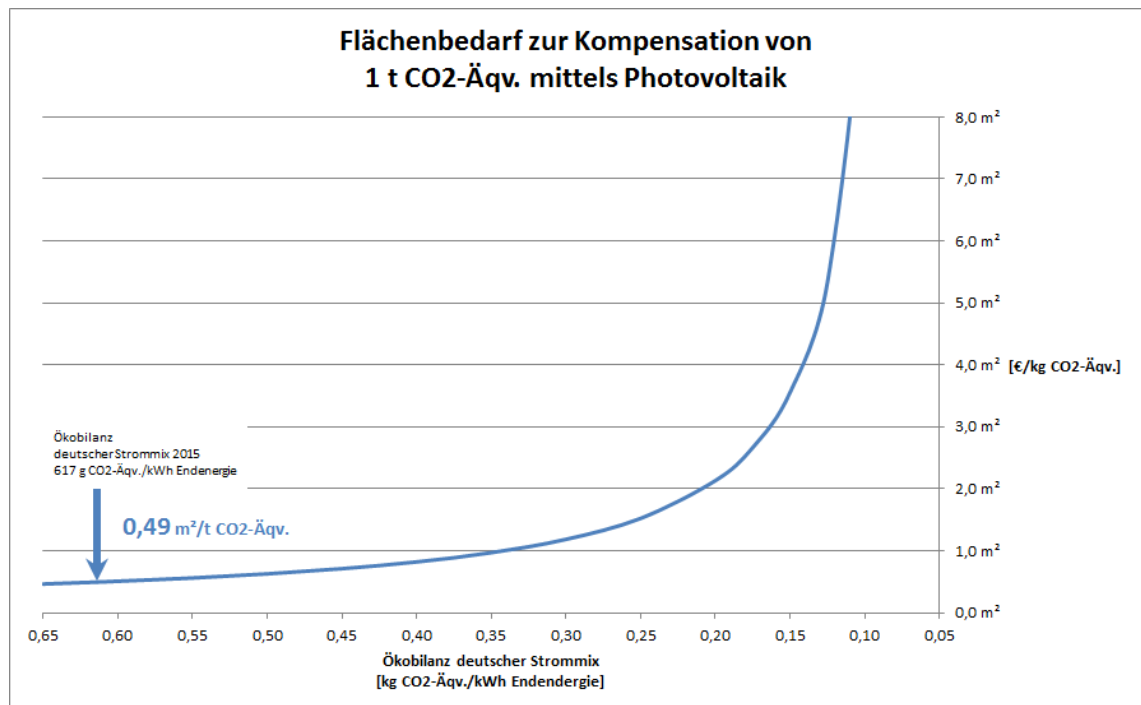


Abbildung 7.4.1-5: Flächenbedarf CO<sub>2</sub>-Emissionskompensation mittels PV

## Kompensation von CO<sub>2</sub> Emissionen durch nachwachsende Baustoffe

Ab dem Punkt, da ein nachwachsender Baustoff (in der Regel Holz) übermäßig, das heißt in einem über das für die Erfüllung der Funktion erforderliche Maß hinausgehend, eingesetzt wird und für den end-of-life Prozess ein energetisches Verwertungsszenario angesetzt wird, kann man ebenfalls von einer Kompensationsmaßnahme sprechen, da die Reduktion des GWP Werts im Wesentlichen darauf beruht, dass das Holz bei der energetischen Verwertung andere (fossile) Energieträger verdrängt und dafür eine Gutschrift erhält, was die CO<sub>2</sub>-Bilanz insgesamt auf einen negativen Wert bringt. Letztlich lassen sich rechnerisch mit jedem zusätzlichen Kubikmeter Nadelholz, den man verbaut ca. 300 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. und mit jedem Kubikmeter Laubholz ca. 450 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. an Emissionen kompensieren (vgl. Datensätze für kammergetrocknetes Nadel- bzw. Laubschnittholz [Rüter et al., 2012, S.118+127]). Allerdings

gilt auch für diese Form der Kompensation, dass sie nur so lange funktioniert, wie andere schlechtere Energieträger verdrängt werden können. Unabhängig wird die energetische Verwertung von Holz zunehmend und zu Recht auch sehr kritisch diskutiert. Hauptproblem ist es dass der hierfür erforderliche Holzbedarf auch aus nachhaltiger Forstwirtschaft gedeckt werden können muss. Führt man sich vor Augen, dass die Bundesrepublik Deutschland bereits heute mehr Holz importiert als exportiert, dürfte es einleuchtend sein, dass sich unser Energieproblem nicht über eine Verbrennung von Holz lösen lassen wird.

Dieser Zusammenhang kann auch darüber eindrucksvoll verdeutlicht werden, indem man anstelle des energetischen Verwertungsszenarios eine im Sinne der Ressourceneffizienz eigentlich erstrebenswerte stoffliche Verwertung ansetzt. Tut man dies, ergibt sich auch für relativ unbearbeitete Holzprodukte bereits ein wertpositives Treibhauspotential. Für Holzwerkstoffe verstärkt sich der Effekt, weil die im Vergleich aufwendigeren Prozesse im Zuge der Herstellung nicht mehr über die Verwertung kompensiert werden können. Bei stofflichen Verwertungsszenarios ist eine Kompensation über einen gesteigerten Holzeinsatz daher auch nicht mehr möglich. Die Holzmassivbauweise, die bei Ansatz eines energetischen Verwertungsszenarios noch deutlich besser abschneidet, emittiert bei stofflicher Verwertung am Lebensende hingegen mehr CO<sub>2</sub> als die Holzrahmenbauweise.

GWP	cradle to gate (A1-A3)	Abfallwirtschaft (C3)	Verwertung (D)	Summe (A1-A3, C3, D)
<b>kammergetrocknetes Nadelnschnittholz energetische Verwertung</b>	-735,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	797,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-360,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-298,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.
<b>kammergetrocknetes Nadelnschnittholz stoffliche Verwertung</b>	-735,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	797,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-12,30 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	49,70 kg CO <sub>2</sub> -äqv.
<b>kammergetrocknetes Laubschnittholz energetische Verwertung</b>	-1.120,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	1.250,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-579,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-449,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.
<b>kammergetrocknetes Laubschnittholz stoffliche Verwertung</b>	-1.120,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	1.250,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-21,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	109,00 kg CO <sub>2</sub> -äqv.

Abbildung 7.4.1-6: CO<sub>2</sub>-Bilanz Laub- und Nadelhölzer bei unterschiedlichen Verwertungsszenarios

erforderliche Kompensationsleistungen in Abhängigkeit des Treibhauspotentials unterschiedlicher Energieträger

Energie aus Photovoltaikanlagen weist, wie in Tabelle x angegeben ein sehr geringes Treibhauspotential von 75 g CO<sub>2</sub>-Äqv./kWh auf. Um dieses zu kompensieren ist neben der hierfür erforderlichen Photovoltaik-Kapazität eine Überkapazität erforderlich. Beim GWP des aktuellen deutschen Strommixes bzw. des sich daraus ergebenden Verdrängungsmixes und unter Berücksichtigung einer degressiven Entwicklung ergibt sich hieraus eine erforderliche Überkapazität von 27,7 % ( $GWP_{PV} / ((GWP_{Strommix} - GWP_{PV}) * 0,5)$ ), die ins Netz eingespeist werden

muss. Je benötigter kWh Endenergie müssen daher 1,277 kWh erzeugt werden, damit diese CO<sub>2</sub> neutral ist.

Wird die gleiche Endenergie aus Gas bereitgestellt, so erzeugt sie ein Treibhauspotential von 261 g CO<sub>2</sub>-Äqv./kWh. Um dieses zu kompensieren müssen 0,963 kWh Strom ins Netz eingespeist werden.

	Endenergiebedarf	für CO <sub>2</sub> -Neutralität erforderliche Energiebereitstellung PV
<b>Photovoltaikstrom</b>	1 kWh	1,277 kWh
<b>Gas</b>	1 kWh	0,963 kWh (+ Gasbedarf)

Abbildung 7.4.1-7: für „CO<sub>2</sub>-neutralen“ Energiebezug erforderliche PV-Strommenge in Abhängigkeit vom genutzten Energieträger

Hierbei ist zu beachten, dass strombasierte Konzepte in der Regel Wärmepumpen einsetzen, deren endenergiebezogene Anlagenaufwandszahlen je nach Medium und Energiequelle zwischen 0,6 und 0,8 liegen können. Gas-Brennwertthermen weisen hingegen eine endenergiebezogene Anlagenaufwandszahl von ca. 1,7 auf. Somit ergibt sich, für eine CO<sub>2</sub>-neutrale kWh Heizwärme folgende, von einer Photovoltaikanlage bereit zu stellende Energiemenge.

	Heizwärmebedarf	typische endenergiebezogene Anlagenaufwandszahlen	Endenergiebedarf	für CO <sub>2</sub> -Neutralität erforderliche Energiebereitstellung PV
<b>Photovoltaikstrom</b>	1 kWh	0,7 (Wärmepumpe)	0,7 kWh	0,894 kWh
<b>Gas</b>	1 kWh	1,7 (Gas-Brennwerttherme)	1,7 kWh	1,637 kWh (+ Gasbedarf)

Abbildung 7.4.1-8: für „CO<sub>2</sub>-neutrale“ Deckung des Heizwärmebedarfs erforderliche PV-Strommenge in Abhängigkeit vom genutzten Energieträger

## erforderliche und mögliche Kompensationsleistungen der unterschiedlichen Konstruktions- und Energieversorgungskonzepte

Die untersuchten Konstruktions- und Technikkonzepte weisen Gesamtemissionen (Herstellung, Nutzung, Rückbau und Entsorgung) zwischen 33 t und 143 t CO<sub>2</sub>-Äqv. auf.

Bauweise	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2	Variante 3	Variante 4
<b>Gebäude "Ökonomisch"</b>	58,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	53,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	56,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	143,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	125,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Gebäude "Ausbalanciert"</b>	52,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	47,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	50,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	137,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	120,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Gebäude "Ökologisch"</b>	38,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	33,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	36,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	123,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	105,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Gebäude mineralisch</b>	97,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	92,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	94,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	181,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	164,4 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

*Abbildung 7.4.1-9: CO<sub>2</sub>-Bilanz der +++Haus Varianten ohne Kompensationsmaßnahmen durch PV*

im folgenden Diagramm ist der Flächenbedarf von exemplarischen Kompensationsziele (25 t, 50 t, 100 t, 125 t und 150 t CO<sub>2</sub>-Äqv.) in Abhängigkeit vom Treibhauspotential des deutschen Strommixes dargestellt. Aus dieser Grafik wird erkennbar, dass die Wirtschaftlichkeit der Kompensationsmaßnahme in vielen Fällen nicht das alleinige Entscheidungskriterium sein kann. Das +++Haus hat eine Hauptdachfläche von 66 m<sup>2</sup>, sowie weitere 12 m<sup>2</sup> bei Realisierung der Balkon/Loggia Module vor der Südfassade. Berücksichtigt man, dass zur Deckung des Strombedarfs in den meisten Konzepten bereits ca. 50 m<sup>2</sup> für Photovoltaik benötigt werden, so bleibt auf dem Gebäude lediglich eine Restfläche von ca. 28 m<sup>2</sup> übrig, die zur Kompensation genutzt werden kann.

	erf. PV Kapazität Strombedarf	erf. Fläche
Variante 1a	10,0 kWp	60,0 m <sup>2</sup>
Variante 1b	8,4 kWp	50,4 m <sup>2</sup>
Variante 2	9,2 kWp	55,2 m <sup>2</sup>
Variante 3	3,7 kWp	22,2 m <sup>2</sup> zzgl. Fläche für Solarthermie
Variante 4	7,5 kWp	45,0 m <sup>2</sup>

Abbildung 7.4.1-10: erforderliche Photovoltaikkapazitäten und –flächen der unterschiedlichen Technikkonzepte des +++Hauses

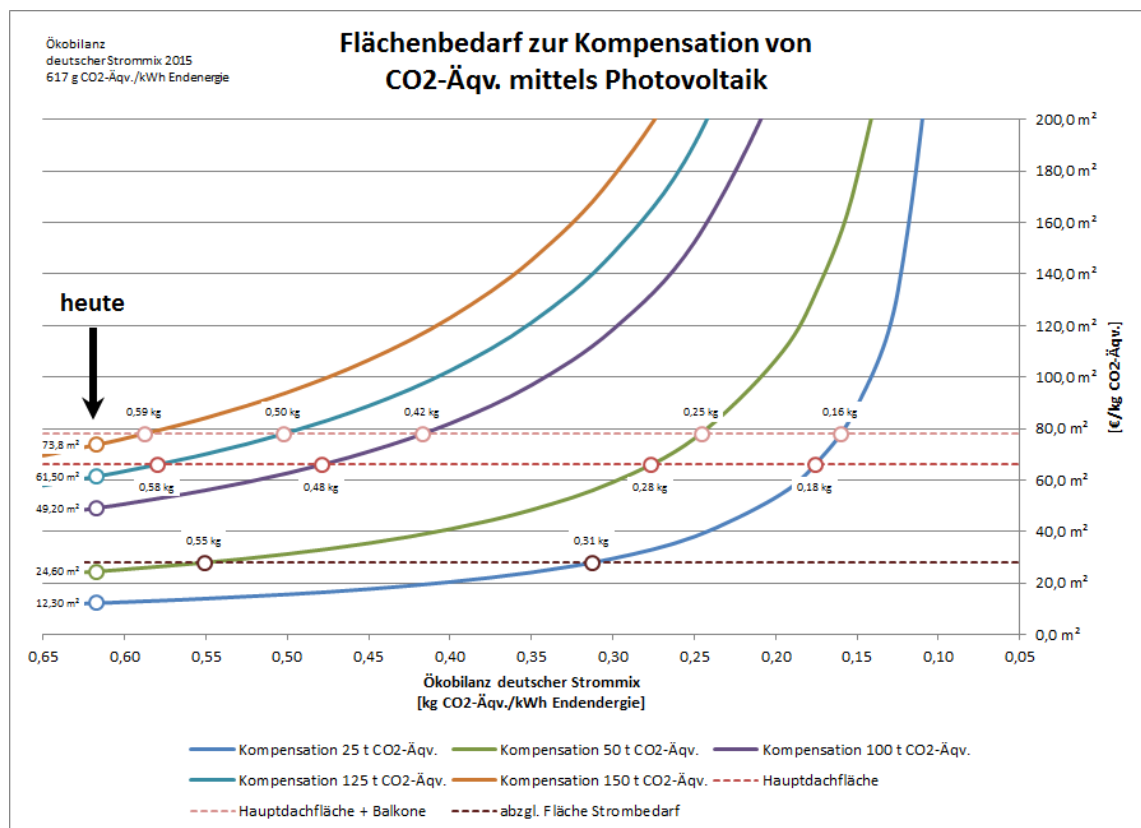


Abbildung 7.4.1-11: Flächenbedarf zur Kompensation von CO<sub>2</sub> mittels PV in Abhängigkeit von der Ökobilanz des deutschen Strommixes und Kapazitätsgrenzen der zur Verfügung stehenden Dachflächen

Es zeigt sich, dass alle Varianten, die in Folge der Nutzung und Konstruktion ein Treibhauspotential von deutlich mehr als 50 t CO<sub>2</sub>-Äqv. aufweisen, bereits bei aktuellem deutschem Strommix Photovoltaikkapazitäten erfordern, die über die zur Verfügung stehenden Dachflächen hinausgehen. Sinkt der deutsche Strommix auf ein Treibhauspotential von 550 g CO<sub>2</sub>-Äqv./kWh ab (entspricht einem absinken um ca. 11%), so reicht die Dachfläche auch für zu dem Zeitpunkt errichtete Neubaugebäude nicht mehr aus. Da es in den meisten Kontexten nicht denkbar erscheint, dass sich Bauherren dazu entscheiden werden, zusätzliche Photovoltaikanlagen auf Freianlagen zu errichten und dies auch vor dem Hintergrund des Flächenverbrauchs fragwürdig erschiene, muss es das Ziel sein, das primäre Treibhauspotential aus Her-

stellung, Nutzung, Rückbau und Entsorgung des Gebäudes aktuell auf ca. 56 t CO<sub>2</sub>-Äqv. zu begrenzen und diesen Wert in der Zukunft weiter zu reduzieren.

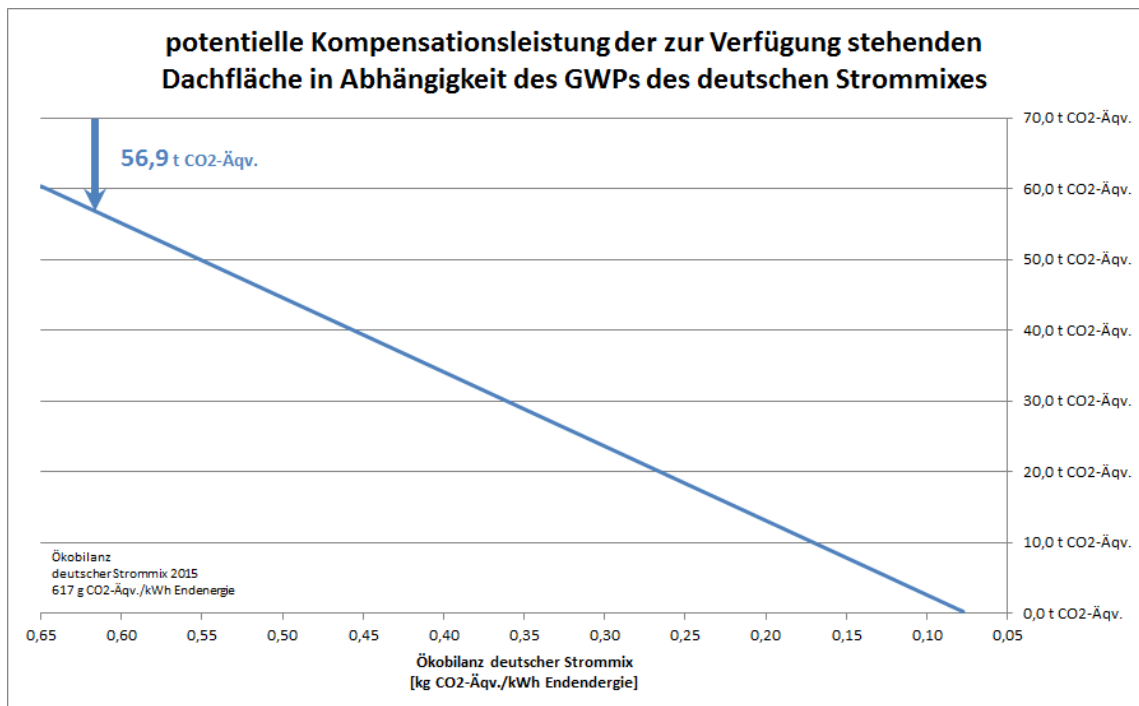


Abbildung 7.4.1-12: potentielle Kompensationsleistung der zur Verfügung stehenden Dachfläche in Abhängigkeit des Treibhauspotentials des deutschen Strommixes

## 7.4.2 Optimierung des Gebäudes und der Energieversorgung gegenüber Kompensation mittels Photovoltaik

### Abhängigkeiten zwischen Reduktionsstrategien und Kompensationsmaßnahmen

Wie bereits in den Kapiteln 7.3.1 Bauweise und 7.3.2 Energieversorgung erläutert gibt es zwei grundsätzliche Strategien, um die primäre CO<sub>2</sub>-Bilanz des Gebäudes zu senken. Die eine zielt auf die Konstruktion, die andere auf die Nutzung des Gebäudes ab. Dem gegenüber steht die gebäudeimmanente Möglichkeit der Kompensation der CO<sub>2</sub> Emissionen durch eine Überkapazität an Photovoltaik. Diese wurde im Kapitel 7.4.1 Kompensationsmaßnahmen vor dem Hintergrund ökologischer werdender Stromerzeugung erläutert. Weitere Kompensationsmöglichkeiten wie zum Beispiel den Erwerb von Emissionszertifikaten, der Aufforstung von Waldflächen, o.ä. wurden da sie außerhalb der Bilanzgrenze des Grundstücks lägen bewusst außer Acht gelassen.

Für die Optimierung der Baukonstruktion wurde aufgezeigt, dass ein klassischer Holzbau, wie er in der Variante "Ökonomisch" beschrieben ist wirtschaftliche Vorteile gegenüber einem mineralischen Massivgebäude mit sich bringt, eine weitergehende Optimierung allerdings in vielen Fällen unwirtschaftlich ist. Eine Optimierung der Baukonstruktion hinsichtlich Ihrer Ökobilanz ist daher immer gegenüber einer Kompensation abzuwägen. Diese Abwägung hat zum einen vor dem wirtschaftlichen Hintergrund, zum anderen aber auch vor dem Hinter-

grund der zur Verfügung stehenden Flächen zu erfolgen (vgl. Kapitel 6.3.2 Kompensationsmaßnahmen vor dem Hintergrund ökologischer werdender Stromerzeugung).

Für die Optimierung der Energieversorgung wurde hingegen aufgezeigt, dass sich eine Optimierung in jedem Fall lohnt. Die Konzepte mit den geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzung (Var 1b und 2) sind gleichzeitig diejenigen mit den geringsten Investitionskosten.

In Kapitel 7.4.1 Kompensationsmaßnahmen vor dem Hintergrund ökologischer werdender Stromerzeugung wurde darüber hinaus zum einen aufgezeigt, dass eine ökologischer werdende Stromproduktion die wirtschaftlichen Vorteile der ökologischeren Energieversorgungen zusätzlich verstärkt. Zum anderen wurde nachgewiesen, dass die Wirtschaftlichkeit in den meisten Fällen gar nicht der entscheidende Faktor ist, sondern die Wahl der Energieversorgung in der Regel von der für Kompensationsmaßnahmen zur Verfügung stehenden Dachfläche beschränkt wird. Auch dieser Zusammenhang verschärft sich drastisch mit einer ökologischer werdenden Stromproduktion.

Vergleicht man die unterschiedlichen Kombinationen aus Konstruktions- und Energieversorgungsvarianten, so stellt man fest, dass alle mindestens die zur Verfügung stehende Hauptdachfläche von 66 m<sup>2</sup> voll ausschöpfen und nur ein Teil der Kombinationen mit den Technikvarianten 1b und 2 mit der zusätzlichen Fläche der Balkonmodule auf der Südseite auskommen. Für die Technikkonzepte 1a und 3 wären über die Bauweise "Ökologisch" hinausgehend weitere Treibhauspotential reduzierende oder anderweitig kompensierende Maßnahmen erforderlich.

Die im Wettbewerb noch vorgeschlagenen Carport- und Terrassenanbauten vor der Nordfassade haben sich wie in Kapitel AP 10 Anbauten - Ergebnisse beschrieben, sowohl als kostenintensiv, als auch als stark nachteilig für die Ökobilanz erwiesen. Sie waren ohnehin eher dem Raumprogramm des Wettbewerbsauslobers geschuldet. Insofern wurden sie im Rahmen der Konzeption für das +++Haus gestrichen. In Bezug auf eine Erhöhung der zur Verfügung stehenden Dachflächen wären sie zwar wirksam, allerdings auch mit hohen Kosten verbunden, sodass bezweifelt werden kann, ob der typische Bauherr der Zielgruppe vor dem Hintergrund eines beschränkten Budgets derartige Anbauten realisieren würde.

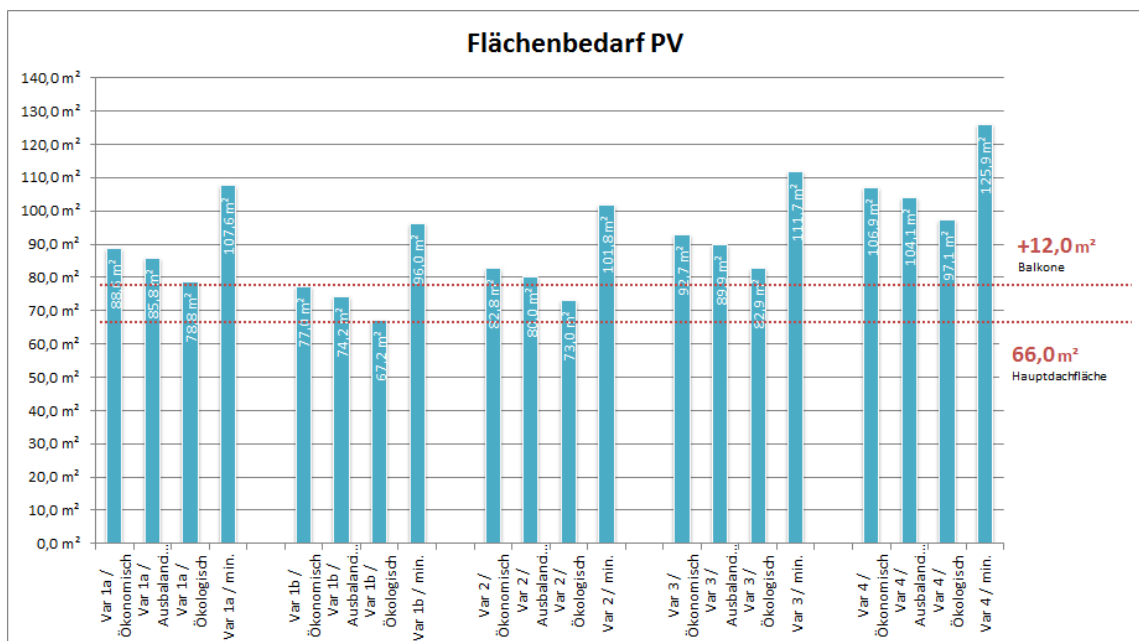


Abbildung 7.4.2-1: Flächenbedarf für PV der +++Haus Varianten



### 7.4.3 Zusammensetzung der CO<sub>2</sub> Bilanz

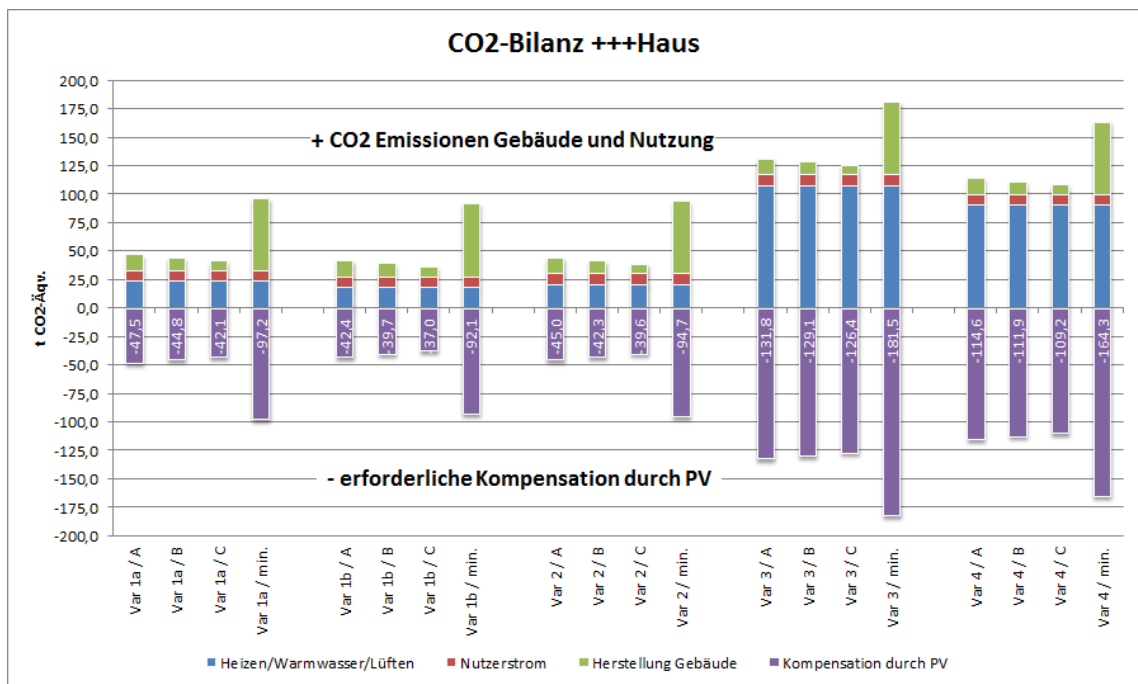


Abbildung 7.4.3-1: Zusammensetzung der CO<sub>2</sub>-Bilanz der +++Haus Varianten

### Herstellung, Rückbau, Entsorgung des Gebäudes gegenüber Betrieb des Gebäudes

Nimmt man die mineralische Massivbauweise mit Gas-Brennwerttherme und solarer Brauchwasserunterstützung, sowie Photovoltaik zur Kompensation der CO<sub>2</sub>-Bilanz als Referenz, so trägt das Gebäude mit seiner Herstellungs-, Rückbau- und Entsorgungsphase (63,6 t CO<sub>2</sub>-Äqv.) zu 35 % des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von 181,5 t CO<sub>2</sub>-Äqv. bei. Der Anteil der Nutzungsphase (Heizung, Warmwasser, Lüften und Strom) liegt mit 117,9 t CO<sub>2</sub>-Äqv. hingegen bei 65 % (Mineralisch / Var 3). Optimiert man nun nur die Haustechnik und wählt z.B. eine Erdwärmepumpe mit Warmwasserspeicher, so steigt der Anteil des Gebäudes am CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auf fast 70% an (Mineralisch / Var 1b). In einer Kombination, in der sowohl die Gebäudetechnik, als auch die Gebäudekonstruktion unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert wurden hingegen, sind die Anteile aus Gebäude (Herstellung-Rückbau-Entsorgung) und Nutzung (Heizung-Warmwasser-Lüften-Strom) relativ ausgeglichen. So liegt z.B. die Verteilung bei der Variante Ökonomisch / 1b bei 46,8% zu 55,3%.

Angesichts der Tatsache, dass in Bezug auf Einfamilienhäuser Holzgebäude in der Regel nicht mehr kosten als Massivgebäude, sondern im Gegenteil eine Vielzahl von Bauteilen sogar wirtschaftlicher sind, wird die besondere Relevanz der Berücksichtigung der Herstellungs-, Rückbau- und Entsorgungsphase für die Gesamt-Ökobilanz deutlich. In vielen Fällen ist die Möglichkeit Gebäude mit hohem Holzanteil zu realisieren aufgrund von brandschutztechnischen und baurechtlichen Auflagen nur eingeschränkt möglich bzw. mit planerischem und finanziellem Mehraufwand verbunden. In Bezug auf Einfamilienhäuser ist dies aber für fast alle Bauteile nicht der Fall. Mit Ausnahme der Bodenplatte ist es in fast allen Bauteilen möglich auch

unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit möglich Holzkonstruktionen zu verwenden. In vielen Fällen bieten die Holzkonstruktionen sogar wirtschaftliche Vorteile.

	GWP Gebäude (Herstellung, Rückbau, Entsorgung)			GWP Nutzung (Heizen, Warmwasser, Lüften, Strom)		GWP gesamt
<b>Ökonomisch</b>	25,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	42,8%	<b>Var 1a</b>	33,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	57,2%	<b>58,7 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		46,8%	<b>Var 1b</b>	28,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	53,2%	<b>53,6 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		44,7%	<b>Var 2</b>	31,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	55,3%	<b>56,2 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		17,6%	<b>Var 3</b>	117,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	82,4%	<b>143,0 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		20,0%	<b>Var 4</b>	100,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	80,0%	<b>125,8 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
<b>Ausbalanciert</b>	19,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	36,5%	<b>Var 1a</b>	33,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	63,5%	<b>52,9 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		40,4%	<b>Var 1b</b>	28,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	59,6%	<b>47,8 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		38,3%	<b>Var 2</b>	31,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	61,7%	<b>50,4 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		14,1%	<b>Var 3</b>	117,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	85,9%	<b>137,2 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		16,1%	<b>Var 4</b>	100,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	83,9%	<b>120,0 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
<b>Ökologisch</b>	5,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	13,4%	<b>Var 1a</b>	33,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	86,6%	<b>38,8 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		15,4%	<b>Var 1b</b>	28,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	84,6%	<b>33,7 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		14,3%	<b>Var 2</b>	31,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	85,7%	<b>36,3 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		4,2%	<b>Var 3</b>	117,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	95,8%	<b>123,1 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		4,9%	<b>Var 4</b>	100,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	95,1%	<b>105,9 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
<b>Mineralisch</b>	63,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	65,4%	<b>Var 1a</b>	33,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	34,6%	<b>97,2 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		69,1%	<b>Var 1b</b>	28,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	30,9%	<b>92,1 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		67,2%	<b>Var 2</b>	31,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	32,8%	<b>94,7 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		35,0%	<b>Var 3</b>	117,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	65,0%	<b>181,5 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>
		38,7%	<b>Var 4</b>	100,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	61,3%	<b>164,3 t CO<sub>2</sub>-Äqv.</b>

Abbildung 7.4.3-2: Zusammensetzung der CO<sub>2</sub>-Bilanz der +++Haus Varianten

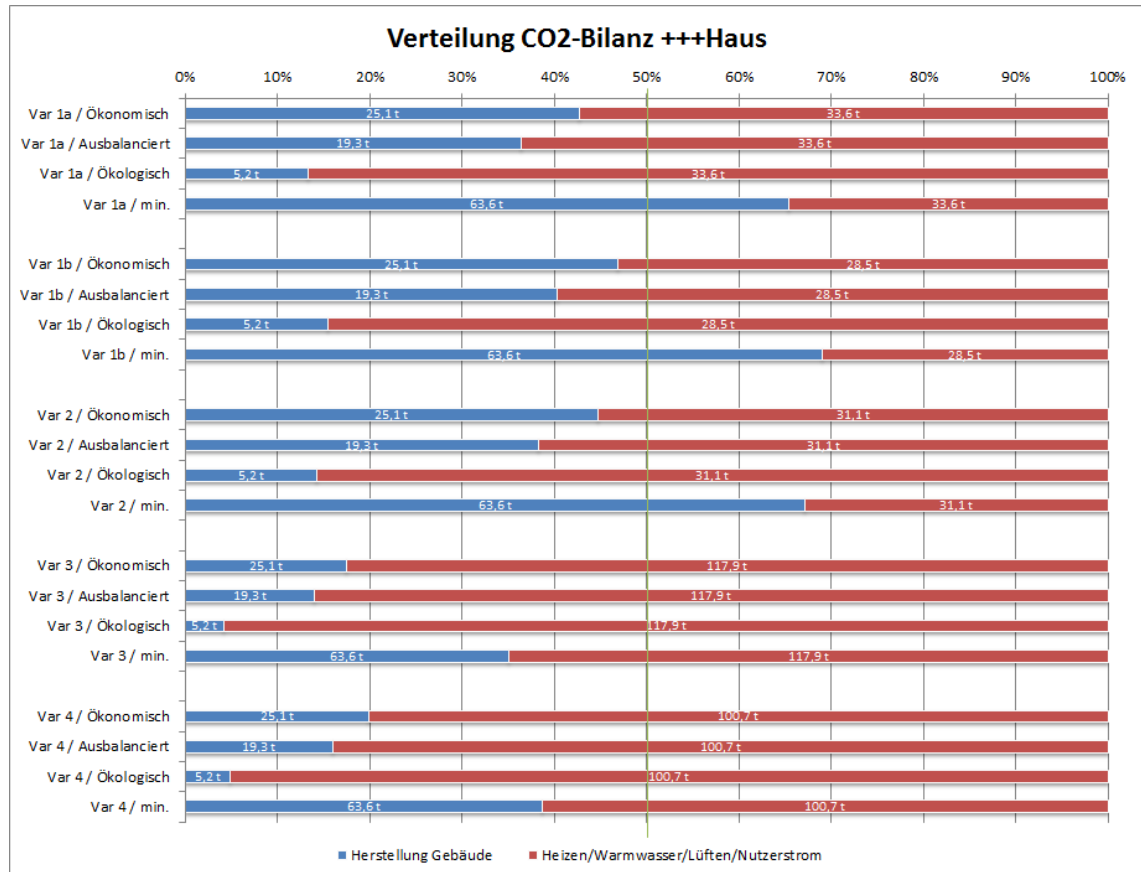


Abbildung 7.4-3-3: prozentuale Verteilung der CO<sub>2</sub>-Bilanz der +++Haus Varianten (Konstruktion, Nutzung)

Betrachtet man die Grafiken der prozentualen Zusammensetzung der CO<sub>2</sub>-Bilanz, so fällt auch auf, dass eine über den klassischen Holzrahmenbau (Variante Ökonomisch) hinausgehende, treibhauspotentialgetriebene Optimierung der Konstruktion (Varianten Ausbalanciert und Ökologisch) hingegen nicht nur den Nebeneffekt hat, dass sie zu Lasten der Wirtschaftlichkeit geht, und zu geringen Lastverschiebungen zwischen den Wirkungskategorien führt (vgl. Kapitel 7.3.1 Bauweise), sondern - bei deutlicher Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen wohl-gemerkt - auch zur Folge hat, dass die Verteilung der CO<sub>2</sub>-Bilanz zwischen Herstellungs-, Rückbau und Entsorgungsphase einerseits und Nutzungsphase andererseits erneut unausgewogen ausfällt. So weist zum Beispiel die Kombination mit den absolut geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen (Ökologisch / Var 2) eine Verteilung von ca. 15 % für die Konstruktion und ca. 85 % für die Nutzung auf.

Auch wenn aus einer ausgewogenen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Bilanz alleine keine direkten Rückschlüsse gezogen werden können was die Nachhaltigkeit eines Gebäudes angeht, so kann eine derartige Betrachtung doch vor allem dann helfen, wenn man sich die Frage stellt, an welcher Stelle eine weitergehende Optimierung mehr Sinn macht. So kann es bei einem mineralischen Massivgebäude mit Luft-Wasser-Wärmepumpe zum Beispiel sinnvoller sich mit der Optimierung der Konstruktion zu beschäftigen, als sich die Frage zu stellen, ob es zusätzlich Sinn macht eine Solarthermieanlage zu installieren. Umgekehrt ist es im Falle eines Holzrahmenbaus mit Gas-Brennwerttherme sinnvoller und wirtschaftlicher, sich mit der Anlagentechnik auseinanderzusetzen, als darüber nachzudenken, ob die Holzmassivbauweise Vorteile generieren kann.

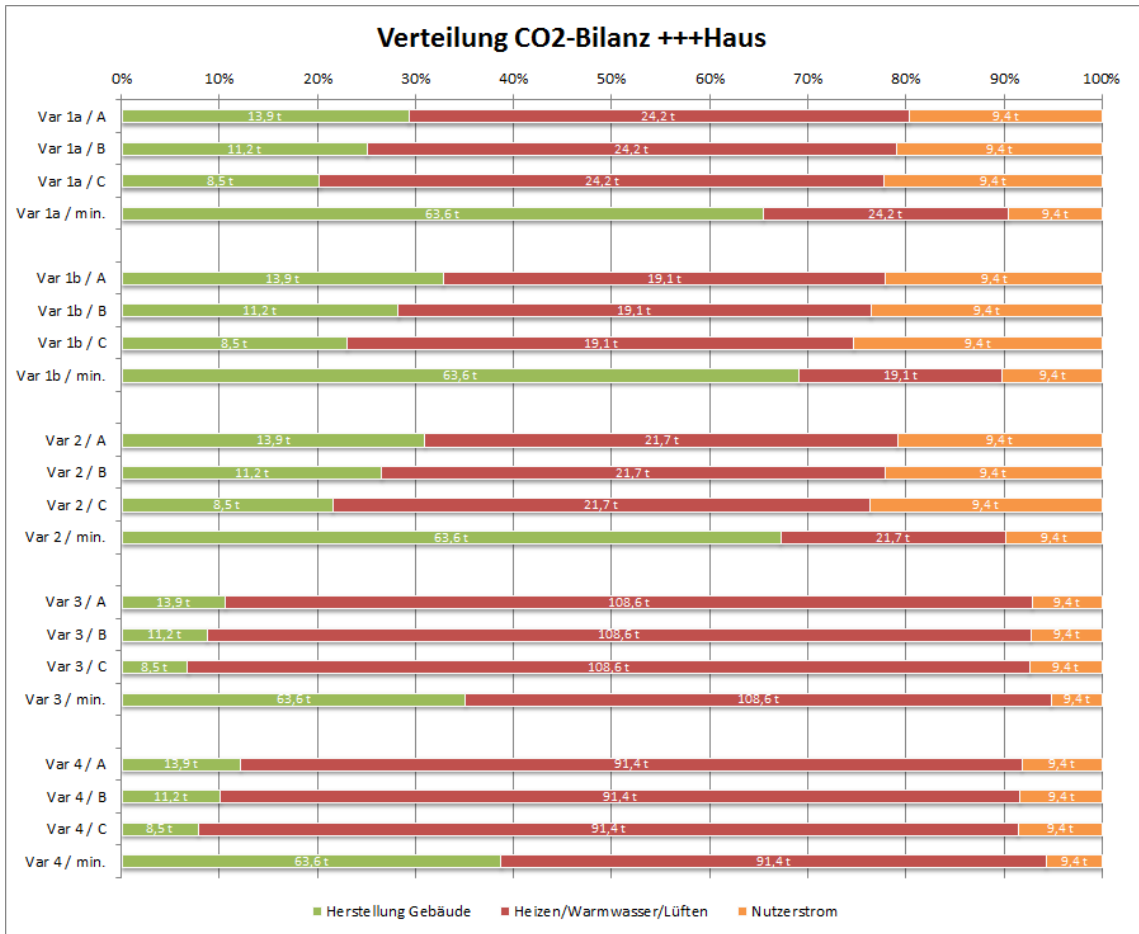


Abbildung 7.4.3-4: prozentuale Verteilung der CO<sub>2</sub>-Bilanz der +++Haus Varianten (Konstruktion, Heizen/WW/Lüften, Nutzerstrom)

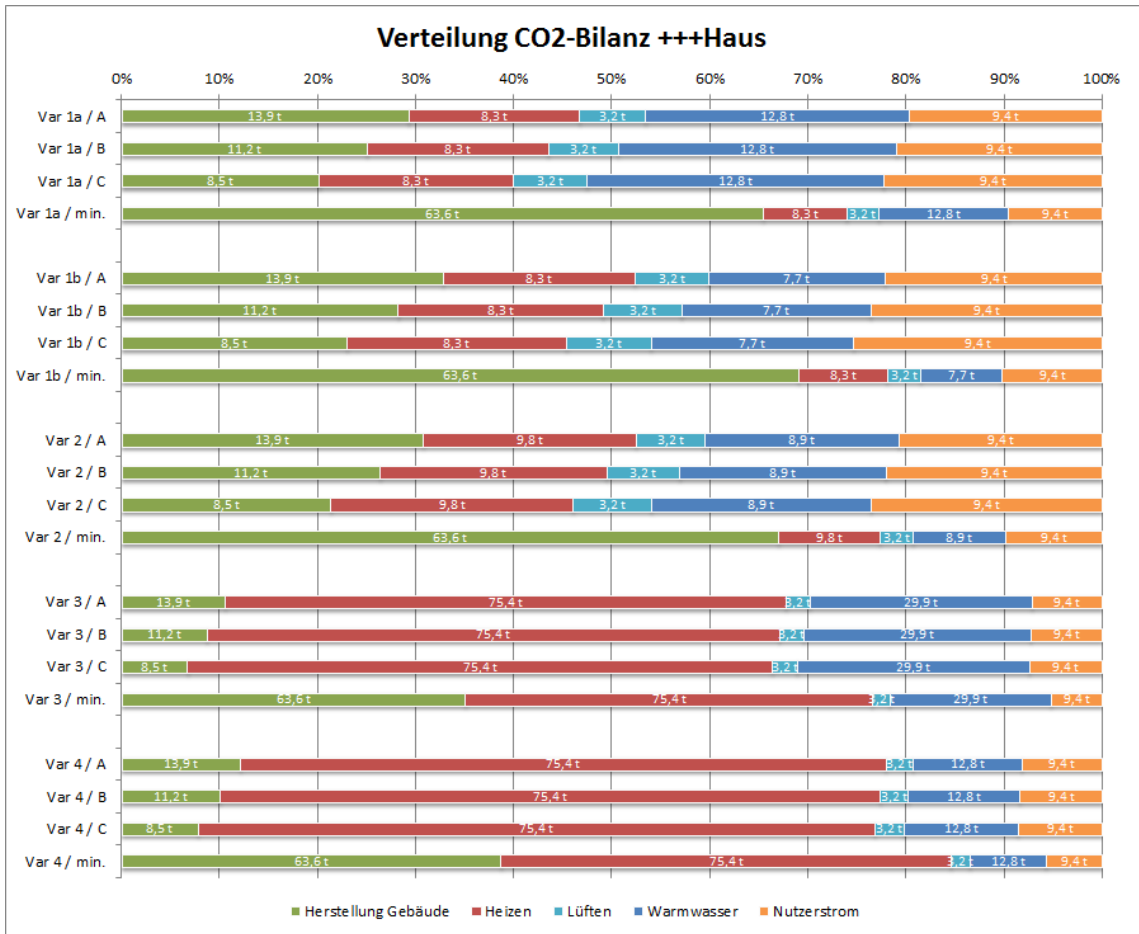


Abbildung 7.4.3-5: prozentuale Verteilung der CO<sub>2</sub>-Bilanz der +++Haus Varianten (Konstruktion, Heizen, Lüften, Warmwasser, Nutzerstrom)

## 8 Drittverwendungsfähigkeit

### 8.1 Übertragbarkeit der Ergebnisse

#### 8.1.1 Bauteilorientierter Ansatz

Die Tatsache, dass die Untersuchungen sehr stark auf Bauteil- und Bauteilschichtenebene erfolgt sind, hat den Vorteil, dass diese Ergebnisse sehr einfach auf andere Projekte übertragen werden können. So können sowohl die Erkenntnisse aus den Zusammenfassungen und inhaltlichen Erläuterungen der Arbeitspakete, als die in den tabellarischen Aufstellungen aufbereiteten Daten als erste Informationsquelle bei der projektspezifischen Auswahl von Bauteilen und der Entwicklung von individuellen Bauteilaufbauten. So ist auf dieser Basis eine erste Einschätzung zur Ökobilanz von grundsätzlichen Bauteilen und Aufbauten mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich. Bezogen auf zum Beispiel Dachabdichtungen werden so auf einen Blick die Vorteile von Kunststoffabdichtungen gegenüber bituminösen Systemen sichtbar, ohne dass in einer frühen Projektphase der hohe Aufwand der Erstellung einer vollständigen Ökobilanz erforderlich wird. Das gewählte Beispiel der Dachabdichtung soll hier nur stellvertretend stehen. Letztlich gilt die Nutzbarkeit der Informationen für alle beschriebenen Bauteile und Aufbauten von der Bodenplatte, über die Aussenwände, das Dach bis hin zu sonstigen konstruktiven Elementen im Gebäudeinneren.

Auch die Ergebnisse bzgl. der mit den Bauteilen und Aufbauten verbundenen Einsparpotentiale lassen sich mit Einschränkungen übertragen. Beschränkt wird die Übertragbarkeit hier nur in der Form, als dass Massenverhältnisse zwischen Bauteilen in gewissem Umfang projektspezifischer Natur sind. So wird das Bauteil eines Flachdachs für die Ökobilanz eines eingeschossigen Bungalows beispielsweise eine deutlich höhere Relevanz haben, als sie für ein Hochhaus gegeben ist.

Für eine in einer späteren Leistungsphase anstehende Optimierung wird man, wenn man das Thema ernst nimmt, weiterhin nicht um eine Ökobilanzierung umhin kommen. Für eine frühe, richtungssichere Einschätzung, bietet die Datenbasis des Projekts jedoch eine wertvolle Informationsquelle.

#### 8.1.2 aktuelle Bauaufgaben Nachverdichtung & Aufstockung

Bezüglich der direkten Übertragbarkeit sei an dieser Stelle auch noch darauf hingewiesen, dass sich der im +++Haus verankerte Gebäudetypus des Einfamilienhauses, dem man im Hinblick auf die Nachhaltigkeit, wie erläutert durchaus kritisch gegenüber stehen kann, in technischer Hinsicht weitestgehend nicht von den hochaktuellen Bauaufgaben der Nachverdichtung und Aufstockung unterscheidet. Die untersuchten Bauweisen sind hierfür ebenso gültig, was eine direkte Nutzbarkeit von Ergebnissen für diese Art von Projekte in noch höherem Maße gewährleistet.

#### 8.1.3 Werkzeuge zur Wirkungsmaximierung ökonomischer Mittel

Darüber hinaus bieten die vornehmlich im Kapitel 7.2.1 Kriterien zur Baustoffwahl – Bewertungsmatrix eingeführten und erläuterten Kenngrößen "absolutes Einsparpotential" und "spezifische Optimierungskosten" sind im Zusammenspiel ein äußerst wirksames Werkzeug in der Entwurfs- und Ausführungsplanung von Gebäuden, welches es ermöglicht die zur Verfügung stehenden ökonomischen Mittel dahingehend zu kanalisieren, dass sie so effektiv wie möglich zur Minimierung von Umweltwirkungen genutzt werden können. Gleichzeitig lässt sich dieses Werkzeug aufgrund der Tatsache, dass es nicht um spezifische Datensätze oder

ähnliches geht, sondern es sich viel mehr um eine Methode handelt, uneingeschränkt auf andere Gebäudetypen, Rahmenbedingungen, etc. übertragen.

Letztlich kann das Werkzeug auch selbst außerhalb des Baubereichs, überall da angewendet werden, wo es darum geht in einem komplexen System unterschiedlicher Lösungsmöglichkeiten diejenigen auszuwählen, mit denen sich im Verhältnis zum erforderlichen Mitteleinsatz die größtmögliche Wirkung erzielen lässt.

#### **8.1.4 Bewertungsmaßstäbe für ökologische Gebäude**

Das Forschungsprojekt zeigt über den eigenen Projektrahmen hinaus auf, dass es eine Vielzahl von Gründen gibt die übliche, stark energetisch fokussierte Bewertung von Gebäuden weiter zu entwickeln und stattdessen zu einer Bewertung von Umweltwirkungen von Gebäuden zu gelangen. Nur über einen solchen Ansatz ist es valide möglich, sowohl die Herstellungs- als auch die Nutzungsphase ganzheitlich zu betrachten. Sowohl die Grenzen der energetischen Bewertungen als auch die Potentiale der umweltwirkungsbezogenen Betrachtungen werden detaillierter im Kapitel 2 Zusammenfassung beschrieben.

Dieser Zusammenhang ist ausdrücklich nicht projektspezifischer, sondern allgemeiner Natur und sollte daher nach Auffassung der Verfasser deutlich größeren Eingang in die Gestaltung von Gesetzgebung, Förderprogrammen etc. finden. Dies lässt sich aktuell bedauerlicherweise nicht erkennen. So beziehen sich die zum 1.1.2016 in Kraft tretenden Verschärfungen der [EnEV, 2014] beispielsweise weiterhin ausschließlich auf energetische Parameter. Im Wesentlichen werden die Anforderungen an den einzuhaltenden max. Primärenergiebedarf QP um 25 % verschärft. Zu einer Verschärfung der Anforderungen an die thermische Hülle des Gebäudes kommt es indirekt, da nicht mehr nur die je nach Gebäudetyp zulässigen Höchstwerte des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlusts HT' [EnEV, 2014, Anlage 1, 1.2, Tabelle 2], sondern auch die HT' des Referenzgebäudes eingehalten werden müssen. Eine direkte Berücksichtigung von Umweltwirkungen von Gebäuden erfolgt nicht.

Auch die deutsche Förderlandschaft setzt hier aktuell wenig andere Schwerpunkte. So orientieren sich sowohl die aktuellen Förderprogramme für energieeffizientes Bauen der KfW, als auch die zum 1.4.2016 in Kraft tretenden Anpassungen sich weiterhin ausschließlich an energetischen Themen. Mit dem Ansatz der prozentualen Unterschreitung der nach [EnEV, 2014] zulässigen QP und HT' Werte waren die Förderprogramme bisher fast ausschließlich direkt an die Zielsetzungen der EnEV gekoppelt und somit ebenfalls ausschließlich energetisch motiviert. Zum 1.4. wird nun das KfW-Effizienzhaus 70 Programm wegfallen und dafür ein KfW-Effizienzhaus 40 Plus Programm neu aufgelegt, welches den Einsatz von Photovoltaik-Anlagen und Batteriespeicherlösungen fördern will. Ohne anzeigen zu wollen, dass dies nicht ggf. sinnvoll sein kann, so sind die Verfasser doch der Auffassung, dass diese Form der Förderung aufgrund der Tatsache, dass es aktuell noch weitgehend unerforscht ist, welchen Einfluss Batteriespeicherlösungen auf die Ökobilanz von Photovoltaikstrom haben doch gewisse Risiken birgt. Selbst für Photovoltaikanlagen an sich gibt es schon nur sehr unvollständige Ökobilanzen. Im Wesentlichen sind lediglich Daten für das Treibhauspotential verfügbar. Für Batteriespeicher gibt es aktuell gar keine belastbaren Daten. Somit lässt sich mit Blick auf die Umweltwirkungen aktuell nicht sicher abschätzen, ob die Speicherung von Photovoltaikstrom ökologische Vorteile bietet, auch wenn es mit steigendem Photovoltaikstromanteil ohne Zweifel einen Bedarf an Konzepten gibt, die den zeitlichen Versatz von Angebot und Nachfrage kompensieren.

Sowohl für die Gestaltung von Gesetzgebung als auch von Förderprogrammen wäre die Integration von ökobilanziellen Aspekten auf Basis der Umweltwirkungskategorien ein wertvoller Schritt auf dem Weg zu einem Gebäudestandard, der unsere Umwelt nicht oder so wenig wie möglich belastet.

### **8.1.5 Strategie zur Minimierung von Umweltwirkungen**

Die im Kapitel 3 Fazit beschriebene strategische Reihenfolge, in der eine effektive Optimierung von Gebäuden hinsichtlich der Minimierung von Umwelteinflüssen erfolgen sollte ist ebenfalls nicht projektspezifisch, sondern vom Grundsatz her auf andere Projekte übertragbar.

- Energieversorgungskonzept auf Basis von weitestgehend erneuerbaren Energieträgern
- Materialkonzept mit Verzicht weitestgehendem Verzicht auf emissionsintensiven Baustoffen
- Suffizienzstrategien, Kompensationsmaßnahmen, weitergehende Optimierungen in Bezug auf Energieversorgung und Materialwahl

## **8.2 Anschlussfähigkeit**

Aus dem Forschungsprojekt ergeben sich eine Reihe von Themen, die eine wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit darstellen.

### **8.2.1 Wieviel CO<sub>2</sub>-Emissionen darf ein Gebäude verursachen?**

Wie bereits erläutert ist es für die Beantwortung der Frage, wie ein Gebäude konzipiert werden muss, damit es der Erreichbarkeit eines für unseren Planeten verträglichen, personenbezogenen, jährlichen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von 2,5 t CO<sub>2</sub>-äqv. nicht im Wege steht, zunächst von zentraler Bedeutung zu untersuchen, wie hoch der Anteil der aus dem Wohnen resultierenden Emissionen am CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aktuell ist. Des Weiteren ist zu untersuchen, wie die Chancen zur Minimierung im Vergleich zu anderen Bereichen bewertet werden, da der Optimierungsdruck umso höher ist, je schwieriger sich eine Optimierung in anderen Bereichen darstellt.

### **8.2.2 Substitution emissionsintensiver Baustoffe**

Für eine Reihe von Bauteilen ist aktuell noch keine Substitution der teilweise sehr emissionsintensiven Baustoffe möglich. Dies trifft insbesondere auf Bodenplatten zu (vgl. AP 02 Gründung und Bodenplatte - Ergebnisse). In geringerem Umfang gilt dies aber auch für abdichtende Bauteile, wie Dächer, etc. In dieser Richtung gibt es bereits eine Vielzahl von Forschungsvorhaben, die sich sowohl mit der Entwicklung alternativer, ressourcenschonender Herstellungsprozesse für vorhandene Baustoffe, als auch der Erforschung alternativer Baustoffe beschäftigen. Angesichts der Tatsache, dass die genannten Bauteile in vielen Fällen weiterhin die Ökobilanz von Gebäuden dominieren, besteht hier aber weiterhin großer Forschungsbedarf und somit ein hohes wissenschaftliches und wirtschaftliches Anschlusspotential.



## 9 Dokumentation der Arbeitspakete

### 9.1 AP 1 Energieplushäuser in Fertigbauweise

#### 9.1.1 Marktstudie

Energieplushäuser in Fertigbauweise werden von vielen Fertighausherstellern angeboten. Dabei haben die meisten Hersteller nicht ein speziell entwickeltes Plusenergiehaus in ihrem Sortiment, sondern bieten den Plusenergiestandard als Zusatzpaket an. Neben verschiedenen Ausbaustufen sind beim Weber Haus zum Beispiel mehrere Zusatzoptionen mit einem entsprechenden Aufpreis möglich. Dazu gehören beispielsweise die besser gedämmte Außenwand ÖvoNatur Therm mit einem U-Wert von  $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$  anstatt  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei der Standardwand und eine auf dem Dach installierte Photovoltaikanlage inklusive Batteriespeicherung. [Weber Haus, 2014]

#### 9.1.2 Forschungsprogramm "Effizienzhäuser Plus"

##### sechs Modellprojekte in der Fertighausausstellung Köln Frechen

Da die vielen gestalterischen und auch technischen Optionen, die bei den Fertighausherstellern wählbar sind, einen Vergleich erschweren, eignen sich zur Analyse gebaute Musterhäuser im Energieplusstandard. In der Fertighausausstellung Köln Frechen wurden in den Jahren 2011/2012 insgesamt sechs Musterhäuser von verschiedenen Herstellern gebaut, die auch an dem Forschungsprogramm „Effizienzhäuser Plus“ des BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) bzw. aktuell des BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) teilnehmen. Bei dem Forschungsprogramm werden Wohngebäude (Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäuser) gefördert, die in Deutschland errichtet werden und während der Nutzungsphase eine positive Energiebilanz erzielen (Plusenergiehaus). Eine Voraussetzung der Förderung ist, dass die Häuser unter realen bewohnten Bedingungen getestet und evaluiert und die Messungen anschließend dokumentiert und ausgewertet werden. Das Monitoring von den Modellhäusern in der Fertighausausstellung Köln Frechen wurde von dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik 2012/2013 durchgeführt und ausgewertet. Allerdings steht die vollständige Veröffentlichung der Ergebnisse noch aus.

Ziel des Forschungsprojektes „Effizienzhäuser Plus“ ist es, dass mittelfristig Null- und Plusenergiehäuser zu attraktiven Preisen angeboten werden können, die nicht nur einen überdurchschnittlich verdienenden und somit kleinen Personenkreis ansprechen. Die am Markt verfügbaren sechs Musterhäuser in Köln von

### Bien-Zenker „Concept M“



Abbildung 9.1.2-1: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013],

### Finger Haus „VIO 400“



Abbildung 9.1.2-2: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2013],

### Huf Haus „Green[r]evolution“



Abbildung 9.1.2-3: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2013],

### Lux Haus „frame“



Abbildung 9.1.2-4: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2013],

## Schwörer Haus „Plan 550“

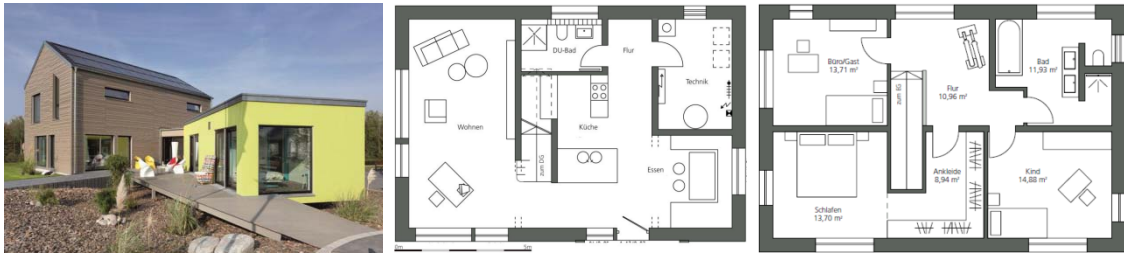


Abbildung 9.1.2-5: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 2, 2013],

## Weber Haus „Generation 5.0“



Abbildung 9.1.2-6: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2013],

„sind für 340.000 – 560.000 Euro bei Wohnflächen zwischen 180 – 280 m<sup>2</sup> erhältlich“. (s. [Hagel, 2012, S. 12]) In den Steckbriefen von den einzelnen Häusern sind Bauwerkskosten für die Kostengruppe 300 und 400 zwischen 276.800 Euro (Finger Haus) und 700.000 Euro (Lux Haus) angegeben. Allerdings sind noch nicht von allen Modellhäusern die Kosten in den Steckbriefen vollständig dokumentiert. Umgerechnet auf die Gebäudenutzfläche entspricht dies einen Quadratmeterpreis von 1.192,58 Euro/m<sup>2</sup> (Weber Haus) bis 2.372,88 Euro/m<sup>2</sup> (Lux Haus).

Da es für den Plusenergiestandard keine festgelegte Definition gibt, hat das BMUB mit dem Fraunhofer-Institut folgende Definition für die Effizienzhäuser Plus definiert:

„Das Effizienzhaus Plus-Niveau ist erreicht, wenn sowohl ein negativer Jahres-Primärenergiebedarf ( $\sum Q_p < 0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ) als auch ein negativer Jahres-Endenergiebedarf ( $\sum Q_e < 0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ) vorliegen. Alle sonstigen Bedingungen der Energieeinsparverordnung (EnEV), wie z.B. die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz, sind einzuhalten“ (s. [Erhorn et al., 2014, S. 9]). Zusätzlich müssen die geförderten Häuser durchgängig mit Geräten des höchsten Energieeffizienzlabels ausgestattet sein. Die Definition zeigt, dass bei den geförderten Häusern nur die positive Energiebilanz der Nutzungsphase (Heizung, Warmwasser, Lüftung, Beleuchtung und Haushaltsstrom) beachtet wird. Eine gesamte Lebenszyklusbe-

trachtung der energetischen Bilanz unter zusätzlicher Berücksichtigung von Herstellung, Unterhalt/Instandsetzung und Rückbau bleibt unbeachtet.

### **9.1.3 Pilotprojekt Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität (BMVBS Haus in Berlin)**

Neben der Initialisierung des Forschungsprogramms Effizienzhäuser Plus im Jahr 2011, dessen Netzwerk mittlerweile aus etwa 35 Modellhäusern besteht, nimmt das BMVBS selbst mit einem eigenen Haus als Pilotprojekt teil. Für die Entwicklung des BMVBS Hauses mit Elektromobilität wurde im Sommer 2010 ein interdisziplinärer Wettbewerb für Hochschulen in Zusammenarbeit mit Planungsbüros ausgelobt. Die Universität in Stuttgart hat in Zusammenarbeit mit Werner Sobek Stuttgart GmbH und Werner Sobek Green Technology GmbH Stuttgart den Wettbewerb gewonnen und anschließend einen Planungsvertrag für die Ausführung bekommen.

Am 07.12.2011 wurde das Gebäude in zentraler Lage in Berlin Charlottenburg eröffnet. Für 9 Monate stand das Haus zur Präsentation der Öffentlichkeit zur Verfügung. Anschließend wurde das Effizienzhaus Plus von einer vierköpfigen Familie bewohnt, um ein Monitoring unter real bewohnten Bedingungen durchführen zu können. Die Testfamilie, die mit Hilfe eines mehrstufigen Auswahlverfahrens ausgewählt wurde, zog am 05.03.2012 in das Berliner BMVBS Haus für eine Wohndauer von 15 Monaten ein. Neben der Wohnqualität wurde von der Familie auch die zu dem Forschungskonzept gehörenden zwei Elektroautos und zwei Elektrofahrrädern auf ihre Alltagstauglichkeit getestet. Mit Hilfe der Messergebnisse aus der Testphase und deren Auswertung wurden anschließend Verbesserungen im Bereich der Haustechnik und kleinere Umbauten durchgeführt und seit Mai 2014 wird das BMVBS Haus von einer zweiten Testfamilie bewohnt und ein erneutes Monitoring durchgeführt. (Siehe hierzu Abschnitt "Auswertung der Messergebnisse vom Berliner Effizienzhaus (Messzeitraum März 2012 bis Februar 2013)

Da das BMVBS Haus für das Forschungsprojekt als temporärer Bau gedacht ist, war ein weiteres Ziel das Haus aus vollständig recycelbaren Materialien zu bauen. So soll nach Ablauf der Projektlaufzeit das Haus zurückgebaut werden. Ein Teil der Baustoffe, wie zum Beispiel die Photovoltaikmodule, werden von den Herstellern wieder zurückgenommen und können bei anderen Bauprojekten wiedergenutzt werden. Die anderen Baustoffe sind entweder aus biologisch abbaubaren Materialien oder können zu neuen Recycling-Baustoffen weiterverarbeitet werden. (Vgl. [Sobek et al., 2012])

Die Kosten für die Realisierung des BMVBS Hauses betragen insgesamt 1.646.000 Euro (Kostengruppe 300: 1.080.000 Euro und Kostengruppe 400: 566.000 Euro) und liegen somit weit über den angegebenen Kosten von den 6 Musterhäusern in Köln. Bezogen auf die Gebäudenutzfläche des BMVBS Hauses mit 203 m<sup>2</sup> ergibt das einen Preis von 8.108,37 Euro/m<sup>2</sup>. (Vgl. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014])

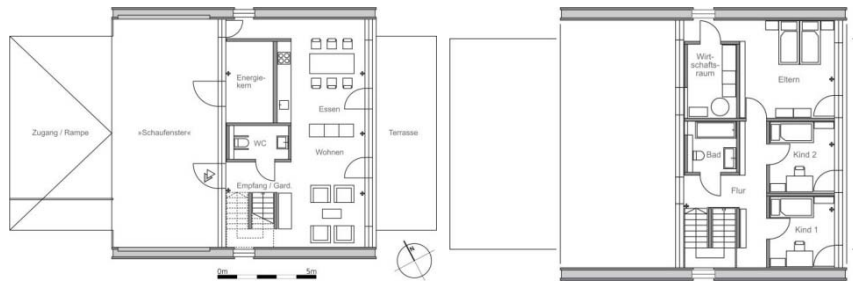


Abbildung 9.1.3-1: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014]

### 9.1.4 Gestaltung

Alle sechs Fertighäuser und das BMVBS Haus sind 2-geschossig und haben ein ähnliches A/V-Verhältnis. (Vgl. Steckbriefe: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 2, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2014], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014].) Wie es für den Haustyp Einfamilienhaus eher üblich ist, richten sich die Häuser mit Ausnahme vom Lux-Haus an eine idealtypische Kleinfamilie bestehend aus den Eltern mit zwei Kindern und weisen dem entsprechend 4 Individualräume (Schlafen, Arbeiten, Kinderzimmer), bzw. 3 Individualräume beim Schwörer Haus und BMVBS Haus, auf. Das Lux Haus „frame“ hat hingegen nur ein Schlafzimmer und einen separaten Bürobereich, der bei Bedarf auch als Einliegerwohnung genutzt werden kann, obwohl es zusammen mit dem Huf Haus vergleichend zu den anderen Häusern noch eine deutlich größere Wohnfläche hat (beheizte Nettogrundfläche Huf Haus und Lux Haus ca. 300 m<sup>2</sup>, anstatt ca. 150-200 m<sup>2</sup>). Auch der Vergleich zu allen Modellhäusern, die an dem Forschungsprojekt Effizienz Häuser Plus teilnehmen, zeigt, dass sowohl die beheizte Wohnfläche als auch das beheizte Gebäudevolumen vom Huf Haus und Lux Haus über dem Durchschnitt liegen, was wiederum erkennen lässt, an welche Käuferschicht sich die Angebote richten.

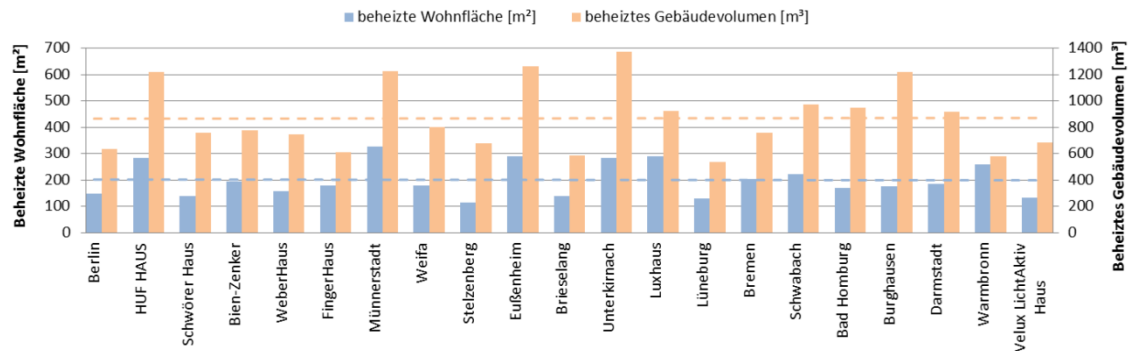


Abbildung 9.1.4-1: Vergleich beheizte Wohnfläche und beheiztes Gebäudevolumen [Bergmann, 2014]

### 9.1.5 Konstruktion (Boden, Wand, Dach)

Die sechs Fertighäuser und das BMVBS Haus bestehen alle aus einer Holzkonstruktion. (Vgl. Steckbriefe: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 2, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2014], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014]) Nur die Bodenplatten sind aus Stahlbeton. Eine Ausnahme bildet hierbei das Schwörer Haus und das BMVBS Haus. So hat das Schwörer Haus eine Bodenplatte aus einer 16 cm dicken Holzverbundkonstruktion mit einem 7 cm dicken Betonspiegel. (s. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 2, 2012]) Genauere Angaben zum Aufbau der Holzverbundkonstruktion konnten nicht recherchiert werden. Die auf Streifenfundamenten aufgeständerte Bodenplatte beim BMVBS Haus besteht aus 40 cm hohen Holzstegträgern mit Zellulosedämmung und ist zur Außenseite mit feuchtigkeitsresistenten Spanplatten bekleidet. (Vgl. [Sobek et al., 2012]) Die Ausführung der Bodenplatte gehört nach den Konzepten der Fertighaushersteller nicht zu der Basisversion und ist dementsprechend optional als Zusatzmodul wählbar oder die Ausführung kann vom Bauherrn selbst organisiert werden. Ebenso besteht die Möglichkeit zusätzlich ein Kellergeschoss oder eine Teilunterkellerung mit den entsprechenden Mehrkosten mit zu bestellen oder ggf. selbst zu organisieren.

Die Außenwände bestehen bei fast allen Fertighäusern aus einer Holzrahmenkonstruktion, die zwischen 16-24 cm dick ist. Als zusätzliche Dämmschicht schließt ein 6-10 cm dickes Wärmedämmverbundsystem an. Nur beim Schwörer Haus besteht die Fassade aus einer Holzbekleidung, ebenfalls mit einer zusätzlichen Dämmebene zwischen Holzrahmenkonstruktion und Holzfassadenbekleidung. Die Außenwände des BMVBS Hauses bestehen aus 36 cm dicken Holzstegträgern mit Zellulosedämmung ohne eine zusätzliche Dämmschicht. Für die hinterlüftete Fassade wurde beim BMVBS Haus an der Südwestseite eine Oberfläche aus Dünnschicht PV-Modulen gewählt, die Nordostseite hat eine optisch ähnlich wirkende Bekleidung aus schwarz bedruckten Glastafeln erhalten. An dem konstruktiven Aufbau der Außenwand erkennt man, dass sich die Wanddicke ausschließlich aus wärmetechnischen Parametern ergibt. Von der klassischen Holzrahmenbauweise weicht nur die Konstruktion des Huf Hauses etwas ab. Die Außenwände des Huf Hauses bestehen aus sichtbaren Fachwerkträgern mit einem Gefach, das entweder vollflächig verglast ist oder vermutlich aus einem 8 cm dicken Brettsperrholzelement mit 13 cm WDVS besteht. (s. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014]) Beim Lux Haus, Bien-Zenker und BMVBS Haus besitzen die Außenwände eine innenliegende Installationsebene, die dem Nutzer eine Nachinstallation von Elektroleitungen ermöglicht, gleichzeitig aber auch hohe Kosten verursacht. Die Innenoberfläche bei den anderen Häusern besteht aus verspachtelten Gipskartonplatten, die direkt auf die Holzwerkstoffplatte der Holzrahmenkonstruktion befestigt sind. Durch die Wahl des inneren und äußeren Oberflächenmaterials (WDVS und verspachtelte Gipskartonplatte) erkennt man fast bei allen Häusern nicht,

dass es sich um ein Fertighaus in Holzbauweise handelt. Allerdings werden auch verschiedene Fassadenmaterialien als Wahlmöglichkeit von den Herstellern angeboten.

Die Dächer sind bei allen sechs Fertighäusern aus einer Holzbalkenkonstruktion und als Satteldach, mit Ausnahme des Lux Hauses, das ein Flachdach besitzt, ausgeführt. Die Sparren bzw. die Zwischendämmung haben eine Dicke von 18-26 cm und meistens noch eine zusätzliche Dämmlage von 6-16 cm. Die Konstruktion des Flachdaches beim BMVBS-Haus besteht ebenfalls wie die Außenwände und Bodenplatte aus Holzstegträgern mit Zellulosedämmung, die für das Gefälle zwischen 40-52 cm hoch sind. Auch die Dachkonstruktion besitzt wie die Außenwände beim BMVBS Haus eine einen zusätzlichen Installationsbereich (16 cm).

### 9.1.6 Thermische Hülle

Die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte), die sich aus den Konstruktionsaufbauten ergeben, sind bei den Bauteilen der Häuser ähnlich und liegen bei den Außenwänden zwischen 0,11-0,17 W/m<sup>2</sup>K, bei den Dachflächen zwischen 0,08-0,15 W/m<sup>2</sup>K und bei den Bodenplatten zwischen 0,11-0,21 W/m<sup>2</sup>K. (Vgl. Steckbriefe: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 2, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2014], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014]) Die Werte zeigen, dass sich die Dämmwirkung der Gebäudehülle aller sieben Häuser größtenteils an dem Passivhausstandard orientiert und folglich die Gebäudehüllen sehr energieeffizient ausgeführt worden sind. Gemäß den Passivhauskriterien ist ein U-Wert für Wand, Dach und Bodenplatte von < 0,15 W/m<sup>2</sup>K vorgegeben. Vollständig werden die vorgegebenen U-Werte eines Passivhauses nur von dem Schwörer Haus und dem BMVBS-Haus erfüllt. Ob die zwei Häuser alle Passivhausanforderungen erfüllen und sogar ggf. Passivhaus zertifiziert sind, konnte nicht recherchiert werden. Die Fenster bestehen aus Dreischeibenisolierverglasung mit einem Energiedurchlassgrad (g-Wert) von ca. 50 % und die Fensterrahmen sind entweder aus Kunststoff, Aluminium oder aus Holz-Alu. Die U-Werte der Fenster liegen zwischen 0,7-1,0 W/m<sup>2</sup>K und orientieren sich somit ebenfalls an die Passivhausvorgabe (U-Wert Fenster < 0,8 W/m<sup>2</sup>K).

### 9.1.7 Energie-/Technikkonzept

Die Grundlage des Technikkonzeptes bildet bei allen sieben Modellhäusern eine Kombination aus Photovoltaikanlage, Wärmepumpe und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Unterschiede bei den einzelnen Konzepten ergeben sich durch die Wahl oder auch Kombination zwischen Erd- und Luftwärmepumpe für die Wärme- und/oder Warmwassererzeugung, durch die Art der Wärmeabgabe (Fußbodenheizung oder über die Zuluft) und durch die Verwendung von zusätzlichen Geräten für die Unterstützung der Wärmeerzeugung und zur Kühlung. So besitzt das Schwörer Haus als einziges Haus zusätzlich zu der Photovoltaikanlage auch Solarthermiemodule auf der Dachfläche. Zur Energiespeicherung (Wärmespeicherung) ist bei jedem Haus ein Brauchwasserspeicher mit ca. 300 - 500 l Speichervolumen installiert. Eine zusätzliche Batteriespeicherung ist hingegen nur beim Weber Haus, Bien-Zenker, Huf Haus und BMVBS vorhanden.

#### Weber Haus:

- Photovoltaikanlage mit Batteriespeicherung
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Jeweils eine Luftwärmepumpe für die Warmwassererzeugung und eine für die Wärmeerzeugung, die miteinander gekoppelt sind.

- Die Wärmeabgabe in den einzelnen Räumen erfolgt über die Zuluft. Kellervorraum, Bad und WC können zusätzlich durch elektrische Konvektoren beheizt werden.
- 295 l Brauchwasserspeicher

(Vgl. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2014])

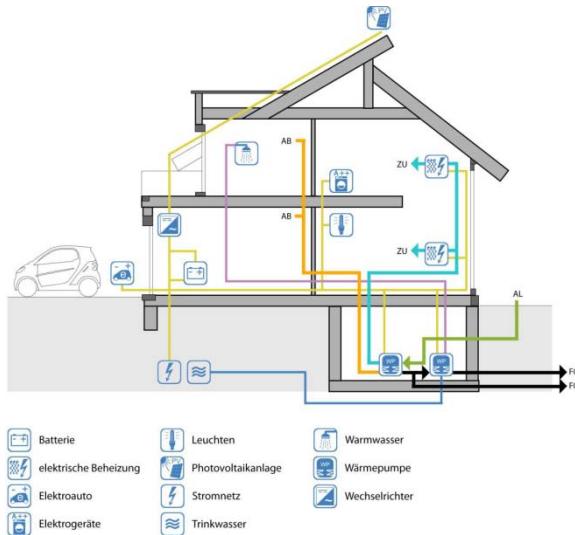


Abbildung 9.1.7-1: Prinzipskizze Weber Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2014]

## Bien-Zenker

- Photovoltaikanlage mit Batteriespeicherung (8,4 kWh)
- Lüftungskompaktgerät mit Wärmerückgewinnung
- In dem Lüftungskompaktgerät ist eine Doppelwärmepumpe (eine Luft- und eine Erdwärmepumpe mit Sole) enthalten.
- Die Luftwärmepumpe wird für die Zulufterwärmung und für die Warmwasserbereitung verwendet.
- In dem Lüftungskompaktgerät ist zusätzlich ein Warmwasserspeicher integriert.
- Mit der Erdwärmepumpe (Sole) wird zusätzlich eine Fußbodenheizung mit Wärme versorgt.

(Vgl. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013])



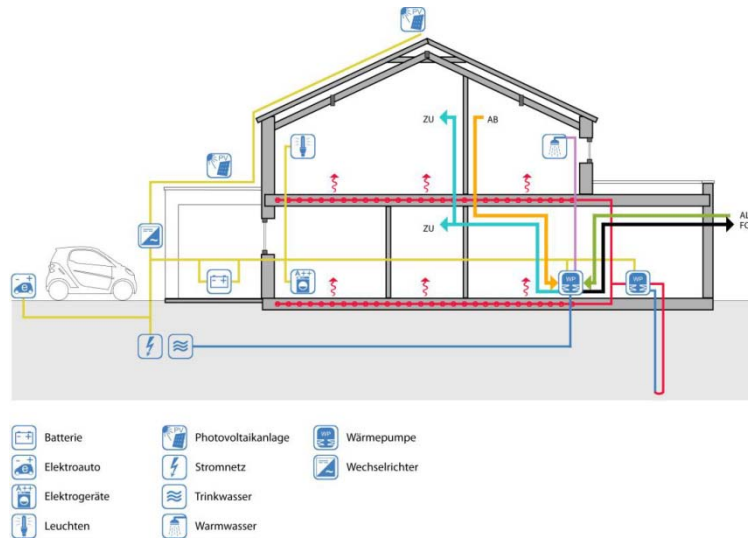


Abbildung 9.1.7-2: Prinzipskizze Bien-Zenker, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013]

## Finger Haus

- Photovoltaikanlage ohne Batteriespeicherung
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Eine Split-Luftwärmepumpe mit integrierter Kühlfunktion sorgt für die Wärme- und Warmwassererzeugung.
- Die Wärmeabgabe in den Räumen erfolgt ausschließlich über eine Fußbodenheizung. Dementsprechend ist die Luftwärmepumpe nicht mit der Lüftungsanlage gekoppelt.
- Brauchwasserspeicher

(Vgl. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2012])

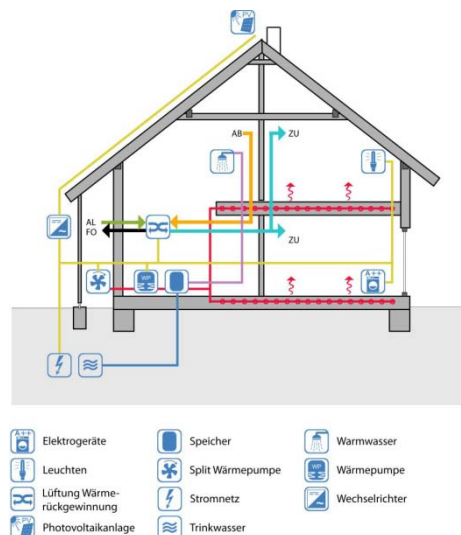


Abbildung 9.1.7-3: Prinzipskizze Finger Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2012]

## Huf Haus

- Photovoltaikanlage mit Batteriespeicherung (13,2 kWh)

- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Die Zuluft wird elektrisch befeuchtet und in der Lüftungsanlage ist außerdem ein Kühllaufsatz und ein Enthalphiewärmetauscher zur Rückgewinnung der Luftfeuchtigkeit integriert.
- Die Warmwasser- und Wärmeerzeugung erfolgt über eine Erdwärmepumpe (Sole).
- Die Wärmeabgabe findet ausschließlich über eine Fußbodenheizung statt. Dementsprechend ist die Luftwärmepumpe nicht mit der Lüftungsanlage gekoppelt.
- Die Erdwärmepumpe mit der Fußbodenheizung kann im Sommer zum Kühlen benutzt werden.
- Brauchwasserspeicher

(Vgl. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014])

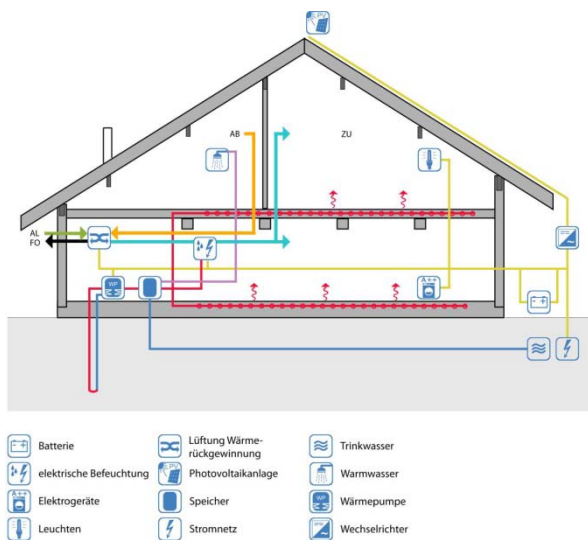


Abbildung 9.1.7-4: Prinzipskizze Huf Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014]

## Schwörer Haus

- Photovoltaikanlage ohne Batteriespeicherung
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Die Zulufterwärmung erfolgt über eine Luftwärmepumpe.
- Durch einen Erdwärmetauscher (Sole) kann die Außenluft vorher vorgewärmt bzw. vorgekühlt werden.
- Als Zusatzheizung sind elektrische keramische Direktheizelemente (PTC-Heizelemente) im Zuluftventil integriert.
- Die Warmwasserbereitung erfolgt über Solarkollektoren (die einen ausgerechneten solaren Deckungsanteil am Warmwasser von 58,1 % haben) und einer elektrischen Aufheizung, sobald die solare Erwärmung nicht ausreichend ist.
- Außerdem wird die Lüftungsanlage mit der Wärmerückgewinnung automatisch auf die Warmwasserbereitung umgeschaltet, wenn kein Heizbedarf besteht.
- 500 l Brauchwasserspeicher

(Vgl. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 2, 2012])

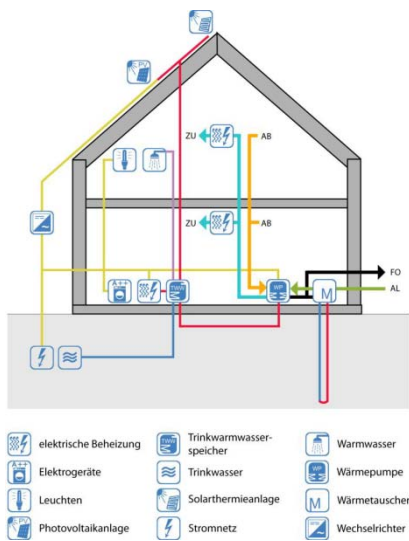


Abbildung 9.1.7-5: Prinzipskizze Schwörer Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014])

## Lux Haus

- Photovoltaikanlage ohne Batteriespeicherung
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Eine Erdwärmepumpe mit zwei Sonden (Sole) wird zur Warmwasser- und Wärmeerzeugung genutzt.
- Die Wärmeabgabe erfolgt ausschließlich über eine Fußbodenheizung. Dementsprechend ist die Luftwärmepumpe nicht mit der Lüftungsanlage gekoppelt.
- Zur Verlängerung der Wärmepumpenlaufzeit gibt es zusätzlich zum Brauchwasserspeicher einen 100 l Pufferspeicher.
- Bevor die Außenluft in den Wärmetauscher gelangt, wird sie durch einen Erdwärmetauscher (Sole) vorgewärmt bzw. vorgekühlt.
- 300 l Brauchwasserspeicher

(Vgl. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2012])

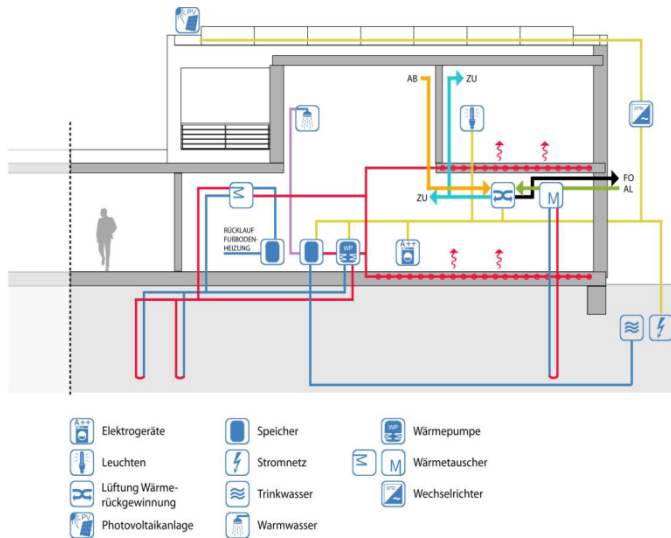


Abbildung 9.1.7-6: Prinzipskizze Lux Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2012]

### BMVBS Haus

- Photovoltaikanlage mit Batteriespeicherung (40 kWh)
- Eine Luftwärmepumpe mit Kompaktlüftungsgerät und Wärmerückgewinnung.
- Die Luftwärmepumpe wird zur Warmwasser- und Wärmeerzeugung genutzt.
- Die Wärmeabgabe erfolgt über eine Fußbodenheizung.
- Außerdem wird das Zuluft-Nachheizregister durch die Luftwärmepumpe versorgt.
- 288 l Brauchwasserspeicher

(Vgl. [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014])

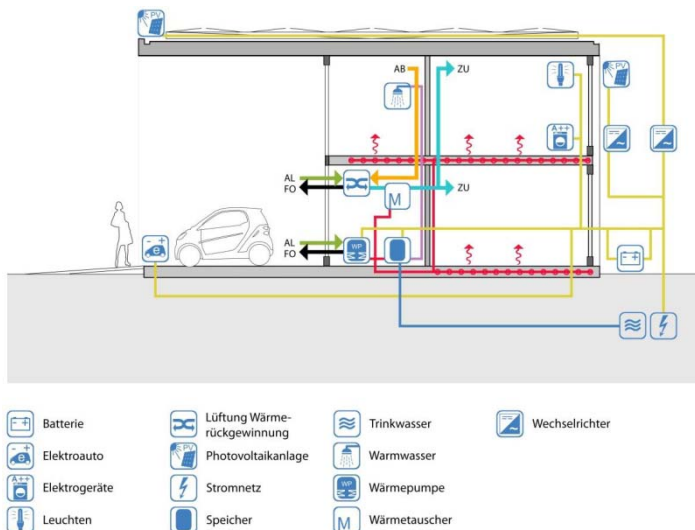


Abbildung 9.1.7-7: Prinzipskizze BMVBS Haus, [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014]

### 9.1.8 Photovoltaik

Um eine positive Energiebilanz am Ende des Jahres zu erzielen, sind bei allen sieben Häusern Photovoltaikanlagen auf der Dachfläche installiert. Bei den sechs Plusenergiehäusern haben die PV-Anlagen eine Fläche zwischen ca. 60 und 100 m<sup>2</sup>, die einen berechneten Stromertrag

zwischen 7.390 kWh/m<sup>2</sup>a (Schwörer Haus) und 12.710 kWh/m<sup>2</sup>a (Huf Haus) erzielen sollen. Die Gesamtfläche der Photovoltaikanlagen des BMVBS Hauses auf dem Flachdach und an der Südfassade sind mit insgesamt 171,2 m<sup>2</sup> einiges größer und sollen einen berechneten Stromertrag von 16.625 kWh/m<sup>2</sup>a erwirtschaften. Der berechnete Strombedarf für die einzelnen Häuser liegt zwischen 5.119 kWh/m<sup>2</sup>a (Schwörer Haus) und 9.730 kWh/m<sup>2</sup>a (Huf Haus). (Vgl. Steckbriefe: [Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 2, 2012], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2014], [Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014]) Auffällig beim Weber Haus und Finger Haus ist, dass über eine Integration der Photovoltaikanlage in die Gebäudehülle anscheinend nicht nachgedacht wurde. Die Photovoltaikmodule wurden bei den zwei Häusern als Aufdachkonstruktion einfach auf eine Seitenfläche des Satteldachs auf die Dachziegel aufgesetzt. Daran wird deutlich, dass bei den meisten Fertighausherstellern auch die Installation einer Photovoltaikanlage zu den Zusatzpaketen gehört, die bei jedem angebotenen Hausdesign optional hinzugewählt werden kann. Bei den Plusenergiehäusern von Bien-Zenker, Huf Haus und Schwörer Haus sind die Photovoltaikmodule hingegen in die Dachdeckung integriert eingebaut und beim Lux Haus und BMVBS Haus verschwindet die Photovoltaikanlage optisch hinter der Attika des Flachdachs. Die zusätzlichen Dünnschichtmodule beim BMVBS Haus werden bewusst als Gestaltungsmerkmal optisch sichtbar in die Südfassade integriert.

Beim "Concept M" von Bien-Zenker ist zu beachten, dass es neben der am Haus angebrachten Photovoltaikfläche auf dem Satteldach und auf der Pergoladachfläche über der Terrasse zusätzlich im Garten noch einen Pavillon gibt, auf dessen Dach ebenfalls eine Photovoltaikanlage mit einer zusätzlichen Leistung von 5,65 kWp installiert ist. So besitzt das Haus von Bien-Zenker in Köln insgesamt eine PV-Leistung von 16,25 kWp mit einem berechneten Stromertrag von insgesamt 13.040 kWh/a. Bei den veröffentlichten Messergebnissen wurde der Gesamtertrag inklusive Pavillon immer berücksichtigt.

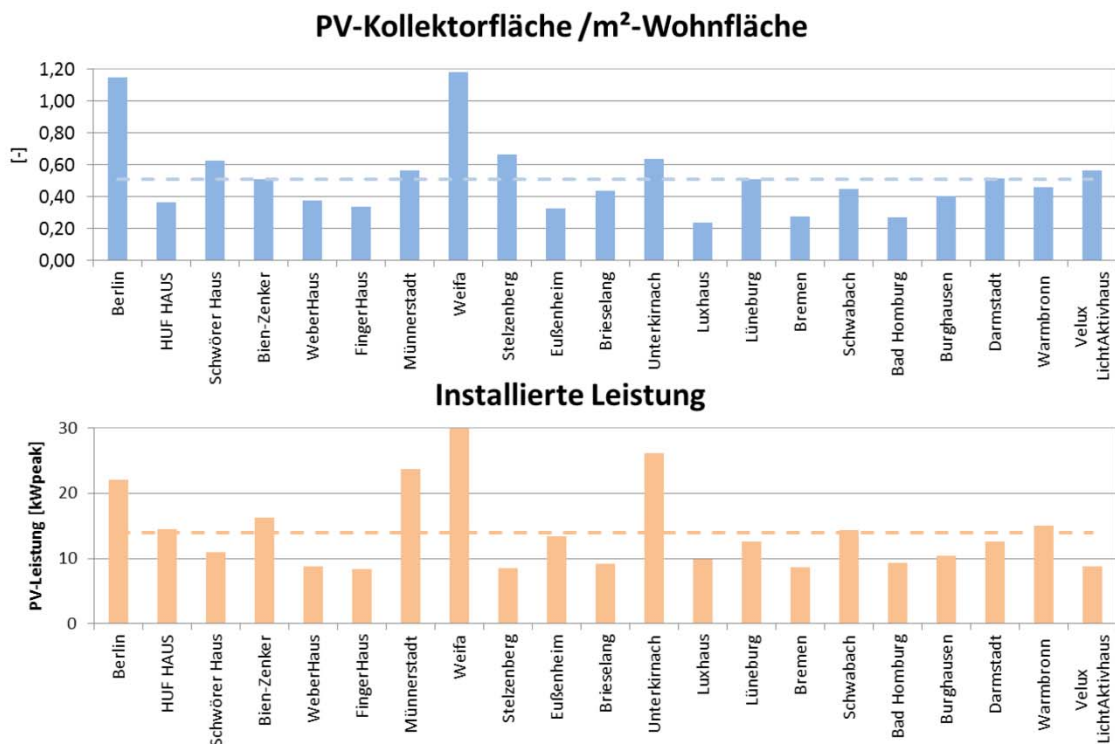


Abbildung 9.1.8-1: Vergleich Kennwerte der Photovoltaik [Bergmann, 2014]

## 9.1.9 Messergebnisse, Stand Mai 2014

### Energiebilanz

Von Januar 2013 bis einschließlich April 2014 wurden für die sechs Fertighäuser in Köln erste Messergebnisse zum Stromertrag und Stromverbrauch vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik veröffentlicht. Von dem BMVBS Haus liegen Messergebnisse von März 2013 bis einschließlich April 2014 vor. Da das BMVBS Haus während dieser Zeit nur von März 2012 bis Ende Mai 2013 von einer Testfamilie bewohnt wurde, ist hier diese Zeitspanne zum Vergleichen interessant. Die Energiebilanz vom Messjahr 2013 zeigt, dass nur das Schwörer-Haus (ca. +1.300 kWh/a) und Bien-Zenker (ca. +2.000 kWh/a) eine positive Bilanz am Ende des Jahres erzielten. (Vgl. Abbildung 1 - 7) Auch das BMVBS Haus erzielte nach einem Jahr (Ende Februar 2013) eine positive Energiebilanz mit einem Stromüberschuss von +906 kWh. (Vgl. [Erhorn et al., März 2013]) Die berechneten Stromüberschüsse vom Schwörer Haus (+2.271 kWh/a), Bien-Zenker (+4.957 kWh/a inkl. Pavillon) und BMVBS Haus (+9.633 kWh/a ohne Elektromobilität) werden hingegen nicht erreicht. Im Vergleich zeigt sich, dass die gemessenen Werte vom Schwörer Haus und Bien-Zenker etwa 50% unter den berechneten liegen, beim BMVBS Haus ist die Abweichung sogar noch viel größer. Der Jahresverlauf der gemessenen kumulierten Endenergie vom Schwörer Haus und Bien Zenker zeigt, dass die Bilanz erst ab Mitte Juni positiv wurde. Von Januar bis Mitte Juni 2013 lag der Stromverbrauch über dem Stromertrag. Beim BMVBS Haus war die Bilanz der gemessenen kumulierten Endenergie hingegen während des gesamten Jahres (von März 2012 bis Ende Februar 2013) positiv. Der Jahresverlauf der gemessenen kumulierten Endenergie von 2013 beim Finger Haus und Huf Haus zeigt kurzzeitig eine positive Energiebilanz; beim Finger Haus zwischen September und Ende Oktober und beim Huf Haus zwischen September und Ende November. Allerdings wird die Bilanz bei den beiden Häusern am Jahresende von 2013 wieder negativ. Das Weber Haus hat im Messjahr 2013 durchweg eine negative Bilanz. Die Messungen beim Lux Haus werden erst seit Dezember 2013 durchgeführt, sodass hier noch keine gemessene Jahresbilanz vorliegt. Beim Vergleich der erzielten Energiebilanzen sollten allerdings auch die installierte PV-Leistung bzw. PV-Fläche beachtet werden, die beim Huf Haus, Schwörer Haus und Bien-Zenker ca. 30-40 % größer als beim Weber Haus, Finger Haus und Lux Haus sind.

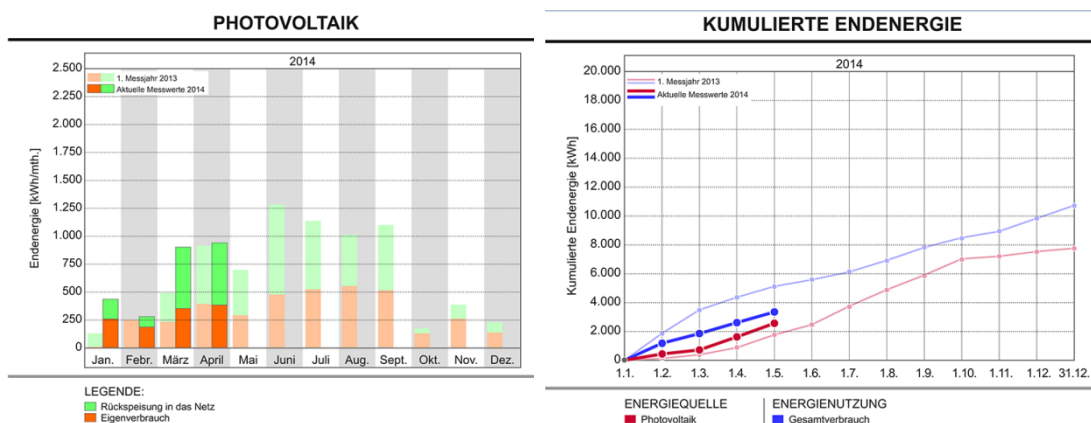


Abbildung 9.1.9-1: Weber Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus_node.html)

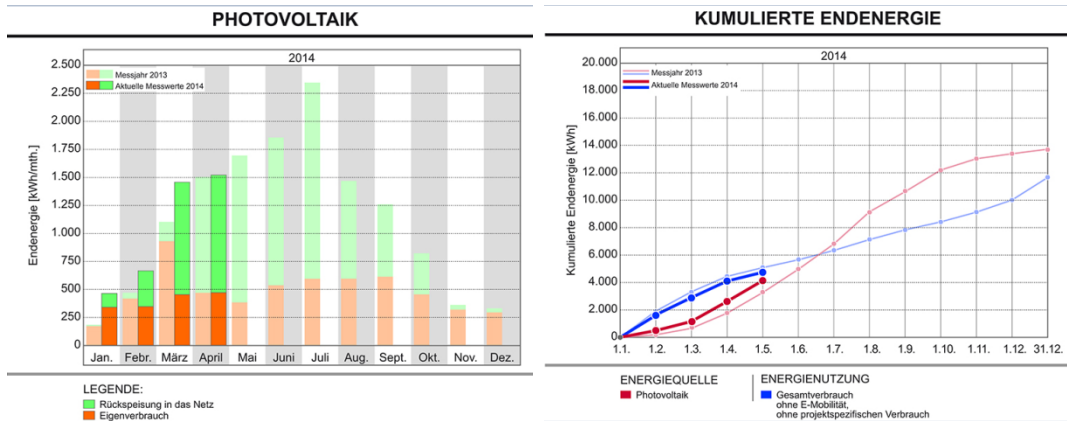


Abbildung 9.1.9-2: Bien-Zenker, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker_node.html)

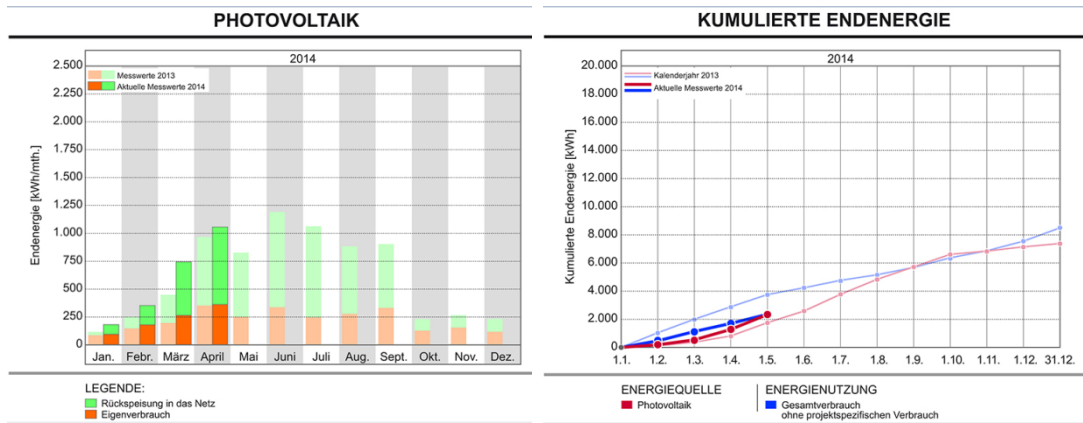


Abbildung 9.1.9-3: Finger Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger_node.html)

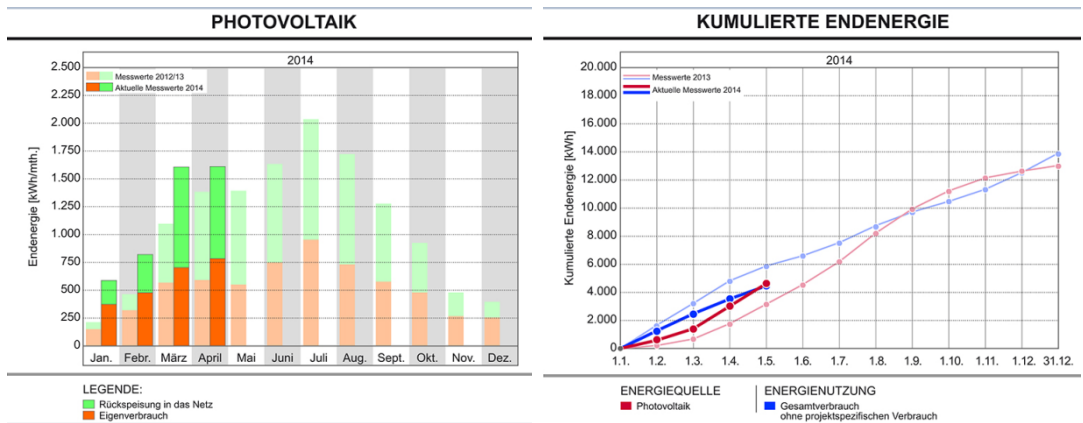


Abbildung 9.1.9-4: Huf Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf_node.html)

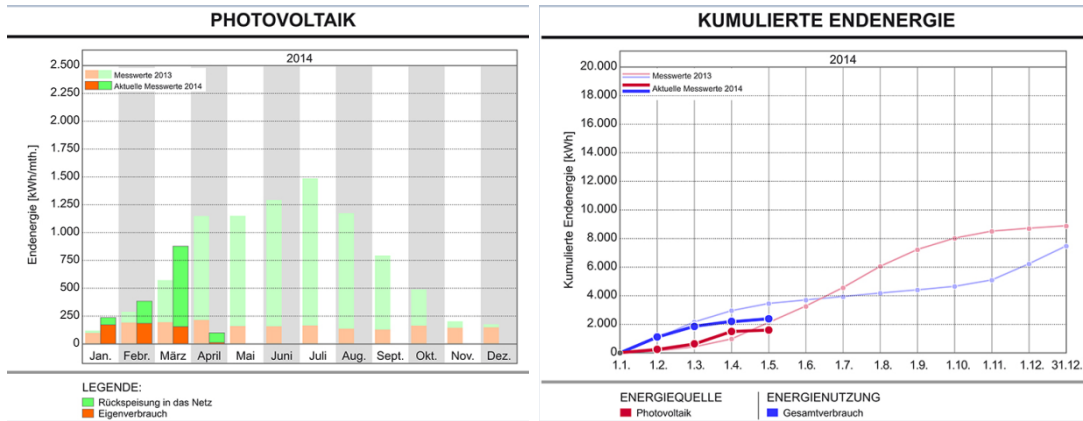


Abbildung 9.1.9-5: Schwörer Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schwoerer/schwoerer\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schwoerer/schwoerer_node.html)

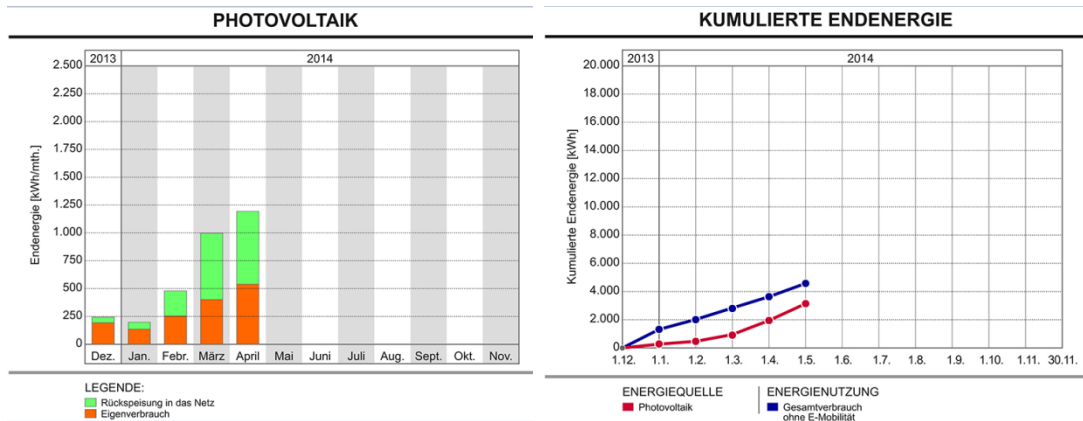
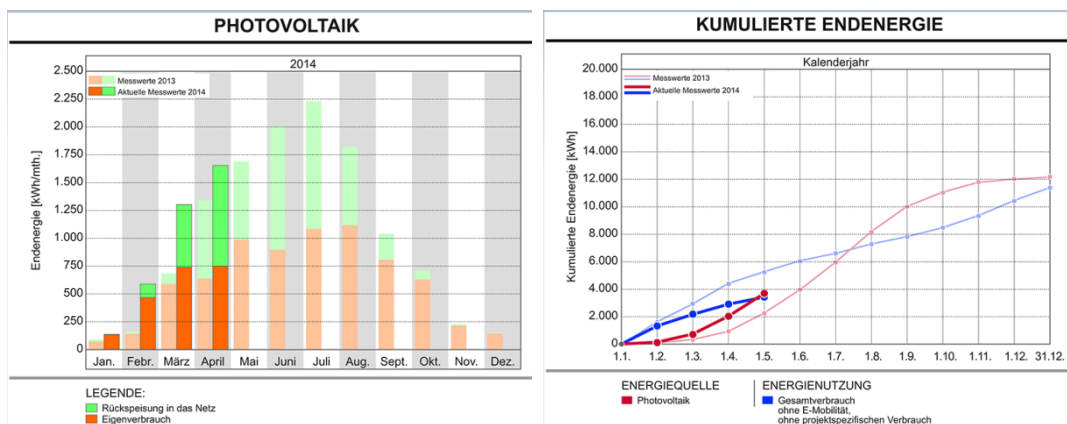


Abbildung 9.1.9-6: Lux Haus, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus_node.html)





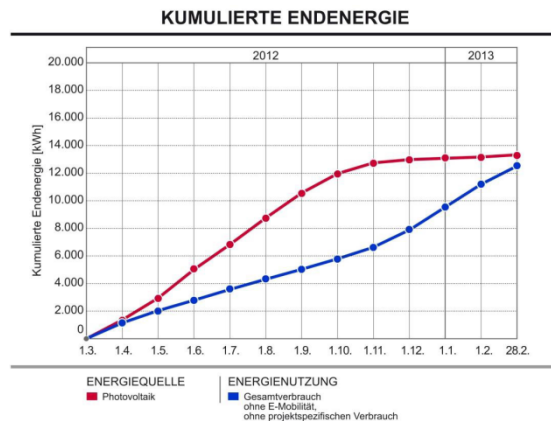


Abbildung 9.1.9-7: BMVBS Haus Berlin, Messergebnisse Photovoltaikanlage und kumulierte Endenergie, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin_node.html)

## Nutzerbedarfsdeckung

Neben dem Ziel mehr Energie zu erzeugen als zu verbrauchen möchten die Effizienzhäuser den Energiebedarf aus dem öffentlichen Netz möglichst minimieren. Eine intelligente Gebäudesteuerung, die bei allen Häusern verwendet wird, soll dabei helfen. Um die Eigenstromnutzung weiter zu verbessern ist beim Weber Haus, Bien-Zenker, Huf Haus und BMVBS Haus eine zusätzliche Batteriespeicherung vorgesehen. Bei den gemessenen Stromerträgen für 2013 ergibt sich ein Eigennutzungsgrad von 20 % (Schwörer Haus) bis 48 % (Huf Haus).

(Vgl. Abbildung 9.1.9-8) Der positive Effekt einer Batteriespeicherung macht sich erwartungsgemäß bemerkbar. Beim BMVBS Haus liegt der Eigennutzungsgrad bei 60 %, was auf die sehr große Speicherleistung der hier eingebauten Lithium-Ionen-Batterie von 40 kWh zurückzuführen ist. Das Besondere an der hier eingesetzten Batterie ist, dass sie aus 7.250 gebrauchten Batteriezellen aus der Elektromobilität bestehen. Da im Fahrzeug eine absinkende Speicherkapazität der Batterien auf 80% einen Ersatz erfordert, wird beim BMVBS Haus versucht alte Autobatterien länger zu nutzen. (Vgl. [Hagel, 2012, S. 12])

Einen möglichst hohen Eigennutzungsgrad zu erzielen, ist aus wirtschaftlicher Sicht sehr sinnvoll, da seit April 2012 die Eigenverbrauchsvergütung abgeschafft worden ist und die Einspeisevergütung immer weiter sinkt (Juli 2014: ca. 13 ct/kWh bei einer Größe bis 10 kWp). Des Weiteren ist ab einer installierten Kapazität > 10 kWp auch auf den eigengenutzten Strom die EEG-Umlage zu entrichten [EEG, 2014].

Durch eine Batteriespeicherung können bei sinkender Einspeisevergütung und steigenden Stromkosten die Betriebskosten gesenkt werden. Allerdings sind diesen Einsparungen die derzeit noch hohen Anschaffungskosten von Batterien gegenüber zustellen, sowie die Kosten und Energieverluste durch nötige Wechselrichter und Energiemanagementsysteme. Eine Bleiakkubatterie kostet derzeit ca. 500 € pro kWh Batteriekapazität und eine effizientere Lithium-Ionen-Batterie ca. 1.000 € pro kWh. [Erhorn et al., 2013].

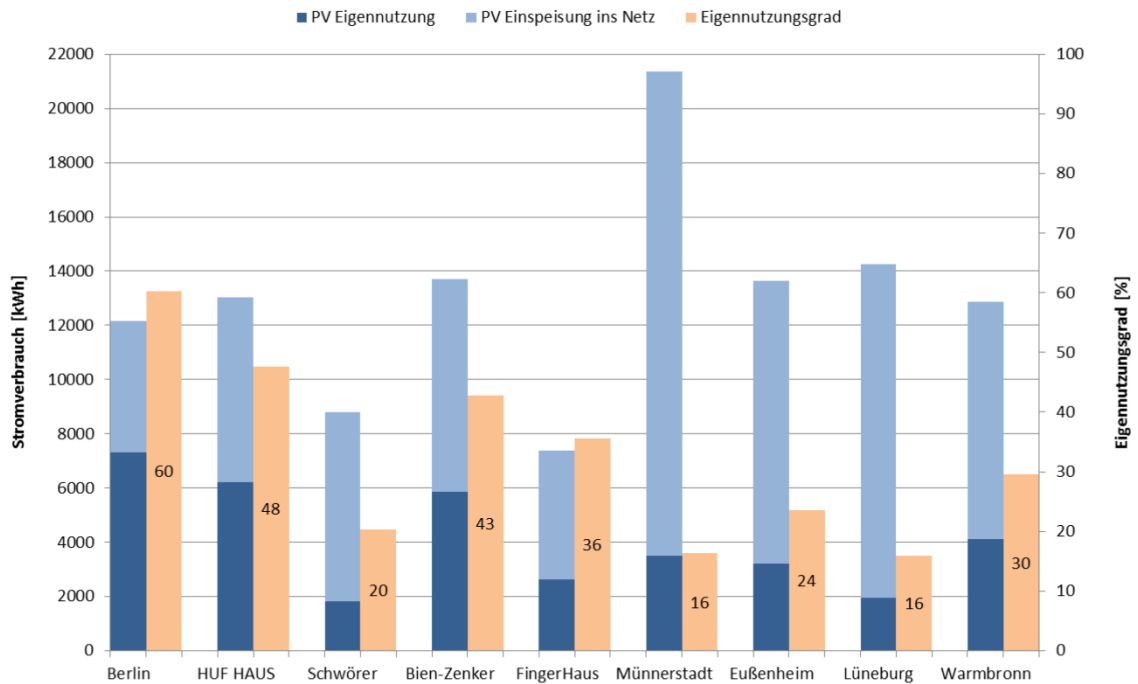


Abbildung 9.1.9-8: Vergleich gemessene Eigenstromnutzung 2013 [Bergmann, 2014]

- Der monatliche Endenergieverbrauch wird jeweils für Heizung und Trinkwasser, Beleuchtung, Hilfsenergie der Anlagentechnik und Elektrogeräte separat gemessen, so dass der Energieverbrauch von den einzelnen Bereichen auch miteinander verglichen werden kann. Bei dem Vergleich dieser Ergebnisse fallen folgende Abweichungen auf:
- Der monatliche Endenergieverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasser ist beim Schwörer Haus, Bien-Zenker und BMVBS Haus (2012/2013) vergleichend zu den anderen Häusern hoch
- Der monatliche Endenergieverbrauch für die Beleuchtung ist beim Finger Haus und Lux Haus hoch, beim Huf Haus sogar sehr hoch
- Der monatliche Endenergieverbrauch für die Hilfsenergie der Anlagentechnik ist in den Sommermonaten beim Huf Haus sehr hoch, das vermutlich mit der Anlagentechnik zur Kühlung zusammenhängt. Bei den anderen Häusern ist die benötigte Hilfsenergie der Anlagentechnik geringer und übers Jahr betrachtet auch eher konstant.
- Der monatliche Endenergieverbrauch für die Elektrogeräte fällt beim Schwörer Haus vergleichend zu den anderen Häusern gering aus.

(Vgl. Abbildung 9.1.9-5)

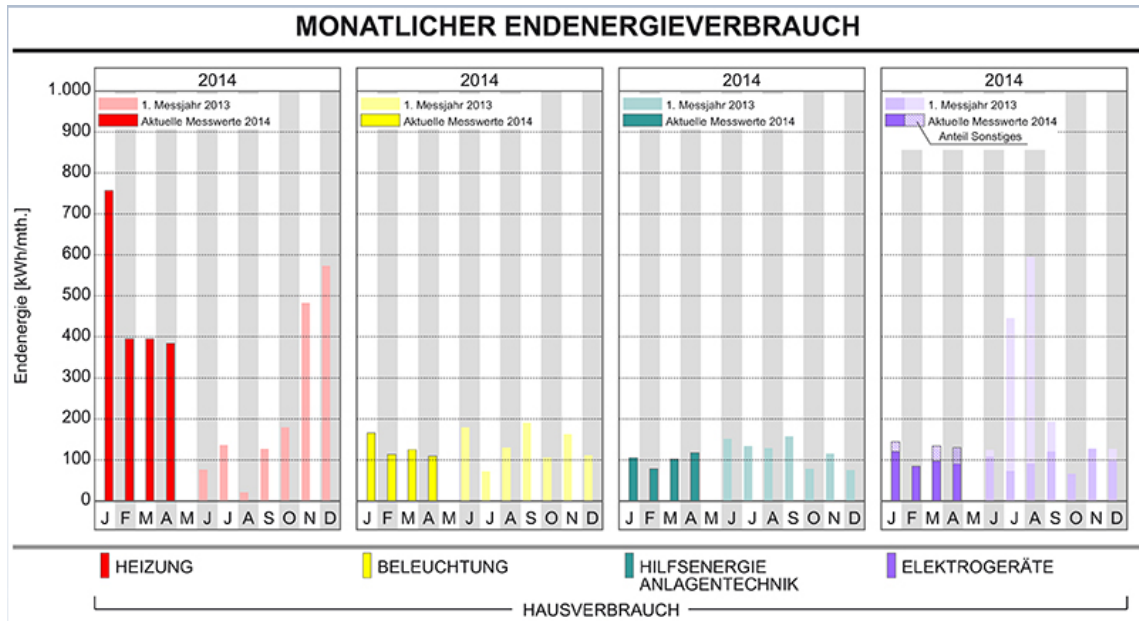


Abbildung 9.1.9-9. Weber Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus_node.html)

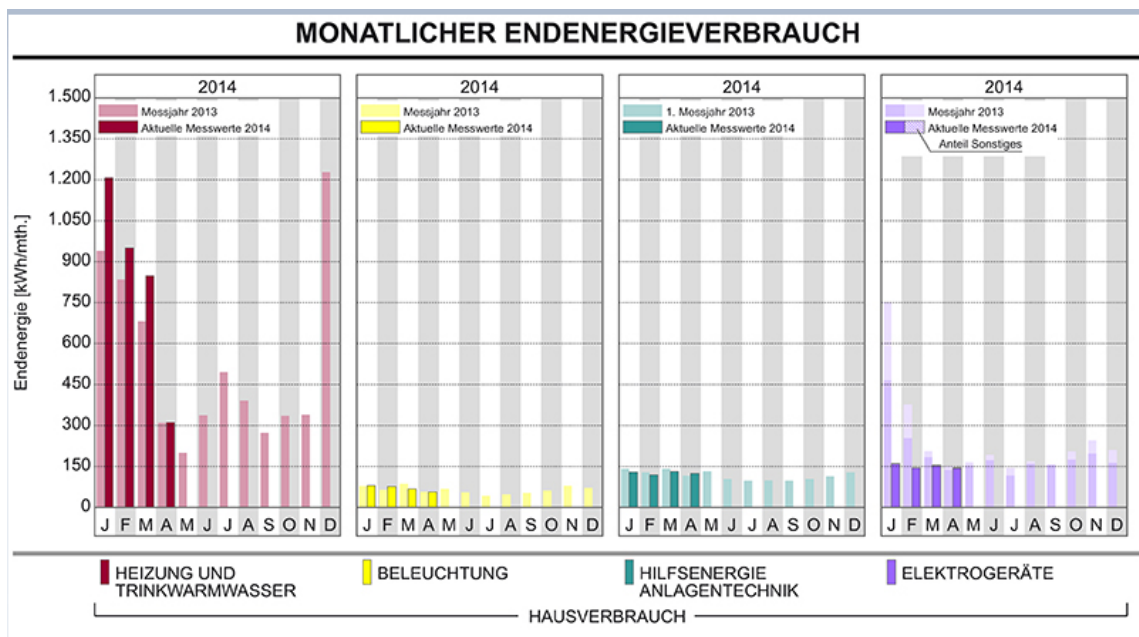


Abbildung 9.1.9-10: Bien-Zenker, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker_node.html)

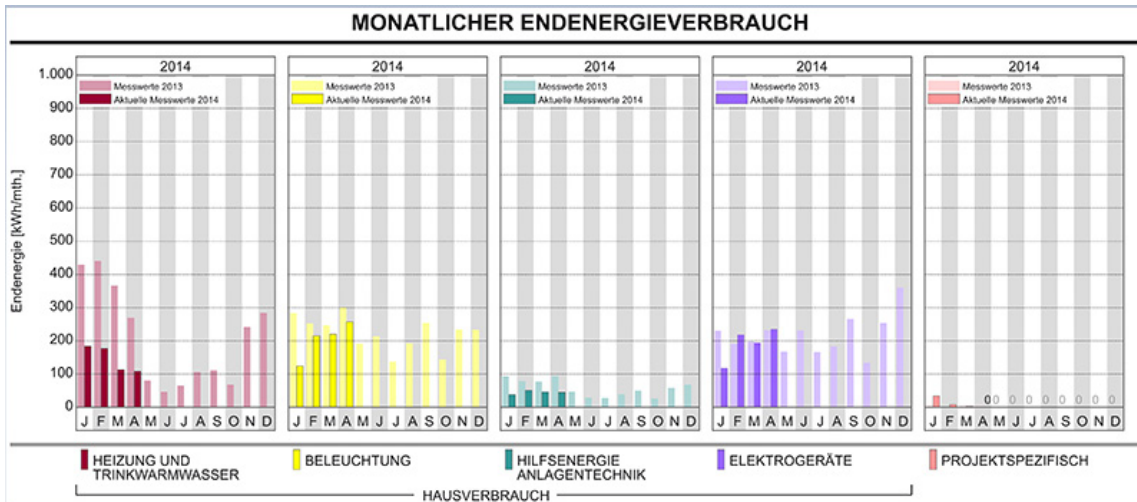


Abbildung 9.1.9-11: Finger Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger_node.html)

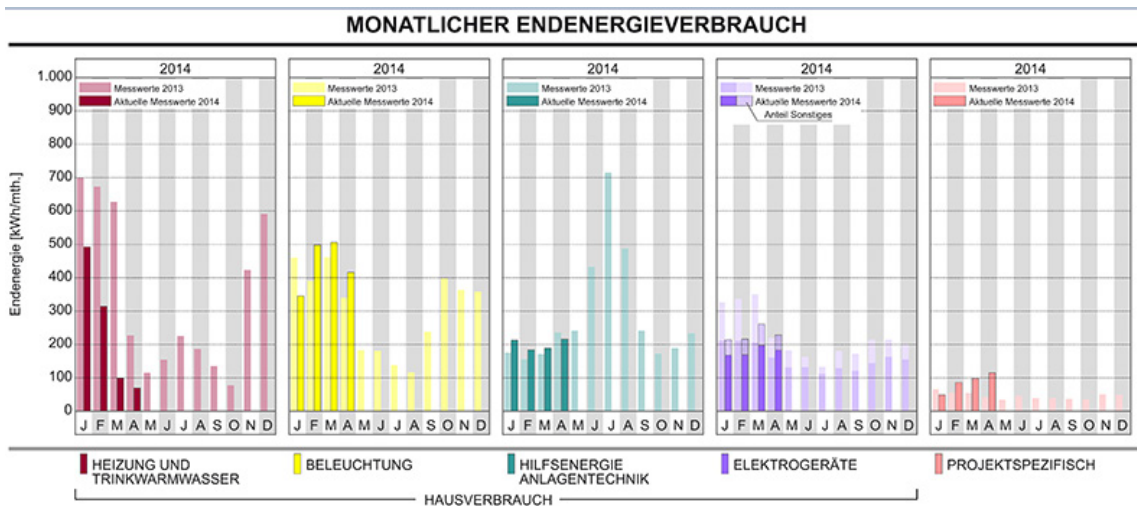


Abbildung 9.1.9-12: Huf Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf_node.html)

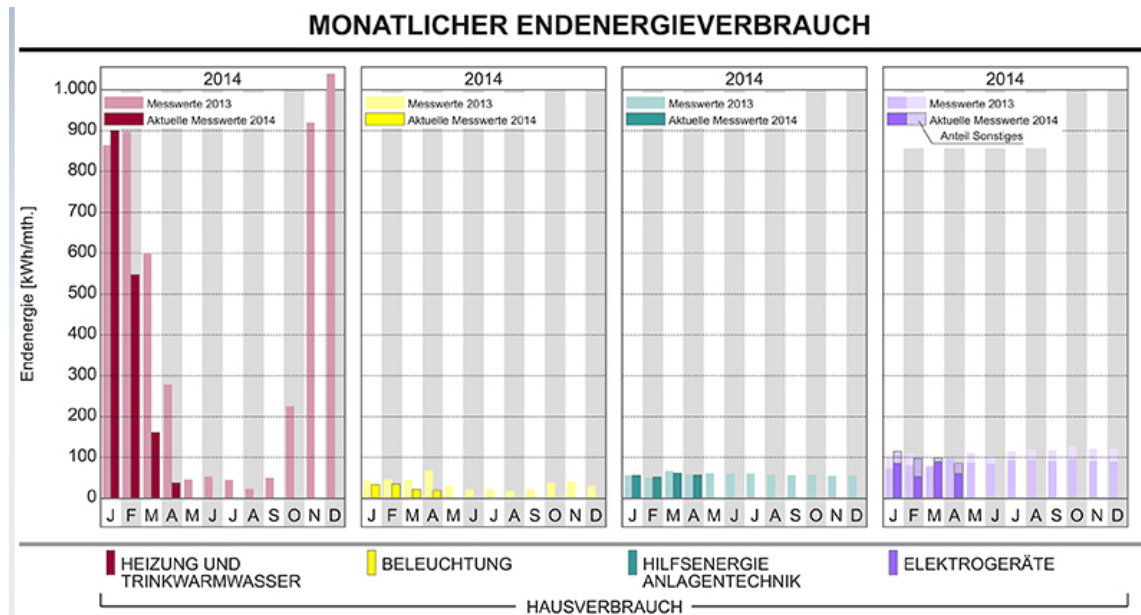


Abbildung 9.1.9-13: Schwörer Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schwoerer/schwoerer\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schwoerer/schwoerer_node.html)

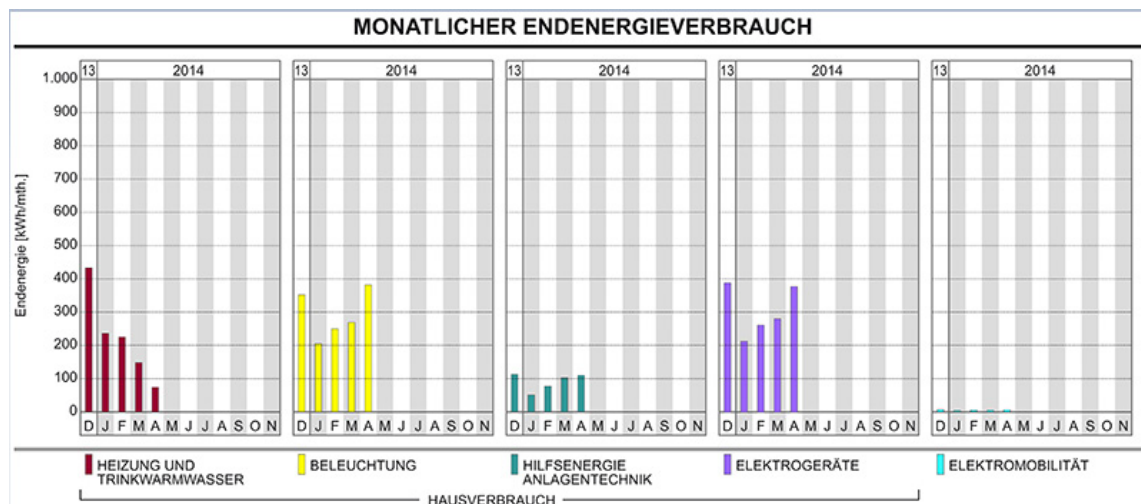


Abbildung 9.1.9-14: Lux Haus, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus_node.html)

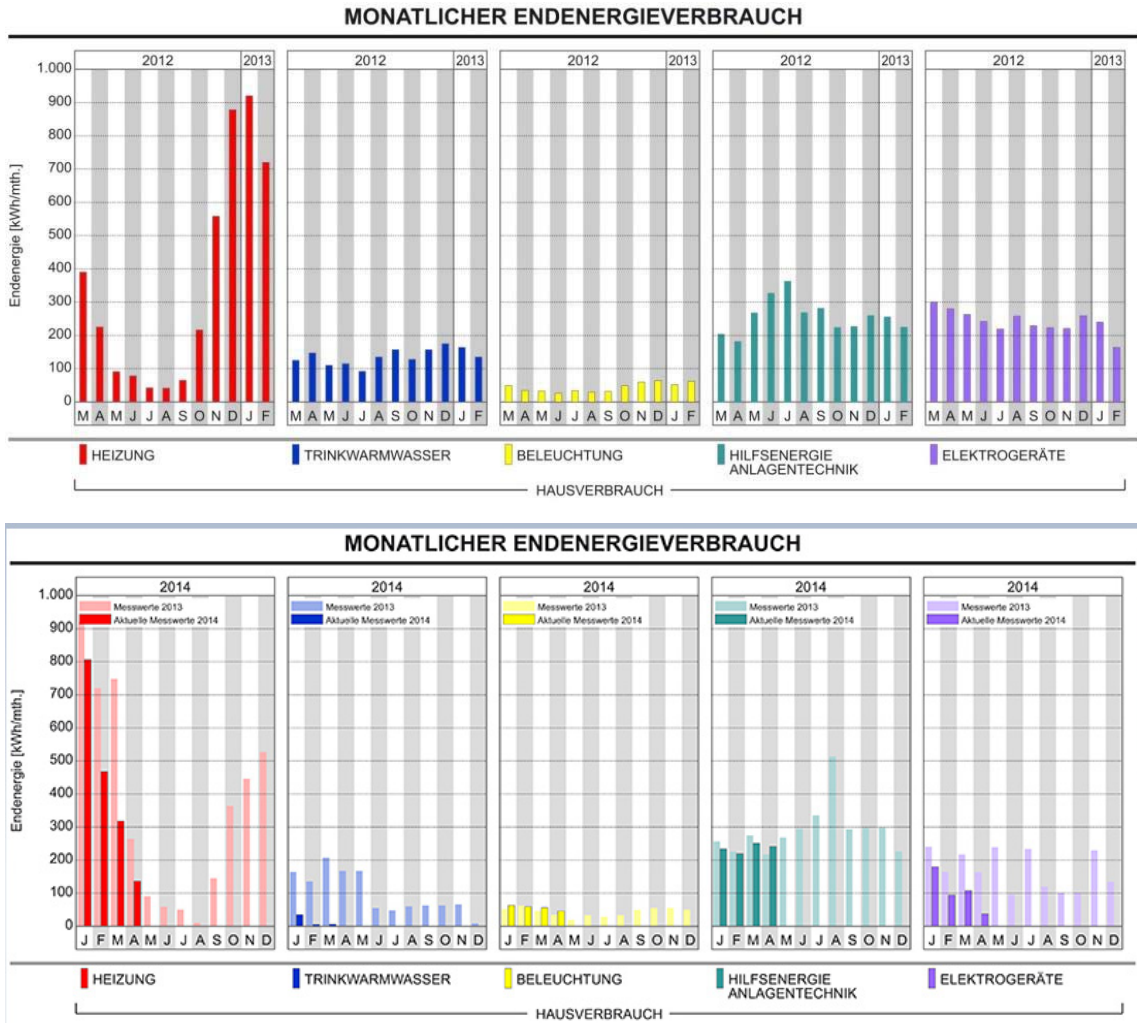


Abbildung 9.1.9-15: BMVBS Haus Berlin, Messergebnisse monatlicher Endenergieverbrauch, Quelle: [http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin_node.html)

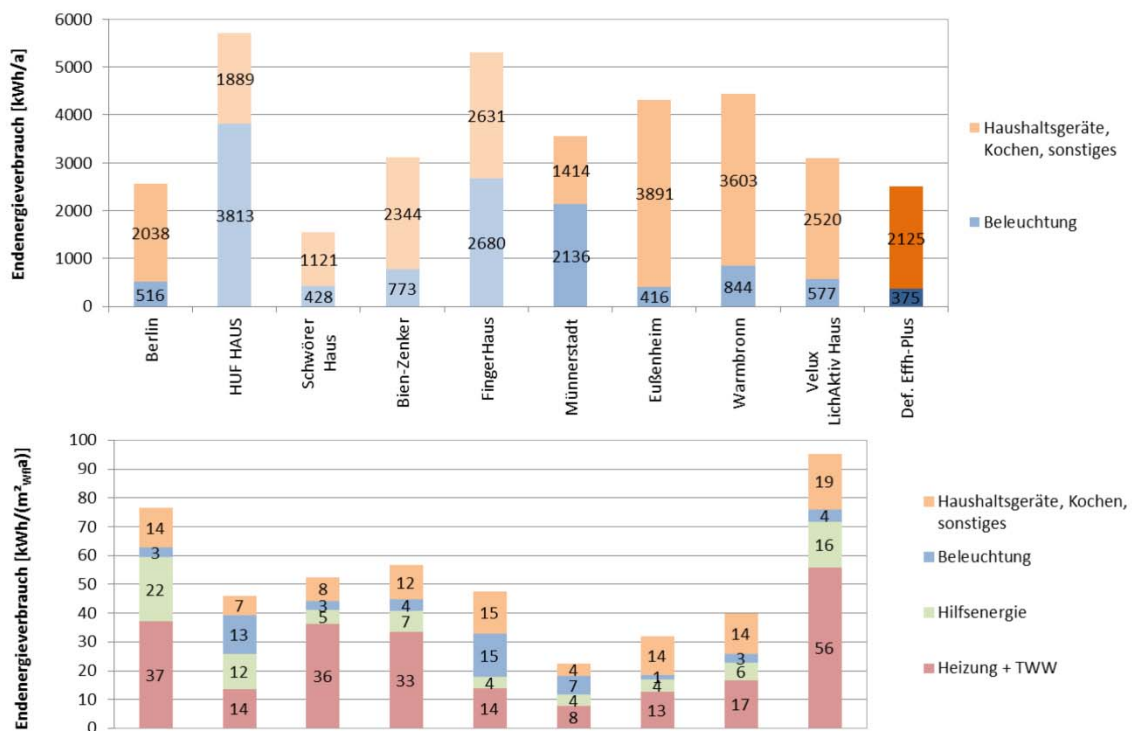


Abbildung 9.1.9-16: Vergleich gemessener Endenergieverbrauch 2013 [Bergmann, 2014]

## Auswertung der Messergebnisse vom Berliner Effizienzhaus (Messzeitraum März 2012 bis Februar 2013)

Während des oben genannten Messzeitraums wurde das Berliner Effizienzhaus von einer Testfamilie bewohnt und im Rahmen eines Monitoringprogramms wird das Haus vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik messtechnisch erfasst und energetisch bewertet. In dem Bericht "Messtechnische und energetische Validierung des BMVBS-Effizienzhaus Plus in Berlin" wurden die ersten Zwischenergebnisse vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik veröffentlicht. [Erhorn et al., März 2013]

Die Vorberechnung des Energiebedarfs des Gebäudes nach DIN V 18599 ergab insgesamt einen Bedarf von 6.992 kWh/a, der sich aus den folgenden Komponenten zusammensetzt.

- Betrieb der Wärmepumpe zur Beheizung und Warmwasserbereitung: 2.217 kWh/a
- Hilfsenergiebedarf für den Betrieb der Regelung, Pumpen und Ventilatoren des Heizungs-, Warmwasser- und Lüftungssystems: 2.275 kWh/a
- Haushaltsgeräte: 1.625 kWh/a
- Haushaltsprozesse: 500 kWh/a
- Beleuchtung: 375 kWh/a
- (Summe: 6.992 kWh/a)

Die PV-Anlage (Dach und Südfassade) soll nach der Vorberechnung einen Stromertrag von insgesamt 16.625 kWh/a erzielen. Somit ergibt sich ein berechneter Stromüberschuss von 9.633 kWh/a. Für die Elektromobilität wurde ein Strombedarf von 6.000 kWh/a angenommen, sodass sich immer noch ein Überschuss von 3.633 kWh/a ergibt. [Erhorn et al., März 2013, S. 8]

Die Messungen ergaben für den Stromverbrauch folgende Ergebnisse:

- Stromverbrauch für den Hausbetrieb:
  - Heizwärmebereitstellung mit der Wärmepumpe: 4.224 kWh
  - Trinkwarmwasserbereitung mit der Wärmepumpe: 1.641 kWh
  - Hilfsenergie der Anlagentechnik: 3.099 kWh
  - Beleuchtung: 526 kWh
  - Haushaltsgeräte und Haushaltsprozesse: 2.910 kWh

(Summe: 12.400 kWh)
- Stromverbrauch für projektspezifische Geräte: 3.984 kWh  
(z.B. Infomonitor, Außenbeleuchtung, Energieverbräuche für sonstige Forschungsprojekte im und am Haus etc.)
- Stromverbrauch für Elektromobilität: 3.974 kWh/a [Erhorn et al., März 2013, S. 13-14]

Den gemessenen Stromverbräuchen für das erste Jahr, stand eine gemessene Stromgewinnung durch die Photovoltaikanlage von 13.306 kWh gegenüber, sodass sich ein Überschuss von 906 kWh ohne den projektspezifischen Stromverbrauch und ohne den Verbrauch durch die Elektromobilität ergab. 6.555 kWh konnten von dem erzeugten Strom der PV-Anlage selbst genutzt werden. [Erhorn et al., März 2013, S. 15]

Beim Vergleich der berechneten Bedarfswerte mit den gemessenen Verbrauchswerten ergeben sich die folgenden Abweichungen bei den Stromverbräuchen für den Hausbetrieb.

- Wärmepumpe: 5.865 kWh (Messung) anstelle 2.217 kWh (Planung)  
-> 3.648 kWh wurden mehr verbraucht als berechnet
- Hilfsenergien: 3.099 kWh (Messung) anstelle 2.275 kWh (Planung)  
-> 824 kWh wurden mehr verbraucht als berechnet
- Beleuchtung: 526 kWh (Messung) anstelle 375 kWh (Planung)  
-> 151 kWh wurden mehr verbraucht als berechnet
- Haushalt: 2.910 kWh (Messung) anstelle 2.125 kWh (Planung)  
-> 785 kWh wurden mehr verbraucht als berechnet

(Summe: 12.400 kWh (Messung) anstelle 6.992 kWh/a (Planung))  
-> (5.408 kWh wurden mehr verbraucht als berechnet)

Der Energieverbrauch war somit in Summe etwa 75 % höher als der berechnete Wert. Die größten Abweichungen zeigen sich dabei bei den Stromverbräuchen für den Wärmepumpenbetrieb. Die anderen Verbraucher weichen verhältnismäßig gering mit etwa 20 % von den berechneten Werten ab. [Erhorn et al., März 2013, S. 16]

Beim Stromertrag wurden insgesamt 3.319 kWh (etwa 20 %) weniger gemessen als vorher berechnet (Messung: 13.306 kWh/a, Berechnung: 16.625 kWh/a. Bei der Betrachtung der meteorologischen Verhältnisse während des Messzeitraums am Standort Berlin zeigen sich die klimabedingten Abweichungen gegenüber dem langjährigen Mittel nach EnEV. „Klimabedingt war die Anzahl der Sonnenstunden am Standort Berlin während der Sommermonate (Juni bis August 2012) um 14% geringer als das Mittel der letzten 10 Jahre. Über das gesamte



Jahr war die Anzahl der Sonnenstunden um 40% geringer als das Mittel der letzten 10 Jahre.“  
 [Erhorn et al., März 2013, S. 11-12]

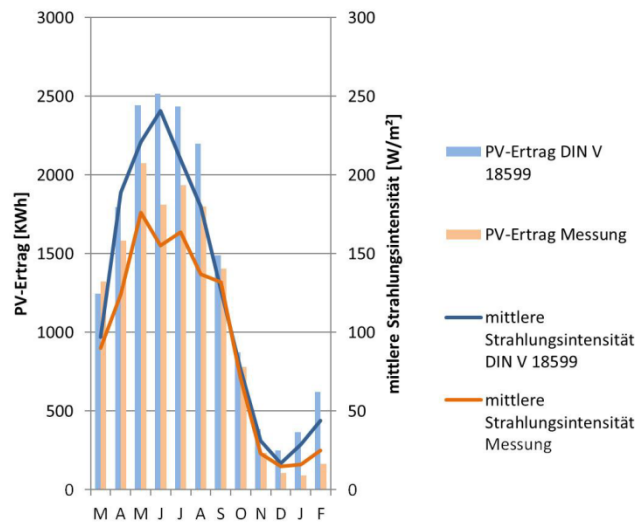


Abbildung 9.1.9-17: Vorherberechnete und gemessene Strahlungsintensitäten und Stromerträge aus den Photovoltaikanlagen [Erhorn et al., März 2013]

Die Ursache für den um etwa 75 % höheren Energieverbrauch liegt nach der Auswertung des Fraunhofer-Institut für Bauphysik „im Wesentlichen an Ineffizienzen im Bereich der Heizanlage aufgrund deutlich höherer Systemtemperaturen als geplant, an der nicht bedarfsgeregelten Außenluftmenge der Lüftungsanlage und an höheren Stromverbräuchen als angenommen im Haushaltsbereich.“ [Erhorn et al., März 2013, S. 3]

Mit Hilfe des Monitorings konnten Verbesserungspotentiale analysiert werden und man entschied sich dazu Umbauten zur Steigerung der Energieeffizienz im Bereich der Haustechnik durchzuführen. „Eine voraussichtlich um 15 Prozent effizientere regelbare Wärmepumpe, und ein Wärmespeicher mit 500 statt 50 Litern mit integriertem 39-Liter-Durchlauferhitzer statt 288-Liter-Warmwasserspeicher wurden eingebaut sowie die komplexe Regeltechnik überarbeitet. Die Lüftungsanlage, bisher im energiefressenden Dauerbetrieb, arbeitet jetzt gedrosselt oder taktet, wenn die Luft im Haus gut genug ist.“ [Morhart, 2014] Ab Mai 2014 ist eine zweite Testfamilie eingezogen und wird ebenfalls von einem Monitoring begleitet, sodass die Effizienz der Verbesserungsmaßnahmen ausgewertet werden kann.

## 9.2 AP 2 Gründung und Bodenplatte

GRÜNDUNG / BODENPLATTE	Effizienz	Suffizienz	Konsistenz
<b>Herstellung / Errichtung</b>	Auswahl ressourcenschonender Baustoffe		Auswahl von Baustoffen, die in Ihrer Herstellung keine/möglichst wenig fossile Energieträger benötigen Auswahl von nachwachsenden Materialien
<b>Nutzung</b>	Vermeidung von Wärmebrücken Optimierung des U-Werts der Konstruktion	Verzicht auf Kellergeschoss	
<b>Entsorgung</b>	Verwendung von Materialkombinationen, die sich ohne großen Aufwand trennen lassen		Auswahl von recyclingfähigen Materialien

Abbildung 9.1.9-1: Strategien Gründung und Bodenplatte

### 9.2.1 Allgemeine Überlegungen

Einer der zentralen Ansätze des dem Forschungsprojekt zugrundeliegenden Wettbewerbskonzepts war es, bewusst auf die Errichtung eines Kellergeschosses zu verzichten, da dieses zwingend mit ressourcenintensiven Baustoffen verbunden wäre. Vor diesem Hintergrund beschränkt sich der Inhalt dieses Arbeitspakets tatsächlich auf die Ausführung einer Bodenplatte einschliesslich ggf. erforderlicher Fundamente.

Bodenplatten von Einfamilienhäusern werden im Allgemeinen aus Stahlbeton hergestellt. In den letzten Jahren hat sich insbesondere für Einfamilienhäuser die Konstruktionsweise der Flachgründung durchgesetzt, bei der eine Bodenplatte ohne Fundamente auf einer Schaumglasschotterschicht erstellt wird. Dies bietet aus ökologischer Sicht vor allem den Vorteil, dass der erforderliche Ressourceneinsatz deutlich minimiert werden kann.

Dennoch verbleibt für das +++Haus eine Menge von ca. 14,5 m<sup>3</sup> Stahlbeton und damit ein Treibhauspotential von 4.082 kg CO<sub>2</sub>-äqv.. Aufgabenstellung im Rahmen dieses Arbeitspakets war es daher zu untersuchen, ob eine weitergehende Substitution der Betonanteile durch nachwachsende Baustoffe (insbesondere Holz) möglich ist. Hierzu gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten, die untersucht wurden und im Folgenden dokumentiert und erläutert werden:

- aufgeständerte Holzkonstruktion
- erdberührte Massivholz-Bodenplatte

### 9.2.2 Einsparpotential der Bodenplatte

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m²	Kosten-differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Brett-sperholz 100mm</b>	-16,73 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,000006 kg R11 äqv.	-0,022 kg SO <sub>2</sub> äqv.	-0,0112 kg Phos äqv.	-0,0097 kg Ethen äqv.	-0,00009 kg Sb äqv.	-378,45 MJ	-439,80 MJ	91,00 EUR	+1.105,00 EUR	-1.097,66 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-4.792,16 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,23 EUR	-29.078 MJ	-40.273 MJ
<b>Furnier-schicht-holz (LVL) 63mm</b>	6,08 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,000006 kg R11 äqv.	0,0706 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,014 kg Phos äqv.	0,00258 kg Ethen äqv.	0,000008 kg Sb äqv.	298,93 MJ	27,23 MJ	60,21 EUR	-896,35 EUR	395,20 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-3.299,30 kg CO <sub>2</sub> äqv.	geringere Kosten, Einsparung GWP	1.770 MJ	-9.424 MJ
<b>Hohl-kammer-element (Lignatur easy)</b>	-8,62 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,000004 kg R11 äqv.	0,064 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,0239 kg Phos äqv.	0,0177 kg Ethen äqv.	0,000013 kg Sb äqv.	-20,47 MJ	-243,50 MJ	95,75 EUR	+1.413,75 EUR	-565,56 kg CO <sub>2</sub> äqv.	4.260,06 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,33 EUR	-15.828 MJ	-27.022 MJ
<b>Stahlbe-ton 200mm</b>	56,31 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000 kg R11 äqv.	0,1007 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,0128934 kg Phos äqv.	0,0059179 kg Ethen äqv.	0,000071 kg Sb äqv.	300,02 MJ	195,28 MJ	74,00 EUR		3.694,50 kg CO <sub>2</sub> äqv.			12.812 MJ	

Abbildung 9.2.2-1: Ökobilanzdaten Bodenplatte

Um das in Bezug auf die Bodenplatte überhaupt bestehende Einsparpotential grob quantifizieren zu können, wurden in einem ersten Schritt zunächst die in der oben stehenden Tabelle aufgeführten Konstruktionsmaterialien hinsichtlich Ihrer Umweltwirkungen verglichen. Hieraus ergibt sich theoretisch ein maximales Einsparpotential von ca. 2,1 t CO<sub>2</sub>-äqv. Diese Art der Betrachtung dient lediglich einer groben Orientierung. Es wurden daher lediglich die Hauptbestandteile der Bodenplattenkonstruktion berücksichtigt. Unterschiede in die jeweils bedingte Form der Abdichtung, Fundamentierung etc. wurden zunächst vernachlässigt.

### 9.2.3 Aufgeständerte Holzkonstruktion

Die einfachste und bautechnisch sicherste Form die Bodenplatte durch eine Holzkonstruktion zu ersetzen ist es, diese aufzuständern und so für eine "Unterlüftung" der Konstruktion zu sorgen und diese somit vor feuchte zu schützen. Damit eine Durchströmung des Hohlraums unter der Platte sichergestellt werden kann ist diese sicherlich 30 - 50 cm aufzuständern. Um zu verhindern, dass aufsteigende Feuchtigkeit oder Spritzwasser an die Holzkonstruktion gelangt, so ist diese unterseitig mit einer wasserabweisenden, aber diffusionsoffenen Bahn zu schützen. Dies kann beispielsweise eine Fassadenbahn sein. Aufgrund der Lage im Gebäude ist in Folge der Druckverhältnisse mit einem Feuchteeintrag in folge Konvektion auch bei geringen Undichtigkeiten nicht zu rechnen. Wird die Konstruktion raumseitig nicht mit einer Dampfsperre geschützt, was analog zu einer Aussenwandkonstruktion nicht zwingend erforderlich ist, so kommt es lediglich zu Wasserdampfdiffusion, die aber bei innen und aussen diffusionsoffenem Aufbau nicht zu Schäden führen sollte. In manchen Fällen kann es sogar aufgrund des dann verminderten Rücktrocknungspotentials nachteilig sein, innen eine dampfbremsende Schicht anzuordnen, was wiederum für einen dampfdiffusionsoffenen Aufbau spricht.

Nimmt man, dass eine Aufständering vor dem Hintergrund des gewählten Tragsystems auf Punktfundamente erfolgt, so ergibt sich bei einer frostfreien Einbindetiefe von 0,8 m, einer Aufständeringhöhe von 0,5 m, Fundamentabmessungen von 0,75 x 0,75 m und einer Fundamentanzahl von 16 Stück dennoch eine Stahlbetonmenge von ca. 11,7 m<sup>3</sup>. Eine flachgegründete Stahlbetonplatte von 20 cm Stärke würde demgegenüber auf eine Menge von ca. 14,0 m<sup>3</sup> Stahlbeton kommen. Somit wäre zum einen die Materialersparnis nur äußerst gering. Das maximal mögliche Einsparpotential von ca. 3,7 t CO<sub>2</sub>-äqv. wird nur zu ca. 16% ausgeschöpft. Des weiteren gingen mit der aufgeständerten Konstruktion deutliche Einschränkungen in Bezug auf die Barrierefreiheit und die Ästhetik des Gebäudes einher, was in Summe dazu geführt hat, dass diese Konstruktionsvariante für das +++Haus als nicht zielführend angesehen wurde.

### 9.2.4 erdberührte Massivholz-Bodenplatte

Als zweite mögliche Konstruktionsart wurde untersucht, inwieweit es möglich ist eine Holzkonstruktion erdberührt auszuführen. Konkret wurde hierbei daran gedacht, die Bodenplatte aus massiven Holzbaustoffen (z.B. Brettsperholz oder Furnierschichtholz auf einer entsprechenden Abdichtung als Bodenplatte auszuführen. Dies erscheint zunächst einmal im Widerspruch zu den allgemein angewendeten Konstruktionsprinzipien des Holzbaus zu stehen. Wie aber [Zirkelbach et al., 2010] am Beispiel eines Sockeldetails im Rahmen einer auf hygrothermischen Simualtionen beruhenden Untersuchung aufzeigen, ist es auch wenn es sich dabei um Sonderlösungen abseits der allgemein anerkannten Regeln der Technik handelt, nicht grundsätzlich ausgeschlossen Bauteile aus Holz so zu konstruieren, dass sie in Berührung zum Erdreich stehen können. Auch für diese Art der Konstruktionen gilt zunächst, dass es aufgrund der Höhenlage im Gebäude zu keinerlei Schäden in Folge von Undichtigkeiten

und Konvektion kommen kann, da die Strömungsrichtung aufgrund der Druckverhältnisse immer von aussen nach innen anliegen würde. Ein Feuchteeintrag ist in diese Richtung jedoch zumindest für die kritische Heizperiode nicht möglich. Ordnet man unter der Bodenplatte, wie bei einer Flachgründung, weiterhin eine kapillARBrechende Schicht aus Schaumglasschotter an, so kann an die Unterseite in der Regel auch keine größere Menge an Wasser gelangen. Das Risiko einer Durchfeuchtung durch Eintrag von Oberflächenwasser von aussen nach innen kann daher für die Bodenplatte ebenfalls als sehr gering bewertet werden. Die Sockelzonen sind was dies angeht wesentlich exponierter und stellen das größere Risikopotential dar. Das größte Risiko besteht daher ausschließlich in Bezug auf eine Wasserdampfdiffusion. Für den Winterfall ist dies zunächst unkritisch, bei dem beschriebenen Aufbau die Dämmschicht unter der Abdichtung angeordnet ist und feuchte Innenraumluft daher nicht an kalte Bauteile gelangen kann. Der Sommerfall, in dem die im Vergleich zum Innenraum höhere Bodenfeuchte nach innen diffundieren könnte, ist daher am kritischsten. Gelingt es zum Schutz der Bodenplatte aber eine sehr zuverlässig wasser- und diffusionsdichte Schicht unterhalb der Massivholzkonstruktion anzuordnen, so zeigen auch die Ergebnisse von [Zirkelbach et al., 2010], dass eine derartige Konstruktion durchaus ausführbar erscheint. Ein derartiger Schutz kann für das +++Haus beispielsweise mit einer aus Einzelbahnen hergestellten und dauerhaft verschweißten Schicht aus Polyolefinen (FPO) hergestellt werden. Auch eine Abdichtung aus PVC-Bahnen erscheint hier als möglich, auch wenn die ökologischen Eigenschaften im Vergleich zu FPO bei ähnlichen Kosten deutlich nachteiliger sind. Angesichts der geringen Grundfläche erscheint es als durchaus ausführbar, die Abdichtungsbahnen zunächst auf den Fundamenten und der Glasschaumschotter auszubreiten und miteinander zu verschweißen, bevor die Massivholzelemente aufgelegt werden. Führt man die FPO Bahn auf der Aussenseite der Aussenwand bis über den Spritzwasserbereich hinaus, empfiehlt es sich nach den Erkenntnissen von [Polleres, 2010] auf der Innenseite der Aussenwand eine Dampfsperre 10 cm höher zu ziehen, als die Abdichtung auf der Aussenseite der Wand. Um das geringe Risikopotential dieser Bauweise weiter zu senken, kann es ggf. ratsam sein, die tragenden Aussenwände und Innenstützen nicht auf die Bodenplatte aufzusetzen, sondern vielmehr tragenden Bauteile und Bodenplattenelemente parallel auf die Punktfundamente aufzulegen. Im Schadensfall könnten dann immerhin Bodenplattenelemente ausgetauscht werden, ohne dass hiervon andere Bauteile abgefangen werden müssten.

Die für die Fundamentierung erforderliche Stahlbetonmenge sinkt infolge der entfallenden Aufständerrhöhe zwar auf ca. 7,2 m<sup>3</sup> ab, liegt damit aber immer noch bei über 50% der flachgegründeten Stahlbetonplatte. Eine weitere Absenkung wäre nur möglich, wenn es gälänge, die Holzmassivbodenplatte aus einem Stück zu fertigen und fundamentfrei auf eine Glasschaumschotterschicht aufzulegen. Dies ist jedoch weder aus produktionstechnischen noch transportwirtschaftlichen Gründen denkbar und auch unter statischen Gesichtspunkten schwierig.

Vor diesem Hintergrund und aufgrund der Tatsache, dass es sich weiterhin um eine absolute Sonderkonstruktion mit entsprechenden Restrisiken und auch wirtschaftlichen Nachteilen handelt, wurde für die weitere Konzeption des +++Hauses für alle Konstruktionsvarianten eine flachgegründete Stahlbetonbodenplatte angenommen.

## 9.2.5 Optimierungspotentiale von Stahlbeton

### Recyclingbeton

Ein Ansatz den Stoffkreislauf von Stahlbeton zu optimieren besteht in der Möglichkeit Recyclingbeton zu verwenden. Nach Angaben von [ifeu, 2015] werden jährlich, weltweit etwa 250 Mio. t Kies und Sand sowie 230 Mio. t Naturstein zur Betonproduktion abgebaut. Mineralischen Bauschutt ersatzweise als Zuschlag zu verwenden, stellt eine der hochwertigsten Recyclingmöglichkeit für derartige Materialien dar. Ansonsten wird mineralischer Bauschutt fast ausschliesslich als Straßenunterbau verwendet. Wie viel Recyclingmaterial zugeschlagen werden darf, regelt die entsprechende Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton [DAfStb, 2010]. So dürfen in den im Hochbau üblichen Betonsorten bis zu 45 Vol.% Steine eingesetzt werden, die aus gebrochenem Altbeton und Mauerwerk hergestellt wurden [ifeu, 2015].

Insofern stellt der Ansatz einen wichtigen Beitrag dazu da, mit natürlichen Rohstoffvorkommen sparsam umzugehen. In Bezug auf die Ökobilanz ergeben sich, wie [Stengel et al., 2007] nachweist, allerdings keine Vorteile. In den meisten Umweltkategorien weist Recyclingbeton im Vergleich zu Normalbeton nahezu gleiche Werte auf. In Bezug auf das bodennahe Ozonbildungspotential kommt es sogar zu geringfügig höheren Werten.

Somit lässt sich resümieren, dass eine Verwendung von Recyclingbeton aus Sicht der Ressourceneffizienz zwar seine Berechtigung hat und demnach erstrebenswert ist. Nennenswerte Auswirkungen auf die Ökobilanz ergeben sich hingegen, jedoch nicht, weshalb im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojekts nicht weiter zwischen Normal- und Recyclingbeton unterschieden wurde.

### Ökobeton

Bei der Herstellung von Portlandzementklinker als Bindemittel für Beton entstehen auf zwei unterschiedlichen Wegen enorme Mengen an CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zum einen werden im Herstellungsprozess rohstoffbedingt je Tonne Klinker 520 kg CO<sub>2</sub> aus der Entsäuerung von 1,2 Tonnen Kalkstein freigesetzt [Mayer et al., 2013, S. 317]. Zum anderen werden in Folge des für den Herstellungsprozess großen Energieeinsatzes weitere 330 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. je Tonne Klinker emittiert [Mayer et al., 2013, S. 318]. Um die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Betonherstellung entscheidend zu verbessern, wird daher nach alternativen Herstellungsprozessen geforscht:

*Um die Energieeffizienz bei der Zementherstellung zu erhöhen und gleichzeitig die CO<sub>2</sub>-Bilanz zu verbessern, verfolgt die Zementindustrie mehrere Strategien: Zum einen wird versucht, den Wirkungsgrad des Produktionsprozesses zu steigern. Allerdings bestehen hier nur noch geringe Möglichkeiten [VDZ 2005], da der Zementherstellungsprozess bereits über die letzten Jahre energetisch immer weiter optimiert wurde. Gleichzeitig werden verstärkt Sekundärbrennstoffe mit hohen, klimaneutralen biogenen Anteilen eingesetzt. Beide Maßnahmen sind aber nicht geeignet, die mit dem Rohstoff Kalkstein verknüpften Emissionen und Energieaufwendungen zu minimieren. Karbonatfreie natürliche oder industrielle Rohstoffe mit den hohen erforderlichen Calciumanteilen, die alternativ zu Calciumkarbonat eingesetzt werden könnten, sind nicht in ausreichenden Mengen verfügbar.*

*Ein weiterer Weg, die Klimabilanz zu verbessern, ist die Produktion von Kompositzementen mit abgesenkten Gehalten an Zementklinker. In diesen Zementsorten wird ein Teil des Portlandzementklinkers durch industrielle Nebenprodukte wie Hüttensand, Flugasche oder natürliche Stoffe wie Trass oder Kalksteinmehl ersetzt. Auch der Einsatz von thermisch aktivierten Tonen als Zementzumahlstoff wird derzeit untersucht. Die regional und konjunkturell*

*stark unterschiedliche Verfügbarkeit all dieser Stoffe führte zu mittlerweile 27 verschiedenen Zementsorten im europäischen Regelwerk. Portlandzementklinker ist in Kompositzementen als aktivierende und Frühfestigkeit besteuernde Komponente nötig.*

*Die Herstellung von bekannten Zementen bedingt also notwendigerweise immer einen gewissen Ausstoß von Kohlendioxid. Die Mengen sind im Rahmen des Handels mit Emissionsrechten mittlerweile gut dokumentiert. Laut dem europäischen Zementherstellerverband CEMBURO sind „diese Emissionen [sind] grundsätzlich nicht verringerbar – es gibt kein technisches Potenzial sie zu reduzieren“. Aus diesem Grund wird international nach alternativen hydraulischen Bindemitteln, insbesondere mit niedrigerem Calciumoxidgehalt, gesucht.*

*[Mayer et al., 2013, S.318]*

Die Verwendung von alternativen hydraulischen Bindemitteln scheint daher einer der vielversprechendsten Ansätze zu sein. Die Celitement GmbH [Celitement, 2015] ist mit entsprechenden Versuchsanlagen mittlerweile in der Lage Produktionsmengen von ca. 100kg pro Tag herzustellen. Dies für Labormaßstäbe zwar schon beachtlich, von einem industriellen Herstellungsverfahren ist man damit allerdings noch ein großes Stück entfernt. Das Potential ist jedoch erheblich. Nach [Mayer et al., 2013, S.329] kommt es bei der Herstellung von Celitement nur noch zu CO<sub>2</sub>-Äqv. Emissionen von ca. 481 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. je Tonne, was etwa einer Halbierung (ca. 53%) entspricht.

Somit lässt sich zusammenfassend feststellen, dass das Potential von Ökobeton erheblich ist, die Produktionsprozesse der hierfür erforderlichen alternativen, hydraulischen Bindemittel aber noch nicht im industriellen Maßstab anwendbar sind und Ökobeton daher aktuell noch nicht als marktfähiges Produkt zur Verfügung.

Da es aus Budgetgründen für das +++Haus absolut erforderlich ist, auf marktgängige, wirtschaftliche Produkte zurückzugreifen, wurden die Möglichkeiten von Ökobeton im Rahmen des Forschungsprojekt aus den oben genannten Gründen nicht weiter untersucht.

## 9.3 AP 3 Tragstruktur

### 9.3.1 Ausgangssituation

Mit dem Wettbewerbsbeitrag [Dortmund, 2013], der dem Forschungsprojekt zu Grunde liegt wurde ein sehr kompaktes, freistehendes, zweigeschossiges und im Grundriss quadratisches Gebäudevolumen definiert. Der Entwurf ist mit einem lichten Innenmaß von 8,1 x 8,1 m und einer max. möglichen Nutzfläche von ca. 120 m<sup>2</sup> im Vergleich zu anderen Einfamilien-Fertighäusern in Bezug auf die zur Verfügung stehende Grundfläche vergleichsweise klein, bildet aber dennoch das für eine vierköpfige Familie typische Raumprogramm mit bis zu 4 Individualräumen im Obergeschoss und einer ausreichenden Fläche für die Funktionen Wohnen, Essen und Kochen ab. Dieses Ziel wurde im Entwurfsprozess mit Hilfe eines iterativen Prozesses erreicht, in dem interne Verkehrsflächen und Raumgrößen und -proportionen schrittweise immer weiter optimiert wurden. Neben den optimierten Innenabmessungen wurde der Grundriss so organisiert, dass in der Gebäudemitte die Möglichkeit besteht vier Stützen so anzuordnen, dass sie die Grundrissflexibilität nicht negativ beeinflussen, gleichzeitig aber eine Minimierung der Spannweiten auf ein extrem wirtschaftliches Maß von ca. 3,15 m ermöglichen. Von diesen Vorgaben hängt ein Großteil der Suffizienzstrategien des Projekts ab, die wiederum einen wesentlichen Anteil des Nachhaltigkeitskonzepts des Gebäudes ausmachen. Vor diesem Hintergrund werden sowohl die Aussenabmessungen der wärmeübertragenden Hülle, als auch die innere Raumaufteilung des Entwurfskonzepts als fixer Aus-

gangspunkt betrachtet, deren Qualitäten im Rahmen der technischen Ausarbeitung des Forschungsprojekts zu sichern sind. Zunächst wurde daher im Rahmen des Forschungsprojekts untersucht, welche grundsätzlichen Bauweisen sich für das +++Haus Konzept eignen. Wie bereits im Förderantrag beschrieben wurden dabei im Hinblick auf die Einbeziehung der Herstellungsphase ausschließlich Holzbauweisen untersucht bzw. ins Verhältnis zu einer mineralischen Referenzbauweise gesetzt. Die Bewertung eines Referenzgebäudes in mineralischer Bauweise war nicht Gegenstand der im Antrag beschriebenen Arbeitspakete, hat sich aber in der Bearbeitung als zwingend erforderlich herausgestellt, um die Vorteile des Holzbaus bewertbar und sichtbar machen zu können. Die Sinnhaftigkeit wird auch im AP 11 Ökobilanz deutlich, in dem die Ökobilanzen sowohl der Konstruktionsvarianten des +++Hauses als auch die eines Referenzgebäudes in Massivbauweise aus mineralischen Baustoffen dokumentiert wird.

### 9.3.2 Konstruktionsarten

#### Holzskellettbauweise

Die Holzskellettbauweise, bei der aus stabförmigen Elementen ein Tragwerk zusammengesetzt wird hat als größte Stärke Ihre hohe Flexibilität, da der Massenanteil der tragenden Bauteile an der Gesamtkonstruktion am geringsten ist. Bei einer reinen Skellettbauweise werden sowohl im Gebäudeinneren, als auch in der Fassadenebene Stützen angeordnet. Wandscheiben und/oder Kerne werden lediglich zur Aussteifung massiv ausgeführt. Der Raumabschluss erfolgt im Inneren in der Regel mit nichttragenden Innenwänden bzw. gegenüber dem Aussenraum mit nichttragenden Fassadenkonstruktionen. Bezogen auf das +++Haus würde es eine Skellettbauweise ermöglichen neben der Grundrissflexibilität auch eine Anpassbarkeit der Fassade herzustellen. Damit einhergehend erhöht sich bezogen auf die Aussenwand der Aufwand durch die separate Erstellung einer tragenden, einer raumabschließenden (und möglicherweise einer bekleidenden) Konstruktion. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass bei Einfamilienhäusern die Aussenwandebenen den überwiegenden Teil der tragenden Struktur bilden. Dies gilt im besonderen Maße für das extrem kompakte Volumen des +++Hauses.

#### Holzmassivbauweise

Die Holzmassivbauweise hat lange Zeit nur einen vergleichsweise geringen Anteil der allgemeinen Bauproduktion ausgemacht. Massiv bauen wurde üblicherweise mit mineralischen Baustoffen gleichgesetzt. Im Zuge der zunehmend in den Vordergrund tretenden Diskussion um graue Energie im Bauwesen gewinnen in den letzten Jahren jedoch auch massive Holzbautechnologien insbesondere im Wohnungsbau an Einfluss. Im Wesentlichen sind zu diesen Bauweisen die folgenden Technologien zu zählen: Brettstapelelemente, Brettsperrholzelemente und Dübelholzelemente. Die massiven Holzbausysteme gewinnen nicht zuletzt auch deshalb an Bedeutung, da sie insbesondere im mehrgeschossigen Bau Ihre Stärken infolge höherer Steifigkeiten und Massivität ausspielen können. Ein Bereich, dessen Rückeroberung durch den Holzbau in den letzten Jahren stark durch die Einführung der Muster-Holzbaurichtlinie [M-HFHolzR, 2004] im Zuge der Übernahme der Musterbauordnung [MBO, 2012] in die einzelnen Landesbauordnungen vereinfacht und somit beschleunigt wurde (wenn auch noch nicht in allen Bundesländern erfolgt).

Mit der Massivität der Bauweise geht bezogen auf die Außenwand eine eingeschränkte Veränderbarkeit einher. Andererseits sind massive Bauweisen vom Prinzip her fehlertolerantere Systeme, deren Anfälligkeit gegenüber Bauschäden systembedingt geringer ausfällt (auch



wenn die Fehlerquellen von mehrschaligen Aufbauten zum Beispiel im modernen Holzrahmenbau mit dampfdiffusionsoffenen Aufbauten und hohem Vorfertigungsgrad gut in den Griff zu bekommen sind). Des Weiteren wird massiven Bauweisen - ob gerechtfertigt oder nicht - oftmals eine größere Robustheit und Wertigkeit zugeschrieben. Bauherren, die sich mit Holzrahmenbauweisen aus Imagegründen nicht mit einem Holzgebäude anfreunden können, lassen sich oftmals über Holzmassivbauweisen doch von den Vorteilen des Holzes überzeugen. Hierzu muss man ergänzen, dass sich dies jedoch vor allem auf eine weniger preissensitive Bauherrschaft bezieht, da mit dem Holzmassivbau in der Regel durchaus erst mal Mehrkosten sowohl gegenüber der Holzrahmenbauweise als auch ggü. eine mineralischen Bauweise verbunden sind. Ein weiterer Vorteil der Holzmassivbauweise ist, dass die Bauteiloberflächen in Sichtqualität hergestellt werden können und somit (zumindest für die Gebäudeklasse 1-3 bzw. Gebäude geringer Höhe nach den jeweiligen Landesbauordnungen) nicht zwingend mit Gipskartonplatten o.ä. bekleidet werden müssen.

## Holzrahmenbauweise

Bei der Holzrahmenbauweise handelt es sich streng genommen um eine hybride Konstruktionsart, bei der aus stabförmigen Elementen und aussteifenden Plattenwerkstoffen flächige Elemente mit Scheibenwirkung hergestellt werden. Aus diesem Grund handelt es sich um eine äußerst materialoptimierte und somit wirtschaftliche Bauweise, die sich aufgrund des sehr guten Verhältnisses von U-Wert zu Wandstärke und der damit einhergehenden Flächensparnis sehr stark insbesondere im Bereich von hochwärmedämmten Passivhäusern durchgesetzt hat. Im Bereich von Ein- und Mehrfamilienhäusern werden Holzrahmenbauwände in der Regel tragend ausgeführt. Im Bereich von mehrgeschossigen Hybridbauten werden Holzrahmenbauwände teilweise auch als nichttragende Aussenwandelemente vor z.B. einem Stahlbetonskelettbau eingesetzt. Bei einer tragenden Ausführung ist auch für diese Konstruktionsart eine Veränderbarkeit nur sehr bedingt bzw. nur unter hohem Kostenaufwand möglich. Was die Innenoberflächen angeht, werden Holzrahmenbauwände im Allgemeinen mit OSB Platten bekleidet, die der überwiegende Teil der Nutzer nicht als eine angemessene fertige Wandoberfläche akzeptieren dürfte. Aus diesem Grund werden die Wände in der Regel nachträglich mit Gipskartonplatten bekleidet. Gleichwohl ist es auch im Holzrahmenbau denkbar Wände mit einer höherwertigen inneren Oberfläche (z.B. Tischlerplatten, o.ä.) herzustellen und somit nicht zwingend zusätzlich bekleiden zu müssen. Im Detail wird dies im Arbeitspaket 4 - Aussenwände untersucht.

## Flexibilität der Fassade

Die Fassade stellt mit dem Dach das am stärksten beanspruchte Bauteil eines Gebäudes dar. Daraus resultierend handelt es sich um eins der kostenintensivsten Bauteile des Gebäudes. Insofern stellt sich die grundsätzliche Frage, wie die Anforderungen aus einer gewissen Flexibilität in der Nutzung des Gebäudes von der Fassade gelöst werden können bzw. mit welchen Konsequenzen dies verbunden ist. Prinzipiell sind hier zwei unterschiedliche Strategien denkbar: (a) eine bauliche Veränderbarkeit der Gebäudehülle, die es erlaubt auf sich ändernde spezifische Anforderungen zu reagieren und (b) eine möglichst nutzungsneutrale Aufteilung von geschlossenen und transparenten Flächen, die eine unterschiedliche Nutzung der Räume von vornherein ohne tatsächliche, bauliche Anpassungen ermöglicht. Für das +++Haus Konzept erscheint die zweite Variante die deutlich geeignetere Variante zu sein, was zum einen an dem engen Budgetrahmen des Gebäudes liegt. Aber auch von einem ökologischen Standpunkt aus betrachtet erscheint es sinnvoller, langlebige Bauteile zu entwickeln, die so konzipiert sind, dass sie Anforderungen vielleicht mit der ein oder anderen Einschränkung erfüllen, dafür aber sich ändernde Anforderungen in einem akzeptablen Rahmen bedienen, als hoch-

spezialisierte 100-Prozent-Lösungen zu schaffen, die bei jeder Änderung der Anforderung einen Austausch erfordern. Das Konzept des +++Hauses präferiert daher offene, robuste Systeme, die langlebig und flexibel nutzbar sind.

### allgemeine Bewertung der Konstruktionsarten

Aus den oben beschriebenen Überlegungen wurden im Rahmen der Projektbearbeitung sechs Bewertungskriterien erarbeitet:

- Veränderbarkeit der Gebäudehülle
- Grundrissflexibilität im Gebäudeinneren
- Wirtschaftlichkeit
- Wertigkeit / Robustheit der Konstruktion
- Oberflächenqualität Rohbau
- thermische Speichermasse

Auf dieser Basis wurden die Tragwerkskonzepte wie folgt bewertet:

	Veränderbarkeit Gebäudehülle	Grundrissflexibilität Gebäudeinneres	Wirtschaftlichkeit	Wertigkeit / Robustheit	thermische Speichermasse	Oberflächenqualität Rohbau
Holzskelettbauweise	+	+	-	+/-	-	+/-
Holzmassivbauweise	-	+	--	+	+	+
Holzrahmenbauweise	+/-	+	+	+/-	-	+/-

Abbildung 9.3.2-1: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Holzkonstruktionsprinzipien

Eine reine Skelettbauweise erscheint vor den Hintergrund, dass eine tatsächliche, bauliche Veränderbarkeit der Außenwand eine eher untergeordnete Rolle spielt und sich eine Veränderbarkeit im Gebäudeinneren mit kleinen Spannweiten und vier Stützen oder großen Spannweiten ohne Stützen mit allen Konstruktionsarten gut herstellen lässt für das +++Haus am wenigsten geeignet zu sein. Daher wurden reine Skelettbauweisen im Rahmen der weitestgehenden Untersuchungen des Forschungsprojekts nicht weiter untersucht. Für die Holzmassivbauweise und die Holzrahmenbauweise zeigt sich ein weitestgehend komplementäres Bild. Dort wo die eine Bauweise Ihre Stärken hat, wartet die andere mit Schwächen auf und umgekehrt. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des AP 04 Außenwand sowohl eine Variante in Holzmassivbauweise, als auch eine Holzrahmenbauweise, sowie eine weitere hybride Variante, die sich im Spannungsfeld zwischen Holzmassiv- und Holzrahmenbau einordnen lässt, untersucht. Dabei wurde insbesondere auf die Schwächen der einzelnen Konstruktionsarten eingegangen und nach Verbesserungsmöglichkeiten gesucht.

### grundsätzliches Tragwerkskonzept

Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Untersuchungsergebnisse wurde ein für alle Varianten einheitliches statisches Grundkonzept festgelegt, dass auf folgenden Parametern basiert:

- tragende Aussenwände
- Aussteifung des Gebäudes über drei Fassadenseiten (N, O, W), die Bodenplatte und die Dachdecke

Um die angestrebte Flexibilität im Innenraum auch in Bezug auf die Zwischendecke zu gewährleisten, wurde dieses Bauteil nicht in das statische Konzept mit einbezogen, sodass das Gebäude mit oder ohne Zwischendecke errichtet werden kann und eine Anpassung auch im Nachhinein jederzeit möglich ist. Wie bereits erläutert erlaubt der Grundriss eine relativ problemlose Stellung von vier Stützen im Innenraum, die für die Zwischendecke und die Dachdecke die erforderlichen Spannweiten auf zwei Felder mit 3,15 m und ein Feld mit 1,8 m reduzieren. Gemäß statischer Vorbemessung wären für die Innenraumstützen Querschnitte von 12/12 cm, sowie Balkenlagen mit einem Querschnitt von 12/24 cm erforderlich. Auch wenn eine funktionale Einschränkung durch die Stützenstellung nicht gegeben ist, so würde eine stützenfreie Lösung räumlich großzügiger wirken. Um dies zu ermöglichen müsste die Balkenlage über die Gebäudetiefe von 8,1 m spannen.

### Elementierbarkeit

Für gewöhnlich werden sowohl im Holzrahmenbau, als auch im vorgefertigten Holzmassivbau geschosshohe Elemente montiert, auf die die Geschossdecken aufgelegt werden, bevor die jeweils folgende Ebene montiert wird. Dies würde für das +++Haus bezogen auf die Außenwand in Summe 8 Elemente (2 je Fassadenseite) ergeben. Aufgrund der Besonderheit, dass die Zwischendecke (Decke zwischen EG und 1OG) statisch nicht angesetzt und ggf. auch nachträglich montiert bzw. demontiert werden können soll, ist es erforderlich, dass die Außenwände über zwei Geschosse hinweg knickstabil ausgeführt werden. Daher wurde bei der Elementierung der Außenwände ein Ansatz verfolgt, bei dem gebäudehohe Elemente auf eine Bodenplatte aufgestellt werden und auf die dann lediglich noch die Dachdecke aufgelegt wird. Da die max. Breitenabmessungen im Wesentlichen durch den Transport vorgegeben werden, sind bei dieser Aufteilung je Fassade 3 Elemente erforderlich. Hieraus resultiert somit eine etwas größere Anzahl von insgesamt 12 Elementen. Andererseits ist die zu erwartende Montagezeit, in der die wetterfeste Gebäudehülle fertiggestellt werden kann extrem kurz, da die Zwischendecke, sofern sie überhaupt im Zuge der Gebäudeerrichtung bereits mit montiert wird, im Nachhinein im Gebäudeinneren möglich ist. Vom Bauablauf her lässt sich das Gebäude wie ein eingeschossiges Gebäude (mit doppelter Geschosshöhe) errichten. Ist die Bodenplatte hergestellt müssen lediglich die Aussenwände errichtet werden und die Dachelemente aufgelegt werden. Alles Weitere kann in der Art von "Innenausbauarbeiten" erfolgen.

### Brandschutz

Nach [MBO, 2012] ist das +++Haus der Gebäudeklasse 1 (freistehende Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten) zuzuordnen. Dies gilt auch dann noch, wenn das Gebäude nachträglich in zwei Nutzungseinheiten geteilt werden sollte. Für diese Gebäudeklasse resultiert, dass keine Anforderungen an die Feuerwiderstandsklassen von tragenden Bauteilen bestehen. Auch könnte das Gebäude theoretisch um ein weiteres Geschoss aufgestockt werden (weiterhin max. 2 Nutzungseinheiten von max. 400 m<sup>2</sup>), ohne dass sich dadurch Brandschutzanforderungen ergeben würden. Für die Nutzung als Einfamilienhaus gilt die Aussage, dass es keine brandschutztechnischen Anforderungen gibt tatsächlich bundesweit. Aus den Anforderungen einiger Landesbauordnungen (vor allem derjenigen,

in die die Novellierung der Musterbauordnung noch keinen Eingang gefunden hat) folgt jedoch, dass bei einer Teilung des Gebäudes in zwei Nutzungseinheiten die tragenden Bauteile mit Ausnahme im Dachgeschoss feuerhemmend (F30) ausgeführt werden müssen. Dies ist sowohl im Holzrahmenbau, als auch im Holzmassivbau durchaus lösbar, ist jedoch bei der Dimensionierung der Konstruktionen und der Ausführung von ggf. erforderlichen Bauteildurchführungen zu beachten.

## 9.4 AP 4 Aussenwand

### 9.4.1 Grundsätzliche Überlegungen

AUSSENWAND	Effizienz	Suffizienz	Konsistenz
<b>Herstellung / Errichtung</b>	Auswahl ressourcenschonender Baustoffe Verwendung von Leichtbaukonstruktionen		Auswahl von Baustoffen die in Ihrer Herstellung keine/möglichst wenig fossile Energieträger benötigen  Auswahl von nachwachsenden Materialien
<b>Nutzung</b>	Vermeidung von Wärmebrücken Optimierung des U-Werts der Konstruktion	Verzicht auf Installationsebenen Verzicht auf innere Bekleidungen	Anordnung von Fensteröffnungen, sodass eine flexible (Um-)Nutzung der Räume ermöglicht wird
<b>Entsorgung</b>	Verwendung von Materialkombinationen, die sich ohne großen Aufwand trennen lassen		Auswahl von recyclingfähigen Materialien

Abbildung 9.4.1-1: Strategien Aussenwand

### Installationsebenen

Installationsebenen werden vor allem im Holzrahmenbau eingesetzt, um die luftdichte Ebene auf der Wandinnenseite nicht mit Leitungsführungen an einer Vielzahl von Stellen zu durchstoßen. Aus bauphysikalischer Sicht haben Sie zur Vermeidung von Bauschäden daher durchaus Ihre Berechtigung. Gleichzeitig sind sie mit Kosten von ca. 45,00 EUR/m<sup>2</sup> (nach [BKI, 2013, S. 444]) ein erheblicher Preistreiber im Holzbau. Für das +++Haus mit einer opaken Fassadenfläche von ca. 150 m<sup>2</sup> lassen sich nur durch das Weglassen der Installationsebene zugunsten einer direkten Bekleidung mit Gipskarton (ca. 11,20 EUR/m<sup>2</sup> => Differenz = -33,80 EUR ) bereits ca. 5.070 EUR einsparen. Dies entspricht über 70% der Summe, die zum Beispiel die Brettsperrholzbauweise gegenüber der Holzrahmenbauweise mit OSB (ohne Installationsebene) teurer ist (Mehrkosten ca. 6.900 EUR). Um das Weglassen der Installationsebene zu ermöglichen, müssen selbstverständlich Lösungen gefunden werden, wie die Leitungsverlegung (vorallem auch die Nachinstallierbarkeit) ausserhalb der Aussenwände sichergestellt werden kann. Im Rahmen des Technikkonzepts wurden daher entlang der Ost- und Westfassade von den Installationsschächten ausgehend in die Decken einfache Kabelkanäle integriert (vgl. AP 08 Energie- und Technikkonzept).

## Fehlertoleranz in Bezug auf Feuchteschäden durch Dampfkonvektion

Die Frage, wie fehlertolerant insbesondere eine Holzrahmenbaukonstruktion ohne eine innere Installationsebene in der Praxis ist, wurde im Rahmen der durchgeführten Workshops unter den Teilnehmern kontrovers diskutiert. Eine anschließende Literaturrecherche kam zu folgenden Ergebnissen:

Die in Deutschland über die [EnEV, 2014] gestellten Anforderungen an die Luftdichtheit bestehen primär aus wärmeschutztechnischen Überlegungen. Gleichzeitig erfüllt die luftdichte Ebene aber auch in Hinblick auf den Feuchteschutz eine wichtige Rolle, da es in Folge von Dampfkonvektion zu erheblichen Schäden an Bauteilen kommen kann. Das diesbezügliche Schadenspotential ist dabei erheblich größer, als das Potential in Folge reiner Wasserdampfdiffusion durch ein Bauteil, was u. a. auch dazu geführt hat, dass sich mittlerweile wieder dampfdiffusionsoffene Konstruktionen am Markt etablieren. Wie [Borsch-Laaks, 2006], [Borsch-Laaks, 2009], [Borsch-Laaks, 2010] und [Köhnke, 2006] deutlich aufzeigen, hängt die Frage, ob eine Leckage unmittelbar zu einem Schaden führt stark davon ab, an welcher Stelle im Haus sich die Leckage befindet und wie der genaue Transportweg des Dampfstroms im Bauteil verläuft. So weisen in Bezug auf den Feuchteschutz überhaupt nur diejenigen Stellen im Gebäude ein nennenswertes Schadenspotential auf, bei denen warme, feuchte Innenluft nach außen strömt. Die Gefährdung nimmt somit mit zunehmender Höhe im Gebäude zu, da an Leckage im Sockelbereich aufgrund des in Folge von Thermik entstehenden Druckgefälles im Gebäude eher kalte Außenluft nach innen strömt, als andersherum. Kalte Aussenluft kann auf Ihrem Weg nach innen aber nicht zu einer Kondensatbildung führen (vgl. zum Beispiel [Borsch-Laaks, 2006, S.17]. Darüber hinaus verursacht auf direktem Wege nach außen strömende Innenluft in der Regel ebenfalls kein Kondensatausfall [Borsch-Laaks, 2006, S.18]. Ein erhebliches Risiko besteht allerdings, wenn innere und äußere Leckagestellen stark parallel versetzt angeordnet sind und die Strömungspfade entlang von kalten Außenbauteilen führen, an denen sich die Luft abkühlen und Kondensat ausfallen kann [Borsch-Laaks, 2006, S.18]. Insofern gilt es bei der Ausdämmung von Holzrahmenbauwänden besonders darauf zu achten, dass die Querschnitte vollständig gefüllt werden und insbesondere in der Nähe zu äußeren Beplankungen keine Hohlräume entstehen. Hierdurch werden mögliche Transportwege für Dampfkonvektion effektiv unterbunden. In diesem Zusammenhang sind weiche, expandierende Dämmstoffe und Schüttungen oder Einblasdämmstoffe zu bevorzugen, da diese gegenüber formstabilen Dämmstoffen in der Regel eng an den Beplankungen anliegen. Bei Schüttungen und Einblasdämmstoffen ist jedoch darauf zu achten, dass nicht in Folge von Materialsetzungen Hohlräume entstehen. In Bezug auf die äußere Beplankung weist [Borsch-Laaks, 2006, S.22] darauf hin, dass MDF-Platten im Vergleich zu Unterdeckplatten aus Holzfaserdämmplatten weniger schimmelfähig sind auch wenn zu den genauen Gründen nur Vermutungen angestellt werden können.

Allgemein lässt festhalten, dass die Außenwand aufgrund Ihres diffusionsoffenen Aufbaus und Ihrer Lage im Gebäude (Thermik) im Vergleich zum Dach insgesamt deutlich weniger anfällig für Feuchteschäden ist. So weist [Kehl, 2014] am Beispiel eines Norddaches mit 50° Neigung nach, dass für Gebäude der Luftdichtigkeitsklasse A ( $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ ) davon ausgegangen werden kann, dass kein Schadensrisiko in Folge Dampfkonvektion aus Restleckagen besteht. Für Gebäude mit einer Höhe von weniger als 8 m Höhe gilt dies in eingeschränkter Form auch für Gebäude der Luftdichtigkeitsklasse B ( $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ ). Da alleine schon aufgrund der Tatsache, dass das +++Haus eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erhalten soll, sehr hohe Anforderungen an die Luftdichtigkeit ( $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$ ) gestellt werden, ist für das +++Haus nach Auffassung der Verfasser ein Entfall der Installationsebene bei gleichzeitiger anderweitiger Sicherstellung einer generellen Nachinstallierbarkeit durchaus zu rechtfertigen, wenn wie oben bereits erläutert im Zuge der Montage verstärkt darauf geachtet wird, dass in den Bau-

teilen keine Hohlräume entstehen. Auch wenn man nicht hundertprozentig verhindern können wird, dass ein Nutzer die luftdichte Ebene der inneren Beplankung an der ein oder anderen Stelle mal geringfügig verletzen wird, so sollte bei Berücksichtigung der beschriebenen Maßnahmen die Konstruktion genügend Fehlertoleranz aufweisen um hierdurch auftretende Feuchtelasten zu verkraften. Dass Wärmeverluste in Folge kleinerer Leckagestellen (zum Beispiel durch eine nicht ganz sauber eingesetzte Steckdose) im Vergleich zu Leckraten von Fenstern ohnehin kaum ins Gewicht fallen erläutert [Köhnke, 2006, S.32]. Auch aus wärmeschutztechnischer Sicht sollten daher keine Bedenken hinsichtlich des Verzichts auf eine Installationsebene bestehen.

Die Ausführungen gelten selbstverständlich in gleichem Maße auch für Holzmassiv- und Hybridkonstruktionen mit dem zusätzlichen Vorteil, dass diese Konstruktionen aufgrund der erhöhten Robustheit Ihrer inneren raumabschließenden Schicht (Brettsperrholz oder Furnierschichtholz) allgemein einem geringeren Risiko unterliegen, dass ein Nutzer diese in größerem Umfang durchstößt.

#### **9.4.2 Raumabschluss**

Auf Grundlage der Ergebnisse des AP 3 Tragstruktur wurden von den Verfassern unter Beteiligung von Fachleuten aus der Industrie, des am Projekt beteiligten Holzbauer und des Statikers in mehreren Workshops drei Grundvarianten für die Außenwandkonstruktion entwickelt. Diese wurden im Folgenden einer Bewertung unter ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten unterzogen. Aus den Erkenntnissen hat sich im Rahmen der Bearbeitung eine weitere Konstruktionsvariante ergeben, die im Detail im Kapitel 7.1.3 Ständerwerk erläutert wird. Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Aufbauten im Wesentlichen in der Ausführung der inneren und äußeren raumabschließenden Schicht, die in unterschiedlichem Umfang auch lastabtragende, knickstabilisierende und aussteifende Funktionen übernehmen kann. Der Aufbau der weiteren Bauteilschichten (Dämmebene und deren konstruktive Überbrückung, sowie die äußere Bekleidung) werden im Sinne einer strukturierten Bewertung gesondert betrachtet. An dieser Stelle sollen daher zunächst die Unterschiede der sich gegenseitig bedingenden raumabschließenden Bauteilschichten erläutert werden. Die unterschiedlichen Möglichkeiten wurden der Übersichtlichkeit halber in die grundsätzlichen Kategorien Holzrahmenbauweise, Holzmassivbauweise und Hybridbauweise unterschieden.

#### **Holzrahmenbauweise (Holzwerkstoffplatten)**

Die Grundsätzlichkeiten des Holzrahmenbausystems wurden bereits im Kapitel AP 3 Tragstruktur erläutert. Die Bauweise hat sich in Deutschland insbesondere im Bereich des Fertighausbaus durchgesetzt, findet aber mittlerweile auch breite Verwendung im Bereich des klassischen Zimmereihandwerks, das somit auch auf die Vorteile von vorgefertigten, standardisierten Bauteilen bzw. Bauweisen zurückgreifen kann. Beim Holzrahmenbau handelt es sich in Deutschland innerhalb des insgesamt wachsenden Segments der Holzbaus um die vorwiegende Bauweise [Holzabsatzfonds, 2009, S. 9].

Wie bereits im Kapitel AP 3 Tragstruktur erläutert, übernimmt im Holzrahmenbau die raumseitig erste, konstruktive Schicht aus einer Holzwerkstoffplatte (in der Regel OSB), neben dem Raumabschluss vor allem die aussteifende Funktion. Die Lastabtragung und Knickstabilität erfolgt hingegen über die in der Dämmebene angeordneten Ständer. Somit kommen hierfür z.B. Konstruktionsvollhölzer (KVH), Balkenschichthölzer (Duo- oder Triobalken), sowie Stegträger in Frage (vgl. AP 04.3 Ständerwerk / Unterkonstruktion). Neben der inneren Beplankung ist in der Regel eine äußere Beplankung erforderlich, die im Vergleich zur inneren

einen geringeren Dampfdiffusionswiderstand aufweisen muss um eine geregelte Feuchteabfuhr zu gewährleisten. Da eine OSB-Platte üblicherweise im Wohnungsbau nicht als fertige Oberfläche angesehen wird, erfolgt in der Regel zusätzlich eine raumseitige Beplankung mit Gipskartonplatten.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>
<b>aussteifende Holzweichfaserplatte 35 mm</b>	-4,25 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000047 kg R11 äqv.	0,0106 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,001575 kg Phos äqv.	0,000764 kg Ethen äqv.	0,00000735 kg Sb äqv.	39,30 MJ	-49,94 MJ	27,85 EUR
<b>aussteifende Holzweichfaserplatte 52 mm</b>	6,31 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000069 kg R11 äqv.	0,0158 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00240 kg Phos äqv.	0,00114 kg Ethen äqv.	0,0000109 kg Sb äqv.	59,39 MJ	MJ	33,79 EUR
<b>Dreischnittplatte Fichte</b>	-3,95 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,00000114 kg R11 äqv.	0,0046 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00255 kg Phos äqv.	0,00203 kg Ethen äqv.	0,00000718 kg Sb äqv.	-39,75 MJ	-95,35 MJ	42,96 EUR
<b>Furniersperrholz (BFU)</b>	-3,03 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,0000013 kg R11 äqv.	0,0022 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,0084 kg Phos äqv.	0,0062 kg Ethen äqv.	0,0000044 kg Sb äqv.	-7,18 MJ	-85,44 MJ	40,37 EUR
<b>Gipskartonplatte</b>	2,073 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,0000002566 kg R11 äqv.	0,004859 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,001795 kg Phos äqv.	0,001531 kg Ethen äqv.	0,01822 kg Sb äqv.	37,99 MJ	37,99 MJ	11,20 EUR
<b>Mitteldichte Unterdeckplatte (DWD)</b>	1,17 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,00000044 kg R11 äqv.	0,0149 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00591 kg Phos äqv.	0,00727 kg Ethen äqv.	0,000005480 kg Sb äqv.	49,71 MJ	-67,46 MJ	11,50 EUR
<b>Oriented Strand Board (OSB)</b>	-0,87 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,0000016 kg R11 äqv.	0,0188 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00359 kg Phos äqv.	0,0131 kg Ethen äqv.	0,00000238 kg Sb äqv.	58,28 MJ	-13,06 MJ	14,20 EUR

Abbildung 9.4.2-1: Ökobilanzdaten Aussenwand - Raumabschluss



Bei Betrachtung der ökologischen Kennwerte der einzelnen Materialien fällt auf, dass die Gipskartonplatte sich neben der DWD stark negativ (vom Wert her positiv) auf das Treibhauspotential auswirkt. So wird zum Beispiel in Bezug auf das GWP der komplette Vorteil, den eine OSB-Platte erzeugt (-0,87 kg CO<sup>2</sup> äqv.) von einer zusätzlich aufgebrachten GK-Platte (2,073 kg CO<sup>2</sup> äqv.) in mehr als zweifacher Höhe aufgezehrt. Des weiteren wirkt sich die Kombination von Gips- und Holzbaustoffen sich nachteilig auf ein späteres Recycling aus (s. Erläuterungen am Ende dieses Kapitels). Aus diesem Grund liegt es für das +++Haus nahe, auf eine innere Beplankung mit Gipskarton zu verzichten. Die einfachste Möglichkeit besteht im schlichten Weglassen, dieser inneren Beplankung. Wie bereits erwähnt ist die stark strukturierte und unruhige Oberfläche einer OSB-Platte jedoch mindestens etwas gewöhnungsbedürftig. Etwas abschwächen lässt sich der Effekt sicherlich durch die Auswahl einer deckenden oder semitransparenten Beschichtung. Zum anderen weist die OSB-Platte selber aber (zumindest für einen Material aus nachwachsenden Rohstoffen) auch eine vergleichsweise schlechte Ökobilanz auf. Die Werte für GWP und PENRT sind geringfügig negativ, sodass die Umweltwirkung in diesen Kategorien als geringfügig positiv bzw. "neutral" bezeichnet werden kann. Eine Kompensation von an anderer Stelle erforderlichen Baustoffen mit negativen Umweltwirkungen ist somit jedoch nicht möglich.

Vor diesem Hintergrund wurden für die Aussenwand des +++Haus in der Variante Holzrahmenbau folgende, alternative Holzplattenwerkstoffe untersucht (vgl. auch oben stehende Tabelle für deren Ökobilanzdaten):

- Furniersperrholzplatte
- Dreischicht-Massivholzplatte

Die folgende Grafik zeigt deren Umweltwirkungen im Vergleich in normierter Darstellung auf Basis der Gesamtemissionen Westeuropas.

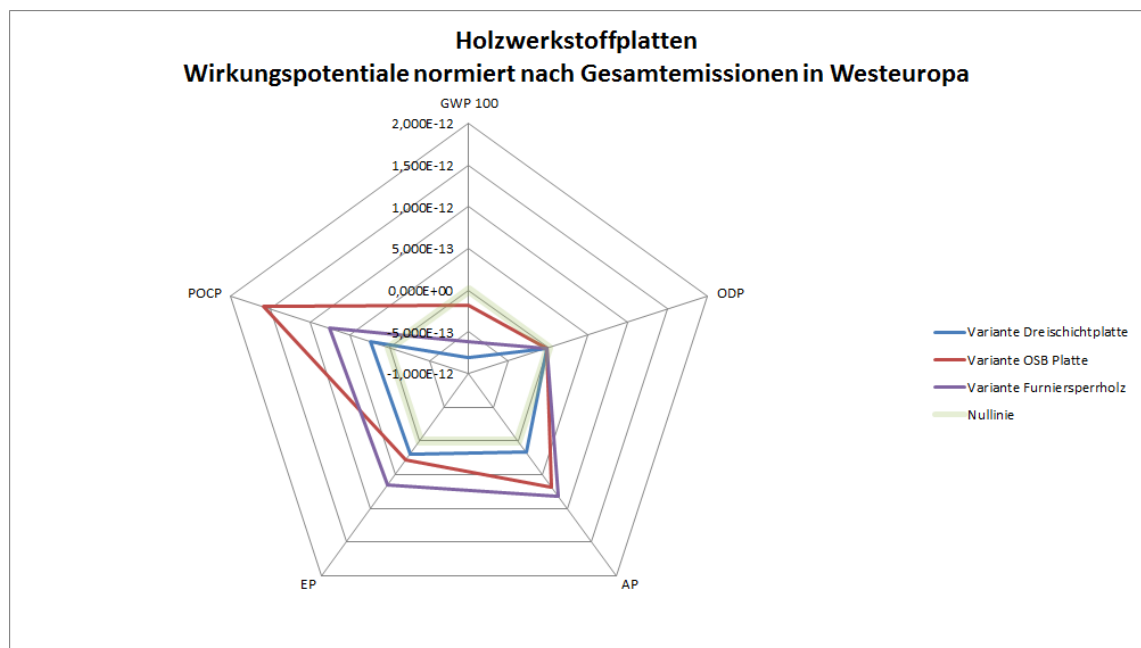


Abbildung 9.4.2-2: Umweltwirkungen Holzwerkstoffplatten, normiert

Wie im Rahmen der weiteren Ergebnisdokumentation immer wieder auffallen wird, ist die Kategorie Ozonabbaupotential (ODP) in Bezug auf die untersuchten Baustoffe unerheblich. Holzwerkstoffe tragen eindeutig nicht zu den Gesamtemissionen Europas in dieser Kategorie bei und können daher bei der Materialwahl auch ausgeblendet werden. Die Variante aus Furniersperrholz stellt gegen der OSB eine Verbesserung auf die Kategorien GWP und POCP eine Verbesserung dar. In Bezug auf die Kategorien EP und AP kommt es aber zu einer Lastverschiebung. Die Dreischichtplatte hingegen schneidet eindeutig am besten ab und weist in allen Umweltwirkungskategorien die besten Werte auf.

Im Holzrahmenbau wird mindestens eine Beplankungslage (in der Regel die innere Beplankung) zur Sicherstellung der Aussteifungsebene in relativ geringen Abständen mit den Ständern vernagelt oder verschraubt. Da in der für das +++Haus gedachten Variante, wie bereits oben erläutert eine Sichtqualitätsanforderung besteht, ist es grundsätzlich von Vorteil, wenn aus statischer Hinsicht abweichend die äußere Beplankungslage als aussteifende Ebene herangezogen werden kann. Die innere Bekleidung kann so in deutlich verringertem Umfang und in einem sorgfältig geplanten Schraub- bzw. Nagelbild mit den Ständern verbunden werden. Als äußere Beplankungslage kommt hierfür zum Beispiel eine aussteifende Holzweichfaserplatte (vgl. [Steico, 2014]) in Frage. Die Anordnung von Ständern ist hier gemäß Zulassung im Abstand von 62,5 cm erforderlich. Die konkreten statischen Anforderungen sind selbstverständlich im Einzelfall zu prüfen. Holzweichfaserplatten wirken sich deutlich positiv (vom Wert her negativ) auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz aus, sind jedoch gegenüber der herkömmlichen DWD auch mit nicht unerheblichen Mehrkosten verbunden.

## Innere Bekleidungen der Aussenwand

Gips ist einer der wenigen Baustoffe, die sich theoretisch verlustfrei recyceln lassen. Dennoch sieht die Praxis insbesondere in Deutschland bis heute deutlich anders aus. So wurde der überwiegende Teil (76,3%) der in Deutschland im Jahr 2010 angefallenen Gipsabfälle im Berg- und Deponiebau verwertet. Der Rest wurde auf Deponien beseitigt (vgl. [bbs, 2013]). Eine stofflich hochwertige Verwertung findet de facto nicht statt. Das Arbeitspapier der [DGAW, 2010] kommt zu folgendem Schluss:

*"Im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern, in denen sehr hohe Deponierungskosten und Deponierungssteuern für gipshaltige Abfälle oder sogar ein Deponierungsverbot gelten (z. B. Dänemark, Niederlande oder Großbritannien) ist in Deutschland aktuell eine gegenläufige Tendenz zu beobachten. Es werden zunehmend Deponien für mineralische Abfälle errichtet mit Annahmepreisen von unter 20 €/t. Für ein derartiges Preisniveau ist eine höherwertige Aufbereitung von Gipsabfällen nicht durchführbar."*

Desweiteren stellt Gips in der Vermischung mit anderen Baustoffen für die Wiederverwertung ein erhebliches Störpotential dar. Insbesondere für die Vermischung mit Holzabfällen gibt es momentan kein wirtschaftliches Trennverfahren (vgl. [El khouli et al., 2014, S.56, Abbildung 3.39]). Des Weiteren hat sich (wie bereits im Abschnitt zu Holzrahmenbau erläutert) in der Analyse der unterschiedlichen Plattenwerkstoffe gezeigt, dass eine Gipskartonplatte als innere Beplankung zu einer deutlichen Verschlechterung der Ökobilanz dieses Bauteils beiträgt. Ohne daher Gips als Baustoff generell negativ darstellen zu wollen, erscheint es den Verfassern hier doch sinnvoll, die finanziellen Mittel für eine innere Beplankung mit Gipskartonplatten anderweitig (z.B. für einen Ersatz der OSB durch eine optisch ansprechendere und daher kostenintensivere Holzwerkstoffplatte) zu verwenden. Die innere Beplankung mit GK-Platten wurde bzgl. der Kosten mit ca. 11,20 EUR bewertet. Für das +++Haus lassen sich durch den Entfall daher ca. 1.680 EUR sparen.

## Holzmassivbauweise (Brettsperrholz)

In der Variante Brettsperrholz (Holzmassivbauweise) besteht die innere Schicht aus massiven, 10 cm starken Brettsperrholzelementen, die sowohl die Funktionen Aussteifung und Knickstabilität, als auch Lastabtragung übernehmen. In die darauf folgende Dämmebene muss lediglich ggf. eine Unterkonstruktion zur Befestigung der vorgehängten Fassadenelemente integriert werden. Neben den bereits genannten Möglichkeiten (KVH, Balkenschichtholz und Stegträger), können alternativ auch sogenannte Dämmständer verwendet werden (vgl. AP 04.3 Ständerwerk / Unterkonstruktion). Im Bereich des Brettsperrholzes stehen grundsätzlich zwei Konstruktionsweisen zur Verfügung: (a) großformatige, projektspezifisch gefertigte Wandelemente (max. Abmessungen in der Regel bis ca. 3,5 m x 22,0 m) und (b) Standardformate (z.B. im Standardformat von 1,25 m und einer Länge von bis zu ca. 24 m). Die Frage der Wirtschaftlichkeit der beiden Möglichkeiten im Vergleich hängt stark von den Abbundmöglichkeiten des verarbeitenden Holzbauers ab. Der Materialpreis der großformatigen Platten ist etwas höher und gleichzeitig werden bei der Angebotskalkulation Fensteröffnungen, etc. übermessen. Eine Zusammensetzung von Wandelementen aus Standardformaten erzeugt weniger Verschnitt, ist allerdings arbeitsintensiver für den Zimmereibetrieb. Im Rahmen des +++Hauses wurde eine Konstruktion der Wandelemente aus Standardformaten durchdacht, da dies sowohl insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen, als auch für die Projektgröße in der Regel die wirtschaftlichere Form der Ausführung sein dürfte. Eine Ausführung in Großformatplatten ist in konstruktiver bzw. baupraktischer Hinsicht aber grundsätzlich einfacher und daher genauso möglich. Für die Holzmassivbauweise sind die Ständer in statischer Hinsicht im Wesentlichen nicht erforderlich. Sie übernehmen wenn überhaupt ausschließlich die Funktion der Unterkonstruktion für die Vorhangfassade. Insofern kann der Ständerabstand ggf. vergrößert werden auf ein Maß, das sich ausschließlich aus konstruktiven Abhängigkeiten der Vorhangfassade ergibt.

Je nach Art der Vorhangfassade und Wahl des Dämmstoffs kann die Dämmebene aussen theoretisch unbedeckt bleiben, mit einer Fassadenbahn oder einer DWD Platte abgedeckt oder mit Holzfaserdämmplatten überdämmt werden. Bei einer Vorhangfassade mit offenen Fugen ist mindestens eine Unterspannbahn erforderlich. Wählt man z.B. eine Polycarbonatfassade, so kann diese entfallen. Ein formstabiler Abschluss (DWD oder Holzweichfaserplatte) ist erforderlich, wenn Einblasdämmstoffe zum Einsatz kommen sollen. Dies stellt die jeweiligen Mindestanforderungen dar. Eine höherwertige Ausführung des äusseren Abschlusses kann selbstverständlich immer erfolgen.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>
<b>aussteifende Holzweichfaserplatte 35 mm</b>	-4,25 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000047 kg R11 äqv.	0,0106 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,001575 kg Phos äqv.	0,000764 kg Ethen äqv.	0,00000735 kg Sb äqv.	39,30 MJ	-49,94 MJ	27,85 EUR
<b>aussteifende Holzweichfaserplatte 52 mm</b>	6,31 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000069 kg R11 äqv.	0,0158 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00240 kg Phos äqv.	0,00114 kg Ethen äqv.	0,0000109 kg Sb äqv.	59,39 MJ	MJ	33,79 EUR
<b>Brettsperrholz 100mm</b>	-16,73 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,0000056 kg R11 äqv.	-0,0223 kg SO <sub>2</sub> äqv.	-0,0112 kg Phos äqv.	-0,0097 kg Ethen äqv.	-0,000086 kg Sb äqv.	-378,45 MJ	-439,80 MJ	105,56 EUR
<b>Fassadenunterspannbahn PE gewebeverstärkt</b>	1,06 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000005 kg R11 äqv.	0,00191 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,000193 kg Phos äqv.	0,00066 kg Ethen äqv.	0,00193 kg Sb äqv.	12,18 MJ	12,16 MJ	6,76 EUR
<b>Mitteldichte Unterdeckplatte (DWD)</b>	1,17 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,00000044 kg R11 äqv.	0,0149 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,000591 kg Phos äqv.	0,00727 kg Ethen äqv.	0,000005480 kg Sb äqv.	49,71 MJ	-67,46 MJ	11,50 EUR

Abbildung 9.4.2-3: Ökobilanzdaten Aussenwand – Holzmassivbauweise, äußere Bekleidung

## **Hybridbauweise (Furnierschichtholz)**

Die Variante aus Furnierschichtholz stellt den Versuch dar, einen konstruktiven Kompromiss zwischen der Holzrahmenbauweise und der Holzmassivbauweise auszuloten. So kommen hier als innere Bauteilschicht ca. 4,5 cm starke Furnierschichtholzelemente zum Einsatz. Die Platten übernehmen die Aussteifung der Konstruktion und können darüber hinaus ggf. auch zur Einleitung der Auflagerkräfte aus einer möglichen Zwischendecke in die tragenden Ständer herangezogen werden. Als Ständer kommen, wie auch bei der Holzrahmenbauweise KVHs, Balkenschichthölzer oder Stegträger in Frage. Im Sinne einer statischen Optimierung kann bei einem entsprechenden Verbund von Platte und Ständer für den Standsicherheitsnachweis der zusammengesetzte Querschnitt herangezogen werden.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>
aussteifende Holzweich- faserplatte 35 mm	-4,25 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000047 kg R11 äqv.	0,0106 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,001575 kg Phos äqv.	0,000764 kg Ethen äqv.	0,00000735 kg Sb äqv.	39,30 MJ	-49,94 MJ	27,85 EUR
aussteifende Holzweich- faserplatte 52 mm	6,31 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000069 kg R11 äqv.	0,0158 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00240 kg Phos äqv.	0,00114 kg Ethen äqv.	0,00000109 kg Sb äqv.	59,39 MJ	MJ	33,79 EUR
Fassadenunterspannbahn PE gewebeverstärkt	1,06 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000005 kg R11 äqv.	0,00191 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,000193 kg Phos äqv.	0,00066 kg Ethen äqv.	0,00193 kg Sb äqv.	12,18 MJ	12,16 MJ	6,76 EUR
Furnierschichtholz (LVL) 45mm	4,34 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,0000045 kg R11 äqv.	0,0504 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,01 kg Phos äqv.	0,00184 kg Ethen äqv.	0,0000055 kg Sb äqv.	213,52 MJ	19,45 MJ	48,69 EUR
Mitteldichte Unterdeckplatte (DWD)	1,17 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,00000044 kg R11 äqv.	0,0149 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00591 kg Phos äqv.	0,00077 kg Ethen äqv.	0,00000548 kg Sb äqv.	49,71 MJ	-67,46 MJ	11,50 EUR

Abbildung 9.4.2-4: Ökobilanzdaten Aussenwand – Hybridbauweise, äußere Bekleidung

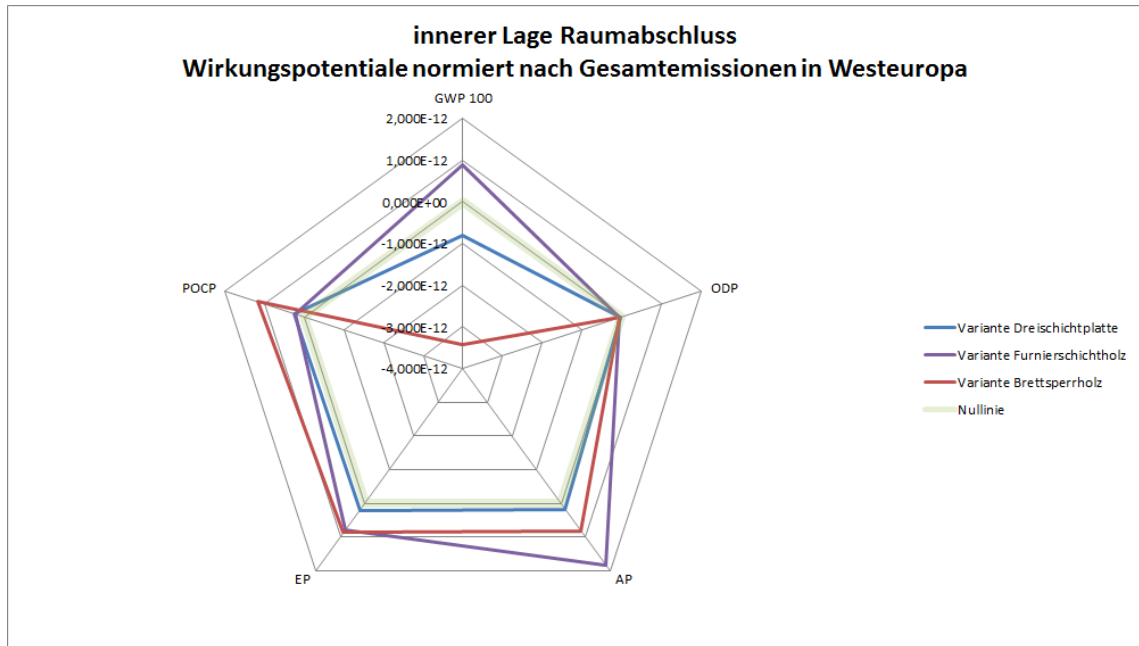


Abbildung 9.4.2-5: Umweltwirkungen der inneren Lage Raumbabschluss, normiert

Was sich zunächst nach einer vielversprechenden, intelligenten Lösung anhört, wird durch einen überraschend hohen GWP Wert stark konterkariert. Ging bei der Massivholzvariante mit dem erhöhten Materialeinsatz eine Reduzierung des Treibhauspotentials einher, so führt der hohe Leimanteil und der augenscheinlich energieintensive Herstellungsprozess von Furniersperrholz im Gegenteil zu einer deutlichen Erhöhung sowohl des Treibhauspotentials (GWP), als auch des Versauerungspotentials (AP) bei.

Schaut man sich alle drei Varianten (Dreischichtplatte, Furnierschichtholz und Brettsperrholz) im Vergleich an, so fällt auf, dass das Brettsperrholz zwar den besten Wert in Bezug auf das Treibhauspotential aufweist, es aber aufgrund des größeren Materialeinsatzes zu einer geringen Lastverschiebung in die anderen Umweltwirkungskategorien (insbesondere bzgl. des bodennahen Ozonbildungspotentials POCP) kommt. Das Furnierschichtholz schneidet wie bereits erläutert (vor allem in Bezug auf GWP und AP) vergleichsweise schlecht ab. Am ausgeglichensten präsentiert sich die Dreischichtplatte. Sie weist bei einem immer noch deutlich wertnegativen Treibhauspotential in allen anderen Wirkungskategorien die niedrigsten Werte auf.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>	Kosten-differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
Brettspertholz/Unterspannbahn	-15,67 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-5,560E-06 kg R11 äqv.	0,02420 kg SO <sup>2</sup> -äqv.	0,01134 kg Phos äqv.	0,01037 kg Ethen äqv.	0,00202 kg Sb äqv.	-366,28 MJ	-427,65 MJ	112,32 EUR	+11.313,00 EUR	-2.350,46 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-4.523,12 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	2,50 EUR/ kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-64,148 MJ	-52,982 MJ
Furnierschicht-holz/Unterspannbahn	5,39 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-4,450E-06 kg R11 äqv.	0,05235 kg SO <sup>2</sup> -äqv.	0,01028 kg Phos äqv.	0,00250 kg Ethen äqv.	0,00194 kg Sb äqv.	225,70 MJ	31,61 MJ	55,45 EUR	+2.782,50 EUR	808,82 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-1.363,84 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	2,04 EUR/ kg CO <sup>2</sup> -äqv.	4,742 MJ	+15,907 MJ
Holzrahmenbau Dreischichtplatte/DWD	-2,78 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-1,580E-06 kg R11 äqv.	0,01952 kg SO <sup>2</sup> -äqv.	0,00847 kg Phos äqv.	0,00930 kg Ethen äqv.	0,00001 kg Sb äqv.	9,96 MJ	-162,81 MJ	54,46 EUR	+2.634,00 EUR	-416,65 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-2.589,31 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	1,02 EUR/ kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-24,422 MJ	-13,256 MJ
Holzrahmenbau Dreischichtplatte/Holzweichfaserplatte	-8,19 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-1,132E-06 kg R11 äqv.	0,01521 kg SO <sup>2</sup> -äqv.	0,00417 kg Phos äqv.	0,00279 kg Ethen äqv.	0,00001 kg Sb äqv.	-0,44 MJ	-14,529 MJ	76,75 EUR	+5.977,50 EUR	-1.229,23 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-3.401,89 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	1,76 EUR/ kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-21,794 MJ	-10,178 MJ
Holzrahmenbau Furnierspertholz/DWD	-1,85 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-1,786E-06 kg R11 äqv.	0,03738 kg SO <sup>2</sup> -äqv.	0,01430 kg Phos äqv.	0,01350 kg Ethen äqv.	0,00001 kg Sb äqv.	42,53 MJ	-152,90 MJ	51,87 EUR	+2.245,50 EUR	-277,88 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-2.450,54 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	0,92 EUR/ kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-22,935 MJ	-11,770 MJ
Holzrahmenbau Furnierspertholz/Holzweichfaserplatte	-7,27 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-1,337E-06 kg R11 äqv.	0,03308 kg SO <sup>2</sup> -äqv.	0,01000 kg Phos äqv.	0,00700 kg Ethen äqv.	0,00001 kg Sb äqv.	32,12 MJ	-135,38 MJ	74,16 EUR	+5.589,00 EUR	-1.090,46 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-3.263,12 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	1,71 EUR/ kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-20,307 MJ	-9,142 MJ
Holzrahmenbau nur Dreischichtplatte	-3,95 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-1,136E-06 kg R11 äqv.	0,00460 kg SO <sup>2</sup> -äqv.	0,00255 kg Phos äqv.	0,00203 kg Ethen äqv.	0,00001 kg Sb äqv.	-39,75 MJ	-95,35 MJ	42,96 EUR	+909,00 EUR	-592,61 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-949,25 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	0,96 EUR/ kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-14,837 MJ	-8,457 MJ
Holzrahmenbau, klassisch (GK/OSB/DWD)	2,38 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-1,794E-06 kg R11 äqv.	0,03862 kg SO <sup>2</sup> -äqv.	0,01130 kg Phos äqv.	0,01130 kg Ethen äqv.	0,01825 kg Sb äqv.	145,98 MJ	-42,53 MJ	36,90 EUR	0,00 EUR	356,64 kg CO <sup>2</sup> -äqv.			-6,380 MJ	
Holzrahmenbau, ohne Gipskarton (OSB/DWD)	0,30 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	0,00000 kg R11 äqv.	0,03376 kg SO <sup>2</sup> -äqv.	0,00951 kg Phos äqv.	0,02034 kg Ethen äqv.	0,00003 kg Sb äqv.	107,99 MJ	-80,52 MJ	25,70 EUR	-1.680,00 EUR	45,66 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-2.127,00 kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-0,79 EUR/ kg CO <sup>2</sup> -äqv.	-12,078 MJ	-913 MJ



Abbildung 9.4.2-6. Ökobilanzdaten Aussenwand

Insbesondere für die Gruppe Holzrahmenbau lässt sich daher eine Vielzahl von denkbaren Konstruktionsvarianten bilden. Stellt man alle in der normierten Betrachtung im Vergleich dar, so ergibt sich ein vielschichtiges Bild.

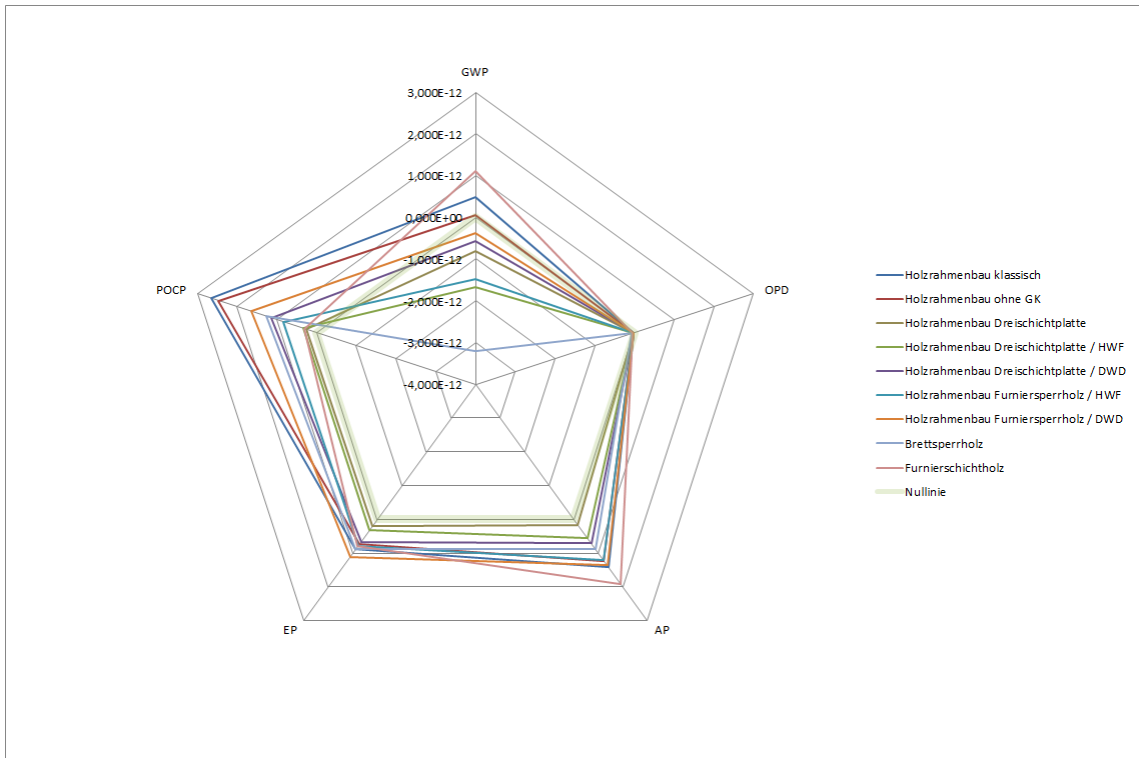


Abbildung 9.4.2-7: Umweltwirkungen Aussenwand, normiert

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden in der folgenden Grafik nur ausgewählte Holzrahmenkonstruktionen im Vergleich zur Massiv- und zur Hybridbauweise dargestellt.

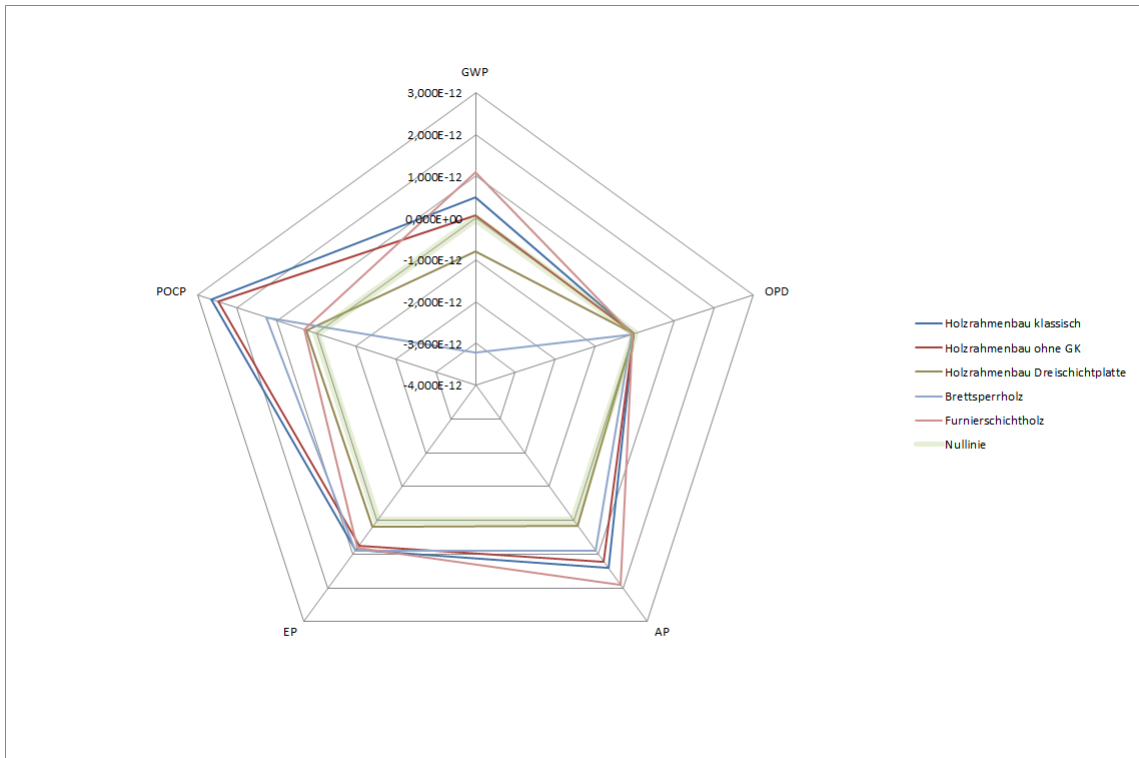


Abbildung 9.4.2-8. Umweltwirkungen Aussenwand, normiert (Auswahl Holzkonstruktionen)

Auch hier werden folgende Erkenntnisse nochmals deutlich:

- alleine aus ökobilanzieller Sicht ergeben sich aus der Hybridbauweise fast nur Nachteile. Diese Bauweise wurde daher im Rahmen des Forschungsprojekts nicht weitergehend verfolgt.
- aus ökobilanzieller Sicht spricht vieles dafür, auf eine Gipskartonbekleidung zu verzichten.
- die klassische Holzrahmenbauwand (ohne GK) ist zwar äußerst wirtschaftlich, bietet aber in ökobilanzieller Sicht durchaus Optimierungspotential.

In der folgenden Grafik sind nur noch die unterschiedlichen Holzrahmenbauvarianten gegenüber gestellt.

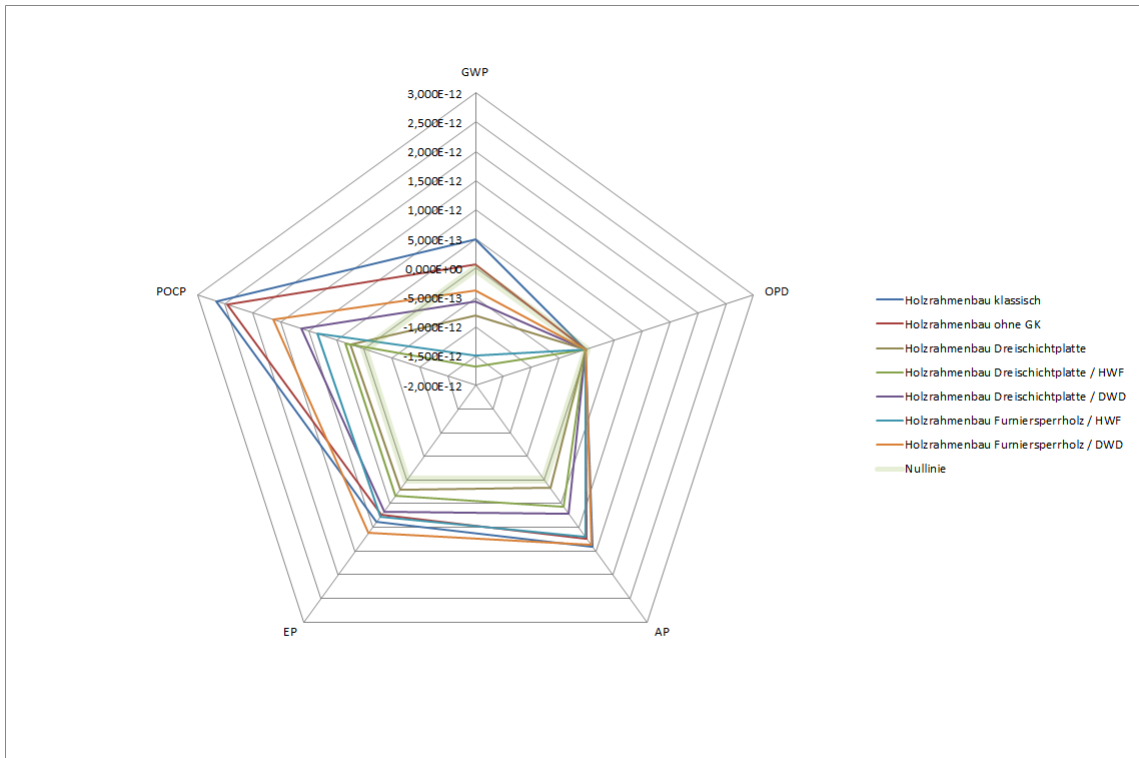


Abbildung 9.4.2-9. Umweltwirkungen Aussenwand, normiert (Holzrahmenbauvarianten)

### 9.4.3 Ständerwerk / Unterkonstruktion

Wie bereits beschrieben benötigen sowohl die Holzrahmenbauweise, als auch der beschriebene hybride Aufbau mit Furnierschichtholzplatten statisch tragende Ständer in einem Achsraster von üblicherweise 62,5 cm oder 83,3 cm.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je lfm	Kosten-differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Duo- / Triobalken</b>	-2,71 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,0000007 kg R11 äqv.	0,0022 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0013 kg Phos äqv.	0,0011 kg Ethen äqv.	0,00000091 kg Sb äqv.	-28,53 MJ	-58,27 MJ	11,49 EUR	-585,68 EUR	-1.158,53 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+662,62 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,88 EUR/kg CO <sup>2</sup> äqv.	-24.910,43 MJ	+12.406,05 MJ
<b>Holzstegträger 58/200</b>	0,34 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,0000005 kg R11 äqv.	0,0060 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0018 kg Phos äqv.	0,0010 kg Ethen äqv.	0,00000020 kg Sb äqv.	23,79 MJ	0,86 MJ	13,42 EUR	+177,60 EUR	14,535 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+1.966,50 kg CO <sup>2</sup> äqv.	keine Einsparung, Mehrkosten	367,65 MJ	+37.684,13 MJ
<b>Holzstegträger 58/300</b>	0,29 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,0000006 kg R11 äqv.	0,0069 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0036 kg Phos äqv.	0,00018 kg Ethen äqv.	0,000000339 kg Sb äqv.	26,70 MJ	0,21 MJ	14,40 EUR	+412,80 EUR	12,398 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+1.945,13 kg CO <sup>2</sup> äqv.	keine Einsparung, Mehrkosten	89,78 MJ	+37.406,26 MJ
<b>KVH Konstruktions-vollholz</b>	-4,26 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,0000011 kg R11 äqv.	-0,0017 kg SO <sup>2</sup> äqv.	-0,0015 kg Phos äqv.	-0,0013 kg Ethen äqv.	-0,00000103 kg Sb äqv.	-47,48 MJ	-87,29 MJ	12,68 EUR	0,00 EUR	-1.821,15 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.		-37.316,48 MJ	0,00 MJ
<b>U*psi Dämm-ständer</b>	-0,99 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,00000027 kg R11 äqv.	0,0008 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,00048 kg Phos äqv.	0,00041 kg Ethen äqv.	0,00000033 kg Sb äqv.	-10,46 MJ	-21,37 MJ	18,69 EUR	+1.442,40 EUR	-423,23 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+139792 kg CO <sup>2</sup> äqv.	keine Einsparung, Mehrkosten	-9.135,68 MJ	+28.180,80 MJ

Abbildung 9.4.3-1: Ökobilanzdaten Holzrahmenbauständer

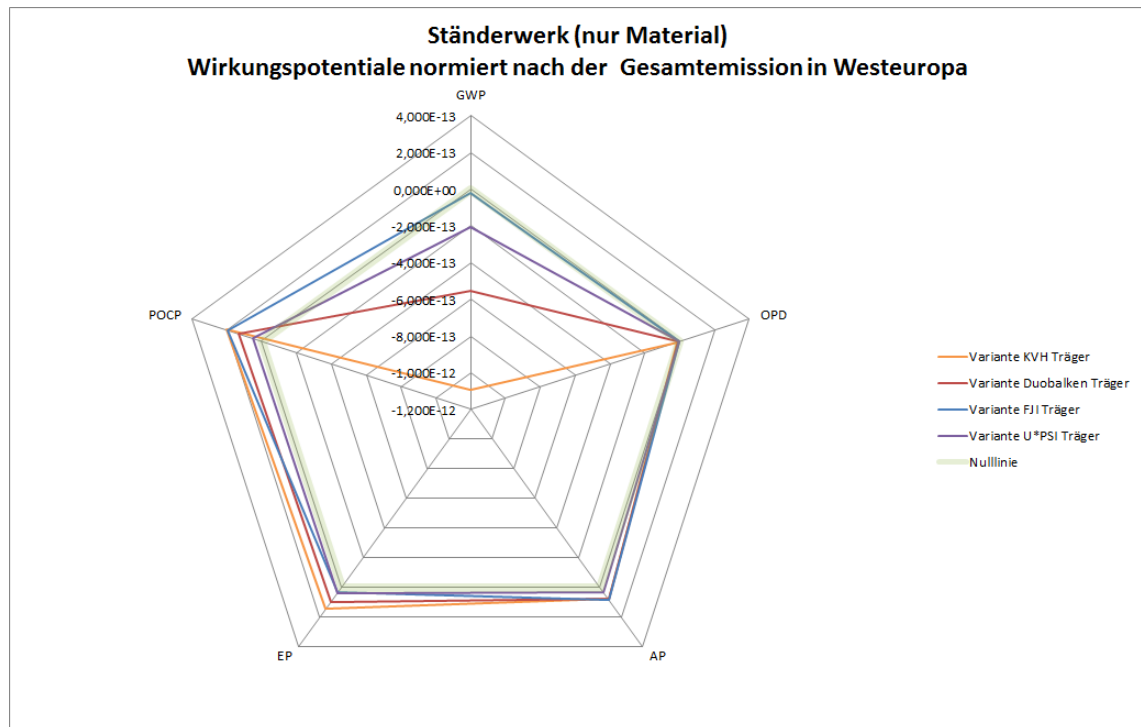


Abbildung 9.4.3-2: Umweltwirkungen Holzrahmenbauständer, normiert

## statische Vorbemessung

Für das +++Haus hat die statische Vorbemessung ergeben, dass Vollholzständer am Elementrand für eine dämmstärken bedingte Ständertiefe von ca. 200 mm Querschnitte mit einer Breite von 80 mm statisch erforderlich sind um den Belastungen aus Zwischendecke, Dach und Wind standzuhalten. Die Breite ergibt sich vorallem aus der Tatsache, dass die Elemente über zwei Geschosse spannen und die Zwischendecke aufgrund Ihrer Reversibilität nicht statisch angesetzt werden kann. Im herkömmlichen Holzrahmenbau mit geschosshohen Elementen wären auch geringere Ständerbreiten möglich. Die Tiefe bestimmt bei hochgedämmten Gebäuden in der Regel ohnehin die Bauphysik (U-Wert) über die erforderliche Dicke der Dämmebene. So können auch beim +++Haus in Elementmitte theoretisch Ständer mit einer Breite von 60 mm eingesetzt werden.

## Konstruktionsvollholz

Die einfachste Art der Unterkonstruktion bzw. Tragkonstruktion sind Konstruktionsvollhölzer (KVH). Hierbei handelt es sich um veredelte Bauschnitthölzer, die in der Regel im Keilzinkverfahren als Endlosstrang produziert werden. Das industrielle Fertigungsverfahren ermöglicht höhere Qualitätsanforderungen an z.B. Trockenheit und Maßhaltigkeit als herkömmliches Bauholz. Aufgrund der Tatsache, dass sich KVHs mit einem sehr ungleichen Kantenverhältnis in der Praxis oftmals verziehen, sind die theoretisch möglichen, geringen Querschnitte mit 60 mm bei Verwendung von KVHs aus baupraktischen Gründen in vielen Fällen nicht möglich. In der Regel wird bei Verwendung von KVHs daher auf Querschnitte mit einer Mindestbreite von 80-100 mm zurückgegriffen. Der Materialpreis von KVH liegt bei ca. 410 EUR/m<sup>3</sup>. Ein Ständer

mit den Abmessungen 200/80 hat daher einen Materialpreis von ca. 6,56 EUR. Der Leimanteil beträgt ca. 0,1 %

### **Balkenschichtholz (Duobalken)**

Die Herstellung von Balkenschichthölzern erfolgt in ähnlicher Form, wie bei KVHs. Jedoch werden Duobalken aus zwei parallelen Lamellen (Bohlen) verleimt. Balkenschichthölzer bieten aufgrund der hierdurch erhöhten Maßhaltigkeit, im Gegensatz zum KVH die Möglichkeit auch bei großen Dämmstoffdicken minimierte Ständerbreiten von z.B. 60 mm zu realisieren, ohne dass die Balken sich verziehen. Der Preis pro m<sup>3</sup> beträgt mit ca. 447,50 EUR ca. 9 % mehr gegenüber dem KVH. Da mit 60 mm Ständern ggü. 80 mm Ständern allerdings 25% Material gespart werden können, stellen Balkenschichthölzer oftmals die wirtschaftlichere Lösung dar. Auch auf den gesamt U-Wert der Wand wirken sich die verringerten Ständerbreiten aufgrund der verringerten Wärmebrücke positiv aus. Ein Ständer mit den Abmessungen 200/60 hat daher einen Materialpreis von ca. 5,37 EUR. Geringfügig negativ fällt ins Gewicht, dass der Leimanteil von 1% aufgrund der über die gesamte Länge durchgehenden Leimfuge gegenüber dem KVH um einen Faktor 10 höher liegt.

### **Stegträger**

Bei Stegträgern handelt es sich um zusammengesetzte Querschnitte aus zwei Gurten in Furnierschichtholz und einem Steg aus einem Holzwerkstoff (in der Regel OSB). Der zusammengesetzte Querschnitt vermindert zunächst einmal die Wärmebrücke, aufgrund der im Vergleich zum Vollholzständer geringeren Stärke des durchgehenden Holzstegs und wirkt sich somit positiv auf den gesamt-U-Wert der Wand aus. Wie jedoch [Horn, 2003] nachweist, wird ein nicht unwesentlicher Teil der Einsparung dadurch wieder zu Nichte gemacht, dass die Wärmeleitfähigkeit des OSB Stegs parallel zur Faser um einen Faktor von ca. 2,2 höher ist, als senkrecht zur Faser. Eine Überdämmung von Vollholzständern mit zum Beispiel einer Holzwoleleichtbauplatte hat ab einer Stärke von 6 cm den gleichen verbessernden Effekt\*, wie ein Stegträger. In Bezug auf den Leimanteil ist der Stegträger sowohl gegenüber dem KVH, als auch dem Balkenschichtholz klar im Nachteil, da sowohl das Furnierschichtholz (Leimanteil ca. 7,2 %) der beiden Gurte, als auch die OSB Platte (Leimanteil ca. 7%) im Steg deutlich höhere Werte aufweisen. Von den Kosten her liegt ein FJI 59/200 Stegträger bei einem Materialpreis von ca. 7,00 EUR/m und liegt damit über dem KVH und dem Duobalken. Des weiteren ist beim Stegträger in der Regel auch der Montageaufwand ein höherer.

\*) FJI 59/300 und 26 cm Holzweichfaserdämmung WLG 040 ggü. Duobalken 6/20 und 20 cm + 6 cm Holzweichfaserdämmung WLG 040, Ständerabstand in beiden Fällen 62,5 cm,  $U_{\text{ges}} = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$

### **Dämmständer**

Bei sogenannten Dämmständern handelt es sich um eine Weiterentwicklung der vorgenannten Stegträgern, bei denen der Steg in einzelne Stäbe aufgelöst wurde. Es entsteht somit ein aus einzelnen Lamellen verleimter, leiterförmiger Träger. Die Wärmebrücke ist damit auf ein absolutes Minimum verringert, auch wenn für die Lamellen bzgl. der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Faserrichtung grundsätzlich das gleiche gilt, wie für die OSB Platten im Steg des Stegträgers. Vom Leimanteil sind die Dämmständer mit Balkenschichtholz vergleichbar (Leimanteil ca. 1,0 %) und somit besser, als der Stegträger aus Furnierschichtholz und OSB. Der Dämmständer in 200 mm Tiefe liegt von den Kosten her bei ca. 6,30 EUR und ist damit etwas

günstiger, als der Stegträger und das KVH, aber etwas teurer, als der Duobalken. Auch hier ist der Montageaufwand etwas höher, als bei den Vollholzständern.

## Abhängigkeiten der Ständerwahl

Die Unterschiede in den Ökobilanzen der einzelnen Ständer sind mit Ausnahme des Treibhauspotentials nur sehr gering. Die größeren Unterschiede bestehen in Bezug auf den Preis, als auch auf die Dämmeigenschaften. Da die Wahl des Dämmständers unmittelbar Einfluss auf den Umfang der Wärmebrücke und somit die Transmissionswärmeverluste des Gebäudes hat, ist die Frage welcher Ständer am geeignetsten ist nicht ausschließlich aus dem Blickwinkel der reinen Materialbetrachtung zu beantworten. Es gibt komplexe Abhängigkeiten zu anderen Bauteilen und insbesondere zur Wahl des Technikkonzepts. Diese sind daher ausführlich im Kapitel 7.1.3 Ständerwerk erläutert.

### 9.4.4 Dämmung

#### grundsätzliche Überlegungen zur Bewertung von Dämmstoffen

Für die Verwendung im Holzbau eignen sich in der Regel eher weiche Dämmstoffe in Form von Matten bzw. lose Schüttungen. Sehr formstabile Dämmstoffe lassen sich nur mit erhöhtem Aufwand an konstruktiv notwendige Ständer, Unterkonstruktionen, etc. anpassen. Andere sind für den Einsatz in/an Aussenwänden gänzlich ungeeignet und wurden daher nur zur Einordnung der Vor- und Nachteile in Bezug zu üblichen Dämmstoffen mit untersucht (grau markiert). Folgende Dämmstoffe wurden recherchiert:

Dämmstoffe aus mineralischen Rohstoffen:

- Mineralfaser (Steinwolle)
- Mineralfaser (Glaswolle)
- Schaumglasschotter

Dämmstoffe aus fossilen Rohstoffen:

- expandiertes Polystyrol (EPS)
- extrudiertes Polystyrol (XPS)

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen:

- Holzfasereinblasdämmung
- Holzfaserdämmplatten
- Zelluloseeinblasdämmung
- Zellulosefaserplatten

Da die Dämmstoffe unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen, ist es für einen Vergleich der Ökobilanzdaten erforderlich, dass diese in Abhängigkeit zu Ihrem Wärmedurchlaßwiderstand gesetzt werden. [Isopp, 2009] hat dies für im Bauwesen übliche Dämmstoffe

sowohl für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (PENRT) und das GWP zusammengestellt, hierzu allerdings lediglich die Datensätze aus der Herstellungsphase herangezogen. Da sich die unterschiedlichen Dämmstoffarten aber in den Auswirkungen Ihrer Entsorgungsszenarien erheblich unterscheiden, greift eine komplette Vernachlässigung der Entsorgung auch wenn, (wie [Isopp, 2009] anmerkt) eine Betrachtung von Recyclingszenarien aufgrund fehlender Daten schwer zu fassen ist nach Auffassung der Verfasser dennoch zu kurz. Auch scheint eine alleinige Betrachtung von GWP und PENRT in Anbetracht der Heterogenität der unterschiedlichen Dämmstoffe nicht ausreichend.

Einen alternativen Weg der Bewertung gehen [Sprengard et. al., 2013], in dem Sie für die einzelnen Dämmstoffe energetische Amortisationszeiten ermitteln. Auch diese Studie beschränkt sich dabei in Ihrer Betrachtung auf die Herstellungsphase und lässt so insbesondere das für manche Baustoffe vorteilhafte Entsorgungspotential außer Acht. [Sprengard et. al., 2013] setzen den Energieaufwand (PENRT) für die Dämmstoffherstellung und die über die Zeit eingesparten Transmissionswärmeverluste bzw. eingesparte Heizenergie ins Verhältnis. Da Energieeinsparungen aber zum einen stark von den U-Werten der übrigen Bauteilschichten und den zu erreichenden Gesamt-U-Werten in einem nicht linearen Verhältnis abhängen, ist eine solche Betrachtung zum einen recht aufwendig. Zum anderen erscheint diese Betrachtungsweise vor allem für die Bestandssanierung geeignet. So werden zum Beispiel Amortisationszeiten in Abhängigkeit des U-Werts von Bestandsbauteilen angegeben. Es wird vor allem aufgezeigt, ab welchem Punkt sich eine zunehmende Verbesserung der Aussenhülle immer weniger rechnet und nicht so sehr die grundsätzlichen ökologischen Unterschiede der einzelnen Dämmstoffe dargestellt. Diese lassen sich aus den Ergebnissen nur indirekt ablesen. Auch ist die Betrachtung auf energetische Aspekte beschränkt. Aussagen zu den Umweltwirkungskategorien (z.B. dem Treibhauspotential) sind nicht möglich da man in einer Betrachtung, in der man die Transmissionswärmeverluste miteinbezieht, die unterschiedlichen Einflüsse von verschiedenen Technikkonzepten mit darstellen müsste.

Dass eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus und der Umweltkategorien zu deutlich anderen Ergebnissen führt, als eine reine Betrachtung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs für die Herstellung zeigt u.a. auch [Becker, 2014]. In der Studie zur Ressourceneffizienz von Dämmstoffen werden verschiedene Materialien hinsichtlich Ihres GWP und PENRT Wertes für die Herstellungs- und Entsorgungsphase untersucht. Als Bezugsgröße wurde aufgrund der unterschiedlichen Materialkennwerte für die betrachteten Bauteile ein gleichbleibender U-Wert von  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  gewählt. Des Weiteren stellt die Autorin die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Rohstoffarten (mineralisch, fossil, nachwachsend) und der unterschiedlichen Entsorgungs- bzw. Recyclingszenarien heraus (Deponierung, thermische Verwertung, stoffliche Verwertung).

Aus den vorgenannten Gründen wurden für die Dämmstoffwahl des +++Hauses auf Grundlage der Daten der ÖkobaDat [BMUB, 2014] die Ökobilanzdaten der unterschiedlichen Dämmstoffe für den gesamten Lebenszyklus und deren Herstellungskosten in Bezug zu Ihrem Wärmedurchlasswiderstand ermittelt. Da die Lebensdauer der unterschiedlichen Außenwandkonstruktionen nicht maßgeblich von der Beschaffenheit des Dämmstoffes abhängt, sondern im Wesentlichen von dem Konstruktionsprinzip der Außenwand bestimmt wird und Dämmstoffe im Rahmen des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren in der Regel keine Unterhalts- und/oder Instandsetzungsmaßnahmen erfordern, wurde die Nutzungsphase bei der Betrachtung der Ökobilanzdaten von Dämmstoffen nicht weiter spezifiziert. So ist die zum Beispiel kürzere Lebenserwartung von Wärmedämmverbundsystemen eine Folge der Haltbarkeit der bewitterten Putzschichten und hat nichts mit den Materialeigenschaften des gewählten Dämmstoffs an sich zu tun (vgl. [Sprengard et. al., 2013, S.128]).



Im Rahmen dieses Arbeitspakets werden daher zunächst nur die ökologischen und ökonomischen Unterschiede der verschiedenen Dämmstoffe, die in den Materialeigenschaften begründet liegen, untersucht. Die Frage, in welcher Stärke es sinnvoll ist, zu dämmen hat wie erläutert vielfältige, komplexe Abhängigkeiten. Diese Fragestellung wurde daher nachgelagert untersucht und im Kapitel 7.1.7 Optimierung der Aussenwanddämmung dokumentiert.

MATERIAL	Wärmeleitfähigkeit	GWP pro m <sup>2</sup> K/W	ODP pro m <sup>2</sup> K/W	AP pro m <sup>2</sup> K/W	EP pro m <sup>2</sup> K/W	POCP pro m <sup>2</sup> K/W	ADPE pro m <sup>2</sup> K/W	ADPF pro m <sup>2</sup> K/W	PENRT pro m <sup>2</sup> K/W	Kosten pro R=5,71	Kostendiff. ++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einspar. GWP	Beitrag PENRT ++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Expandiertes Polystyrol (EPS)</b>	0,035 W/mK	3,12 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,000000004 kg R11 äqv.	0,0030 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,00031 kg Phos äqv.	0,00121 kg Ethen äqv.	0,0193 kg Sb äqv.	40,08 MJ	40,08 MJ	nur zur Einordnung	2,672,28 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+1.447,48 kg CO <sup>2</sup> äqv.	34.329 MJ	+14.474,85 MJ	34.329 MJ	+14.474,85 MJ
<b>Expandiertes Polystyrol (EPS)</b>	0,040 W/mK	2,69 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,000000000 kg R11 äqv.	0,0027 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,00028 kg Phos äqv.	0,00119 kg Ethen äqv.	0,0168 kg Sb äqv.	34,72 MJ	34,72 MJ	nur zur Einordnung	2,303,99 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+1.224,80 kg CO <sup>2</sup> äqv.	29.738 MJ	+9.884,01 MJ	29.738 MJ	+9.884,01 MJ
<b>Glaswolle Klemmfilz</b>	0,032 W/mK	1,69 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,000000004 kg R11 äqv.	0,00350 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,000613 kg Phos äqv.	0,000406 kg Ethen äqv.	0,00007 kg Sb äqv.	24,55 MJ	27,37 MJ	13,08 EUR	+420,00 EUR	1.447,49 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+222,69 kg CO <sup>2</sup> äqv.	keine Einsparung	23.442 MJ	+3.588,74 MJ
<b>Glaswolle Klemmfilz</b>	0,035 W/mK	1,43 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,000000003 kg R11 äqv.	0,00297 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,000519 kg Phos äqv.	0,000344 kg Ethen äqv.	0,00006 kg Sb äqv.	20,79 MJ	23,18 MJ	10,28 EUR		1.222,48 kg CO <sup>2</sup> äqv.			19.854 MJ	
<b>Glaswolle Klemmfilz</b>	0,040 W/mK	1,26 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,000000003 kg R11 äqv.	0,00261 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,000457 kg Phos äqv.	0,000303 kg Ethen äqv.	0,00005 kg Sb äqv.	18,32 MJ	20,42 MJ	nicht als Standardware verfügbar		1.079,19 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-145,61 kg CO <sup>2</sup> äqv.		17.490 MJ	
<b>Holzfasereinblasdämmung</b>	0,040 W/mK	-0,74 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,00000002 kg R11 äqv.	0,000317 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,000269 kg Phos äqv.	0,000243 kg Ethen äqv.	0,00000 kg Sb äqv.	-8,63 MJ	-15,10 MJ	17,42 EUR	+1.071,00 EUR	-633,81 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-1.858,61 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,58 EUR/kg CO <sup>2</sup> äqv.	-12.933 MJ	-32.786,82 MJ
<b>Holzweichfaserplatte</b>	0,039 W/mK	-10,94 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,000000001 kg R11 äqv.	0,0129 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,00158 kg Phos äqv.	0,00103 kg Ethen äqv.	0,00000 kg Sb äqv.	79,07 MJ	-16,87 MJ	36,49 EUR	+3.931,04 EUR	-8.599,26 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-9.824,06 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,40 EUR/kg CO <sup>2</sup> äqv.	-14.449 MJ	-34.302,83 MJ
<b>Steinwolle Klemmfilz</b>	0,035 W/mK	1,12 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,000000004 kg R11 äqv.	0,00960 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,001646 kg Phos äqv.	0,000578 kg Ethen äqv.	0,00000 kg Sb äqv.	15,18 MJ	16,75 MJ	12,73 EUR	+367,50 EUR	959,28 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-265,52 kg CO <sup>2</sup> äqv.	1,38 EUR/kg CO <sup>2</sup> äqv.	14.346 MJ	-5.507,30 MJ
<b>Zelluloseeinblasdämmung</b>	0,040 W/mK	1,02 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,000000000 kg R11 äqv.	0,001805 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,000427 kg Phos äqv.	0,0000563 kg Ethen äqv.	0,00027 kg Sb äqv.	-8,16 MJ	-9,48 MJ	14,85 EUR	+685,50 EUR	873,63 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-351,17 kg CO <sup>2</sup> äqv.	1,95 EUR/kg CO <sup>2</sup> äqv.	-8.120 MJ	-27.973,29 MJ
<b>Zellulosefaserplatte</b>	0,040 W/mK	1,82 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,000000003 kg R11 äqv.	0,00319 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,000759 kg Phos äqv.	0,0001 kg Ethen äqv.	0,00048 kg Sb äqv.	-14,51 MJ	-16,85 MJ	45,57 EUR	+5.293,50 EUR	1.558,83 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+334,03 kg CO <sup>2</sup> äqv.	keine Einsparung	-14.432 MJ	-34.285,70 MJ

*Abbildung 9.4.4-1: Ökobilanzdaten Dämmstoffe*

Um zu analysieren, welche Wirkungskategorien maßgeblich zur Beurteilung der ökologischen Qualität von Dämmstoffen heranzuziehen sind, wurden die Werte der einzelnen Materialien in Bezug zu den westeuropäischen Gesamtemissionen normiert und in einem Netzdiagramm dargestellt. Wie erwartet liegen die größten Unterschiede im Bereich des Treibhauspotentials (GWP). Darüber hinaus sind aber auch die Kategorien bodennahes Ozonbildungspotential (POCP), Versauerungspotential (AP) und Überdüngungspotential (EP) in genannter Reihenfolge von abnehmender Relevanz. Das Ozonabbaupotential (ODP) ist in Bezug auf die analysierten Dämmstoffe nahezu irrelevant. Insgesamt lässt sich konstatieren, dass die für den Holzbau in Frage kommenden Dämmstoffe relativ vergleichbare Umwelteigenschaften haben. Die für die Aussenwandkonstruktion (insbesondere für Holzrahmenkonstruktionen) nur bedingt in Frage kommenden Dämmstoffe EPS, XPS und Schaumglasschotter weisen aber in Bezug auf das GWP und das POCP zum Teil deutlich schlechtere Werte auf.

Von den für die Aussenwand in Frage kommenden Dämmstoffen weist Mineralfaser die schlechtesten Werte in allen Kategorien, insbesondere aber in Bezug auf das AP auf. Die Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, sowie Mineralfaser unterscheiden sich maßgeblich nur in Ihrem GWP Wert, sowie in geringerem Maße in Bezug auf das AP. Das ausgeglichene Profil hat die Holzfasereinblasdämmung, die nur in Ihrem GWP Wert von der Holzfaserplattendämmung mit einem niedrigeren Wert überboten wird. Der Vorteil der Holzfaserplattendämmung ist allerdings im Wesentlichen auf die höhere Rohdichte und den damit einhergehenden größeren Materialverbrauch zurückzuführen. Erkauft wird dies neben dem höheren Preis mit den in Folge des Materialverbrauchs höheren Werten in Bezug auf AP, POCP und EP. Man könnte zugespitzt ausgedrückt auch zusätzlich einen massiven Holzblock in das Gebäude einbauen und würde in Bezug auf das GWP den gleichen Effekt erzielen. Dies spiegelt sich nicht zuletzt auch im deutlich höheren Preis für die Holzfaserplattendämmung wieder. Insofern ist aus ökologischer Sicht eine Verwendung von Holzfasereinblasdämmung zu präferieren, sofern dies das Kostenbudget des +++Hauses zulässt. Alternativ wären vertretbare Dämmstoffe auch in der folgenden Reihenfolge möglich: Zelluloseeinblasdämmung, Zellulosefaserplatten, Mineralfaser (Glaswolle). Eine Dämmung mit Mineralfaser (Steinwolle) ist aus ökologischer Sicht die schlechteste Variante. Holzweichfaserplatten sind aus Sicht der Verfasser nur dann eine Option, wenn Ihr in der größeren Rohdichte begründete größere Wärmespeicherfähigkeit sinnfällig genutzt werden kann. die Frage in wie weit dies z.B. in Bezug auf das Thema Aktivierung der Fassade als Luftkollektor der Fall ist, wurde im Arbeitspaket AP 08.3 solaraktive Fassade untersucht (vgl. auch 7.1.5 solaraktive Fassadenbekleidung).

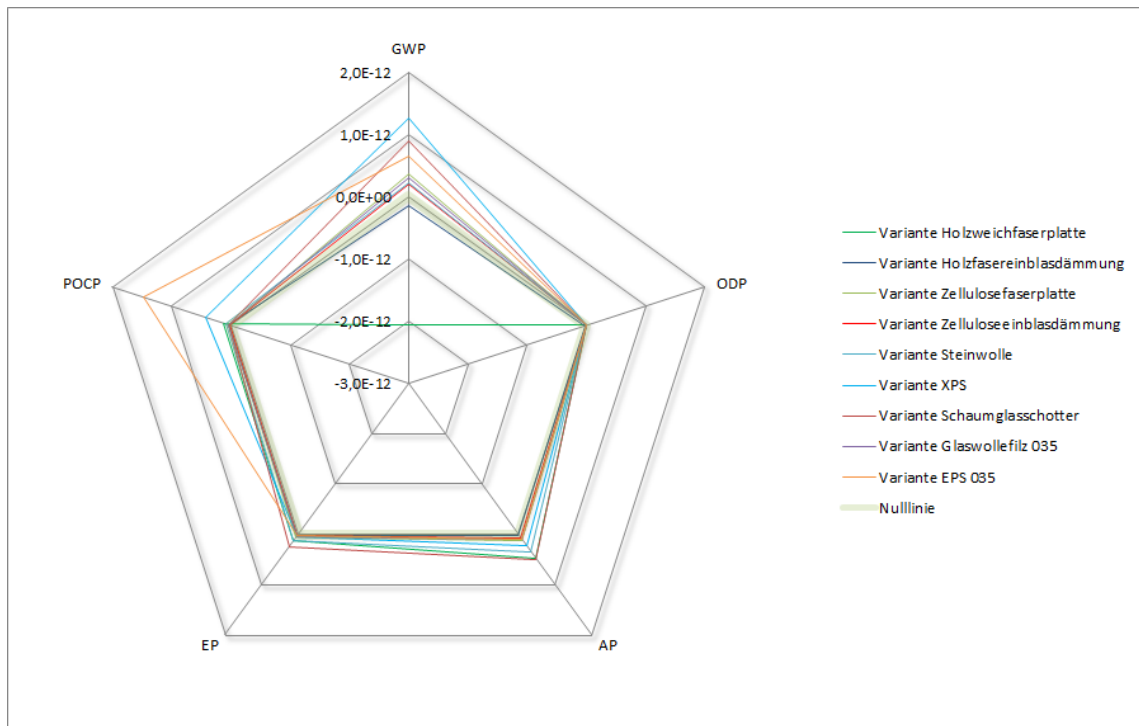


Abbildung 9.4.4-2: Umweltwirkungen Dämmstoffe, normiert

## Recycling von Dämmstoffen

Ein wesentlicher, struktureller Vorteil von Dämmstoffen im Holz(rahmen)bau ist die Lösbarkeit von Verbindungen. Im Gegensatz zu Wärmedämmverbundsystemen lassen sich Dämmstoffe im Zuge vom Rückbau unabhängig von Material und Form (Matten oder Schüttungen) sehr gut von den konstruktiven Bauteilen trennen. Matten lassen sich ausbauen. Schüttungen können abgepumpt werden. Im Falle von energetischen Verwertungsszenarien müssen nachwachsende Dämmstoffe aus Holzkonstruktionen nicht einmal ausgebaut werden. Bei stofflicher Verwertung hängt dies in der Regel von der genauen Beschaffenheit des nachwachsenden Dämmstoffs ab. Im Gegensatz hierzu führen die Verklebungen von Verbundsystemen zu stofflichen Verunreinigungen, die ein Recycling erheblich erschweren.

Die Kompostierbarkeit von nachwachsenden Rohstoffen wird in zunehmendem Maße (insbesondere von Herstellerseite) als eine positive und erstrebenswerte Eigenschaft beworben. Zum einen ist jedoch für eine Vielzahl von nachwachsende (Roh-) Dämmstoffen eine Kompostierung aufgrund von Zusatzstoffen praktisch aber nicht durchführbar (vgl. [Paschko et al., 2012, S.27]), zum anderen erscheint sie aber auch aus ökologischer Sicht gar nicht als sinnvoll, da in diesem Szenario wie bei der thermischen Verwertung der im Rohstoff gebundene Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre emittiert wird, allerdings ohne daraus energetisch einen Nutzen zu ziehen. Unabhängig hiervon sind aber die stofflichen und energetischen Verwertungsmöglichkeiten von nachwachsenden Rohstoffen grundsätzlich als gut zu bewerten.

Für Mineralfaserdämmstoffe besteht, wenn Sie ohne Verunreinigungen ausgebaut werden können (für WDVS Systeme in der Regel nicht möglich) theoretisch ein gutes stoffliches Recyclingpotential. Mineralfasern können sowohl zu neuen Dämmstoffen verarbeitet werden (z.B. durch Einschmelzung) als auch als Zuschlagstoffe in der Ziegelindustrie Verwendung

finden. Dies erfordert jedoch eine spezielle Recyclinglogistik, die bisher nicht etabliert und daher noch aufzubauen wäre. Niedrige Deponiekosten haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass keine nennenswerten Anteile verbauter Mineralfaserdämmstoffe im Zuge des Rückbaus stofflich verwertet wurden. Seit einiger Zeit steigende Deponiekosten und verschärfte gesetzliche Anforderungen könnten diesbezüglich zukünftig zu einer Veränderung führen.

#### **9.4.5 Aussenwandbekleidung**

##### **solaraktive (transparente) Fassadenbekleidungsmaterialien**

Vor dem Hintergrund, dass es angestrebt wurde, eine solaraktive Fassade herzustellen, wurden verschiedene transparente Materialien hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen und Kosten bewertet. All diese Materialien werden als hinterlüftete Konstruktion auf einer Unterkonstruktion (in der Regel aus Aluminium) montiert. Aus der Gruppe der Kunststoffe wurden Polycarbonatstegplatten und Acrylglasplatten (PMMA) untersucht. Alternativ wurde Industrieglas in U-Profilform untersucht. Normiert man die Werte in Relation zu den westeuropäischen Gesamtemissionen, so fällt in Bezug auf das Treibhauspotential (GWP) auf, dass das Acrylglas mit einem ca. doppelt so hohen GWP Wert die größten Auswirkungen auf die Umwelt hat. Sowohl Polycarbonat, als auch Industrieglas schneiden in dieser Umweltwirkungskategorie deutlich besser ab und liegen auf einem nahezu vergleichbaren Niveau. Allerdings kommt es in Bezug auf das Industrieglas zu einer deutlichen Lastverschiebung. Mit dem verringerten Treibhauspotential geht für dieses Material ein sehr hohes Versauerungspotential einher, sodass man eindeutig subsumieren kann, dass von den transparenten Fassadenbekleidungen Polycarbonat die ökologischste Variante darstellt. Darüber hinaus ist es aus dieser Gruppe auch das wirtschaftlichste Bekleidungsmaterial.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>	Kosten-diff. +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einspar. GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
Acrylglas PMMA (ge-gossen)	48,61 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,00000006 kg R11 äqv.	0,0911 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00712 kg Phos äqv.	0,0185 kg Ethen äqv.	0,0000114 kg Sb äqv.	678,63 MJ	721,91 MJ			7,291,50 kg CO <sub>2</sub> äqv.	+6,522,00 kg CO <sub>2</sub> äqv.		108,287 MJ	+96,425 MJ
Industrieglas (1-fach Ver-glasung)	24,46 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,00000017 kg R11 äqv.	0,214 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,0232 kg Phos äqv.	0,0122 kg Ethen äqv.	0,000121 kg Sb äqv.	353,67 MJ	371,66 MJ	287,60 EUR	+36,840 EUR	3,669,00 kg CO <sub>2</sub> äqv.	+2,899,50 kg CO <sub>2</sub> äqv.	keine Einspa- rung	55,749 MJ	+43,887 MJ
Leisten-schalung Lärche	-7,86 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,00000003 kg R11 äqv.	0,0055 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,0018551 kg Phos äqv.	-0,000048 kg Ethen äqv.	-0,00000005 kg Sb äqv.	-64,63 MJ	-77,40 MJ	83,91 EUR	+6,286,50 EUR	-1,179 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-1,948,50 kg CO <sub>2</sub> äqv.	3,23 EUR/ kg CO <sub>2</sub> äqv.	-11,610 MJ	-23,472 MJ
Polycarbonat Hohl-kammer-platten	23,90 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,00000003 kg R11-Äqv.	0,0242 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00395 kg Phos äqv.	0,00396 kg Ethen äqv.	0,0000486 kg Sb äqv.	292,59 MJ	310,86 MJ	206,00 EUR	+24,600 EUR	3,585,00 kg CO <sub>2</sub> äqv.	+2,815,50 kg CO <sub>2</sub> äqv.	keine Einspa- rung	46,629 MJ	+34,767 MJ
Putz, gewebe-armiert	5,13 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,00000072 kg R11 äqv.	0,02036 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,003573 kg Phos äqv.	0,002017 kg Ethen äqv.			79,08 MJ	42,00 EUR		769,5 kg CO <sub>2</sub> äqv.			11,862 MJ	

Abbildung 9.4.5-1: Ökobilanzdaten Fassadenbekleidungen

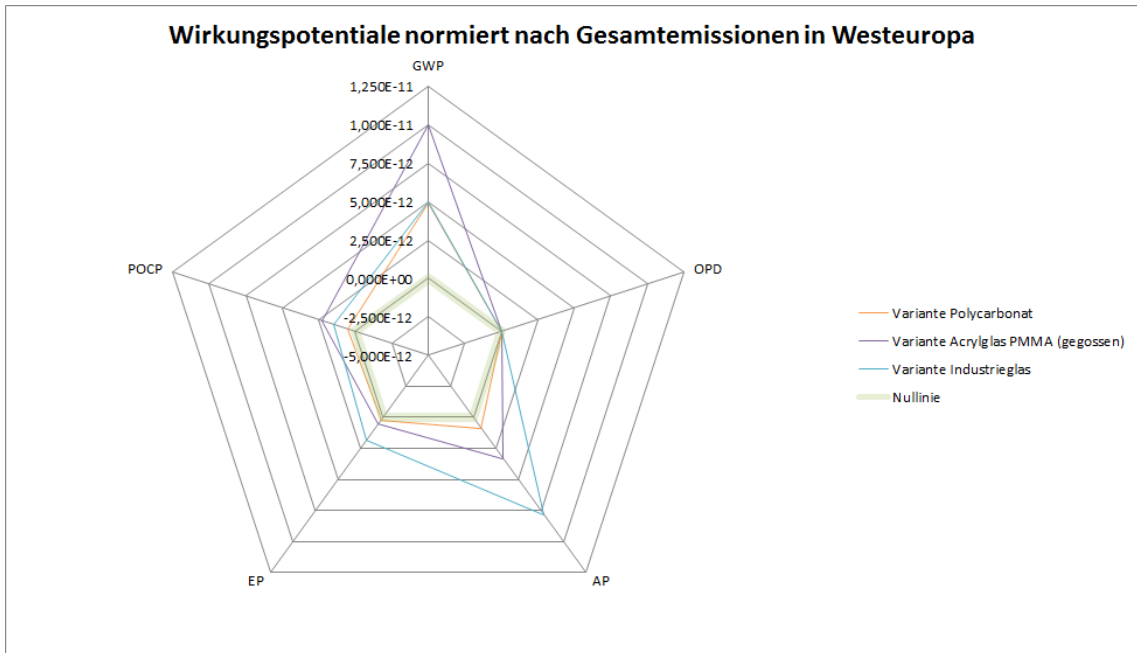


Abbildung 9.4.5-2: Umweltwirkungen transparente Fassadenbekleidungen, normiert

## Referenzmaterialien

Um allerdings auch die Frage, ob sich eine solaraktive Fassade überhaupt lohnt, beantworten zu können, wurden neben den transparenten Materialien sowohl eine Lärchenholzschalung, als auch ein mineralisches Putzsystem (im Sinne eines WDVS, hier jedoch ohne Betrachtung des Dämmstoffs) untersucht. Es zeigt sich, dass beide Varianten bzgl. des Treihauspotentials aus der Konstruktion heraus zunächst vorteilhafter sind. Daneben kommt es in abnehmender Reihenfolge zu geringfügigen Unterschieden in den Kategorien Versauerungspotential (AP), bodennahes Ozonbildungspotential (POCP) und Überdüngungspotential (EP). Im Vergleich zum GWP sind die Werte jedoch von geringerem Einfluss. Das Ozonabbaupotential (ODP) ist erneut nahezu ganz ohne Einfluss auf die westeuropäischen Gesamtemissionen.

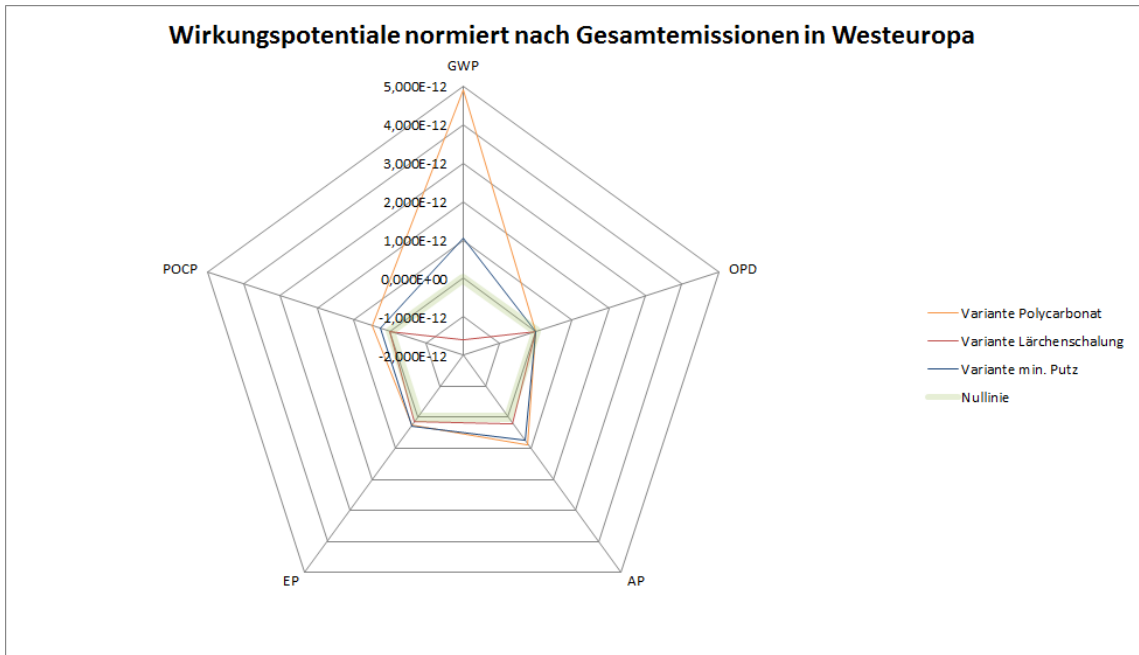


Abbildung 9.4.5-3: Umweltwirkungen Polycarbonat Fassadenbekleidung und Referenzmaterialien

Im Folgenden sind die normierten Werte nochmals für alle Varianten gemeinsam dargestellt.

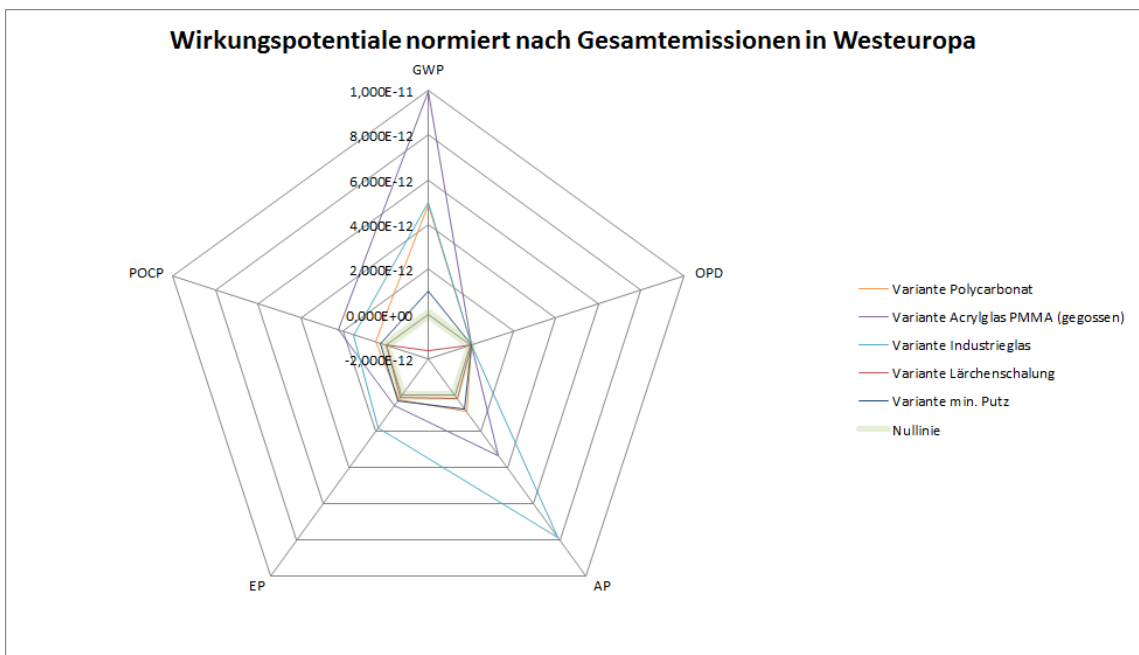


Abbildung 9.4.5-4: Umweltwirkungen Fassadenbekleidungen, normiert

Es zeigt sich sehr deutlich, dass im Vergleich zu den Referenzvarianten nur die Variante aus Polycarbonat überhaupt das Potential besitzt, unter Berücksichtigung der solaraktiven Effekte in einer Gesamtbetrachtung vorteilhaft abzuschneiden. Sowohl das Industrieglas, als auch das



Acrylglas wirken sich bei höheren Kosten sehr nachteilig auf das Treibhauspotential bzw. das Versauerungspotential aus.

Eine Gesamtbetrachtung der Frage, ob eine solaraktive Fassadenkonstruktion aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht vorteilhafter ist, ist jedoch deutlich komplexer und geht deutlich über den Umfang dieses einzelnen Arbeitspakets hinaus. Es gibt insbesondere vielfältige Abhängigkeiten zur gewählten Energieversorgung. Aus diesem Grund wurden umfangreiche thermische Simulationen erstellt. Die Erläuterung und Diskussion der diesbezüglichen Ergebnisse erfolgt daher separat in Kapitel 7.1.5 solaraktive Fassadenbekleidung.

#### **9.4.6 Fensterelemente**

Die Erstellung einer Ökobilanz von Fenstern ist ein sehr komplexes Thema, das sich nur sehr begrenzt mit den einfachen Standarddatensätzen aus der Ökobaudat des [BMUB, 2013] herleiten lässt. Zwar gibt es in der Datenbank eine Vielzahl von Datensätzen für die Einzelbestandteile von Fenstern (Rahmenprofile, Verglasungen, etc.), jedoch beinhalten diese Datensätze aktuell nur Werte für die Module A1-A3, also den Herstellungsprozess. Die End-of-Life Prozesse und evtl. Gutschriften müssen über entsprechende separate Materialdatensätze (für z.B. Holz, Kunststoff, Glas, ...) abgebildet werden. Dies ist in der Regel realistisch nur für die Hauptbestandteile (Rahmenmaterial, Verglasung, etc.) möglich. Im Gegensatz zu den Herstellungsdatensätzen der Bauteile unterscheiden sich diese zudem in der deklarierten Einheit. Werden z.B. die Datensätze für Rahmenprofile für einen Laufmeter Profil deklariert, werden die Datensätze auf Grundlage von Massen (1 kg) angegeben. Die erforderlichen Umrechnungen, Vereinfachungen und Abschätzungen für die Erstellung einer Berechnung über alle Module der Ökobilanz sind somit grundsätzlich möglich stellen aber ein großes Fehler- bzw. Ungenauigkeitspotential dar.

Schaut man sich zunächst nur den in den Datensätzen der Ökobaudat enthaltenen Herstellungsprozess an, so stellt man fest, dass in Bezug auf das Treibhauspotential Holzfenster vor Kunststofffenstern und Aluminiumfenstern am besten abschneiden. Dies gilt auch für alle weiteren Wirkungskategorien, mit Ausnahme des POCP. Hier führen Fenster mit Holzrahmen im Vergleich zu Kunststoff und Aluminiumrahmen zu einer geringfügigen Lastverschiebung.

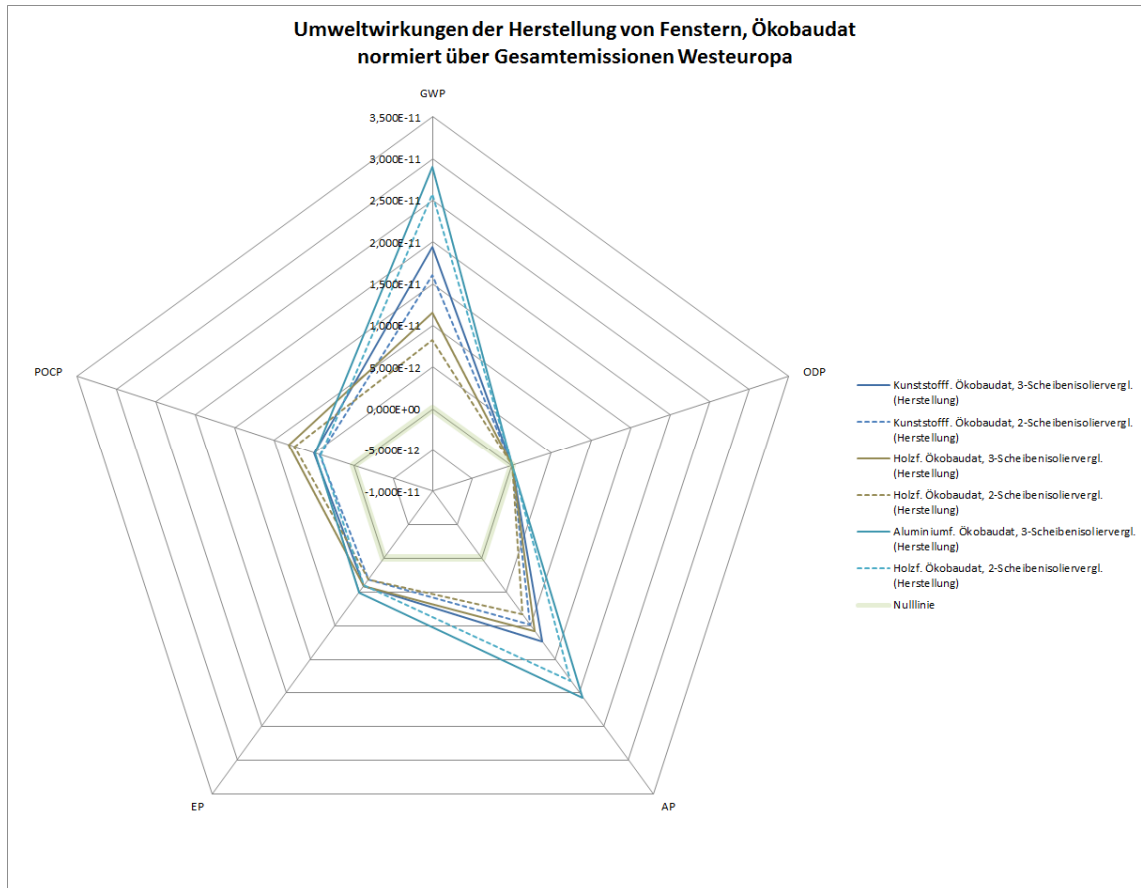


Abbildung 9.4.6-1: Umweltwirkung von Fenstern (Herstellung), normiert

Um die oben bestehende Problematik in Bezug auf die Berücksichtigung der weiteren Module zu umgehen, wurden verschiedene Studien ausgewertet, die Fenster über alle Module der Ökobilanz hinweg modelliert haben.

### ift Rosenheim Studie

Schaut man sich die Ergebnisse der umfassenden Studie des ift Rosenheim [von Houwald et al., 2012] für die Herstellungsphase an, so decken sich diese grundsätzlich mit den Erkenntnissen aus den Datensätzen der Ökobaudat auch wenn die Emissionswerte geringfügig abweichen. Lediglich die angesprochene, geringfügige Lastverschiebung in Bezug auf das POCP lässt sich für die Herstellungsphase in der ift Studie nicht erkennen. Holzfenster schneiden hier auch in Bezug auf das POCP geringfügig besser, als Kunststoff- und Aluminiumfenster ab.

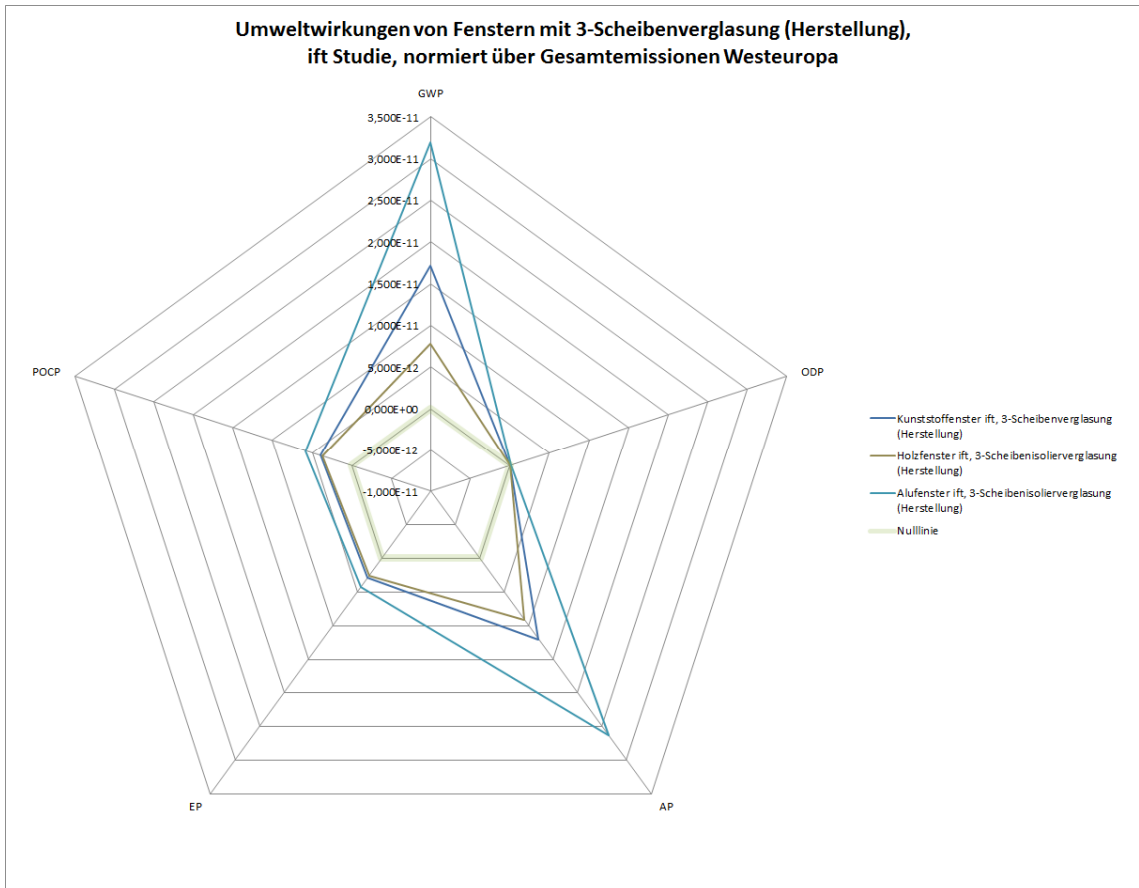


Abbildung 9.4.6-2: Umweltwirkung von Fenstern mit 3-Scheibenverglasung (Herstellung), normiert (ift Rosenheim Studie)

Betrachtet man nun zusätzlich die Emissionen der Entsorgung und mögliche Gutschriften mit, so stellt man fest, dass sich die große Ergebnisspreizung in Bezug auf das GWP stark relativiert, auch wenn die grundsätzliche Rangfolge in Bezug auf das Treibhauspotential erhalten bleibt. Die Holzfenster schneiden weiterhin am besten ab, gefolgt von Kunststofffenstern und Aluminiumfenstern.

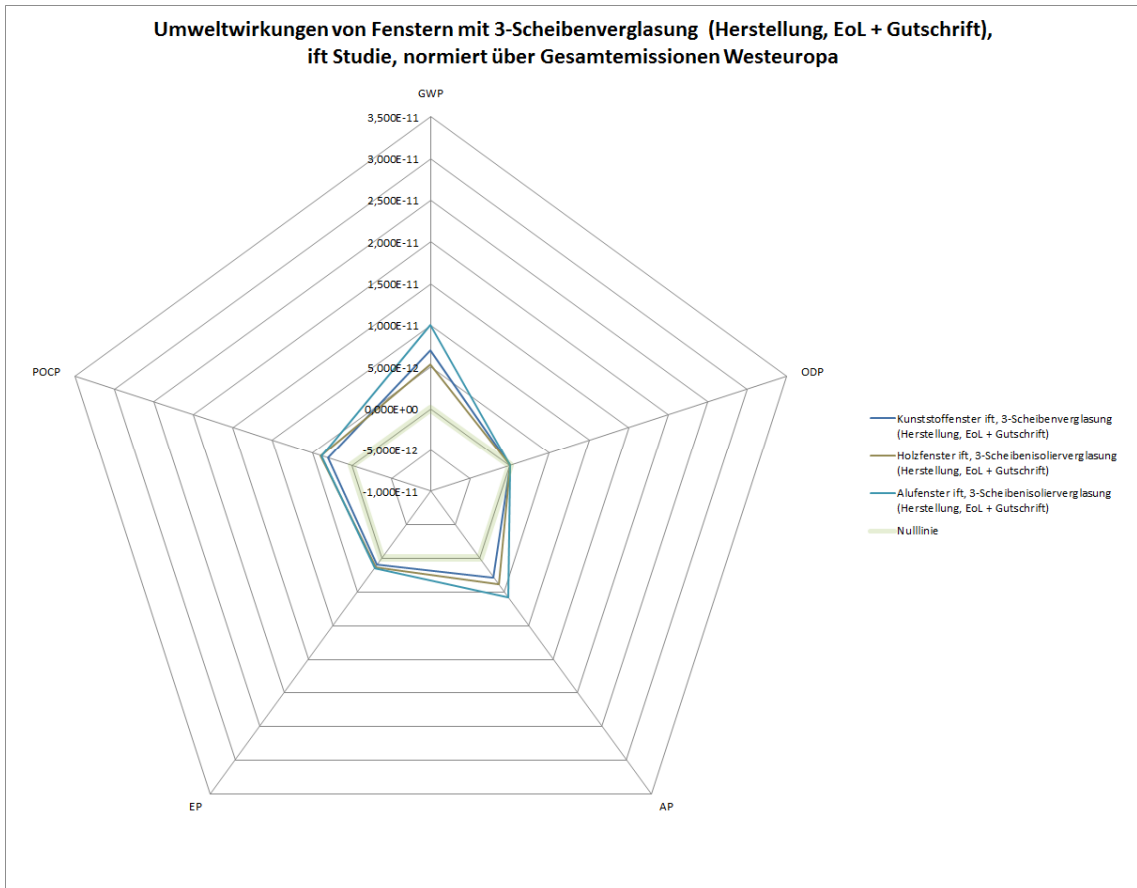


Abbildung 9.4.6-3: Umweltwirkung von Fenstern mit 3-Scheibenverglasung (Herstellung, EoL und Gutschrift), normiert

Da es sich bei Fenstern um zum Teil wartungs- und instandhaltungsintensive Bauteile handelt, ist es aber von großer Wichtigkeit auch diese Module mit zu berücksichtigen. Neben den Modulen am Lebensende betrachtet die ift Studie daher auch noch die Emissionen, die sich aus der Instandhaltung der einzelnen Fenster ergeben. Der gegenüber den Kunststoff- und Aluminiumfenstern stark erhöhte Instandhaltungsaufwand der bisher sehr vorteilhaften Holzfenster führt in dieser Studie dazu, dass das Treibhauspotential von Holzfenstern im Verhältnis stark zunimmt und insgesamt bei einem Wert landet, der knapp über dem von Kunststofffenstern liegt. Auch ergibt sich in dieser Betrachtung wieder eine geringe Lastverschiebung bezüglich des bodennahen Ozonbildungspotentials (POCP). Insgesamt ergibt sich jedoch über alle Wirkungskategorien eine erstaunlich geringe Spreizung der Emissionswerte der unterschiedlichen Fenstertypen.

MATERIAL	GWP/m <sup>2</sup>	ODP/m <sup>2</sup>	AP/m <sup>2</sup>	EP/m <sup>2</sup>	POCP/m <sup>2</sup>	PENRT/m <sup>2</sup>	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
Aluminiumfenster, 2-Scheibenverglasung ift	86,89 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000065 kg R11 äqv.	0,316 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0396 kg Phos äqv.	0,04 kg Ethen äqv.	1.373,12 MJ	6.516,75 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+1.650 kg CO <sup>2</sup> äqv.	102.984,00 MJ	+26.175,00 MJ
Aluminiumfenster, 3-Scheibenverglasung ift	98,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,00000722 kg R11 äqv.	0,37 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0486 kg Phos äqv.	0,047 kg Ethen äqv.	1.535,00 MJ	7.350,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+1.650 kg CO <sup>2</sup> äqv.	115.125 MJ	+26.175,00 MJ
Holzfenster, 2-Scheibenverglasung ift	67,89 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,00000613 kg R11 äqv.	0,311 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,04 kg Phos äqv.	0,192 kg Ethen äqv.	1.271,12 MJ	5.091,75 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+225,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	95.334,00 MJ	+18.525,00 MJ
Holzfenster, 3-Scheibenverglasung ift	79,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,00000685 kg R11 äqv.	0,365 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,049 kg Phos äqv.	0,199 Ethen äqv.	1.433,00 MJ	5.925,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+225,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	107.475,00 MJ	+18.525,00 MJ
Kunststofffenster, 2-Scheibenverglasung ift	64,89 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,00000515 kg R11 äqv.	0,213 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0336 kg Phos äqv.	0,0322 kg Ethen äqv.	1.024,12 MJ	4.866,75 kg CO <sup>2</sup> äqv.		76.809,00 MJ	
Kunststofffenster, 3-Scheibenverglasung ift	76,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,00000587 kg R11 äqv.	0,267 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0426 kg Phos äqv.	0,0392 kg Ethen äqv.	1.186,00 MJ	5.700,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.		88.950 MJ	

Abbildung 9.4.6-4: Ökobilanzdaten von Fenstern

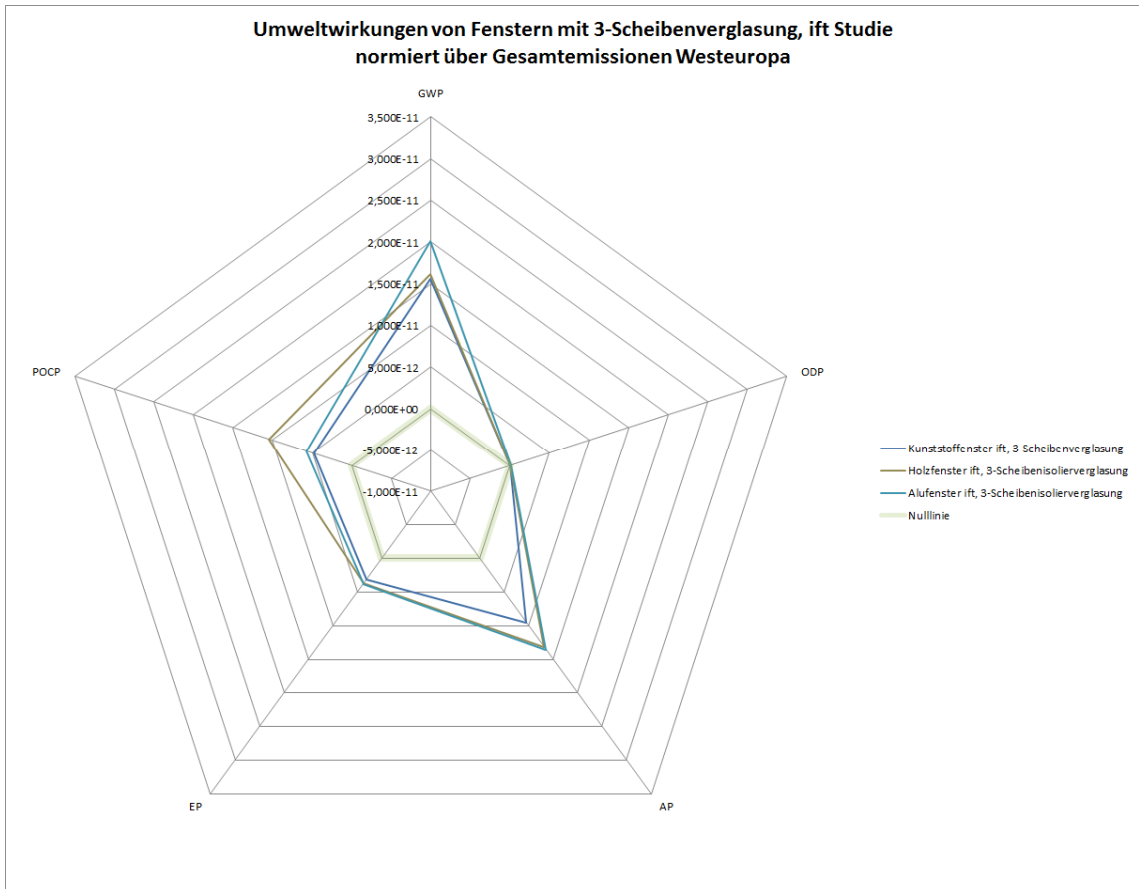


Abbildung 9.4.6-5: Umweltwirkung von Fenstern mit 3-Scheibenverglasung, normiert (ift Rosenheim Studie)

Hierneben lassen sich aus der ift Studie auch die Emissionswerte für Fenster mit 2-Scheibenisolierverglasung ableiten. Da sich der Unterschied im Wesentlichen aus dem Entfall der dritten Glasscheibe ableitet, fallen die Emissionen über alle Kategorien, wie sich aus den folgenden zwei Grafiken erkennen lässt, lediglich etwas geringer aus.

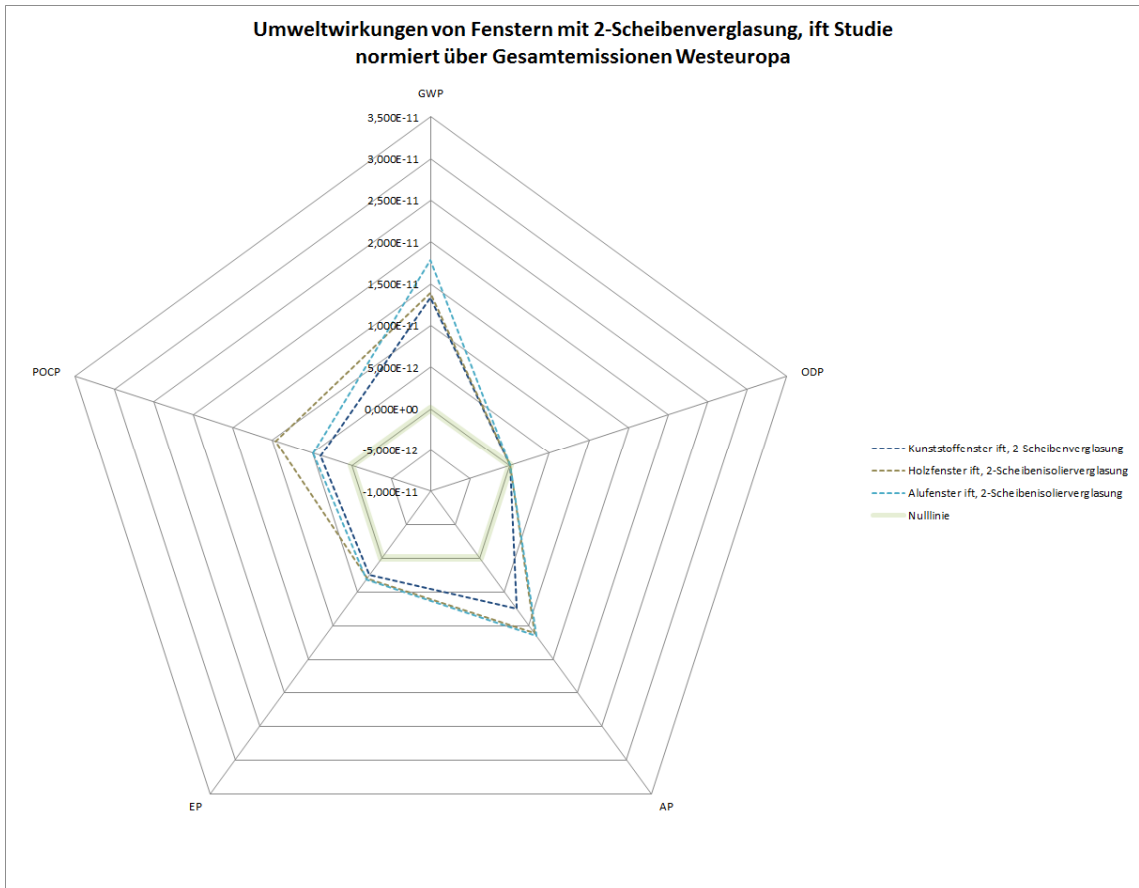


Abbildung 9.4.6-6: Umweltwirkung von Fenstern mit 2-Scheibenverglasung, normiert (ift Rosenheim Studie)

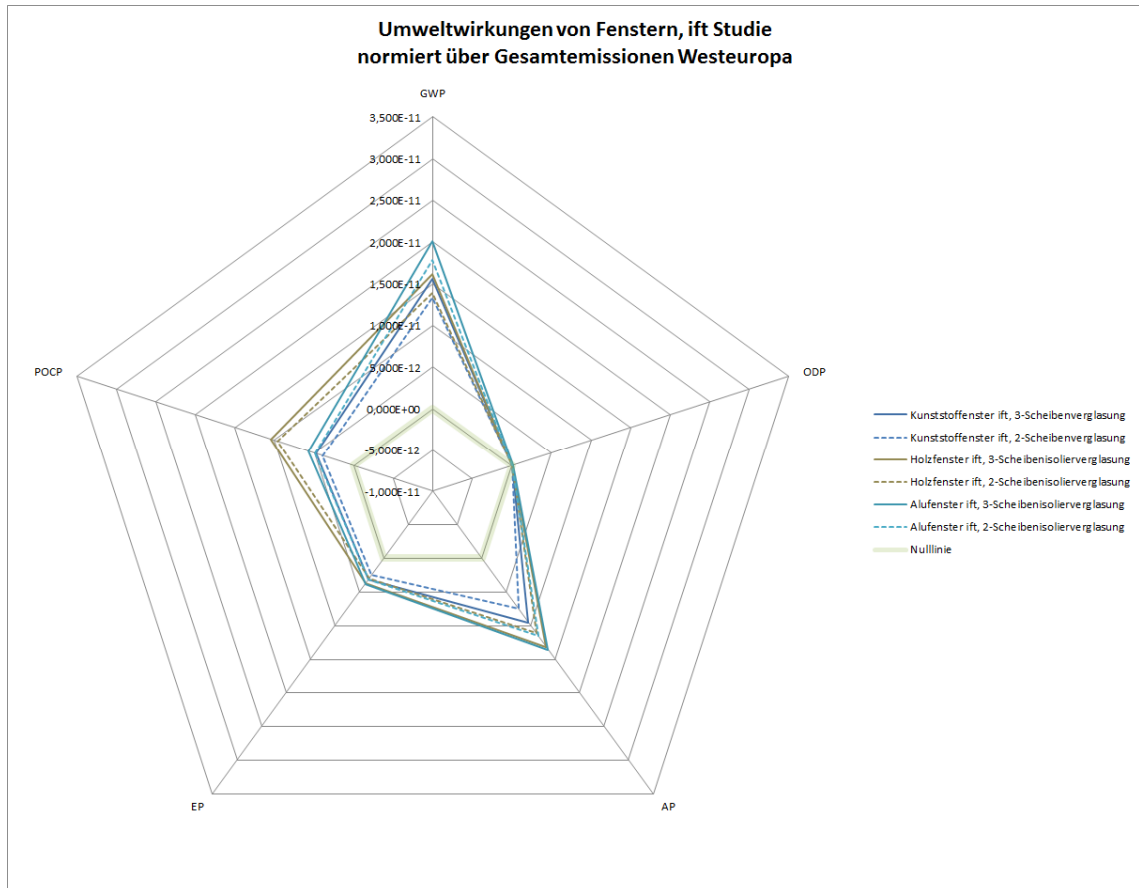


Abbildung 9.4.6-7: Umweltwirkung von Fenstern, normiert (ift Rosenheim Studie), Quelle: [von Houwald et al., 2012]

## Ökopot Studie

Dass die Abschätzung des Aufwands für die Instandhaltung von Fenstern offensichtlich nicht ganz einfach und im Zweifelsfall auch nicht immer eindeutig bzw. objektiv möglich ist, erkennt man, wenn man sich im Vergleich die ÖkoPot-Studie des Johan Heinrich von Thünen Instituts anschaut (vgl. [Albrecht et al., 2008]). Absolute Zahlen werden leider nur für das Treibhauspotential angegeben. Für die übrigen Wirkungskategorien erfolgt nur eine grafische Darstellung. Hieraus ergibt sich aber ein deutlich besseres Abschneiden der Holzfenster, welche in Bezug auf das Treibhauspotential auf einem gegenüber Kunststofffenstern und Aluminiumfenstern deutlich niedrigeren Niveau landen.



MATERIAL	GWP/m <sup>2</sup>	PENRT/m <sup>2</sup>	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
Kunststofffenster, Referenzfenster Ökopot	86,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	1.026,13 MJ	6.450 kg CO <sup>2</sup> äqv.		76.959,75 MJ	
Holzfenster, Referenzfenster Ökopot	61,33 kg CO <sup>2</sup> äqv.	601,20 MJ	4.599,75 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-1.850,25 kg CO <sup>2</sup> äqv.	34.704,00 MJ	-42.255,75 MJ
Holz-Aluminium- Fenster, Referenzfenster Ökopot	64,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	663,00 MJ	4.800,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-1.650,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	49.725,00 MJ	-27.234,75 MJ
Aluminiumfenster, Referenzfenster Ökopot	107,33 kg CO <sup>2</sup> äqv.	1.471,87 MJ	8.049,75 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+1.559,75 kg CO <sup>2</sup> äqv.	110.390,25 MJ	+33.430,50 MJ

Abbildung 9.4.6-8: GWP und PENRT von Fenstern, ÖkoPot Studie, Quelle: [Albrecht et al., 2008]

Weshalb die Ergebnisse der beiden Studien so unterschiedlich ausfallen, lässt sich nicht im Einzelnen nachvollziehen. Es kann letztlich nur vermutet werden, dass unterschiedliche Annahmen und Abschätzungen in den Modulen für die Instandsetzung ausschlaggebend waren. Aus ökologischer Sicht sind somit nach Auffassung der Verfasser sowohl Holz- als auch Kunststofffenster valide Varianten bei der Auswahl eines geeigneten Fenstersystems.

## Ökonomische Bewertung der Fenster

Für das +++Haus wurden auf Grundlage der tatsächlichen Funktionen und Abmessungen der Fenster Preise für die unterschiedlichen in Frage kommenden Fenstersysteme kalkuliert. Hieraus ergibt sich grundsätzlich, dass Kunststofffenster das wirtschaftlichste System darstellen. Typischer Weise ist es bei Kunststofffenstern aufgrund der konstruktiv erforderlichen Stahlanteile in den Rahmen nur eingeschränkt möglich die Uf-Werte zu optimieren. Die kalkulierten Kunststoff-Varianten haben einen Uf-Wert von 1,3 W/m<sup>2</sup>K und sind somit schlechter, als die kalkulierten Holz-Varianten. Dies schlägt sich bei einer 3-Scheibenverglasung mit einem Ug-Wert von 0,7 W/m<sup>2</sup>K in einem Unterschied im Uw-Wert von 0,03 W/m<sup>2</sup>K (0,89 W/m<sup>2</sup>K zu 0,86 W/m<sup>2</sup>K) nieder. Gleichzeitig führt das Holzfenster mit 3-Scheibenverglasung für das +++Haus zu Mehrkosten von ca. 870,00 EUR. Setzt man diese geringen Mehrkosten allerdings ins Verhältnis zum verbesserten Dämmwert des Rahmens, kann man auch von annähernder Preisneutralität sprechen. Aluminium-Holz-Fenster hingegen führen zu deutlichen Mehrkosten von über 9.000 EUR für die Dreischiebenverglasung und fast 8.000 EUR für die Zweischiebenverglasung. Aluminiumfenster wurden aufgrund der negativen Ökobilanz nicht kalkuliert. Aus Kostenperspektive stellen somit ebenfalls sowohl die Holz- als auch die Kunststofffenster eine valide Variante dar.

MATERIAL	Verglasung	U-Wert Glas	U-Wert Rahmen	U-Wert Fenster	Kosten / m <sup>2</sup>	Kostendifferenz +++Haus
Kunststofffenster	2-Scheibenisolierverglasung	Ug= 1,1 W/m <sup>2</sup> K	Uf= 1,3 W/m <sup>2</sup> K	<b>Uw= 1,29 W/m<sup>2</sup>K</b>	256,40 EUR	
Holzfenster	2-Scheibenisolierverglasung	Ug= 1,1 W/m <sup>2</sup> K	Uf= 1,24 W/m <sup>2</sup> K	<b>Uw= 1,21 W/m<sup>2</sup>K</b>	279,23 EUR	+1.712,25 EUR
Holz- Aluminiumfenster	2-Scheibenisolierverglasung	Ug= 1,02 W/m <sup>2</sup> K		<b>Uw= 1,29 W/m<sup>2</sup>K</b>	362,84 EUR	+7.983,00 EUR
Kunststofffenster	3-Scheibenisolierverglasung	Ug= 0,7 W/m <sup>2</sup> K	Uf= 1,3 W/m <sup>2</sup> K	<b>Uw= 0,89 W/m<sup>2</sup>K</b>	294,82 EUR	
Holzfenster	3-Scheibenisolierverglasung	Ug= 0,7 W/m <sup>2</sup> K	Uf= 1,12 W/m <sup>2</sup> K	<b>Uw= 0,86 W/m<sup>2</sup>K</b>	306,41 EUR	+869,25 EUR
Holzfenster	3-Scheibenisolierverglasung	Ug= 0,7 W/m <sup>2</sup> K	Uf= 1,00 W/m <sup>2</sup> K	<b>Uw= 0,84 W/m<sup>2</sup>K</b>	325,97 EUR	+2.335,50 EUR
Holzfenster	3-Scheibenisolierverglasung	Ug= 0,7 W/m <sup>2</sup> K	Uf= 0,94 W/m <sup>2</sup> K	<b>Uw= 0,83 W/m<sup>2</sup>K</b>	335,92EUR	+3.081,75 EUR
Holz- Aluminiumfenster	3-Scheibenisolierverglasung	Ug= 0,53 W/m <sup>2</sup> K	Uf=	<b>Uw= 0,78 W/m<sup>2</sup>K</b>	419,06 EUR	+9.317,25 EUR

Abbildung 9.4.6-9: Ökonomische Bewertung von Fensterqualitäten

## Funktionale Bewertung

Ein Problem von Kunststofffenstern in Bezug auf den Entwurf des +++Hauses sind die begrenzten Feldgrößen. Im Rahmen der Recherche hat sich gezeigt, dass die zum Teil großen Scheibenformate sich mit Kunststoffprofilen nicht realisieren lassen und zusätzliche Kämpferelemente erforderlich wären. Aus diesem Gesichtspunkt betrachtet sind daher Holzfenster für das +++Haus Konzept zu präferieren.

## 9.5 Dach

### 9.5.1 Konstruktion Dach

#### Variante Holzbalkendecke

Die Holzbalkendecke ist, auch wenn Sie ausserhalb des Einfamilienhausbaus fast vollständig von Massivdecken verdrängt wurde, die im Holzbau vorherrschende Deckenkonstruktion. Sie besteht aus Balkenlagen in Abständen von 60 - 80 cm, sowie oberseitig oder unter- und oberseitig aufgebrachten Verschalungen. Die genaue Festlegung der Balkenabstände erfolgt in der Regel aus den üblichen Standardmassen der Ausbaumaterialien. Insofern hat sich ein Achsraster von 62,5 cm in weiten Teilen etabliert. Wirtschaftliche Spannweiten liegen üblicherweise im Bereich von bis zu 5 m. Die Bemessung der erforderlichen Querschnitte ergibt sich in der Regel nicht aus der Standsicherheit, sondern der Gebrauchstauglichkeit (in Folge der Durchbiegung).

Diese kann in Ihrer kostengünstigsten Variante mit einer OSB-Verschalung auf einer Balkenlage aus KVH Trägern hergestellt werden. Aus bauphysikalischer Sicht ist es dabei empfehlenswert den überwiegenden Teil der Dämmstärke oberhalb der konstruktiven Bauteile anzu-

ordnen. Im Sinne einer möglichst einfachen und somit kostengünstigen Konstruktion wurden für das Forschungsprojekt ausschliesslich Aufbauten ausgewählt, bei denen konstruktiven Elemente vollständig innerhalb der luftdichten Hülle liegen und so optimal vor ansonsten möglichen Feuchteschäden in Folge Leckagen, etc. geschützt sind. Wird eine OSB als Schalung verwendet, so wird diese in der Regel mit Gipskartonplatten verkleidet. Diese Konstruktion weist in der normierten Betrachtung ein geringfügig wertnegatives Treibhauspotential (GWP) auf, trägt mit der Gipskartonplatte jedoch vergleichsweise stark zum bodennahen Ozonbildungspotential (POCP) bei.

Alternativ hierzu wurde eine Konstruktion analysiert, bei der die OSB-Schalung durch eine Dreischichtplatte ersetzt wurde. Diese kann aufgrund der Sichtqualität ohne Gipskartonplatte ausgeführt werden. In der Summe führt dies zu einem abgesenkten Treibhauspotential bei vergleichsweise moderaten Mehrkosten. Für das +++Haus lassen sich so ca. 335 kg CO<sub>2</sub>-äqv. einsparen. Die Mehrkosten belaufen sich dabei auf ca. 182,00 EUR. Die spezifischen Optimierungskosten belaufen sich daher auf vergleichsweise kostengünstige 0,54 EUR je eingespartem kg CO<sub>2</sub>-äqv..

### **Variante Furnierschichtholz**

Aufgrund der äußerst geringen Spannweiten sind für die Dachkonstruktion auch vergleichsweise schlanke Plattenquerschnitte als Tragkonstruktion des Daches denkbar. Untersucht wurde so zum Beispiel eine 63 mm starke Furnierschichtholzplatte. Die Konstruktion ist mit durchaus deutlich geringeren Kosten verbunden. So können die Kosten für die Dachkonstruktion des +++Hauses auf diese Weise um ca. 1.039,00 EUR gesenkt werden. Gleichzeitig erweist sich das Furnierschichtholz in der Ökobilanz allerdings als nachteilig. In Bezug auf das Treibhauspotential ist es die einzige untersuchte Konstruktionsvariante, die ein wertpositives Treibhauspotential (GWP) aufweist. Dies ist für einen Material aus nachwachsenden Rohstoffen durchaus überraschend und vor allem auf den hohen Leimanteil, sowie den energieaufwendigen Herstellungsprozess zurückzuführen. Weitaus höhere Emissionen entstehen zudem darüber hinaus im normierten Vergleich in Bezug auf den Beitrag zum Versauerungspotential (AP). Somit ist diese Form des Dachtragwerks zwar aus ökonomischen Erwägungen interessant, führt aber zu deutlich spürbaren ökologischen Nachteilen.

### **Variante Brettsperrholz**

Als alternative zum Furnierschichtholz ist im Bereich der flächigen Tragkonstruktionen eine Brettsperrholzdecke eine weitere Konstruktionsvariante. Bei diesen Konstruktionen handelt es sich um massive Holzkonstruktionen, mit denen sich wirtschaftliche Spannweiten von bis zu 6 m für Einfeldträger bzw. 7,5 m für Durchlaufträger realisieren lassen. Bei den vergleichsweise geringen Spannweiten kann der Baustoff somit allerdings seine Stärken nur begrenzt ausspielen. Dennoch wirkt sich das Brettsperrholz vor allem in Bezug auf das Treibhauspotential (GWP) stark absenkend aus. So lassen sich bei einer Deckenstärke von 10 cm mit dieser Konstruktion nahezu 1 t CO<sub>2</sub>-äqv. Emissionen (978,90 kg CO<sub>2</sub>-äqv.) einsparen. Dies liegt in erster Linie in dem übermäßigen Holzeinsatz begründet, der auch in statischer Hinsicht zunächst nicht erforderlich wäre. Hieraus ergeben sich dann allerdings auch nicht unerhebliche Mehrkosten. Für die Dachkonstruktion des +++Hauses lägen diese bei ca. 962,00 EUR. Die Maßnahme ist mit spezifischen Optimierungskosten von 0,98 EUR/kg CO<sub>2</sub>-äqv. daher vergleichsweise kostenintensiv. Des Weiteren kann man darüber streiten, ob ein statisch nicht begründeter Materialmehreinsatz im Sinne einer erstrebenswerten Ressourceneffizienz vertretbar ist (vgl. 7.3.1 Kompensationsmaßnahmen vor dem Hintergrund ökologischer werden der Stromerzeugung).

## Variante massive Holzbalkendecke

Des Weiteren wurde die Möglichkeit untersucht, eine flächige Deckenkonstruktion aus direkt aneinander liegenden (miteinander vernagelten) Holzbalken (KVH) herzustellen. Dies erweist sich im Vergleich zur Brettspertholzvariante in Bezug auf das Treibhauspotential als noch vorteilhafter, was vor allem auf den geringeren Leimanteil und den weniger energieintensiven Herstellungsprozess zurückzuführen ist, führt allerdings aufgrund des erhöhten Montageaufwands (vernageln der einzelnen Balken untereinander) zu noch größeren Mehrkosten. In Bezug auf das GWP lassen sich so ca. 1,6 t CO<sub>2</sub>-äqv. Emissionen einsparen. Hiermit verbunden sind aber auch Mehrkosten für das +++Haus in Höhe von 1.937,00 EUR. Die spezifischen Optimierungskosten steigen somit auf ca. 1,20 EUR je eingespartem kg CO<sub>2</sub>-äqv. Emission.

## Variante Hohlkastenelemente

Eine flächige Konstruktion mit reduziertem Ressourceneinsatz (Holzeinsatz) stellt die sogenannte Hohlkastendecke dar. Hierfür werden einzelne Bohlen zu hohlen Balken oder Flächenelementen zusammengesetzt. Neben dem Ressourceneinsatz ist auch der Leimanteil gegenüber dem Brettspertholz deutlich geringer, was sich positiv auf alle Umweltwirkungskategorien auswirkt. Allerdings stellt diese Konstruktionsvariante aufgrund des arbeitsintensiven Herstellungsprozesses ebenfalls eine sehr kostenintensive Bauweise dar. Es lassen sich bei Mehrkosten von ca. 1.270,75 EUR ca. 446,80 kg CO<sub>2</sub>-äqv. Emissionen einsparen. Die spezifischen Optimierungskosten liegen daher für den Bereich der Dachkonstruktion mit 2,84 EUR je eingespartem kg CO<sub>2</sub>-äqv. mit Abstand am höchsten.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>	Kosten-differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Balkenlage GK / KVH / OSB</b>	-1,87 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-0,000002184 kg R11 äqv.	0,02617 kg SO <sub>2</sub> -äqv.	0,00684 kg Phos äqv.	0,01584 kg Ethen äqv.	0,01825 kg Sb äqv.	64,32 MJ		76,20 EUR	EUR	-118,76 kg CO <sub>2</sub> -äqv.			-2.622,10 MJ	
<b>Balkenlage KVH / Dreischichtplatte</b>	-6,982 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-0,000001971 kg R11 äqv.	0,007058 kg SO <sub>2</sub> -äqv.	0,0040 kg Phos äqv.	0,003271 kg Ethen äqv.	0,0000174 kg Sb äqv.	-71,70 MJ		79,00 EUR	+182,00 EUR	-453,83 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-335,07 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	0,54 EUR	-10.439,65 MJ	-7.817,55 MJ
<b>Brettspertholz 100mm</b>	-16,73 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-0,0000056 kg R11 äqv.	-0,0223 kg SO <sub>2</sub> -äqv.	-0,0112 kg Phos äqv.	-0,0097 kg Ethen äqv.	-0,000086 kg Sb äqv.	-378,45 MJ	-439,80 MJ	91,00 EUR	+962,00 EUR	-1.097,66 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-978,90 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	0,98 EUR	-29.078,40 MJ	-26.456,30 MJ
<b>Furnierschichtholz (LVL) 63mm</b>	6,08 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-0,0000063 kg R11 äqv.	0,0706 kg SO <sub>2</sub> -äqv.	0,014 kg Phos äqv.	0,00258 kg Ethen äqv.	0,0000077 kg Sb äqv.	298,93 MJ	27,23 MJ	60,21 EUR	-1.039,35 EUR	395,20 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	+513,96 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	geringere Kosten, keine Einsparung	1.769,95 MJ	+4.397,05 MJ
<b>Hohlkammerelement (Lignatur easy) -</b>	-8,62 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-0,00000382 kg R11 äqv.	0,0640 kg SO <sub>2</sub> -äqv.	0,0239 kg Phos äqv.	0,0177 kg Ethen äqv.	0,00001255 kg Sb äqv.	-20,47 MJ	-243,50 MJ	95,75 EUR	+1.270,75 EUR	-565,56 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-446,80 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	2,84 EUR	-15.827,50 MJ	-13.205,40 MJ
<b>massive Balkenstapeldecke KVH</b>	-26,66 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-0,0000068 kg R11 äqv.	0,0108889 kg SO <sub>2</sub> -äqv.	0,0092368 kg Phos äqv.	0,0083469 kg Ethen äqv.	0,0000644 kg Sb äqv.	-296,76 MJ		106,00 EUR	+1.937,00 EUR	-1.732,90 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-1.614,14 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	1,20 EUR	-35.463,35 MJ	-32.841,25 MJ

Abbildung 9.5.1-1: Ökobilanzdaten Dachkonstruktion

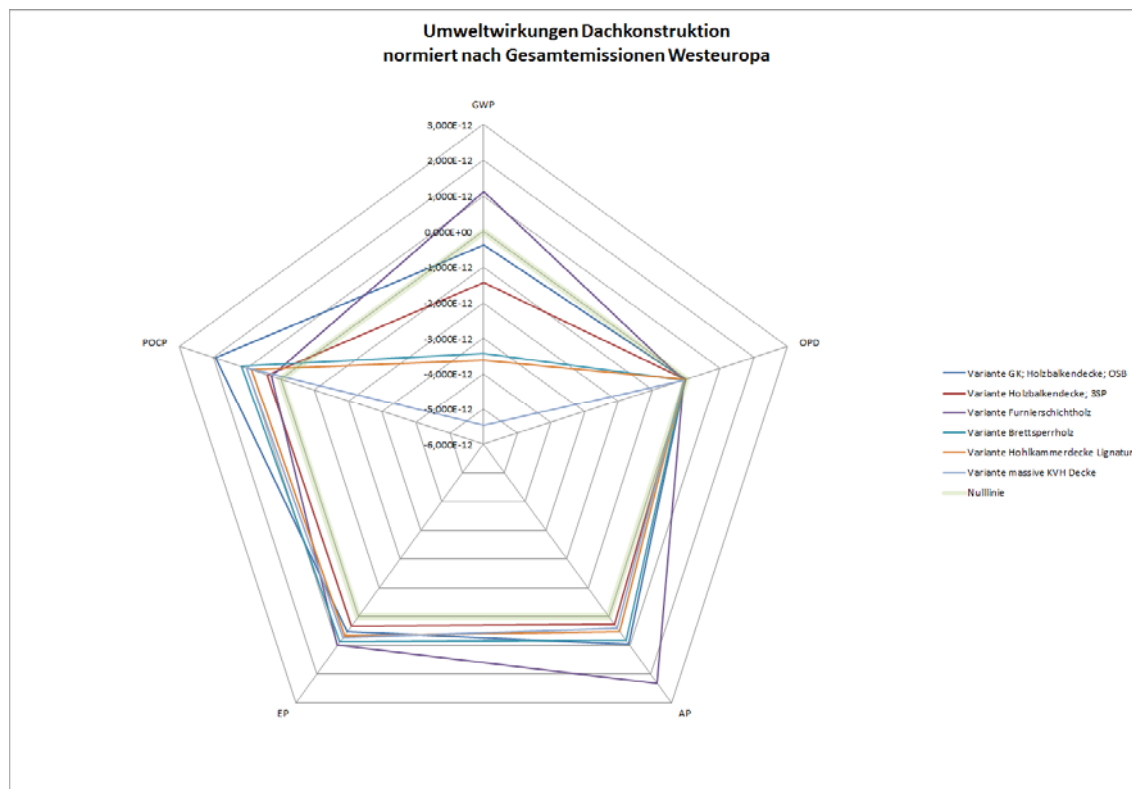


Abbildung 9.5.1-2: Umweltwirkungen von Dachkonstruktionen, normiert

## 9.5.2 Dampfbremse

### klassische Dampfsperre gegenüber feuchtevariabler Dampfbremsen

Allgemein haben diffusionsoffene Holzbausysteme in der Vergangenheit an Relevanz gewonnen und stellen zunehmend den Stand der Technik dar. Dies gilt insbesondere für Außenwände, wo diese Konstruktionen auch sicher und dauerhaft den Anforderungen des Feuchteschutzes gerecht werden. Die Anforderungen an Dachkonstruktionen und hier insbesondere an Flachdächer aus Holz sind aufgrund des erhöhten Risikopotentials aber deutlich höher zu bewerten. Aus diesem Grund wird für sichere Holzflachdächer in der Regel empfohlen den wesentlichen Teil der Dämmung (min. 2/3) oberhalb der Dampfsperre und gleichzeitig die konstruktiven Bauteile unterhalb dieser anzuordnen.

Seit einiger Zeit gibt es jedoch auch sogenannte feuchtevariable oder feuchteadaptive Dampfbremsen, deren wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (sd) abhängig von der Umgebungsfeuchte ist. Nimmt die Bauteilfeuchte zu, so sinkt der sd-Wert und ermöglicht so zum Beispiel eine bessere Rücktrocknung in das Gebäudeinnere. Diese ermöglichen grundsätzlich auch für das Dach Konstruktionen, die in gewissem Umfang dampfdiffusionsoffen sind. Die Funktionsweise ist dabei allerdings von einer Reihe von Randparametern abhängig. Zum einen darf der Effekt nicht durch eine zu "dichte" innere Beplankung konterkariert werden (Dies wäre zum Beispiel bei einer inneren Schicht aus Brettsperrholz oder Furnierschichtholz der Fall). Zum anderen ist es zwingend erforderlich, dass die Dachflächen im Sommer nicht verschattet werden, da es für die Rücktrocknung erforderlich ist, dass sich das Bauteil im Sommer aufheizt.

Für das +++Haus kommen alleine schon aufgrund der Tatsache, dass der Großteil der Dachfläche von Photovoltaikmodulen verschattet wird derartige feuchteadaptive nicht in Frage. Zwar gibt es eine Reihe von Sonderkonstruktionen, bei denen feuchteadaptive Dampfsperren zum Einsatz kommen können, wenn die Aufbauten mit einer zusätzlichen Dämmlage und Abdichtungsbahn überdämmt werden. Allerdings sind derartige Konstruktionen aufgrund der Vielzahl von Arbeitsschritten und dem erhöhten Materialeinsatz von Abdichtungsbahnen weder aus ökologischer, noch aus ökonomischer Sicht interessant.

Aus Gründen der Vollständigkeit, wurden dennoch die folgenden im Holzbau als Dampfbremse/Dampfsperre zum Einsatz kommenden Bahnenmaterialien hinsichtlich Ihrer Umweltauswirkungen untersucht:

- kaltselbstklebende Bitumenbahn
- feuchtevariable Dampfbremse Polyamid (PA)
- feuchtevariable Dampfbremse Polyethylen (PE)

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>	Kosten- differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Bituminöse Dampfsperre</b>	13,75 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-0,000000000 kg R11 äqv.	0,00323 kg SO <sub>2</sub> -äqv.	0,0000786 kg Phos äqv.	0,0023229 kg Ethen äqv.	0,0000007 kg Sb äqv.	137,36 MJ	124,80 MJ	15,00 EUR		893,75 kg CO <sub>2</sub> -äqv.			8.112,00 MJ	
<b>Dampfsperre Polyamid (PA) feuchtevariabel</b>	1,92 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	0,000000000 kg R11 äqv.	0,00390 kg SO <sub>2</sub> -äqv.	0,0003561 kg Phos äqv.	0,0004251 kg Ethen äqv.	0,0063945 kg Sb äqv.	24,86 MJ	20,84 MJ		technisch nicht ausführ- bar	124,80 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-768,95 kg CO <sub>2</sub> -äqv.		1.354,60 MJ	-6.757,40 MJ
<b>Dampfsperre Polyethylen (PE) feuchtevariabel</b>	0,58 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	0,000000000 kg R11 äqv.	0,00090 kg SO <sub>2</sub> -äqv.	0,0000717 kg Phos äqv.	0,0001493 kg Ethen äqv.	0,0017595 kg Sb äqv.	7,12 MJ	2,63 MJ		technisch nicht ausführ- bar	37,70 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	-856,05 kg CO <sub>2</sub> -äqv.		170,95 MJ	-7.941,05 MJ



Abbildung 9.5.2-1: Ökobilanzdaten Dampfsperrbahnen

Es zeigt sich, dass die feuchtevariablen Dampfbremsen deutlich bessere Ökobilanzdaten aufweisen, was nicht zuletzt auf den deutlich geringeren Materialeinsatz zurückzuführen ist. Alleine für die vergleichsweise kleine Dachfläche des +++Hauses (ca. 65 m<sup>2</sup>) ließen sich hierüber Emissionen von bis zu ca. 850 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. einsparen. Allerdings kommen diese alternativen Dampfbremsen aus den oben genannten Gründen und unter den gegebenen Randparametern nicht in Frage, weshalb sich nach abschließender Recherche die Dampfsperre aus kaltselbstklebender Bitumenbahn als alternativlos herausgestellt hat.

### 9.5.3 Dachdämmung

#### Dämmstoffe aus fossilen Rohstoffen

Die Dämmstoffe in dieser Gruppe werden aus fossilen Rohstoffen gewonnen, sodass sie sowohl eine stoffliche (in Form des Rohstoffs) als auch eine energetische (in Form der erforderlichen Herstellungsenergie) Nutzung von fossilen Energiequellen erfordern. Der energetische Teil kann in Zukunft theoretisch auch aus erneuerbaren Energiequellen kommen. Der stoffliche Anteil kommt zwingend aus nicht erneuerbaren Energiequellen. Zu den in Dächern am meisten verwendeten Dämmstoffen aus dieser Kategorie zählen expandiertes Polystyrol (EPS), extrudiertes Polystyrol (XPS) und Polyurethan (PUR/PIR). EPS und PUR werden in der Regel in Warmdachaufbauten (Dampfsperre-Dämmstoff-Dachabdichtung) eingesetzt. Mit XPS Platten lassen sich Umkehrdachaufbauten (Abdichtung-Dämmstoff-Auflast) realisieren. Umkehrdächer bieten den Vorteil, dass die dampfsperr- und Abdichtungsebene mit ein und der selben Bahn hergestellt werden. Dies erfolgt mit einer Abdichtungsbahn, sodass man es auch so ausdrücken kann, dass die Dampfsperre entfällt. Angesichts der Erkenntnisse aus dem AP 05.2 Dampfbremse/Dampfsperre ergibt sich somit ein nicht unerhebliches Optimierungspotential. Der Dämmstoff wird bei Umkehrdächern lose auf die Abdichtungsebene aufgelegt und muss daher mittels einer ausreichenden Auflast gesichert werden (Kiesschüttung oder Gründach). In Kombination mit der für das +++Haus erforderlichen Photovoltaikanlage ergeben sich hier Schwierigkeiten mit der Befestigung der PV Module. Diese müssten entweder auch mit Gewichten gegen Abheben gesichert werden oder durch die Dämmebene hindurch auf der Abdichtungsebene befestigt werden. Dies würde jedoch eine Vielzahl von Wärmebrücken mit sich bringen, weshalb eine Umkehrdachkonstruktion hier nicht als sinnvolle Konstruktion erscheint.

#### Dämmstoffe aus mineralischen Rohstoffen

Die Dämmstoffe dieser Gruppe werden im Wesentlichen aus mineralischen Rohstoffen hergestellt. Eine stoffliche Verwendung von fossilen Energieträgern ist somit nur in geringem Maße erforderlich. Die energetische Nutzung von nicht erneuerbaren Energieträgern ist aktuell noch sehr hoch könnte theoretisch in Zukunft aber verringert werden. Zu den in Dächern am meisten verwendeten Dämmstoffen aus dieser Kategorie zählen Mineralfaserdämmung und Schaumglas. Druckfeste Mineralfaserplatten aus Steinwolle werden in Warmdachaufbauten (Dampfsperre-Dämmstoff-Dachabdichtung) verwendet. Wird Schaumglas als Schotter verbaut, lassen sich mit ihm ebenfalls Umkehrdachaufbauten realisieren, die hier aber aus den bereits oben genannten Gründen keinen sinnvollen Dachaufbau darstellen. Alternativ lassen sich mit Schaumglas sogenannte Kompaktdächer herstellen. Diese nutzen die geschlossenzelligen, dampfdiffusionsdichten Eigenschaften des Materials. Schaumglas wird in Plattenform vollständig in Heißbitumen verlegt. Oberseitig erfolgt dann eine Abdichtung mit Bitumenbahnen. Es handelt sich hierbei um eine der dauerhaftesten Formen der Dachabdichtung.

gen, da aufgrund der Materialeigenschaften der Dämmstoffs selbst Beschädigungen an der Dachhaut nicht zu einem flächigen Versagen der Dämmschicht führen. Allenfalls lokal kann Feuchtigkeit in die Dämmschicht eindringen, was sich aber aufgrund der Eignung für Umkehrdächer nur geringfügig auf die Wärmedämmeigenschaften des Dachaufbaus auswirkt.

### **Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen**

Aus der Gruppe der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen kommt für unbelüftete Flachdächer im Wesentlichen nur Holzfaserdämmung in Frage und auch dies ist mit starken Einschränkungen verbunden. Wie bereits in AP 05.2 Dampfbremse/Dampfsperre beschrieben kommen Aufbauten mit feuchtevariablen Dampfbremsen unter den für das +++Haus gegebenen Randbedingungen nicht in Frage. Grundsätzlich besteht für beidseitig dampfdiffusionsdichte Dachaufbauten immer ein erhöhtes Risiko, da eindringende Feuchtigkeit in der Regel nicht mehr entweichen kann. Ein organischer Dämmstoff ist von Natur aus stark feuchteempfindlich und potenziert daher dieses systemimmanente Restrisiko. Viele Dämmstoffhersteller raten daher von derartigen Aufbauten ab. Unabhängig hiervon sind im Bereich der Holzfaserdämmstoffe auch keine Gefälleplatten am Markt verfügbar, sodass das erforderliche Gefälle entweder mit anderen Dämmstoffen oder konstruktiv hergestellt werden müsste.

Der Vollständigkeit halber wurden alle oben beschriebenen Dämmstoffe hinsichtlich Ihrer ökologischen Eigenschaften bewertet.

MATERIAL	Wärmefähigk. $\lambda$	GWP / m <sup>2</sup> KW	ODP / m <sup>2</sup> KW	AP / m <sup>2</sup> KW	EP / m <sup>2</sup> KW	POCP / m <sup>2</sup> KW	ADPE / m <sup>2</sup> KW	ADPF / m <sup>2</sup> KW	PENRT / m <sup>2</sup> KW	Kosten je R=8,0	Kostendifferenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Holzfaserdämmplatte, Dachdämmung</b>	0,039 W/mK	-9,79 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,0000001 kg R11 äqv.	0,0125 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,000154 kg Phos äqv.	0,001 kg Ethen äqv.	0,0000009 kg Sb äqv.	71,09 MJ	-37,32 MJ	86,48 EUR	+2.845,05 EUR	-5.090,80 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-6.812,40 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,42 EUR/kg CO <sub>2</sub> äqv.	-9.006,40 MJ	-31.132 MJ
<b>Expandiertes Polystyrol (EPS) WLG 035, Gefälledämmung</b>	0,035 W/mK	3,33 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,0000001 kg R11 äqv.	0,0020 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,000025 kg Phos äqv.	0,0155 kg Ethen äqv.	0,0000007 kg Sb äqv.	44,00 MJ		46,48 EUR		1.721,60 kg CO <sub>2</sub> äqv.			2.212,60 MJ	
<b>Extrudiertes Polystyrol (XPS), Gefälledämmung</b>	0,038 W/mK	3,44 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,0000000 kg R11 äqv.	0,00828 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00076 kg Phos äqv.	0,00862 kg Ethen äqv.	0,0000016 kg Sb äqv.	98,97 MJ	104,00 MJ	nicht praktikabel		1.788,80 kg CO <sub>2</sub> äqv.	+67,20 kg CO <sub>2</sub> äqv.	keine Einsparung	54,080 MJ	+31.954 MJ
<b>Polyurethan (PUR/PIR) WLG 023, Gefälledämmung</b>	0,023 W/mK	3,94 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,0000004 kg R11 äqv.	0,0032 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,001 kg Phos äqv.	0,00197 kg Ethen äqv.	0,0000088 kg Sb äqv.	57,66 MJ	46,57 MJ	46,69 EUR	+13,65 EUR	2.048,80 kg CO <sub>2</sub> äqv.	+327,20 kg CO <sub>2</sub> äqv.	keine Einsparung	24.216,40 MJ	+2.090 MJ
<b>Schaumglas, Kompaktdach Gefälledämmung</b>	0,041 W/mK	6,26 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,0000000 kg R11 äqv.	0,0141 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00175 kg Phos äqv.	0,00109 kg Ethen äqv.	0,0000033 kg Sb äqv.	94,73 MJ	96,96 MJ	nicht praktikabel		3.255,20 kg CO <sub>2</sub> äqv.	+1.533,60 kg CO <sub>2</sub> äqv.	keine Einsparung	50.419,20 MJ	+28.293 MJ
<b>Steinwollegefälledämmung WLG 035, druckfest</b>	0,035 W/mK	5,15 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,00000016 kg R11 äqv.	0,037 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00633 kg Phos äqv.	0,00206 kg Ethen äqv.	0,0000013 kg Sb äqv.	59,97 MJ	65,00 MJ	74,08 EUR	+1.794,00 EUR	2.678,00 kg CO <sub>2</sub> äqv.	+956,40 kg CO <sub>2</sub> äqv.	keine Einsparung	33.800,00 MJ	+11.674 MJ

Abbildung 9.5.3-1: Ökobilanzdaten Dachdämmung

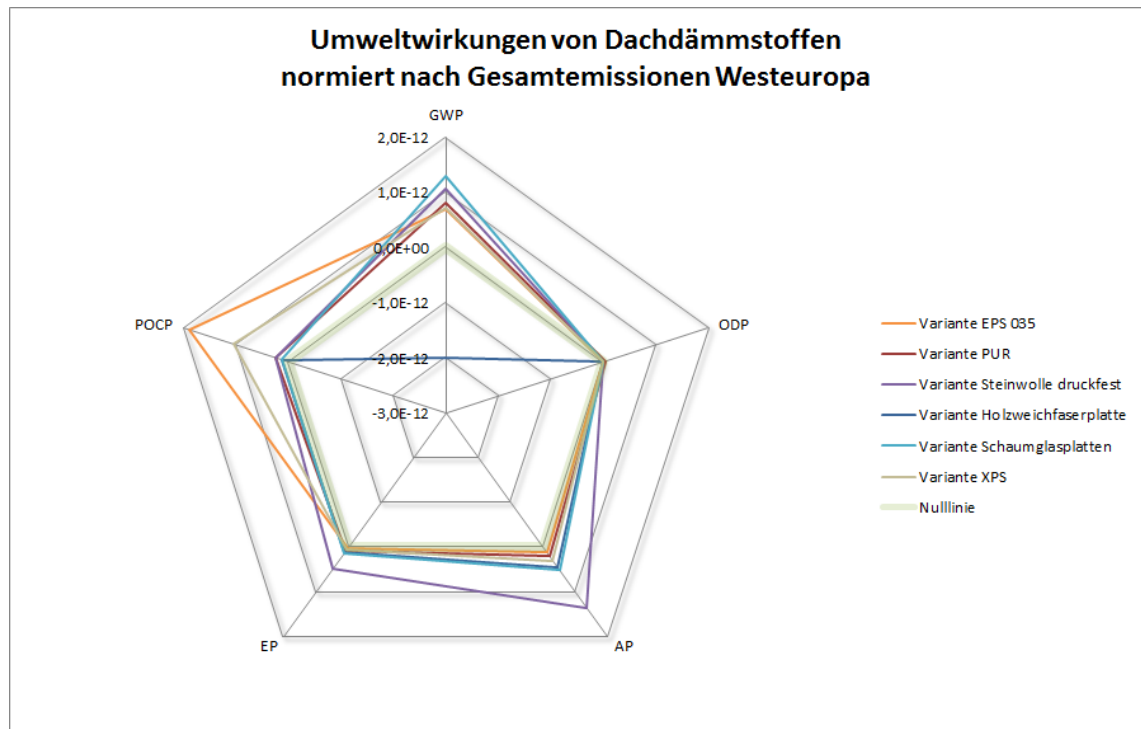


Abbildung 9.5.3-2: Umweltwirkungen von Dachdämmstoffen, normiert

Erwartungsgemäß lässt sich das Treibhauspotential durch eine Holzfaserdämmung stark in den negativen Bereich absenken. Mit spezifischen Optimierungskosten von ca. 0,42 EUR/kg CO<sub>2</sub>-Äqv. wäre dies auch eine durchaus wirtschaftlich vertretbare Optimierungsmaßnahme. Allerdings haben die oben diskutierten Risikopotentiale dazu geführt, dass ein nachwachsender Dämmstoff in einem dampfdichten Warmdachaufbau für das +++Haus nicht als eine sinnvolle Variante angesehen wird. Lässt man die weiteren nicht geeigneten Dämmstoffe außer Betracht, fällt auf, dass sich die unterschiedlichen Materialien hinsichtlich Ihres Treibhauspotentials (GWP) nur geringfügig unterscheiden. Deutlich größere Unterschiede gibt es in Bezug auf das bodennahe Ozonbildungspotential (POCP) und das Versauerungspotential (AP). Die vielfach eingesetzte EPS Dämmung trägt übermäßig stark zum POCP bei, wohingegen die Werte in den übrigen Wirkungskategorien auf vergleichbarem Niveau liegen. Die Mineralfaserdämmung weist hingegen ein verhältnismäßig hohes AP auf. In geringem Maße sind hier auch die Werte für das EP erhöht. In den übrigen Wirkungskategorien liegen sie auf vergleichbarem Niveau. Am ausgeglichensten erweist sich das Emissionsprofil der PUR Dämmung. Es ist in allen Kategorien auf einem für Dämmstoffe aus nicht nachwachsenden Rohstoffen ohne größere Ausreißer auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau.

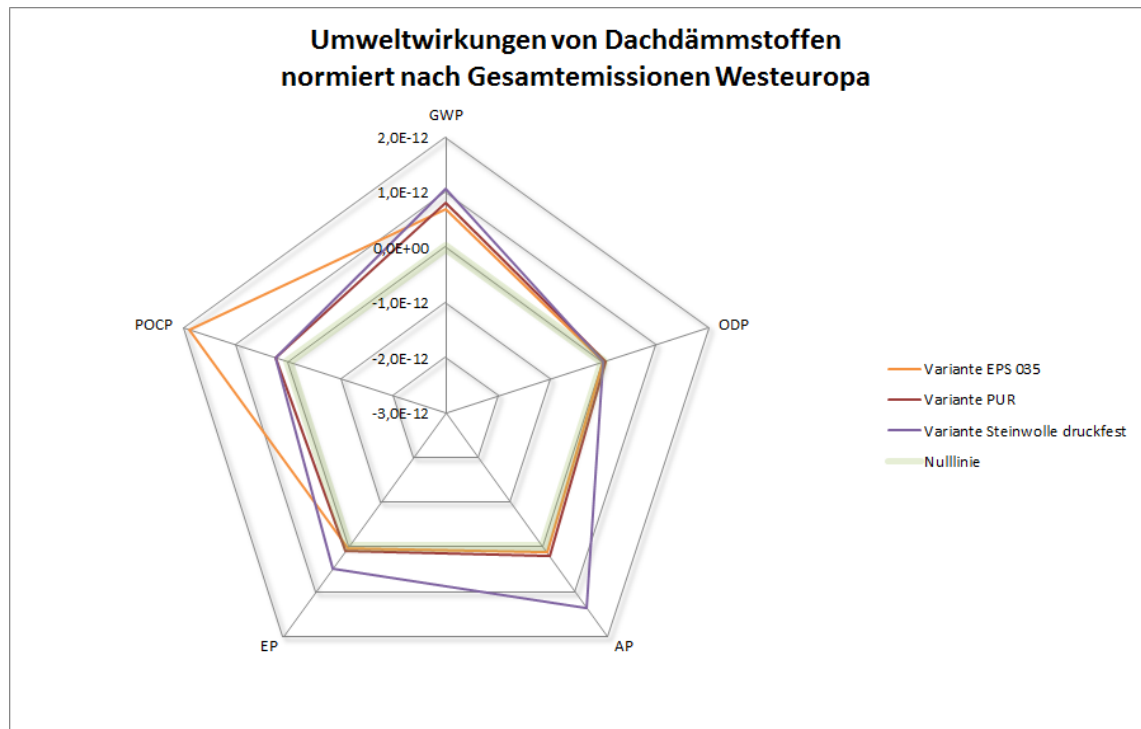


Abbildung 9.5.3-3: Umweltwirkungen von Dachdämmstoffen, normiert (Auswahl)

## Flammschutzmittel in Dämmstoffen aus fossilen Rohstoffen

Das in EPS und XPS Dämmstoffen eingesetzte Flammschutzmittel HBCD steht in der Kritik und darf seit August 2015 nur noch mit Ausnahmegenehmigung verwendet werden:

*Bei Dämmstoffen aus Polystyrol (EPS und XPS) wird und wurde als Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) eingesetzt. EPS und XPS sind dabei das Haupteinsatzgebiet von HBCD. HBCD erfüllt die Kriterien für persistente (in der Umwelt nicht leicht abbaubare), bioakkumulierende (sich in Organismen anreichernde) und toxische (giftig für Mensch, Ökosysteme oder Organismen) Stoffe (PBT-Stoffe) der neuen europäischen Chemikalienverordnung REACH. Ab dem 21. August 2015 darf HBCD nur noch mit Ausnahmegenehmigung zum Einsatz kommen, falls und solange keine geeigneten Ersatzstoffe oder Ersatzprodukte vorhanden sind. Einige Hersteller verwenden bereits ein alternatives Flammschutzmittel (bromiertes Polymer).*

*Für sämtliche Verwendungen außer in Dämmstoffen wurde ein Produktionsverbot von HBCD durch die Stockholm-Konvention im Mai 2012 beschlossen. Über 90 % der HBCD-Produktion werden in Dämmstoffen eingesetzt. Produzenten für diesen Anwendungsbereich können sich vom Verbot für eine Übergangsfrist von 5 Jahren nach Ratifizierung befreien lassen.*

[WECOBIS, 2015]

Das Umweltbundesamt plädiert aus oben genannten Gründen dafür "– soweit technisch möglich – andere umweltverträgliche Dämmmaterialien zu verwenden, bis ein alternatives Flammschutzmittel für Polystyrol gefunden ist." [Koch-Jugl et. al., 2014].

Auch die in PUR/PIR Dämmung eingesetzten Flammschutzmittel sind nicht gänzlich unproblematisch.

*Das eingesetzte Flammschutzmittel TCPP (Tris(2-Chlorisopropyl)phosphat) ist als Gefahrstoff eingestuft. Die ebenfalls zur Verwendung kommenden TCEP sind als SVHC nach REACH eingestuft.*

*[WECOBIS, 2015]*

## 9.5.4 Dachabdichtung

### Marktrelevanz von Abdichtungssystemen

Die Flachdachabdichtung mit einer 2-lagigen Bitumenbahn stellt nach folgender Einschätzung immer noch die vorwiegende Abdichtungsform dar:

*Eine Umfrage des Zentralverbandes der Deutschen Dachdecker im Jahr 2006 ergab jedoch, dass der überwiegende Teil der Dachdecker keine oder kaum Erfahrungen mit Flachdachabdichtungen aus Kunststoff- und Elastomerbahnen gemacht haben. Bei den meisten Befragten war der Anteil der verarbeiteten Kunststoffbahnen am Auftragsbestand insgesamt gering. Bei einer Umfrage unter Dachdeckern und Sachverständigen im Jahr 2003 nach der Häufigkeit der verarbeiteten Kunststoff- und Elastomerbahnen gaben 90 % der Befragten an, überwiegend Bahnen aus PVC (Polyvinylchlorid) zu verarbeiten. Es folgten PIB (Polyisobutylen)-Bahnen mit knapp 70 % und Bahnen aus EVA (Ethylen-Vinylacetat-Terpolymer) mit 50 %. Bahnen aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer) und PE-C (Chloriertem Polyethylen) bildeten mit je 27 % Verarbeitungshäufigkeit das Schlusslicht.*

*Eine Abschätzung der Marktanteile der verwendeten Abdichtungen bzw. der jeweiligen Werkstoffe ist infolge der durchgeführten Umfragen zwar nicht möglich, dennoch zeigt sich ein Trend zur Verarbeitung von Kunststoff- und Elastomerbahnen. Die bituminöse Abdichtung hat in der Ausführungspraxis aber offensichtlich immer noch den größten Marktanteil.*

*[Woopan, 2015]*

Die Einschätzung, dass Kunststoffbahnen weiter an Relevanz gewinnen werden deckt sich mit einer Studie der [BauInfoConsult, 2013], nach der ca. 59 % der befragten ausführenden Betriebe eine Zunahme von Kunststoffabdichtungen in den nächsten 5 Jahren erwarten.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass Bitumen weiterhin die am weitesten verbreitete Abdichtungsform darstellt und Kunststoffbahnen an Relevanz gewinnen, auch wenn sich dieses Marktsegment vor allem auf PVC Abdichtungen konzentriert.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden folgende Abdichtungsmaterialien untersucht:

### Dachbahnen aus Polymerbitumen

Dachbahnen aus Bitumen werden heutzutage mit Polymerzusätzen vergütet und lassen sich nach den beigefügten Polymeren in zwei Gruppen einteilen: Elastomerbitumen (PYE) und Plastomerbitumen (PYP).

#### **Elastomerbitumenbahnen (PYE)**

*Diese bestehen aus Destillationsbitumen (Primärbitumen), die mit SBS (Styrol-Butadien-Styrol) modifiziert sind (Elastomere). Mit zunehmendem SBS-Anteil bekommt das Bitumen*

*ein kautschukartiges Verhalten, wobei die Kautschukeinmischung bis zu 20% betragen kann. Da ein höherer Kautschukanteil die Verlegung und Verschmelzung der Bahnen jedoch erschwert, werden Bitumenschweißbahnen meist mit besonders schmelzfähigen Deckschichten auf der Bahnenunterseite ausgebildet.*

*Vorteile dieses Bahnentyps sind ihre geringe Temperaturempfindlichkeit, eine gute Wärme-standfestigkeit und sehr gute Kälteflexibilität, das ausgeprägte elastische Verhalten sowie eine lange Lebensdauer mit hoher Witterungs- und Alterungsbeständigkeit.*

*Bitumenabdichtungen aus geblasenem Bitumen oder Elastomerbitumen sollen nicht ohne Abstrahlschutz der Witterung ausgesetzt sein. Ein sehr guter Abstrahlschutz sind deckende Grobkies-schichten oder Gründächer. Aber auch eine werksseitige Schieferbestreuung genügt als dauerhafter Schutz.*

### **Plastomerbitumenbahnen (PYP)**

*Plastomerbitumenbahnen bestehen aus Destillationsbitumen (Primärbitumen), die mit APP (ataktisches Polypropylen) modifiziert sind (thermoplastische Kunststoffe). Die Plastomerbitumen-Schweißbahnen kommen aus dem Mittelmeerraum, wo sie insbesondere wegen ihrer hohen Wärmestandfestigkeit seit Jahrzehnten eingesetzt werden: Sie ertragen jahrzehntelange Besonnung ohne sichtbare Veränderung und ohne Verlust der Dichtfunktion.*

*Vorteile dieses Bahnentyps sind seine außerordentliche Wärmestandfestigkeit und gute Kälteflexibilität, sein plastisches Verhalten, das der Bahn gleichzeitig eine hohe Flächenstabilität verleiht, eine lange Lebensdauer mit hoher Witterungs- und Alterungsbeständigkeit sowie eine sehr leichte Aufschmelzbarkeit.*

*Plastomerbitumenbahnen werden i.d.R. als Schweißbahnen hergestellt und sind im Schweißverfahren zu verarbeiten, da sie nicht zufriedenstellend vergossen und verklebt werden können. Der Kunststoffanteil liegt bei höchstwertigen Schweißbahnen bei bis zu 40% des Bitumenanteils; Plastomerbitumen-Schweißbahnen mit geringem Kunststoffanteil gleichen eher den Elastomerbitumen-Schweißbahnen. Ein direkt ablesbares Qualitätsmerkmal ist das Maß der ausgewiesenen Wärmestandfestigkeit.*

*Hochvergütete Plastomerbitumen-Schweißbahnen benötigen generell keinen Oberflächenschutz und werden aufgrund der UV- und Infrarotstabilität bei Dächern eingesetzt, die der direkten Sonnenbestrahlung ausgesetzt sind (z.B. Shed-Dächer). Eine (werksseitige) Beschieferung der Bahnen ist dennoch empfehlenswert, da auch bei ihnen die Nutzdauer durch einen wirksamen Oberflächenschutz wesentlich erhöht wird.*

*[Woopen-II, 2015]*

## **Dachbahnen aus Polyvinylchlorid (PVC)**

Dachbahnen aus Polyvinylchlorid werden zur Gruppe der Kunststoffdachbahnen gezählt stellen das am längsten am Markt verfügbare Abdichtungssystem innerhalb dieser Gruppe dar.

*PVC-Abdichtungsbahnen bestehen überwiegend aus Polyvinylchlorid, einem Kunststoff, der durch Zugabe von Weichmachern und Stabilisatoren weicher und formbar gemacht wird. Sie gehören zu den ältesten Kunststoffabdichtungssystemen und liegen gemäß Schätzungen auf etwa 30% der europäischen Flachdächer.*

*Aufgrund veränderter Anforderungen sowie zahlreicher Schäden wurden PVC-Dachbahnen schon mehrfach modifiziert. Von 1970 bis etwa 1990 waren die Bahnen häufig zu dünn, auch Kontraktion aus Schrumpfung, Versprödung mit Sprödbrüchen und Schweißfehler waren weit verbreitet. Heute sind zahlreiche PVC-Dachbahnen mit den verschiedensten Materialeigenschaften erhältlich. Die Regel sind Bahndicken von mindestens 1,2 mm, meist 1,5 mm und Trägereinlagen oder Kaschierungen. PVC-Dachbahnen sind alterungs- und feuchtebestän-*

*dig, dagegen durchweg wärmeempfindlich, nicht beständig gegen organische Lösemittel und nur in Sonderformen bitumenverträglich. Unter Bewitterung wird die den PVC-Dichtungsbahnen eigene hohe Festigkeit und Teilelastizität abgebaut. Gefährlich wird es im Brandfall: Je nach Temperatur, Sauerstoffzufuhr und Einwirkung von Wasser setzt PVC eine Vielzahl giftiger Brandgase und Salzsäuredämpfe frei u.a. FCKW, Chlor und Dioxine).*

*Bei bitumenverträglichen Bahnen kann es zu natürlichem Schrumpfung durch Auswandern der Polyester-Weichmacher (Lösungsmittel) kommen. Deshalb ist auch ein direkter Kontakt mit Bitumen, Dämmstoffen, Ölen oder öligen Holzschutzmitteln zu vermeiden und die Bahn durch Trennlagen zu schützen. Eine einfache Schutzfolie über der Abdichtung wirkt sich positiv auf die Nutzungsdauer aus. Je besser der thermische und chemische Schutz, desto beständiger sind PVC-Dichtungsbahnen.*

*PVC-Dichtungsbahnen und ihre Schweißnähte gelten als wurzelfest, ablagernde Schmutzschichten wie unter Kiesdeckschichten und Begrünungen schädigen jedoch den Kunststoff. Bei diesem als „Aktivkohle-Effekt“ bezeichneten Schaden wandern Weichmacher aus, die Dachbahn verhärtet, versprödet und schrumpft. Zur Vermeidung von stehendem (Schmutz-)Wasser ist ein ausreichendes Entwässerungsgefälle besonders wichtig.*

*Die Haltbarkeit und Nutzungsdauer von PVC-Dichtungsbahnen hängt von der Anfangsdicke der Dichtungsbahn ab; normierte Bahnen sollen eine Mindeststärke von 1,5 mm aufweisen, eine Dicke von 2,0 mm aber nicht überschreiten. Angeboten werden sie unverstärkt oder mit Einlagen aus Glas- oder PolyesterVLies. Die Befestigungsart und die Oberflächenbehandlung sind auf den Untergrund, auf die Konstruktion und auf die Überdeckung abzustimmen.*

*[Woopfen-II, 2015]*

Auch die [WECOBIS, 2015] Datenbank bewertet die ökologischen Eigenschaften von PVC sowohl was den Brandfall, als auch was das Auswaschungsverhalten von Weichmachern anbelangt als äußerst kritisch.

## **Dachbahnen aus Polyolefin-Legierungen (FPO/TPO)**

Dachbahnen aus Polyolefinen werden ebenfalls zur Gruppe der Kunststoffdachbahnen gezählt und wurden nicht zuletzt aufgrund der problematischen Umwelteigenschaften von PVC entwickelt (vgl. [WECOBIS, 2015]).

*Dachbahnen aus thermoplastischem Polyolefin (TPO) (...) und bestehen aus Legierungen verschiedener Einzelkunststoffe wie Polyethylen, Polypropylen und Polybutylen sowie einer integrierten Armierung. Von verschiedenen Verbänden und Herstellern werden sie auch als flexible Polyolefine (FPO) bezeichnet, weil sie deutlich weniger steif sind als z.B. Polyethylen.*

*Anfang der 1990er Jahre wurde erstmals eine Dachbahn auf Basis von thermoplastischem Polyolefin vorgestellt. Seitdem werden sie vermehrt in der Flachdachabdichtung verwendet. Sie sind bezüglich ihrer Zusammensetzung sowie ihrer mechanisch-physikalischen Eigenschaften relativ günstig einzuschätzen.*

*FPO-Dichtungsbahnen sind in der Regel verträglich mit Bitumen und Polystyrolhartschaum, jedoch nicht mit PVC. Sie werden in unterschiedlichen Farben angeboten und gelten im Bahnenquerschnitt als wurzelfest, Nähte werden wärmegeschweißt. Die Verlegung erfolgt vorwiegend mit mechanischer Verankerung, aber auch lose unter Auflast mit Rand- Linienfixierung.*

*[Woopfen-II, 2015]*



## Dachbahnen aus Ethylen-Copolimerisat-Bitumen (ECB)

Dachbahnen aus Ethylen-Copolimerisat-Bitumen werden ebenfalls zur Gruppe der Kunststoffdachbahnen gezählt.

*Dach- und Dichtungsbahnen aus Ethylen-Copolymerisat-Bitumen, kurz ECB, werden im Extruderverfahren aus Granulat und einem mittig eingelagerten Glasvlies hergestellt. Während das Granulat aus einem ausgewogenen Mischungsverhältnis von Kunststoffen (Polyethylen) und Bitumen besteht, stellt das Glasvlies das „Rückgrat“ der Dachbahn dar und sorgt für Dimensionsstabilität. Die eingemischten kugelförmigen Bitumenteilchen wirken im Kunststoffgefüge wie ein Weichmacher, so dass der Kunststoff im niedrigen Temperaturbereich quasi elastisches Verhalten zeigt. Für spezielle Anforderungen wie z.B. bei rauem Untergrund oder Dachsanierungen wird eine Produktalternative mit zusätzlicher Polyesterkaschierung auf der Unterseite angeboten.*

*Das Polymer im Werkstoff bildet die kohärente, zusammenhängende Phase, die verantwortlich ist für Festigkeit, Zähigkeit, Wärmestandfestigkeit, Kältebiegeverhalten und chemische Resistenz. Das Bitumen ist tröpfchenförmig eingelagert und beeinflusst die Kältezähigkeit, garantiert die Bitumenverträglichkeit und die Witterungsstabilität. Durch Verschiebung der Bitumen- und Polymeranteile sowie die Zugabe von Farbpigmenten kann ECB inzwischen so gestaltet werden, dass sich seine technischen Eigenschaften und seine Farbe nur unwesentlich von TPO-Bahnen unterscheiden.*

*ECB-Dichtungsbahnen und ihre Schweißnähte gelten als wurzelfest. Ihre Mindestnenndicke bei Anwendungskategorie K1 beträgt 2 mm, bei Anwendungskategorie K2 2,3 mm. Sie werden einlagig verlegt (lose verlegt, mechanisch verankert, bitumig oder mit Polyurethanklebern streifenweise verklebt). Die materialhomogene Nahtfüugung erfolgt durch Heißluftverschweißung. Lose verlegte Abdichtungen müssen zum Auffangen von Rückstellkräften an allen Rändern, Anschlüssen und Hohlkehlen linienfixiert werden. Zur materialhomogenen Verarbeitung bieten sich auch Formteile aus ECB an.*

*[Woopon-II, 2015]*

## Dachbahnen aus Ethylen-Propylen-Dien-Monomeren (EPDM)

Dachbahnen aus Ethylen-Propylen-Dien-Monomeren zählen zur Gruppe der Elastomerbahnen.

*Aufgrund des Basis-Materials Kautschuk werden sie oftmals Kautschukbahnen genannt. Sie wurden bereits in den 1960er Jahren hergestellt und waren bzw. sind seitdem aus sehr unterschiedlichen Materialien als Dachbahnen im Einsatz: Isobutylen-Isopren-Kautschuk (IIR), Ethylen-Propylen-Dien-Monomere (EPDM), Nitrilkautschuk (NBR), Chlorsulfonyl-Polyäthylen-Kautschuk (CSM) und thermoplastische Elastomere (TPE).*

*Heute haben sich Kautschukdachbahnen aus EPDM durchgesetzt, die in Europa seit etwa 1980 bekannt sind. EPDM-Dichtungsbahnen sind in vier Grundtypen erhältlich:*

- *Einschichtige, kalandrierte Kautschukbahn*  
*Bei diesem Bahntyp erfolgt die Nahtverschweißung über das sogenannte Hot-Bonding-Verfahren, das in der Regel auf industrielle Fertigung beschränkt bleibt. Verschiedene Hersteller bieten zwar Nähte mit Kontaktklebern oder Schmelzklebebändern an, diese sind jedoch bei stehendem Wasser nicht geeignet.*
- *Kautschukbahn mit Schweißrand*

*Die Kautschukbahn wird im Extruder hergestellt, mit einem 3 cm breiten Fügerand ausgestattet und in anschließender Wärmebehandlung vernetzt (vulkanisiert). Der 1987 entwickelte Fügerand wird mit Warmgas (Heißluft) oder Heizkeilautomat bei etwa 430 °C mit der Dachbahn verschweißt.*

- *Dreischichtige Kautschukbahn*  
*Dieser Bahnentyp erlaubt eine Quellschweißung mittels Zitronensäure und hat sich bei sorgfältiger Ausführung bewährt.*
- *Kautschukdichtungsbahn mit Schmelzschicht*  
*Die Nahtverbindung erfolgt über Warmgasschweißen, wobei eine Adhäsivklebung der polymermodifizierten Bitumen-Unterschicht mit der Kautschukoberfläche zustande kommt.*

*EPDM-Dichtungsbahnen werden mit und ohne Trägereinlage oder auch mit unterseitiger Glas- bzw. Polyester-Vlieskaschierung hergestellt. Ihr Einbau sollte grundsätzlich mit 1% Längenzugabe erfolgen, da sie ein hohes Wärmedehn- und Rückstellvermögen besitzen. Ränder und Anschlüsse sollten grundsätzlich linienfixiert werden.*

*Nicht beständig sind EPDM-Dichtungsbahnen gegen Mineralöle, aliphatische und aromatische Lösungsmittel sowie Salpetersäure. Im Regelfall erfolgt eine werkseitige Vorfertigung von großflächigen Planen mit Formteilen für Anschlüsse und Dachdurchdringungen.*

*[Woopen-II, 2015]*

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>	Kosten-differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Bituminöse Abdichtung, 2-lagig</b>	29,61 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,0000000 kg R11 äqv.	0,0023 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00023 kg Phos äqv.	0,0041 kg Ethen äqv.	0,0000012 kg Sb äqv.	219,07 MJ	187,56 MJ	29,80 EUR	1,924,65 kg CO <sub>2</sub> äqv.	12,191,40 MJ				
<b>Kunststoffabdichtung Ethylen-Copolymerisat-Bitumen (ECB)</b>	7,70 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,0000003 kg R11 äqv.	0,00142 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,0014 kg Phos äqv.	0,0029 kg Ethen äqv.	0,0000078 kg Sb äqv.	166,16 MJ	182,89 MJ	31,12 EUR	+85,80 EUR	509,50 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-1,424,15 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,06 EUR/kg CO <sub>2</sub> äqv.	11,885,90 MJ	-305,50 MJ
<b>Kunststoffabdichtung Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM)</b>	8,76 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,0000000 kg R11 äqv.	0,00683 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00068 kg Phosp. äqv.	0,00340 kg Ethen äqv.	0,0000044 kg Sb äqv.	145,44 MJ	144,65 MJ	42,00 EUR	+793,00 EUR	569,40 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-1,355,25 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,56 EUR/kg CO <sub>2</sub> äqv.	9,402,25 MJ	-2,789,15 MJ
<b>Kunststoffabdichtung Polyvinylchlorid (PVC)</b>	18,17 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,0000001 kg R11 äqv.	0,0329 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00388 kg Phos äqv.	0,00981 kg Ethen äqv.	0,000157 kg Sb äqv.	191,90 MJ	202,38 MJ	22,00 EUR	-507,00 EUR	1,181,05 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-743,60 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,68 EUR/kg CO <sub>2</sub> äqv.	13,154,70 MJ	+963,30 MJ
<b>Kunststoff-abdichtung thermoplastische /flexible Polyolefine (TPO/FPO)</b>	8,05 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,0000003 kg R11 äqv.	0,0248 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,0015 kg Phos äqv.	0,0030 kg Ethen äqv.	0,0000083 kg Sb äqv.	162,96 MJ	181,62 MJ	32,36 EUR	+166,40 EUR	523,25 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-1,401,40 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,11 EUR/kg CO <sub>2</sub> äqv.	11,805,73 MJ	-386,10 MJ

Abbildung 9.5.4-1: Ökobilanzdaten von Abdichtungsbahnen

Schaut man sich die Ökobilanzdaten der verschiedenen Abdichtungssysteme an, so stellt man fest, dass diese Ausgangssituation ein enormes Optimierungspotential bietet.

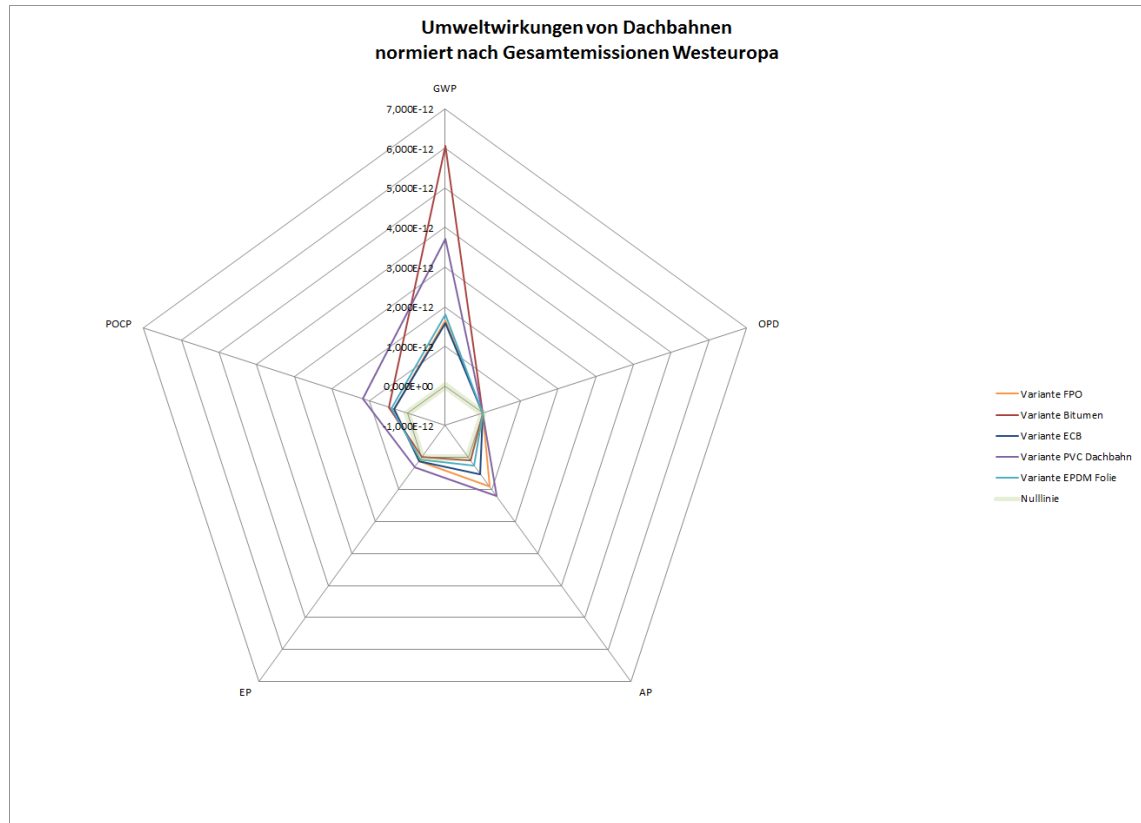


Abbildung 9.5.4-2. Umweltwirkungen von Abdichtungsbahnen, normiert

So weist die 2-lagige bituminöse Abdichtung bei vergleichsweise guten Werten in den übrigen Wirkungskategorien mit Abstand das größte Treibhauspotential (GWP) auf, was nicht zuletzt auf die große erforderliche Schichtdicke und den damit erhöhten Materialeinsatz zurück zu führen ist. Mit einer Kunststoffabdichtung aus PVC lässt sich das GWP um ca. 40% senken. Allerdings führt dies gleichzeitig zu einer geringen Lastverschiebung in die Kategorien bodenahes Ozonbildungspotential und Versauerungspotential. Hinzu kommen die oben beschriebenen problematischen Eigenschaften in Bezug auf das Brandverhalten und die Auswaschung von Weichmachern.

Vor dem Hintergrund, dass die übrigen am Markt verfügbaren Kunststoffabdichtungssysteme durchaus ökonomische Alternativen darstellen, lohnt es sich, diese genauer anzuschauen.

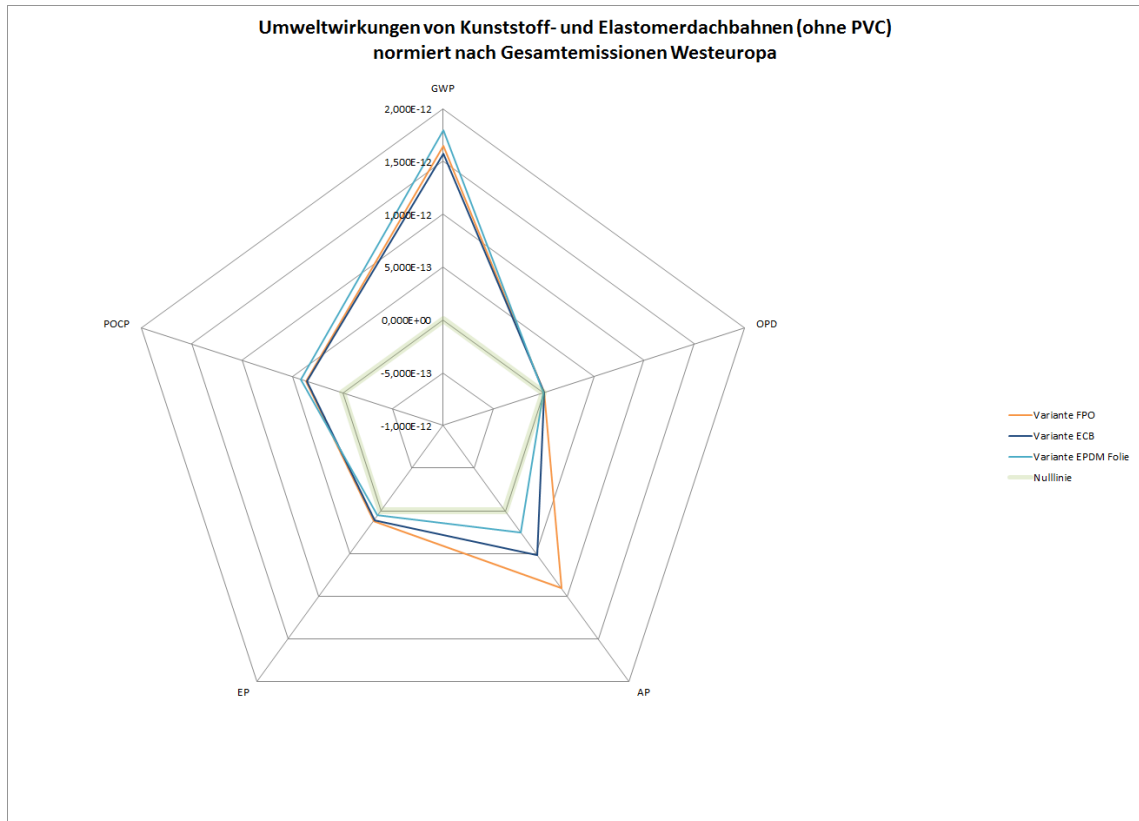


Abbildung 9.5.4-3. Umweltwirkungen von Abdichtungsbahnen, normiert (Auswahl)

Es zeigt sich, dass wenn man Bitumen- und PVC-Bahnen außer Betracht läßt die größten Unterschiede in Bezug auf das Versauerungspotential (AP) bestehen. Gleichwohl zeigt sich, dass die Materialien alle mehr zum GWP, als zum AP beitragen. Aus der normierten Betrachtung lässt sich nicht eindeutig bestimmen, welches System die günstigsten Eigenschaften aufweist. Angesichts der Tatsache, dass EPDM Bahnen im Vergleich zu den Kunststoffbahnen mit Mehrkosten verbunden sind, erscheinen insbesondere ECB und FPO/TPO Bahnen als ökologische und ökonomisch vertretbare Alternativen zu Bitumen- und PVC-Bahnen.

Angesichts der Tatsache, dass sich aufgrund der kleinen Fläche (ca. 65m<sup>2</sup>) auch mit der kostengünstigsten Abdichtung (PVC) im Vergleich zu anderen Kunststoff- oder Bitumenbahnen nur ca. 500 EUR an Kosten einsparen ließen, erscheint dies für das +++Haus als gangbarer Weg. Mit ca. 0,06 EUR je kg ersparter CO<sub>2</sub>-Äqv. Emissionen für ECB und ca. 0,11 EUR/kg CO<sub>2</sub>-Äqv. für TPO/FPO zählen diese Optimierungsmaßnahmen mit zu den kostengünstigsten, die im Rahmen des Forschungsprojekts identifiziert werden konnten.

## 9.6 AP 6 Zwischendecken

### 9.6.1 Deckensysteme

Wie bereits im Förderantrag beschrieben, ist die tatsächliche, innere Flexibilität des +++Haus Konzepts in allen drei räumlichen Dimensionen massgeblich abhängig vom Bauteil der Zwischendecke. Mit den allgemeinen Überlegungen zum Tragwerk in AP 03 Tragstruktur wurde mit der Entscheidung, die Zwischendecke nicht für das statische System des Gebäudes heranzuziehen die grundsätzliche Voraussetzung geschaffen, dass dieses Bauteil überhaupt reversibel gestaltet werden kann. Dennoch ergeben sich aus einer Vielzahl von baupraktischen

Aspekten Abhängigkeiten, die eine Reversibilität in der Praxis alles andere als einfach erscheinen lassen. Vor diesem Hintergrund wurden zunächst drei unterschiedliche klassische Konstruktionsvarianten untersucht und bewertet.

## **Holzbalkendecke**

Die grundsätzliche Konstruktionsweise von Holzbalkendecken wurde bereits im AP 05.1 Konstruktion Dach erläutert. Zu den Vorteilen der Holzbalkendecke zählt ein geringes Eigengewicht der Konstruktion, sowie die Möglichkeit zur Vorfertigung größerer Deckenelemente. Damit verbunden sind schallschutztechnische Nachteile, die alle Holzkonstruktionen gegenüber massiven, mineralischen Bauweisen gemeinsam haben. Es handelt sich für den Einfamilienhausbereich vor allem um eine sehr wirtschaftliche Konstruktionsart. Die Holzbalkendecke hat in Bezug auf das +++Haus jedoch den entscheidenden Nachteil, dass Sie zwar grundsätzlich leicht ein- und auszubauen ist, dies jedoch in der Regel durch einen Fachmann erfolgen muss und die erforderlichen Anpassungen mit den für Baustellen üblichen Dreck- und Staubbelastungen einhergehen. In diesem Sinne ist eine tatsächliche Reversibilität, wie Sie im Rahmen des +++Haus Konzepts formuliert wurde nicht gegeben.

## **Massivholzdecke -Brettstapel / Dübelholz / Brettsperrholz**

die Grundsätzlichkeiten von Massivholzdecken wurden ebenfalls im AP 05.1 Konstruktion Dach erläutert. Trotz der erhöhten Masse gegenüber den zuvor beschriebenen Holzbalkendecken sind auch diese Konstruktionen hinsichtlich des Schallschutzes (vor allem in Bezug auf Trittschall) massiven, mineralischen Konstruktionen unterlegen. Eine Reversibilität ist aufgrund der größeren Masse noch deutlich weniger gegeben, als dies bei Holzbalkendecken der Fall ist. Für eine reversible Decke, wie Sie im Rahmen des +++Haus Konzepts gefordert wird, kommen derartige Konstruktionen daher nicht in Betracht.

## **Reversibilität / Montagefreundlichkeit**

Im Sinne einer tatsächlich praktikablen Reversibilität, die im Zweifelsfall auch vom Laien ausgeführt werden kann, ist es von zentraler Bedeutung, zwei Hauptaspekte zu lösen. Zum einen ist das einzelne Elementgewicht auf ein Maß zu begrenzen, sodass diese ohne professionelle Hebezeuge von max. zwei Personen bewegt und montiert werden können. Als Richtgröße soll hierfür das Gewicht eines Standard Sack Zement (ca. 25 kg) nicht überschritten werden. Des Weiteren ist die Montage der Einzelelemente möglichst einfach zu gestalten. So soll die Montage mit einfachen haushaltsüblichen bzw. heimwerkerüblichen Werkzeugen (Akkuschrauber, o.ä.) möglich sein. Da diese Anforderungen mit klassischen Holz- und/oder Trockenbausystemen nicht bzw. nur eingeschränkt realisierbar sind, wurden zwei weitere Systeme betrachtet.

## **massive Holzbalkendecken**

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen massiven Holzdeckenkonstruktionen wurde eine Konstruktion abgeleitet, bei der Decken aus einzelnen, handelsüblichen Holzbalken hergestellt werden können, in dem diese Zug-um-Zug in direktem Kontakt zueinander ausgelegt und sowohl miteinander als auch in regelmäßigen Abständen mit den Auflagerbalken verschraubt werden. Das Einzelgewicht der Balken ist bei einer Spannweite von ca. 3,15 m und einem beispielhaften Balkenquerschnitt von z.B. 10/10 cm auf maximal 16 kg beschränkt. Auch wenn der Materialpreis für KVH vergleichsweise günstig ist, so ergeben sich in Folge des ho-

hen Montageaufwands (Vernagelung der Balken untereinander) doch recht hohe Herstellungskosten von ca. 106 EUR/m<sup>2</sup>.

### **Hohlkammerdecke (Lignatur easy)**

Einem ähnlichen Konstruktionsprinzip in technisch ausgereifterer Form folgt das System Lignatur easy des Herstellers [Lignatur, 2012]. Das System ist seit einigen Jahren am Markt verfügbar. Es handelt sich hierbei um zusammengesetzte "Hohlbalken" mit Nut-/Federprinzip und optionaler Füllung mit Holzweichfasermaterial. Die Profilierung bietet darüber hinaus die Möglichkeit, in einem zwischen den Einzelementen entstehenden Hohlraum Kabel o.ä. zu verziehen. Bei den Lignatur easy Elementen handelt es sich im Vergleich zu den übrigen Kasten- und Flächenelementen des Herstellers um ein Halbfertigprodukt das in der Regel lagermäßig verfügbar ist, wohingegen die übrigen Produkte stets projektspezifisch geplant und gefertigt werden. Dies drückt sich positiv auf den Elementpreis aus. Dennoch sind die Kosten mit ca. 95,75 EUR/m<sup>2</sup> relativ hoch.

Aufgrund der Tatsache jedoch, dass diesem System die mit Abstand höchste tatsächliche Reversibilität zugetraut wird, wird diese Konstruktionsweise für die Zwischendecke des +++Hauses als sehr sinnvoll erachtet.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>	Kosten-differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Balkenlage GK / KVH / OSB</b>	-1,827 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,000003 kg R11 äqv.	0,02617 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,00684 kg Phos äqv.	0,01584 kg Ethen äqv.	0,01825 kg Sb äqv.	6,4,32 MJ	-40,34 MJ	76,20 EUR	+118,76 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-118,76 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-2.622,10 MJ	0,54 EUR	-10.439,65 MJ	-7.817,55 MJ
<b>Balkenlage KVH / Dreischichtplatte</b>	-6,982 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,000002 kg R11 äqv.	0,007058 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0040 kg Phos äqv.	0,00327 kg Ethen äqv.	0,0000174 kg Sb äqv.	7,70 MJ	-160,61 MJ	79,00 EUR	+182,00 EUR	-453,83 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-335,07 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,54 EUR	-10.439,65 MJ	-7.817,55 MJ
<b>Brettspertholz 100mm</b>	-16,73 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,000006 kg R11 äqv.	-0,0223 kg SO <sup>2</sup> äqv.	-0,0112 kg Phos äqv.	-0,0097 kg Ethen äqv.	-0,000086 kg Sb äqv.	378,4 MJ	-439,80 MJ	91,00 EUR	+1.105,00 EUR	-1.097,66 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-978,90 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,98 EUR	-29.078,40 MJ	-40.272,70 MJ
<b>Furnierschichtholz (LVL) 63mm</b>	6,08 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,000006 kg R11 äqv.	0,0706 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,014 kg Phos äqv.	0,00258 kg Ethen äqv.	0,0000077 kg Sb äqv.	298,9 MJ	27,23 MJ	60,21 EUR	-896,35 EUR	395,20 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+513,96 kg CO <sup>2</sup> äqv.	geringere Kosten, keine Einspa- rung	1.769,95 MJ	-9.424,35 MJ
<b>Hohlkammerelement (Lignatur easy)</b>	-8,62 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,000004 kg R11 äqv.	0,0640 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0239 kg Phos äqv.	0,0177 kg Ethen äqv.	0,0000125 kg Sb äqv.	20,47 MJ	-243,50 MJ	95,75 EUR	+1.413,75 EUR	-565,56 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-446,80 kg CO <sup>2</sup> äqv.	2,84 EUR	-15.827,50 MJ	-27.021,80 MJ
<b>massive Balkenstapeldecke KVH</b>	-26,66 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-0,000007 kg R11 äqv.	0,0108889 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,00923 kg Phos äqv.	0,00834 kg Ethen äqv.	0,0000644 kg Sb äqv.	296,7 MJ	-545,59 MJ	106,0 EUR	+1.937,00 EUR	-1.732,90 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-1.614,14 kg CO <sup>2</sup> äqv.	1,20 EUR	-35.463,35 MJ	-32.841,25 MJ



Abbildung 9.6.1-1: Ökobilanzdaten Geschossdecke

## 9.6.2 Deckenaufbauten zur Verbesserung des Schallschutz

Alle Holzdeckenkonstruktionen weisen aufgrund der deutlich geringeren Masse gegenüber massiven, mineralischen Konstruktionen bzgl. des Schallschutzes den gleichen strukturellen Nachteil auf. Andererseits gibt es für den Einfamilienhausbereich keine ordnungsrechtlich zu erfüllenden Anforderungen. Die [DIN 4109-B2:1989-11, Tabelle 3] gibt Empfehlungen für Decken in Einfamilienhäusern und unterscheidet dabei zwei Kategorien. Für einen normalen Schallschutz wird (für den Luftschallschutz) ein erf  $R'w = 50$  dB und (für den Trittschallschutz) ein bewerteter Norm-Trittschallpegel von erf.  $L'n,w = 56$  dB empfohlen. Für einen erhöhten Schallschutz wird ein bewertetes Schalldämm-Maß von erf  $R'w \geq 55$  dB und ein bewerteter Norm-Trittschallpegel von erf.  $L'n,w \leq 46$  dB empfohlen. Da sich erfahrungsgemäß sowohl Komfortansprüche, als auch verfügbares Budget der Nutzer mit der Zeit verändern, erscheint es den Verfassern sinnvoll die Zwischendeckenkonstruktion so vorzusehen, dass Sie sich bereits in einem relativ einfachen Zustand (Stichwort: hochwertiger Rohbau) ohne hohe Schallschutzanforderungen und dafür zu relativ geringen Kosten nutzen lassen, wenn gleichzeitig sichergestellt ist, dass sich höhere Schallschutzqualitäten zu einem späteren Zeitpunkt ohne großen baulichen Aufwand nachrüsten lassen.

Vor diesem Hintergrund wurden verschiedene Bodenaufbauten recherchiert und bewertet. Damit sich die Bodenaufbauten in das übrige +++Hauskonzept optimal einfügen, wurde hierbei ein Fokus auf Trockensysteme gelegt. Ein weiterer wichtiger Bewertungsparameter stellt in diesem Zusammenhang die nach Einbau weiterhin gegebene Reversibilität dar, da ansonsten der im Bereich der Deckenkonstruktion betriebene Aufwand zu Nichte gemacht würde. Klassische Zement- oder Calciumsulfatestrichaufbauten erschienen den Verfassern aus diesen Gründen als ungeeignet und wurden der Vollständigkeit halber und als Referenzgröße jedoch mit betrachtet.

### Trittschalldämmung

Zusätzlich zum Estrichmaterial wurden auch verschiedene Trittschalldämmstoffe untersucht. Die kostengünstigste und daher am meisten verwendete Trittschalldämmung wird aus expandiertem Polystyrol (EPS) hergestellt. Alternativ hierzu wurden sowohl Trittschalldämmungen aus Mineralfaser und Holzweichfaser analysiert.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>	Kosten- differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Expandiertes Polystyrol (EPS)</b>	1,39 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000000 274 kg R11 äqv.	0,001286 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0001293 kg Phos äqv.	0,005216 kg Ethen äqv.	0,0000084 kg Sb äqv.	17,64 MJ	2,50 EUR	180,70 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-811,20 kg CO <sup>2</sup> äqv.	2,08 EUR/ kg CO <sup>2</sup> äqv.	2,293,20 MJ	-9,709,70 MJ	2,867,80 MJ	+574,60 MJ
<b>Holzweichfaserplatte</b>	-4,85 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000000 05052 kg R11 äqv.	0,01213 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,001846 kg Phos äqv.	0,0008278 kg Ethen äqv.	44,92 MJ	57,05 MJ	15,50 EUR	+1.690,00 EUR	-630,5 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+159,04 kg CO <sup>2</sup> äqv.	höhere Kosten, keine Einspa- rung	2,867,80 MJ	+574,60 MJ	
<b>Mineralfaser</b>	1,682 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000000 567 kg R11 äqv.	0,01253 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,002156 kg Phos äqv.	0,0007153 kg Ethen äqv.	20,01 MJ	22,06 MJ	4,50 EUR	+260,00 EUR	218,66 kg CO <sup>2</sup> äqv.	+159,04 kg CO <sup>2</sup> äqv.	höhere Kosten, keine Einspa- rung	2,867,80 MJ	+574,60 MJ	

Abbildung 9.6.2-1: Ökobilanzdaten Trittschalldämmung

Aus den Ergebnissen in der oben stehenden Tabelle und den folgenden Grafiken wird ersichtlich, dass die Auswirkungen der Dämmstoffwahl für das Gesamtsystem Estrich von untergeordneter Relevanz ist. Auch wenn es mit einer Holzweichfaserdämmung grundsätzlich möglich ist, das Treibhauspotential abzusenken. Bei einer zu Grunde gelegten Fläche von ca. 130 m<sup>2</sup> ist so gegenüber der Referenzvariante EPS eine Einsparung von ca. 811,20 kg CO<sub>2</sub>-äqv. erzielbar. Allerdings handelt es sich mit spezifischen Optimierungskosten von 2,08 EUR je eingespartem kg CO<sub>2</sub>-äqv. Emission um eine relativ kostenintensive Optimierungsmaßnahme. Eine Trittschalldämmung aus Mineralfaser erhöht hingegen das Treibhauspotential geringfügig, senkt dafür aber das vergleichsweise hohe bodennahe Ozonbildungspotential (POCP) des EPS.

## Estrich

Aus der Materialwahl des Estrichs ergeben sich deutlich größere Optimierungspotentiale. Der kostengünstige und daher am meisten verbreitete Zementestrich hat das mit Abstand größte Treibhauspotential (GWP). Bereits durch einen Calciumsulfatestrich lässt sich das Treibhauspotential um mehr als 2 t CO<sub>2</sub>-äqv. senken. Auch die Emissionen in den anderen Umweltwirkungskategorien werden hierbei z.T. deutlich gesenkt. Mit Mehrkosten von ca. 780 EUR und spezifischen Optimierungskosten von ca. 0,38 EUR je kg CO<sub>2</sub>-äqv. Emissionen handelt es sich dabei bereits um eine vergleichsweise kostengünstige Optimierungsmöglichkeit.

Durch Trockenestriche aus Holzwerkstoffen lässt sich das Treibhauspotential jedoch noch deutlich weiter absenken auf eine je nach verwendetem Dämmstoff neutrale oder sogar wertnegative Niveau. Die kostengünstigste Variante stellt hier ein Estrich aus einer OSB-Platte dar. Hiermit ist eine Absenkung des Treibhauspotentials um mehr als 3 t CO<sub>2</sub>-äqv. Emissionen möglich. Dies ist dabei preisneutral bzw. sogar zu geringfügigen Minderkosten möglich. Allerdings geht mit der OSB-Platte auch eine geringfügige Erhöhung des bodennahen Ozonbildungspotentials einher. Diese lässt sich vermeiden, verwendet man anstelle der OSB-Platte eine Dreischichtplatte als Trockenestrich. Hiermit lässt sich das Treibhauspotential noch etwas mehr (insgesamt fast 3,5 t CO<sub>2</sub>-äqv. Emissionen) absenken. Die Dreischichtplatte stellt somit das über alle Wirkungskategorien ökologischste Estrichmaterial dar. Es führt allerdings auch zu Mehrkosten von ca. 3.634,00 EUR. Das entspricht spezifischen Optimierungskosten von 1,04 EUR je eingespartem kg CO<sub>2</sub>-äqv. Emission. Die Dreischichtplatte kostet pro m<sup>2</sup> ca. 28,00 EUR mehr als der Zementestrich. Berücksichtigt man allerdings, dass die Dreischichtplatte als einziges Material eine annehmbare Oberflächenqualität aufweist, die es theoretisch ermöglicht auf einen Bodenbelag zu verzichten, so relativieren sich die Kosten schnell. Der Mehrpreis entspricht mehr oder weniger einem kostengünstigen Kautschuk- oder Linoleumbelag. Somit kann man bei Verzicht auf einen Bodenbelag auch von einer Preisneutralität sprechen, weshalb diese Konstruktion nach Auffassung der Verfasser ein großes Potential darstellt, für den Fall, dass man die Geschossdecken im Nachgang schallschutztechnisch ertüchtigen möchte.

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>	Kosten-differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Calciumsulfatestrich (CA)</b>	7,17 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,0000000 kg R11 äqv.	0,02175 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00269 kg Phos äqv.	0,0005145 kg Ethen äqv.	0,0000039 kg Sb äqv.	90,39 MJ	94,98 MJ	21,00 EUR	780,00 EUR	932,10 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-2,050,1 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,38 EUR	12,347 MJ	-13,676 MJ
<b>Dreischichtplatte Fichte - Trockenstrich</b>	-3,95 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,000001 kg R11 äqv.	0,0046 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00255 kg Phos äqv.	0,00203 kg Ethen äqv.	0,00000718 kg Sb äqv.	-39,75 MJ	-95,35 MJ	42,96 EUR	+3,634, 80 EUR	-513,50 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-3,495,70 kg CO <sub>2</sub> äqv.	1,04 EUR	-12,396 MJ	-38,419 MJ
<b>Oriented Strand Board (OSB)- Trockenstrich</b>	-0,87 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-0,000002 kg R11 äqv.	0,0188 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00359 kg Phos äqv.	0,0131 kg Ethen äqv.	0,0000238 kg Sb äqv.	58,28 MJ	-13,06 MJ	14,20 EUR	-104,00 EUR	-113,10 kg CO <sub>2</sub> äqv.	-3,095,30 kg CO <sub>2</sub> äqv.	geringere Kosten bei gleichzeitiger Einsparung	-1,698 MJ	-27,721 MJ
<b>Zementestrich (CT)</b>	22,94 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,0000006 kg R11 äqv.	0,0521 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,00788 kg Phos äqv.	0,00618 kg Ethen äqv.			200,1 8 MJ	15,00 EUR		2,982,20 kg CO <sub>2</sub> äqv.			26,023 MJ	

Abbildung 9.6.2-2: Ökobilanzdaten Estrich

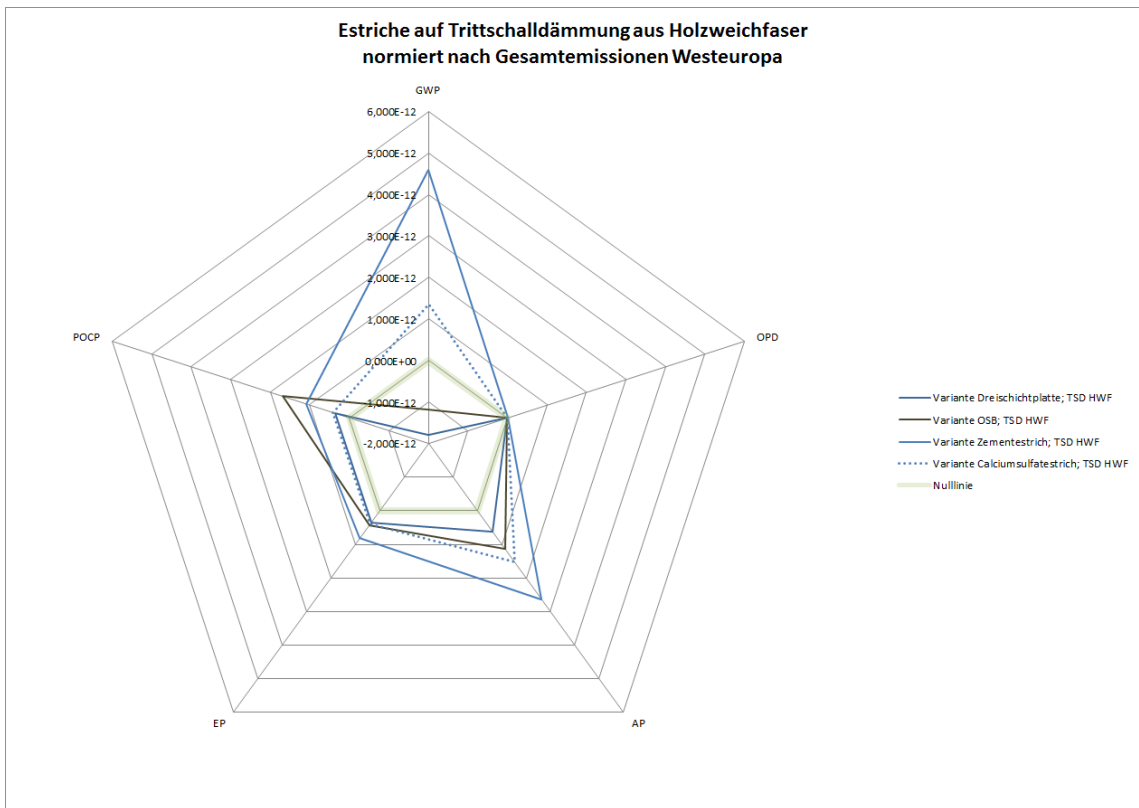


Abbildung 9.6.2-3: Umweltwirkungen von Estrichen auf Holzweichfaserdämmung, normiert

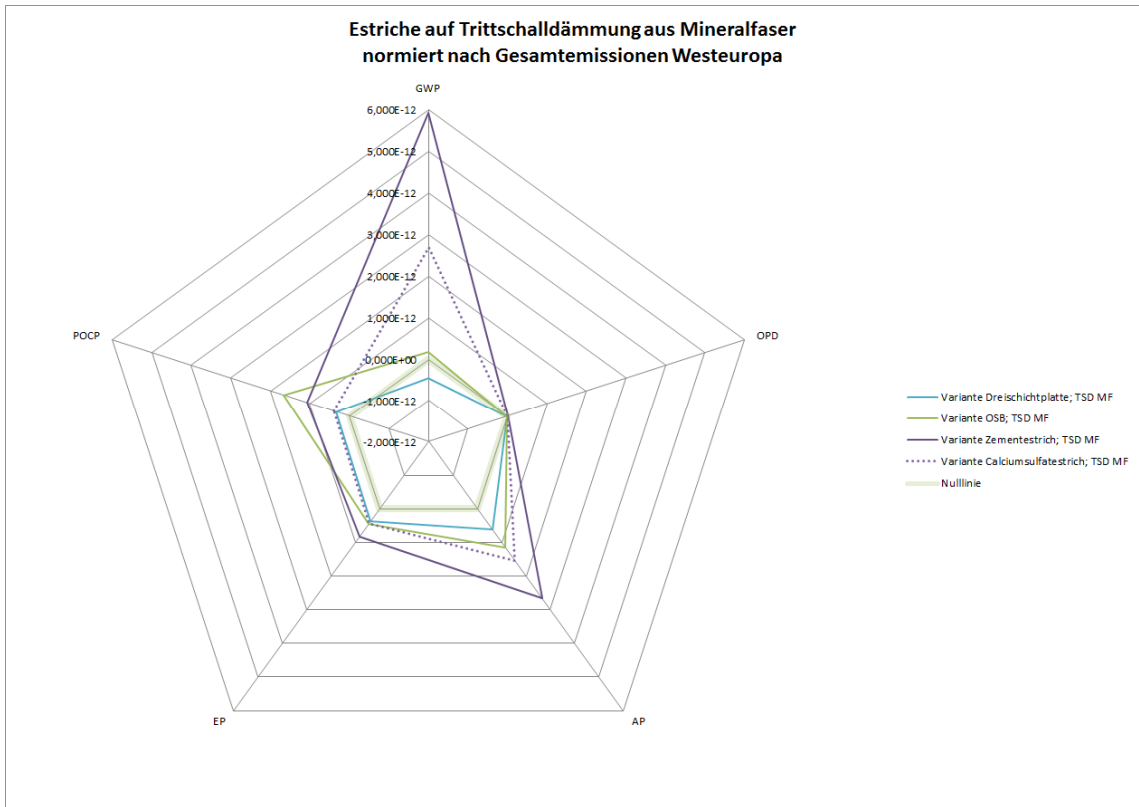


Abbildung 9.6.2-4: Umweltwirkungen von Estrichen auf Mineralfaserdämmung, normiert

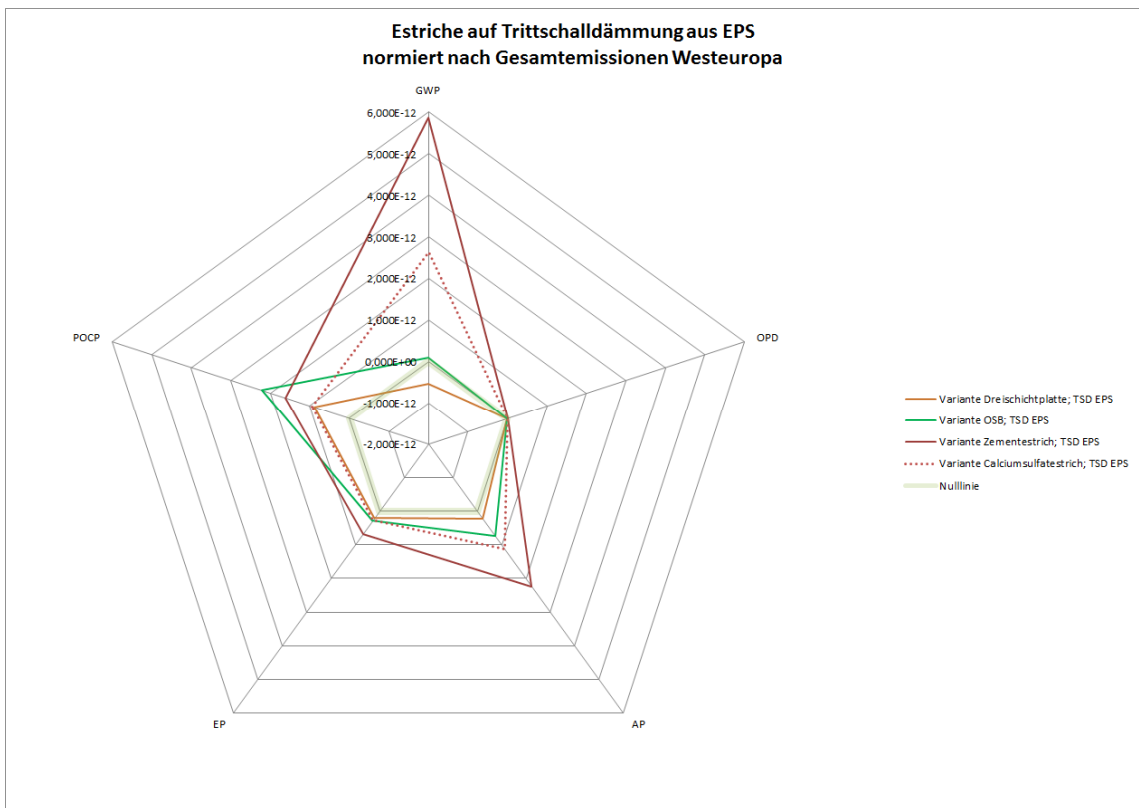


Abbildung 9.6.2-5: Umweltwirkungen von Estrichen auf EPS-Dämmung, normiert

Generell kann man aber festhalten, dass sowohl aus ökologischen und ökonomischen Überlegungen heraus, als auch vor dem Hintergrund der geforderten zerstörungsfreien Rückbaubarkeit Trockenestriche aus Holzwerkstoffen für das +++Haus gegenüber mineralischen Systemen zu präferieren sind. Sie weisen Unterschieden im Bezug auf das Treibhauspotential (GWP) auf. Innerhalb dieser Gruppe fallen aber die Unterschiede in Bezug auf das bodennahe Ozonbildungspotential (POCP) deutlich größer aus:

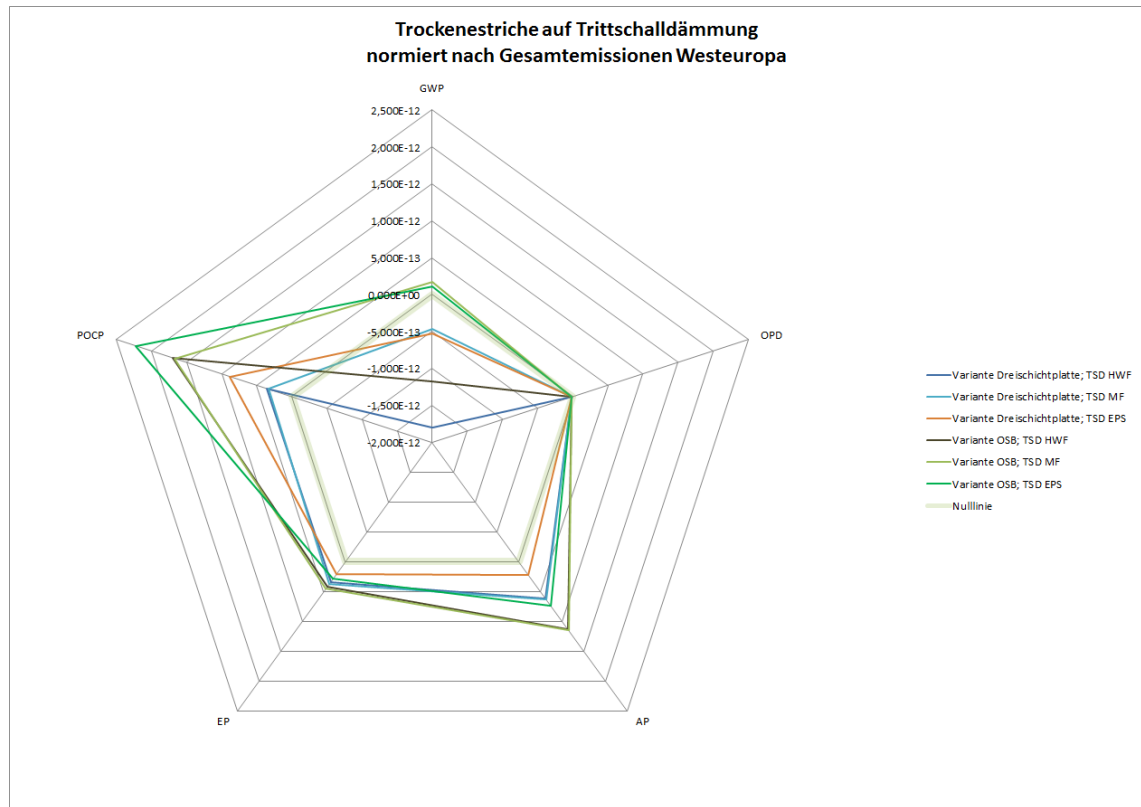


Abbildung 9.6.2-6. Umweltwirkungen von Trockenestrichen, normiert

## 9.7 AP 7 Zwischenwände

### Metallständerwände

Üblicherweise werden leichte Trennwände aus Metallprofilen, Mineralfaserdämmung und Gipskartonplatten hergestellt. Diese Konstruktion wurde daher zunächst als Referenzvariante analysiert. Es zeigt sich, dass sich insbesondere der Gipskarton maßgeblich auf das Treibhauspotential auswirkt. Der zweitgrößten Anteil resultiert aus dem Metallständer. Den kleinsten Anteil hat die Mineralfaserdämmung. Bei einer zu Grunde gelegten Innenwandfläche von ca. 100 m<sup>2</sup> für das +++Haus ergibt sich daraus für eine beidseitig zweilagig beplankte Metallständerwand ein Treibhauspotential von ca. 1,6 t CO<sub>2</sub>-äqv.

Metallständerwand CW75, beidseitig 2-lagig beplankt mit GKB 60 mm Glasfaserklemmfilz	GWP/m <sup>2</sup>	Anteil
<b>Gesamtkonstruktion</b>	16,47 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	
<b>Metallständer</b>	4,53 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	27,5%
<b>Glasfaser</b>	3,65 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	22,2%
<b>Gipskarton (GKB)</b>	8,29 kg CO <sub>2</sub> -äqv.	49,7%

Abbildung 9.6.2-1: Treibhauspotential von Metallständerwänden

Alternativ zur Verwendung von Metallprofilen gibt es im Bereich des Holzbaus eine Reihe von unterschiedlichen Systemen.

## Holzständer

In der einfachsten Variante werden die CW-Profile durch Konstruktionshölzer ersetzt. Dies ist im Vergleich zur Metallständerwand nahezu kostenneutral möglich, führt aber dazu, dass die Schallschutzqualität der Wandkonstruktion merkbar abnimmt. Hinsichtlich des Treibhauspotentials ergibt sich daraus eine Optimierung in einer Größenordnung von ca. 6,77 kg CO<sub>2</sub>-äqv.

## Furnierschichtholzständer

Die Verwendung von Furnierschichtholz als Ständermaterial, erlaubt zunächst schlankere Ständerprofile, was sich in geringem Maße positiv auf die Schallschutzqualität auswirkt. Allerdings führen die Materialkosten für die Ständer zu einem höheren Gesamtpreis. Auch ist das Furnierschichtholz in seinen ökologischen Eigenschaften schlechter zu bewerten, als der Vollholzständer.

## zusammengesetzte Holzständer

Als weitere Alternative gibt es Ständer, die aus kleinteiligen Holzquerschnitten und Holzweichfaserstreifen zusammengesetzt werden. Hintergrund ist in erster Linie der Versuch, darüber die Federwirkung des Metallständers zu imitieren und die Schallschutzqualitäten der Wand zu verbessern.

Somit besteht über die Verwendung von Ständern aus Holz- und Holzwerkstoffen grundsätzlich die Möglichkeit, das Treibhauspotential einer Trennwandkonstruktion merklich zu senken. Gleichzeitig führt dies aber auch zu einer geringfügigen Lastverschiebung in die Kategorien POCP, EP und AP. Diese Art der Holzständerwand kommt dabei auf annähernd ähnliche Schallschutzwerte, wie die klassische Holzständerwand. Alle anderen Holzkonstruktionen bleiben auf einem schallschutztechnisch niedrigeren (wenngleich für den wohnungsinternen Bereich ausreichenden) Niveau.

## einfach beplankte Ständerwand

Somit sind zweifach beplankte Holzständerwände in schallschutztechnischer Hinsicht nahezu gleichwertig mit einfach beplankten Metallständerwänden oder Ständerwänden aus zusammengesetzten Holzständern. Schaut man sich die einfach beplankte Metallständerwand wiederum in der Ökobilanz an, stellt man fest, dass sie hinsichtlich des Treibhauspotentials (GWP) mit den meisten Holzkonstruktionen vergleichbar ist und was die übrigen Wirkungska-



tegorien angeht sogar besser abschneidet. Somit handelt es sich bei einer einfach beplankten Metallständerwand um eine äußerst wirtschaftliche und vergleichsweise ökologische Konstruktionsart, da sie gegenüber der zweifach beplankten Wand bei geringeren Kosten ein Reduzierung der GWP-, POCP-, EP- und AP-Emissionen erzielt. In ähnlicher Form gilt das für die einfach beplankte Holzständerwand aus zusammengesetzten Holzprofilen. Sie weist gegenüber der einfach beplankten Metallständerwand ein noch etwas niedrigeres GWP auf, bei geringfügig höheren POCP- und EP-Werten. Die spezifischen Optimierungskosten fallen mit 0,29 EUR je eingespartem kg CO<sub>2</sub>-äqv. Emission sehr moderat aus.

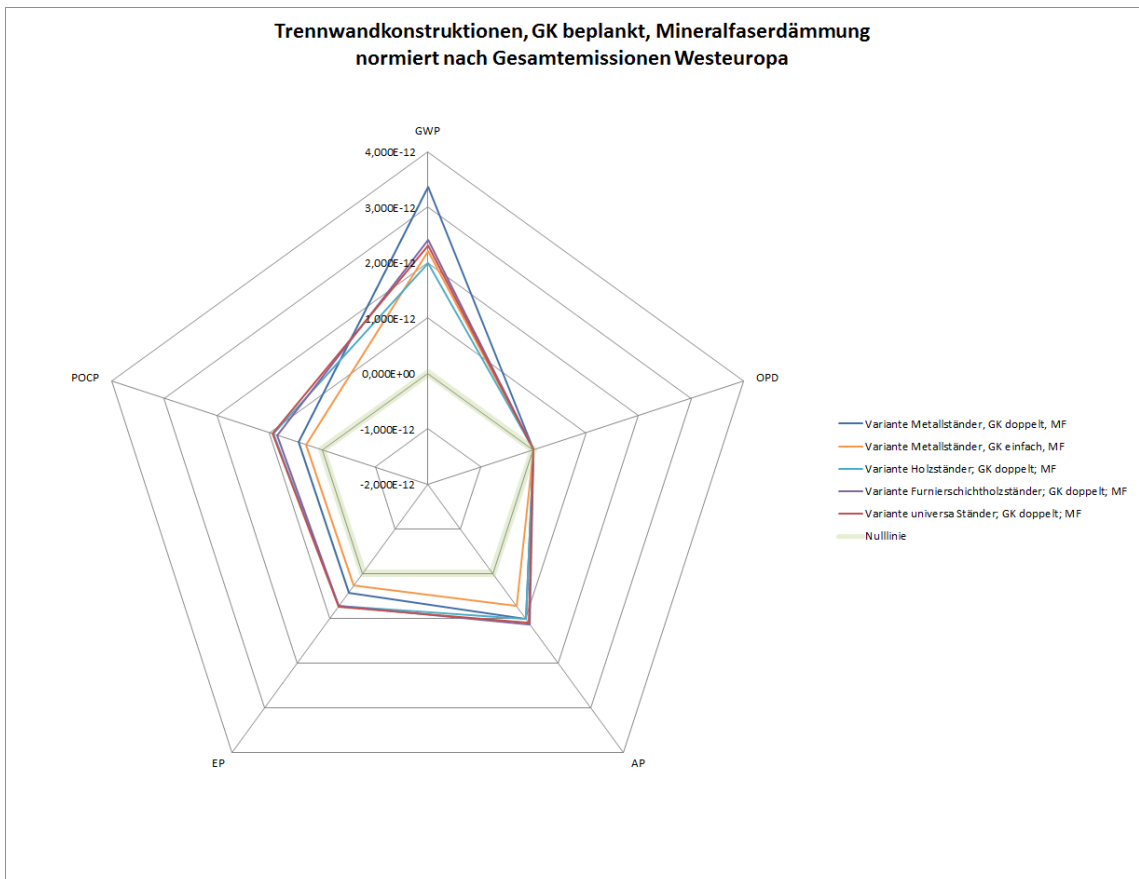


Abbildung 9.6.2-2: Umweltwirkungen von Trennwandkonstruktionen, normiert

MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Kosten je m <sup>2</sup>	Kosten-differenz +++Haus	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Kosten Einsparung GWP	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
<b>Furnierschicht-holzständerwand 100 mm, beidseitig doppelt GK, MF</b>	11,79 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000006 kg R11 äqv.	0,0310508 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0093444 kg Phos äqv.	0,0070495 kg Ethen äqv.	0,0730053 kg Sb äqv.	218,68 MJ	203,39 MJ			1.179,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.				
<b>Holzständerwand 100 mm, beidseitig einfach Dreischichtplatte, MF</b>	-5,58 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000028 kg R11 äqv.	0,0195914 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0075357 kg Phos äqv.	0,0059593 kg Ethen äqv.	0,0002069 kg Sb äqv.	-37,96 MJ	-162,46 MJ			-558,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.			-16.246,00 MJ	
<b>Holzständerwand 100 mm, beidseitig einfach OSB, MF</b>	0,59 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000038 kg R11 äqv.	0,0480894 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0096166 kg Phos äqv.	0,0279372 kg Ethen äqv.	0,0002402 kg Sb äqv.	158,09 MJ	2,12 MJ			59,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.			200,12 MJ	
<b>Holzständerwand 110 mm, beidseitig doppelt GK, MF</b>	9,71 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000005 kg R11 äqv.	0,0279933 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0092824 kg Phos äqv.	0,0077043 kg Ethen äqv.	0,0730951 kg Sb äqv.	180,20 MJ	156,39 MJ	35,30 EUR	0,00 EUR (preisneutral)	971,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-676,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.		16.539,00 MJ	-6.853,00 MJ
<b>Metallständerwand 100 mm, beidseitig einfach GK, MF</b>	10,77 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000000 kg R11 äqv.	0,0197389 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0035106 kg Phos äqv.	0,0025611 kg Ethen äqv.	0,0006833 kg Sb äqv.	147,46 MJ	159,66 MJ	30,60 EUR	-470,00 EUR	1.077,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-570 kg CO <sup>2</sup> äqv.	geringere Kosten, Einsparung	15.966,00 MJ	-7.426,00 MJ
<b>Metallständerwand 125 mm, beidseitig doppelt GK, MF</b>	16,47 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000000 kg R11 äqv.	0,0279222 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0053889 kg Phos äqv.	0,0036722 kg Ethen äqv.	0,0010223 kg Sb äqv.	218,56 MJ	233,92 MJ	35,30 EUR		1.647,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.			23.392,00 MJ	
<b>uni*versa Holzständerwand 100 mm, beidseitig einfach GK, MF</b>	7,14 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000001 kg R11 äqv.	0,0204936 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0060041 kg Phos äqv.	0,0048036 kg Ethen äqv.	0,0366324 kg Sb äqv.	126,02 MJ	116,21 MJ	38,02 EUR	272,00 EUR	714,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-933,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,29 EUR	11.621,00 MJ	-11.771,00 MJ
<b>uni*versa Holzständerwand 125 mm, beidseitig doppelt GK, HWF</b>	4,07 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000006 kg R11 äqv.	0,0313519 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0096758 kg Phos äqv.	0,0074952 kg Ethen äqv.	0,0728860 kg Sb äqv.	164,63 MJ	54,23 MJ	70,00 EUR	3.470,00 EUR	407,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	124,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	2,80 EUR	5.423,00 MJ	
<b>uni*versa Holzständerwand 125 mm, beidseitig doppelt GK, MF</b>	11,29 kg CO <sup>2</sup> äqv.	0,0000007 kg R11 äqv.	0,0302116 kg SO <sup>2</sup> äqv.	0,0095941 kg Phos äqv.	0,0078656 kg Ethen äqv.	0,0730724 kg Sb äqv.	202,00 MJ	192,19 MJ	42,72 EUR	742,00 EUR	1.129,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	-518,00 kg CO <sup>2</sup> äqv.	1,43 EUR	19.219,00 MJ	-4.173,00 MJ

Abbildung 9.6.2-3. Ökobilanzdaten von Trennwandkonstruktionen

Weitergehende Optimierungen sind nur möglich, entscheidet man sich für alternative Dämmstoffe oder Bekleidungsmaterialien.

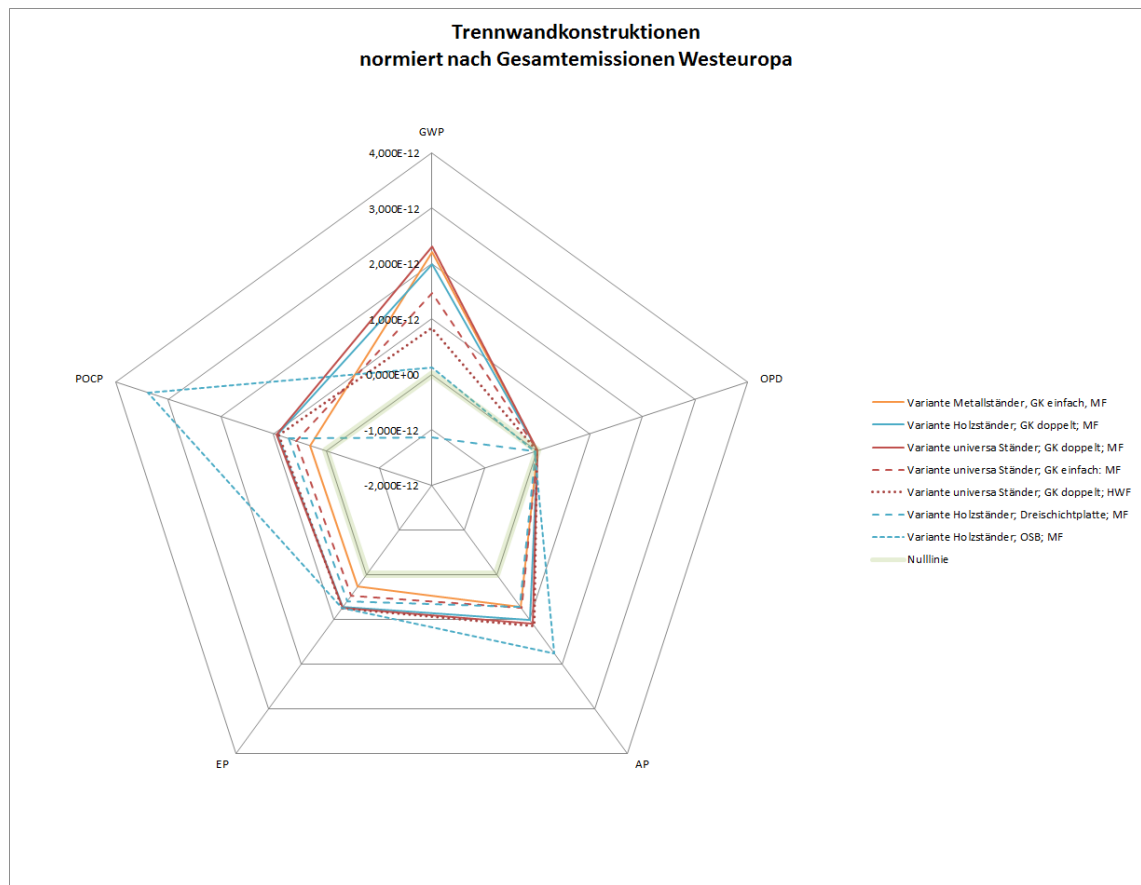


Abbildung 9.6.2-4. Umweltwirkungen von Trennwandkonstruktionen, normiert

Der Ersatz der GK-Platten durch eine OSB erweist sich unabhängig von der Oberflächenthematik zwar als wirksam im Hinblick auf das Treibhauspotential (GWP), jedoch kommt es zu einer deutlichen Lastverschiebung in Richtung des bodennahen Ozonbildungspotentials (POCP). Somit erscheint dies nicht als eine sinnvolle Alternative. Ein Ersatz der Dämmung durch Holzweichfaser (dargestellt am Beispiel des uni\*versa Systems) erweist sich als durchaus wirksam im Hinblick auf das GWP ohne, daß daraus Lastverschiebungen entstehen. Am Wirksamsten ist jedoch der Ersatz der GK Bekleidung durch eine Dreischichtplatte aus Fichtenholz. Diese Maßnahme senkt das Treibhauspotential als einzige untersuchte Variante in den wertnegativen Bereich. Allerdings fallen die spezifischen Optimierungskosten mit ca. 2,80 EUR je eingespartem kg CO<sub>2</sub>-äqv. Emission vergleichsweise hoch aus.

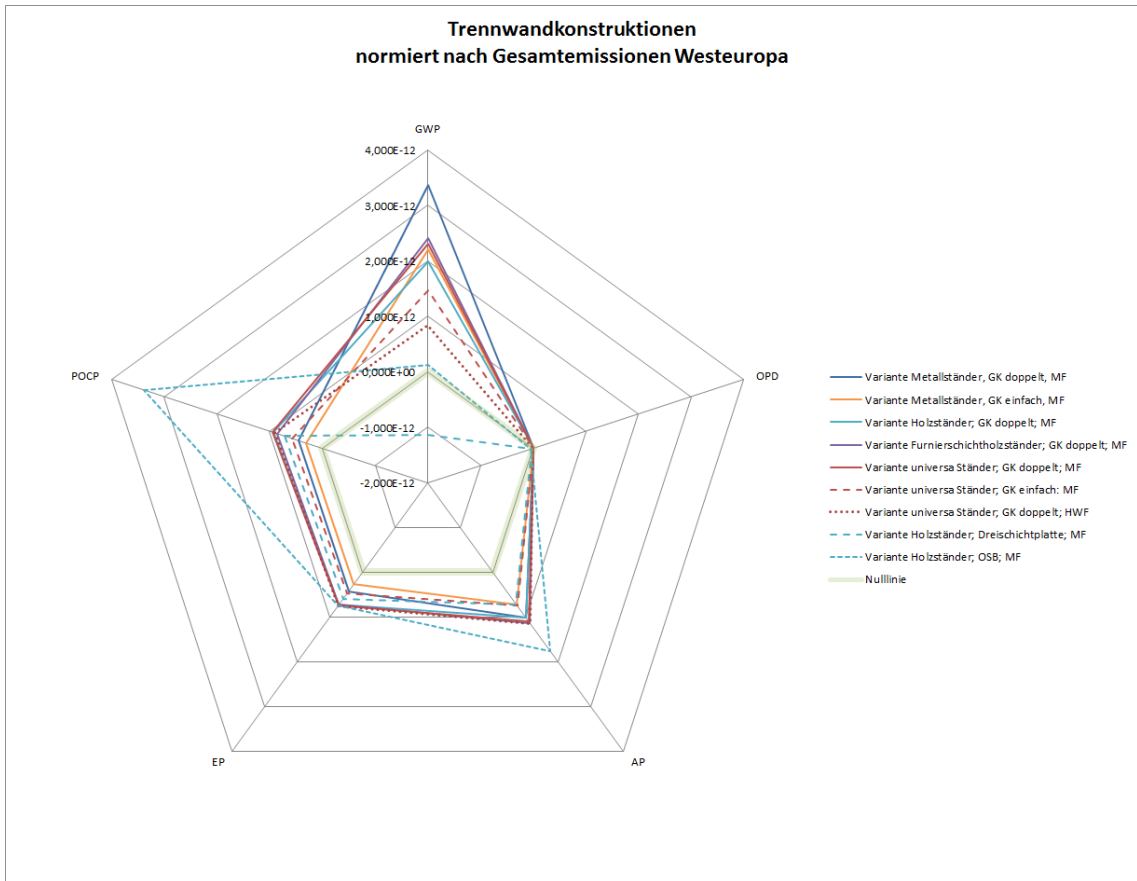


Abbildung 9.6.2-5: Umweltwirkungen von Trennwandkonstruktionen, normiert

## 9.8 Energie- und Technikkonzept

### 9.8.1 Energiebedarf

#### Endenergiebedarf Nutzung

Auf Grundlage der technischen, ökologischen und ökonomischen Untersuchungen zur Gebäudehülle wurde für das +++Haus als Ausgangspunkt ein energetischer Standard gewählt, der einem Heizwärmebedarf von 20 kWh/m<sup>2</sup>a entspricht. Hinzu kommt ein Nutzwärmebedarf für Warmwasser von 12,5 kWh/m<sup>2</sup>a [EnEV, 2014]

<b>Heizwärmebedarf</b>	20 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Nutzwärmebedarf für Warmwasser</b>	12,5 kWh/m <sup>2</sup> a

Abbildung 9.8.1-1: Energiebedarf +++Haus

Auf diesen Grundannahmen basierend ergeben sich für die im Weiteren beschriebenen Technikkonzepte folgende Endenergiebedarfe:

Beschreibung		Gas	Strom	gesamt
<b>Variante 1a</b>	3 kW Wärmepumpe mit Erdsonde als Quelle, Elektrodurchlauferhitzer, Lüftungsanlage mit WRG	-	38,0 kWh/m <sup>2</sup> a	38,0 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Variante 1b</b>	3 kW Wärmepumpe mit Erdsonde als Quelle, Elektrodurchlauferhitzer, 300l Warmwasserspeicher, Lüftungsanlage mit WRG	-	30,0 kWh/m <sup>2</sup> a	30,0 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Variante 2</b>	Luft/Wasser-Wärmepumpe für Heizen und Warmwasser, Lüftungsanlage mit WRG	-	34,0 kWh/m <sup>2</sup> a	34,0 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Variante 3</b>	Solar-Gas-Brennwert-System (solare Brauchwasserunterstützung), Lüftungsanlage mit WRG	47,5 kWh/m <sup>2</sup> a	5,0 kWh/m <sup>2</sup> a	52,5 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Variante 4</b>	Gas-Brennwert-System, Elektrodurchlauferhitzer, Lüftungsanlage mit WRG	34,0 kWh/m <sup>2</sup> a	25,0 kWh/m <sup>2</sup> a	59,0 kWh/m <sup>2</sup> a

Abbildung 9.8.1-2: Technikvarianten des +++Hauses

Der Nutzerstrombedarf für einen 4-Personen-Haushalt wurde wie folgt angenommen:

<b>Nutzerstrombedarf, absolut</b>	2.500 kWh/a
<b>Nutzerstrombedarf, flächenbezogen</b>	14,7 kWh/m <sup>2</sup> a

Abbildung 9.8.1-3: Nutzerstrombedarf +++Haus

Die Annahme basiert auf der Überlegung, dass sich ein Haushalt, der sich für ein +++Haus entscheidet, auch bei der Ausstattung des Gebäudes mit Haushaltsgeräten, Beleuchtungsmitteln, etc. von ökologischen Aspekten leiten lässt. Die Annahme ist vor diesem Hintergrund relativ konservativ angesetzt und entspricht dem Maximalwert je Wohneinheit nach Effizienzhaus-Plus Standard [Fraunhofer IBP, 2012]. Angesichts der Tatsache dass das Gebäude sehr stark flächenreduziert ist, wäre je nach Effizienz und Umfang der Haushaltsgeräte und der Beleuchtung auch ein Wert von bis zu 2.000 kWh/a nicht unrealistisch. Dies würde sich vorteilhaft auf die erforderliche Photovoltaik-Dimension auswirken.

Reduktion des Nutzerstrombedarfs	ersparte PV Kapazität	ersparte Fläche
-100 kWh/a	-0,142 kWp	-0,85 m <sup>2</sup>
-200 kWh/a	-0,284 kWp	-1,70 m <sup>2</sup>
-300 kWh/a	-0,426 kWp	-2,55 m <sup>2</sup>
-400 kWh/a	-0,568 kWp	-3,40 m <sup>2</sup>
-500 kWh/a	-0,710 kWp	-4,25 m <sup>2</sup>

Abbildung 9.8.1-4: mögliche Flächenreduktion Photovoltaik bei geringerem Nutzerstrombedarf

In die Berechnung der ersparten Photovoltaik ist sowohl der reduzierte Strombedarf als auch die in Folge des reduzierten CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Energiebereitstellung geringere erforderliche Kompensationsleistung eingeflossen.

## 9.8.2 Energieerzeugung

### Beschreibung der analysierten Systeme zur Energieerzeugung

Zur Beheizung des Gebäudes und zur Erzeugung von Warmwasser wurden folgende Technik-konzepte aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energiequellen analysiert:

#### Variante 1a: 3 kW Wärmepumpe mit Erdsonde als Quelle, Elektrodurchlauferhitzer

Aufgrund der guten thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle und der Kompaktheit des zu beheizenden Gebäudevolumens (Nutzfläche max. 130 m<sup>2</sup>, Bruttorauminhalt 540 m<sup>3</sup>) ist es möglich mit einer vergleichsweise kleinen Wärmepumpe mit einer Leistung von 3kW und einer Erdsonde (als Flachkollektor oder Tiefenbohrung) das Gebäude mit Wärme zu versorgen. Diese Art von Geräten werden am Markt in der Regel als Hybridlösungen in Kombination Gas-therme angeboten, können nach Herstelleraussage aber auch ohne dieses verbaut werden. Zur Erzeugung von Warmwasser werden in dieser Variante Elektrodurchlauferhitzer verwendet. Die Investitionskosten für die Anlage und systemimmanente Zusatzkosten (hier: Erdsonde) wurden auf ca. 7.900 EUR abgeschätzt. Unter den Konzepten, die auf erneuerbare Energiequellen setzen ist dies preislich im Mittelfeld, was nachvollziehbar ist, da die Warmwasserbereitung zunächst auch nicht unter Nutzung regenerativer Energien erfolgt.

#### Variante 1b: 3 kW Wärmepumpe mit Erdsonde als Quelle, Elektrodurchlauferhitzer, 300 l Warmwasserspeicher

Diese Variante ist identisch mit der Variante 1a bis auf die Tatsache, dass anstelle der Elektrodurchlauferhitzer ein 300 l Warmwasserspeicher vorgesehen wurde. Hierdurch ist die Erzeugung von Warmwasser ebenfalls über die Wärmepumpe möglich. Die Kosten dieser Variante liegen im Vergleich zur Variante 1a mit ca. 8.800 EUR etwas höher und stellen hier zunächst den höchsten Wert dar. Dies liegt an den höheren Kosten für den Warmwasserspeicher. In der primärenergetischen Betrachtung führt dies zu dem besten Wert von nur 54 kWh/m<sup>2</sup>a für Heizen, Warmwasser und Lüften.

#### Variante 2: Luft/Wasser-Wärmepumpe für Heizen und Warmwasser

Aufgrund der Tatsache, dass an manchen Standorten Erdsonden baurechtlich nicht möglich oder aus anderen Gründen von Bauherren nicht gewünscht werden, wurde alternativ dieses Konzept mit Luft/Wasser-Wärmepumpe analysiert. Die Wärmepumpe wurde dabei so dimensioniert, dass sie sowohl zur Beheizung als auch zur Warmwasserbereitung dienen kann. Die Investitionskosten belaufen sich auf ca. 7.300 EUR und stellen unter den Konzepten, die regenerative Energien nutzen zunächst den günstigsten Wert dar. Dies führt erwartungsgemäß zu einem mittleren Primärenergiebedarf von 61,2 kWh/m<sup>2</sup>a

### Variante 3: Solar-Gas-Brennwert-System (solare Brauchwasserunterstützung)

In dieser Variante wird eine Gasbrennwerttherme mit einer solaren Brauchwasserunterstützung kombiniert. Die vergleichsweise hohen Investitionskosten dieses Systems belaufen sich auf ca. 8.500 EUR, wobei festzustellen ist, dass sich der Primärenergiebedarf nur geringfügig von der Variante 2 unterscheidet und somit ebenfalls im Mittelfeld liegt.

### Variante 4: Gas-Brennwert-System, Elektrodurchlauferhitzer

Diese Variante eines Gas-Brennwert-Systems in Kombination mit Elektrodurchlauferhitzern weist mit Investitionskosten von nur 5.300 EUR den geringsten Wert auf, was wesentlich zur großen Verbreitung derartiger Systeme am Markt beitragen dürfte. Gleichzeitig führt dies in der primärenergetischen Betrachtung mit 73 kWh/m<sup>2</sup>a zu dem schlechtesten Wert im Feld.

	Beschreibung	Investition Anlage	Investition Zusatzkosten	Investition gesamt	Primärenergiebedarf	GWP Nutzung
<b>Variante 1a</b>	3 kW Wärmepumpe mit Erdsonde als Quelle, Elektrodurchlauferhitzer	4.900,- EUR	3.000,- EUR	7.900,- EUR	68,4 kWh/m <sup>2</sup> a	33,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Variante 1b</b>	3 kW Wärmepumpe mit Erdsonde als Quelle, 300l Warmwasserspeicher	5.800,- EUR	3.000,- EUR	8.800,- EUR	54,0 kWh/m <sup>2</sup> a	28,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Variante 2</b>	Luft/Wasser-Wärmepumpe für Heizen und Warmwasser	7.300,- EUR	-	7.300,- EUR	61,0 kWh/m <sup>2</sup> a	31,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Variante 3</b>	Solar-Gas-Brennwert-System (solare Brauchwasserunterstützung)	7.500,- EUR	1.000,- EUR	8.500,- EUR	61,0 kWh/m <sup>2</sup> a	117,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Variante 4</b>	Gas-Brennwert-System, Elektrodurchlauferhitzer	4.300,- EUR	1.000,- EUR	5.300,- EUR	73,0 kWh/m <sup>2</sup> a	100,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 9.8.2-1: Kosten, Primärenergiebedarf und Treibhauspotential der Technikvarianten des +++Hauses

### Lüftungsanlage mit WRG

Zur Minimierung der Lüftungswärmeverluste wurde in allen Gebäuden ein zentrales Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung vorgesehen.

## Photovoltaik-Anlage Erreichung eines CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäudes

Die oben beschriebenen Technikkonzepte unterscheiden sich somit nicht nur erheblich in Ihren Investitionskosten sondern führen eben zunächst auch zu deutlichen Unterschieden bezüglich des jeweiligen Primärenergiebedarfs. Für die Betrachtung im Rahmen des Forschungsprojekts wichtiger ist jedoch die Höhe der durch die Nutzung des Gebäudes erzeugten CO<sub>2</sub>-Äqv. Emissionen. Zur Nutzung zählen dabei die Beheizung, die Erzeugung von Warmwasser, der energetische Aufwand für die mechanische Lüftung, sowie der Nutzerstrombedarf.

Um die Konzepte vergleichbar zu machen, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts das Ziel definiert, dass in der Gesamtbilanz alle Gebäude CO<sub>2</sub>-neutral sein sollen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Photovoltaikanlage entsprechend so zu konzipieren, dass Ihre Überkapazität die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebäudes kompensiert.

Für die wirtschaftliche Bewertung wurden die Investitionskosten mit ca. 1.280 EUR/kWp angenommen. Es zeigt sich, dass die Konzepte, die bereits in nennenswertem Umfang auf regenerative Energiequellen setzen (Variante 1b und 2) in der Gesamtkostenbetrachtung am günstigsten abschneiden. Die genannten Varianten unterscheiden sich in Ihren Investitionskosten nur um ca. 300,- EUR. Die Variante 1a, die im Gegensatz zur Variante 1b ihr Warmwasser unökologischer mit Elektrodurchlauferhitzern erzeugt, schneidet ca. 1.800 EUR teurer ab. Die beiden Systeme, die ganz oder teilweise auf eine Gas-Brennwert-Therme setzen (Variante 3 und 4) sind in der Gesamtbetrachtung deutlich teurer und erzeugen gegenüber der günstigsten Variante Investitionsmehrkosten von ca. 3.100 - 3.300,- EUR.

	Beschreibung	erf. Dimension PV	Investition PV	Investition gesamt (inkl. PV)	Endenergiebedarf (PV bilanziert)	Energieeffizienzklasse [EnEV, 2014]	Primärenergiebedarf (PV bilanziert)	GWP
<b>Variante 1a</b>	3 kW Wärmepumpe mit Erdsonde als Quelle, Elektrodurchlauferhitzer	12,7 kWp	16.270,- EUR	31.269,80 EUR	15,0 kWh/m <sup>2</sup> a	A+	27,0 kWh/m <sup>2</sup> a	33,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Variante 1b</b>	3 kW Wärmepumpe mit Erdsonde als Quelle, 300l Warmwasserspeicher	10,8 kWp	13.800,- EUR	29.700,28 EUR	6,0 kWh/m <sup>2</sup> a	A+	11,0 kWh/m <sup>2</sup> a	28,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Variante 2</b>	Luft/Wasser-Wärmepumpe für Heizen und Warmwasser	11,7 kWp	15.035,- EUR	29.435,04 EUR	10,0 kWh/m <sup>2</sup> a	A+	18,0 kWh/m <sup>2</sup> a	31,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Variante 3</b>	Solar-Gas-Brennwert-System (solare Brauchwasserunterstützung)	13,4 kWp	17.144,- EUR	32.743,68 EUR	50,5 kWh/m <sup>2</sup> a	B	58,0 kWh/m <sup>2</sup> a	117,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
<b>Variante 4</b>	Gas-Brennwert-System, Elektrodurchlauferhitzer	15,8 kWp	20.174,- EUR	32.573,93 EUR	43,0 kWh/m <sup>2</sup> a	A	54,0 kWh/m <sup>2</sup> a	100,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

Abbildung 9.8.2-2: Vergleich Technikvarianten +++Haus (Kosten, Photovoltaik, Primärenergiebedarf und Treibhauspotential)

Auch wenn alle 5 Technikkonzepte formal das Ziel der CO<sub>2</sub>-Neutralität gleichermaßen erfüllen, so unterscheiden Sie sich dennoch hinsichtlich Ihres Primärenergiebedarfs. Dies liegt bezüglich der Primärenergie darin begründet, dass gemäß [EnEV, 2014] die Erträge der Photovoltaik nur teilweise vom Endenergiebedarf (und nur vom tatsächlichen Anteil für Strom) abgezogen werden dürfen. Dies wirkt sich berechtigterweise negativ auf die Varianten aus, die



auf nicht regenerative Energiequellen setzen (hier: Gas). Hieraus resultiert für das +++Haus, dass bei abschließender Optimierung unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten die Varianten 1b oder 2 zu präferieren sind.

### 9.8.3 Solaraktive Fassade

Der dem Forschungsprojekt zu Grunde liegende Wettbewerbsentwurf hat eine transparente Fassadenbekleidung aus Polycarbonat-Stegplatten vorgesehen. Im Wettbewerb wurde bereits qualitativ auf den Effekt hingewiesen, dass sich der Hinterlüftungsspalt bei entsprechender Abriegelung in der Heizperiode an sonnigen Tagen aufheizt und somit zur Verbesserung des Wärmeschutzes beiträgt, ohne diesen Effekt genauer zu quantifizieren. Seitens des Preisgerichts wurde damals angeregt, die entstehende Wärme doch direkt zur Gebäudebeheizung zu nutzen.

Mit Hilfe einer thermischen Simulation wurden im Rahmen des Forschungsprojekts nun beide Effekte (Transmission und Konvektion) quantifiziert.

## Zusammenfassung

### Kompensation von Lüftungswärmeverlusten

Bei der Maximalwertbetrachtung wurde deutlich, dass durch einen zweigeschossigen Ausbau des fassadenintegrierten Luftkollektors weitaus höhere Temperaturspreizungen erzielt werden, die für eine Einspeisung in ein Lüftungssystem genutzt werden können. In der Häufigkeitsanalyse in Bezug zur Außentemperatur konnte zudem sichergestellt werden, dass diese Temperaturspreizungen wiederholt sowie überwiegend im Bedarfsfall auftreten werden. Eine zweigeschossige Ausführung stellt in Bezug auf die Kompensation von Lüftungswärmeverlusten ein energetisches Optimum dar.

Wird der Luftkollektor in Verbindung eines Lüftungsgerätes mit Wärmerückgewinnung genutzt, fällt der Kompensationsanteil durch den hohen Wärmerückgewinnungsgrad mit 11% eher gering aus. Auch sollte beachtet werden, dass das Kompensationspotenzial durch die Anbindung an ein Lüftungsgerät durch die stetige Abführung der erwärmten Luft um rund 45% beträchtlich reduziert wird. Die Sinnfälligkeit der Anbindung an ein Lüftungssystem sollte deshalb im Gesamtkontext betrachtet werden.

Ohne den Einbezug eines Lüftungsgerätes können durch die Luftkollektorfassade ebenfalls energetische Potenziale zur Kompensation von Lüftungswärmeverlusten generiert werden. Im Vergleich zu einer konventionellen Fensterlüftung können Lüftungswärmeverluste durch die direkte Einführung der vorerwärmten Außenluft um rund 12% kompensiert werden.

Die in einer weiteren Variante beabsichtigte Vorerwärmung der Abluft durch den Luftkollektor, zugunsten der Erhöhung des zur Wärmerückgewinnung relevanten Temperaturniveaus, wird als nicht sinnvoll erachtet. Die Abluft erlangt im Tagesverlauf zwar ein höheres Temperaturniveau, in den Abend- und Nachtstunden kommt es jedoch zu erhöhten Transmissionswärmeverlusten und schließlich zu beträchtlichen Temperaturabsenkungen. Die Lüftungswärmeverluste steigern sich, im Vergleich zur Basisvariante, um rund 36%.

Die Kollektorausrichtung in Ost und West weist trotz der auf der Südseite vorgesehenen Überdachungen keine höheren energetischen Erträge zur Steigerung der Kompensation auf. Die Südausrichtung des fassadenintegrierten Luftkollektors ist somit energetisch am effektivsten.

## Kompensation von Transmissionswärmeverlusten

Durch die Ausbildung einer Polycarbonatstegplattenverkleidung ergeben sich auch energetische Potenziale im Bezug auf die Transmissionswärmeverluste der raumabschließenden Bauteile. So können Transmissionswärmeverluste im direkten Vergleich zu einer konventionellen Fassadenverkleidung aus Holz durch eine Polycarbonatstegplattenverkleidung teils vollständig kompensiert und effektiv zu Transmissionswärmegewinnen übersetzt werden. Über den Heizperiodenverlauf können so Transmissionswärmeverluste, um rund 55%, wesentlich gesenkt werden. Auch die Fassadenflächen in Nord-, Ost- und Westausrichtung weisen durch die Ausbildung mit Polycarbonatstegplatten einen gewichtigen, energetischen Mehrwert auf. Der solare Ertrag führt zu einer Minimierung der Transmissionswärmeverluste um rund 30-45%. Die Ausbildung aller vier Fassadenflächen durch Polycarbonatstegplatten wird deshalb energetisch als äußerst sinnvoll erachtet.

Wenn der Wärmedurchlasswiderstand der raumabschließenden Bauteile durch die Dezimierung der Dämmstoffstärke vermindert wird und der, der transluzenten Fassadenverkleidung durch die Auswahl von dämmfähigeren Polycarbonatstegplatten erhöht, können Transmissionswärmeverluste zwar schneller und effizienter kompensiert werden, jedoch entweicht dem Gebäude durch die geringere Dämmstoffstärke in den Abend- und Nachtstunden bzw. tagsüber ohne direkte Solareinstrahlung auch wieder mehr Wärme. Die Transmissionswärmeverluste steigen im Vergleich zur Basisvariante um rund 35% an. Diese Variante erscheint somit als energetisch nicht sinnvoll.

Wird der Fassadenzwischenraum im Sommerfall nicht mit einem konstanten Volumenstrom durchlüftet, können erhöhte Absorberflächentemperaturen von bis zu 130°C entstehen. Durch den sich einstellenden Transmissionswärmegewinn kommt es aufgrund dessen auch im Innenraum zu erhöhten Oberflächentemperaturen. An heißen Sommertagen können diese bei über 23°C als durchaus unangenehm empfunden werden. Integrierte Lüftungsklappen im Dach und Sockelbereich des Gebäudes, die an Sommertagen geöffnet werden können, erscheinen deshalb zwingend notwendig. Im Vergleich zu einer konventionellen Holzverkleidung erhöht sich die Oberflächentemperatur im Innenraum durch eine hinterlüftete Polycarbonatstegplattenverkleidung um 0,30°C. Diese äußerst geringe Temperatursteigerung führt jedoch zu keinen maßgeblichen Komforteinschränkungen. Auch die hierdurch resultierende Kühllaststeigerung von +2,70 kWh·a kann ohne energetischen Aufwand über eine natürliche Fensterlüftung kompensiert werden.

Die Ausbildung eines fassadenintegrierten Luftkollektors sowie die Fassadenverkleidung durch Polycarbonatstegplatten selbst, weisen ein nicht unerhebliches, energetisches Potenzial auf. Die Sinnfälligkeit einer technischen Systemintegration sollte allerdings im Gesamtkontext betrachtet werden, so spielen ökologische sowie ökonomische Aspekte ebenfalls eine wesentliche Rolle.

## Simulationsmodell

Der Baukörper wurde im CAD-Editor des Simulationsprogramms TAS abgebildet. Folgende, stichwortartig aufgelistete Punkte sind Leistungsmerkmale des verwendeten Simulationsprogramms TAS NG [EDSL, 2000]:

- Sonnenstandsberechnungen basierend auf dem geographischen Standort [Michalsky, 1988, S. 227-235]
- Algorithmen zum instationären Wärmefluss durch Bauteile nach Mitalas in Stundenschritten berechnet [Stephenson et al., 1971, S. 117-126]

- Speicherfaktoren von Bauteilen nach der Response-Faktoren-Methode [Gough, 1982]
- Berücksichtigung freier und erzwungener Konvektion an Oberflächen nach Alamdari-Hammond und Fujii-Imura [Alamdari et al., 1983]
- Gesetze der solaren Strahlung und Wärmestrahlung nach Liu-Jordan und MRT-Methode [Carroll, 1980, S. 343-348]
- Berechnung der freien äußeren und interzonalen Luftwechsel nach regelbarer effektiver Öffnung, Temperaturdifferenzen und Windlast [Orme et al., 1994]

Das Simulationsmodell untergliedert sich für eine detailliertere Analyse in 27 Zonen die den Kollektorluftraum sowie den Luftraum des Innenraums bilden. Die in der Planung des Gebäudes beabsichtigten Auskragungen auf der Südseite sind in der Simulation berücksichtigt. Die Wandscheibe zwischen dem Kollektorluftraum und dem Innenraum bildet das raumabschließende Bauteil das wie auch das Fassadenverkleidungsbauteil mit allen relevanten, baukonstruktiven und physikalischen Kennwerten in den Systemeingaben definiert ist. Alle anderen raumabschließenden Decken- bzw. Wandscheiben sind als adiabate Flächen über die kein Wärmeaustausch stattfindet definiert. Um einen genauen Bilanzierungsvergleich ohne Einbezug von Temperaturschwankungen zwischen den ermittelten Lasten vollziehen zu können wurde für den Innenraum ein konstantes Solltemperaturniveau angenommen. Für den Luftwechsel wurde ein für einen 4 Personenhaushalt ausgelegter Volumenstrom angesetzt. Bei ruhender Luftschichtbetrachtung findet lediglich eine Zwangsdurchmischung innerhalb des Fassadenluftraums ohne Luftaustausch mit der Umgebung statt.

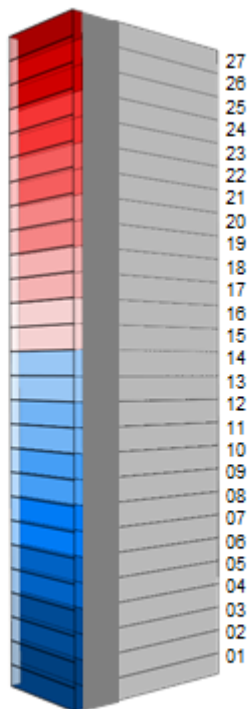


Abbildung 9.8.3-1: 3D TAS Simulationsmodell mit Visualisierung der Zonierung

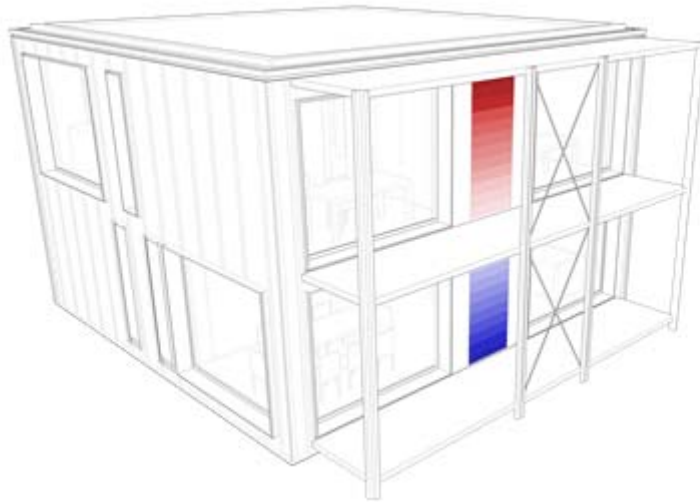


Abbildung 9.8.3-2: 3D Gebäudemodell mit Kollektorflächenvisualisierung

Für die thermische Simulation gelten folgende Randbedingungen:

<b>Zeitraum der Heizperiode</b>	01. Oktober - 31. März	
<b>Wetterdatensatz</b>	TRY04 (Potsdam) mittleres Jahr	
<b>Min./Max. Außenlufttemperatur</b>	-13,40 °C	+24,10 °C
<b>Min./Max. Globalstrahlung</b>	0,00 W/m <sup>2</sup>	673,00 W/m <sup>2</sup>
<b>Abmessungen der Kollektorfläche (H/B)</b>	5,38 m	1,00 m
<b>Abmessungen der Zonen (H/B)</b>	0,18 m (Zone 1) 0,20 m (Zone 2-27)	1,00 m
<b>Angesetzter Volumenstrom</b>	120 m <sup>3</sup> /h (30 m <sup>3</sup> /Pers.)	
<b>Konstante Solltemperatur Innenraum</b>	20°C	

Abbildung 9.8.3-3: Randbedingungen der thermischen Simulation

## konstruktive und physikalische Parameter

	Dicke	Strahlungsreflexionsgrad	Strahlungsabsorptionsgrad	Strahlungstransmissionsgrad	Lichtreflexionsgrad	Lichttransmissionsgrad	Emissionsgrad	Gesamtenergiedurchlassgrad	Wärmeübergangs-koeffizient	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	Spezifische Wärme-kapazität	Rohdichte	Wasserdampfdiffusions-widerstandszahl
	[mm]								[W/m <sup>2</sup> *K]	[W/m*K]	[J/kg*K]	[kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$
<b>Innen</b>													
Dreischichtplatte	20	-	-	-	-	-	0,8	-	-	0,14	2.800	500	50
Holzrahmenfilz climowool HRF2 0351		-	-	-	-	-	-	-	-	0,035	840	24	-1
Holzfaserdämmung Pavatex Pavaflex2	200	-	-	-	-	-	0,9	-	-	0,039	2.100	55	2
Holzweichfaserpl. Steico universal3	H1 dunkel	0,38	0,62	-	0,36	-	-	-	-	-	-	-	-
	H2 hell	0,47	0,53	-	0,45	-	-	-	-	0,048	2.100	270	5
Luftschicht	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Polycarb.-stegplatte Rodeca4	PC2540-4 color-kristall	0,25	0,75	0,63	0,23	0,66	-	0,68	1,4	0,073	-	-	-
	PC2540-7 color-kristall	0,33	0,67	0,47	0,31	0,53	-	0,56	1,1	0,054	-	-	5,000
<b>Außen</b>													
Raumabschl. Konstruktion Gesamt	280								0,164				

Abbildung 9.8.3-4: konstruktive und physikalische Parameter

## Lüftungssystem



	VAR 260/4
Breite	595 mm
Tiefe	631 mm
Höhe	885 mm
Produkt mit Verpackung	52,3 kg
Produkt ohne Verpackung/betriebsbereit	41 kg
Nennspannung/Bemessungsspannung am Steuerkreis	230 V
Netzfrequenz	50 Hz
Sicherung, träge	4 A
Leistungsaufnahme	22 ... 170 W
max. Leistungsaufnahme mit Frostschutzelement	1.170 W
Stromaufnahme	0,74 A
Mindestquerschnitt der Anschlussleitung	≥ 1,5 mm <sup>2</sup>
Schutzklasse	1
Schutzart	IP10B
Luftanschlussbereich • (innen)	180 mm
Luftanschlussbereich • (außen)	210 mm
Material des Wärmetauschers	Polystyrol/ Aluminium Grid
max. Luftvolumenstrom	260 m <sup>3</sup> /h
verbleibender Förderdruck bei max. Luftvolumenstrom	180 Pa
spezifische Leistungsaufnahme	0,3 W/(m <sup>3</sup> /h) bei 200 m <sup>3</sup> /h, 100 Pa
Filterklasse Zuluft	F7/F9
Filterklasse Abluft	G4
Filteroberfläche	0,9 m <sup>2</sup>
Wärmebereitstellungsgrad	85 %
Temperaturverhältnis Zuluftseite nach EN 13141-7	85 %
Frostschutzbetrieb aktiv (verhindert Einfrieren bzw. taut Kondensat wieder auf)	≤ -3 °C
max. Betriebstemperatur	40 °C
Schalleistung Stufe 1	45 dB(A)
Schalleistung Stufe 2	48 dB(A)
Schalleistung Stufe 3	53 dB(A)
max. Schalleistung	59 dB(A)
Umgebungstemperatur	5 ... 40 °C

Abbildung 9.8.3-5: Lüftungssystem

## Kollektorhöhe

Zunächst wurde ermittelt, welche Geschosshöhe für die Ausbildung eines Kollektors in Bezug auf die energetischen Erträge ein Optimum darstellt.

Die Luftraumtemperatur steigt bei zunehmender Kollektorhöhe ohne Überdachungen nahezu linear an. In der Heizperiode können Luftraumtemperaturen von max. 39,80°C (1 Geschosshöhe) sowie max. 53,00°C (2 Geschosshöhen) entstehen. Die solaren Wärmegewinne belaufen sich auf maximal 79,20 W/0,20m<sup>2</sup> Segment.

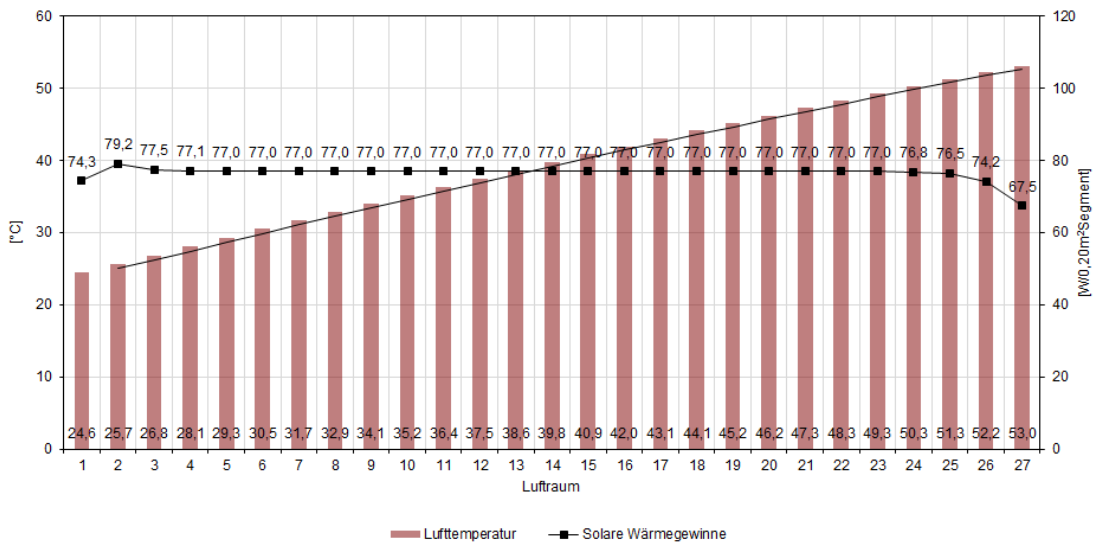


Abbildung 9.8.3-6: Lufttemperatur und solare Gewinne im Fassadenzwischenraum des Kollektors

Durch die vorgesehenen Überdachungen kommt es durch die Verschattung der Kollektorfläche zu einer Verminderung der solaren Einträge und somit auch zu einem geringeren Temperaturanstieg innerhalb des Kollektors. In der Heizperiode können dabei Temperaturspitzen von max. 35,30°C (1 Geschosshöhe) und max. 44,80°C (2 Geschosshöhen) entstehen.

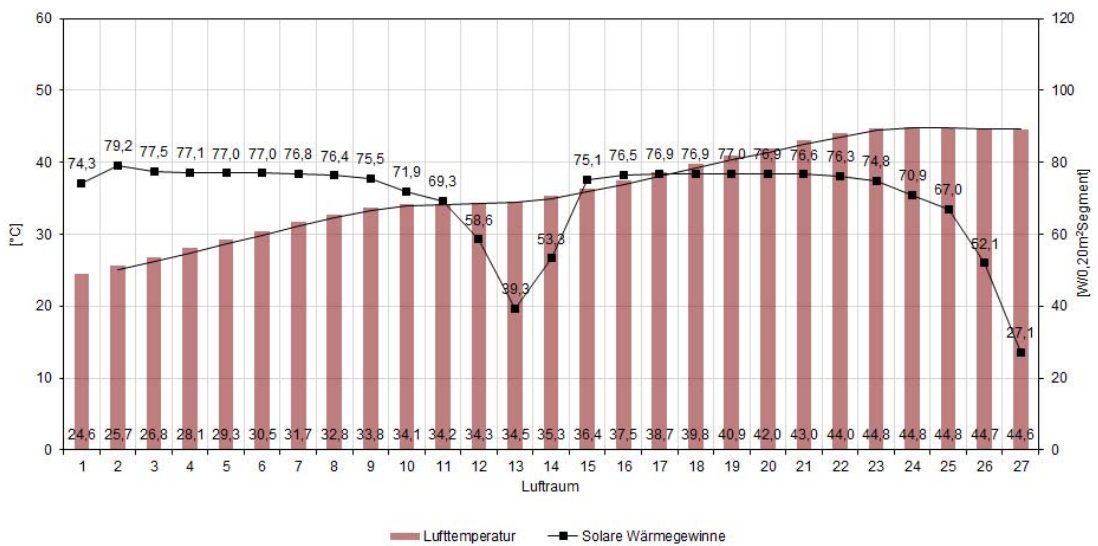


Abbildung 9.8.3-7: Lufttemperatur und solare Gewinne im Fassadenzwischenraum des Kollektors (teilverschattet)

Um die effizienteste Kollektorhöhe zu ermitteln bedarf es neben der Maximalwertbetrachtung einer Häufigkeitsanalyse. In oben abgebildetem Diagramm zeigen sich die über die Heizperiode auftretenden Temperaturspreizungen zwischen den Lufträumen 12 und 24.

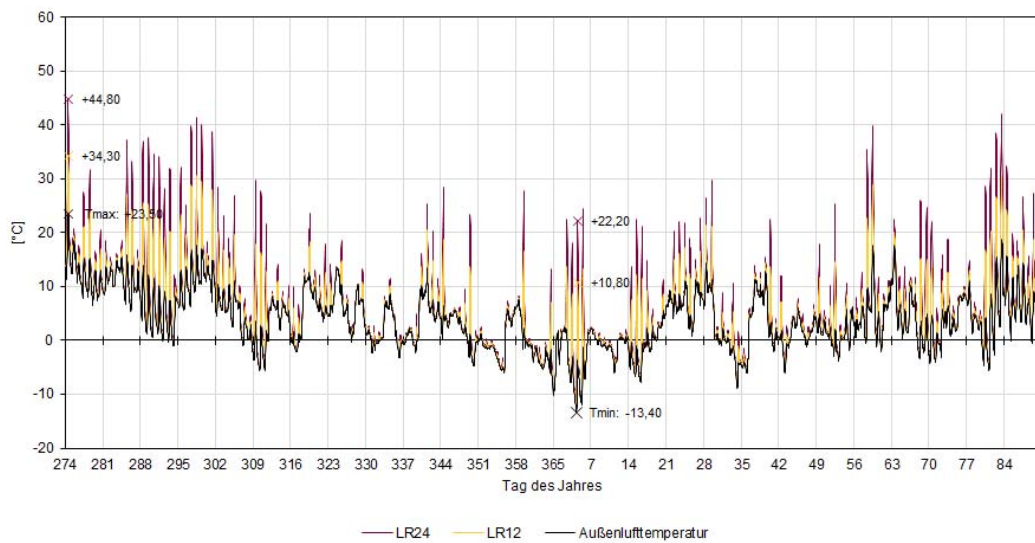


Abbildung 9.8.3-8: Temperaturspreizungen im Fassadenzwischenraum des Kollektors und Außentemperatur im Jahresverlauf

In der Punktwolke zeigt sich nochmals deutlich, dass bei einer Ausbildung der Kollektorfläche über zwei Geschosse höhere Temperaturspreizungen erzielt werden können. Gerade bei Außenlufttemperaturen bei denen es zwingend nötig ist die Zuluft vorzuwärmen um Lüftungswärmeverluste zu vermeiden, können durch eine zusätzliche Geschosshöhe effektivere Temperaturniveaus erzielt werden. Eine Ausführung über zwei Geschosse erscheint hierdurch als energetisch sinnvoll und wird in den weiteren Simulationsschritten angenommen.

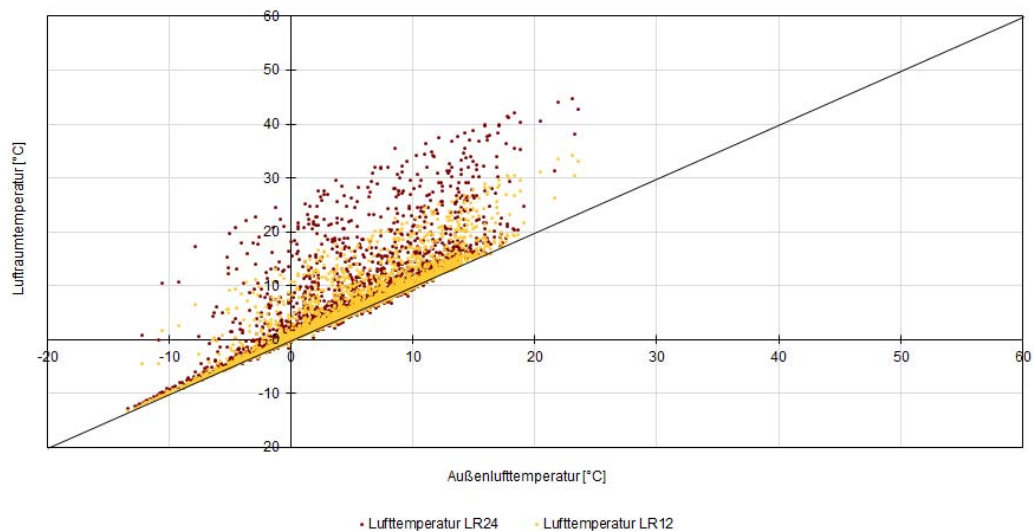


Abbildung 9.8.3-9: Temperaturspreizungen im Fassadenzwischenraum des Kollektors und Außentemperatur, Punktwolke

In diesem Temperaturverlauf wird ersichtlich wie sich die Luftraumtemperaturen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlung verhalten. Die Temperaturspreizung an bewölkten Tagen mit lediglich diffuser Einstrahlung von  $<100 \text{ W/m}^2$  fällt sehr gering mit  $\leq 3,30^\circ\text{C}$  aus, an Sonnentagen mit direkter solarer Einstrahlung von  $>250 \text{ W/m}^2$  hingegen mit  $\leq 24,40^\circ\text{C}$  sehr hoch.



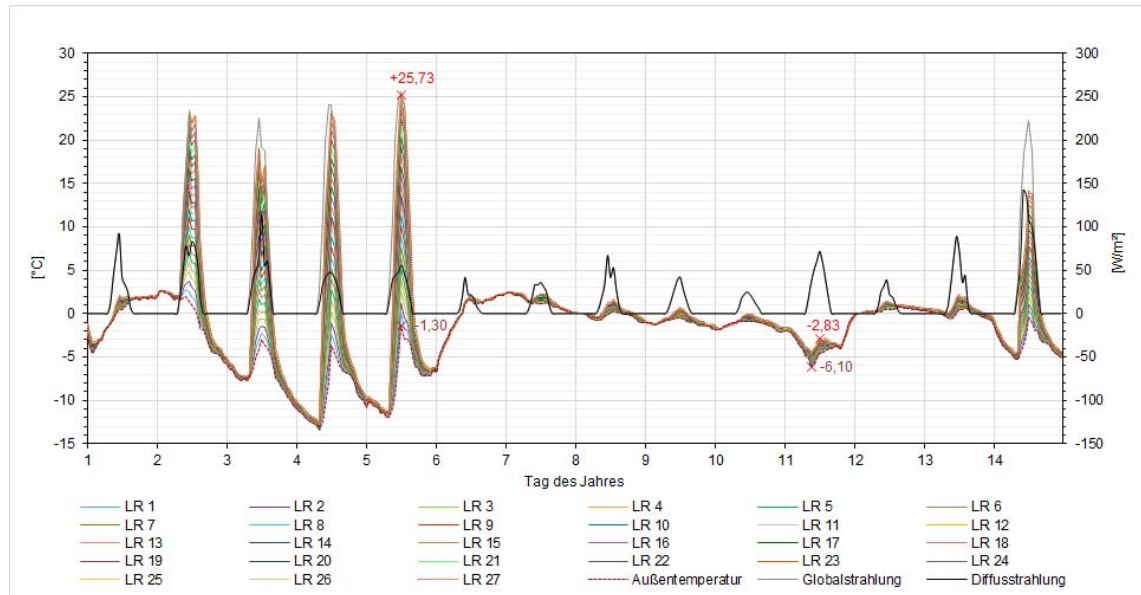


Abbildung 9.8.3-10: Temperaturspreizungen im Fassadenzwischenraum des Kollektors, Globalstrahlung, Diffusstrahlung und Außentemperatur im 2-Wochenverlauf

## Reduktion von Transmissionswärmeverlusten

Folgende Fragestellungen wurden in Bezug auf die Transmission untersucht:

**Können Transmissionswärmeverluste kompensiert bzw. der Innenraum durch Transmissionswärmegewinne mit Hilfe der vorgesehenen, transluzente Fassadenverkleidung erwärmt werden?**

Nachfolgende Diagramme zeigen auf, wie sich der Transmissionswärmeverlust verhält, wenn die Fassade in konventioneller Weise mit Holz bzw. in aktivierter Weise mit Polycarbonatsteplatten verkleidet wird. Betrachtung mit jeweils ruhenden Luftschichten ohne konstanten Volumenstrom.

Im Heizperiodenverlauf sind die Auswirkungen der transluzenten Fassadenverkleidung deutlich zu erkennen. Bei einer auftretenden Globalstrahlung von  $\geq 220 \text{ W/m}^2$  können Transmissionswärmeverluste durch die herbeigeführte Erhitzung des Luftraums durch eine Polycarbonatsteplattenverkleidung vollständig kompensiert werden und zu Transmissionswärmegewinnen übersetzt werden.

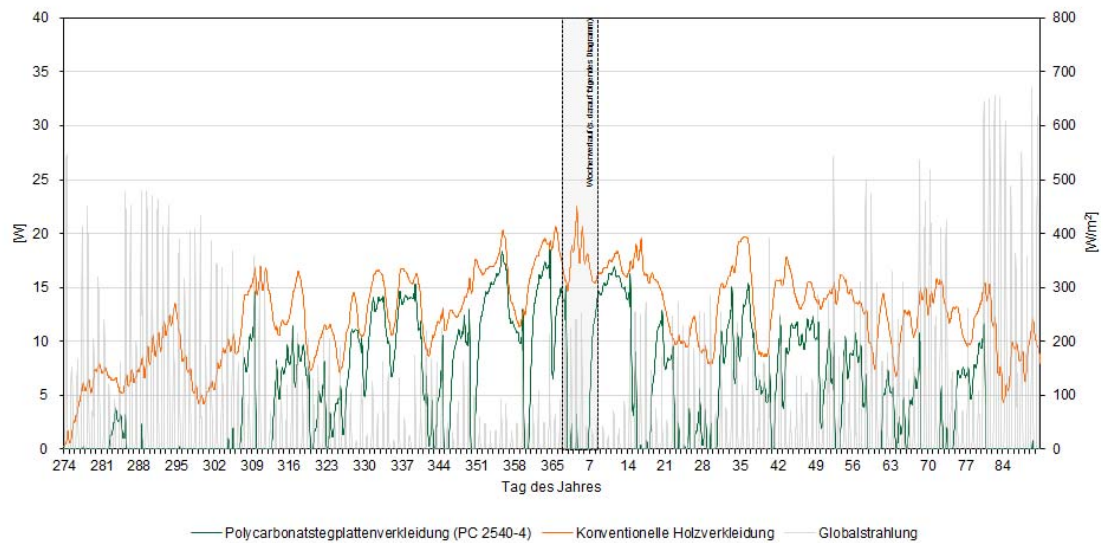


Abbildung 9.8.3-11: Transmissionswärmeverluste der Polycarbonatstegplattenfassade ggü. einer konventionellen Holzverkleidung im Jahresverlauf

Der Wochenverlauf zeigt die Auswirkungen nochmals im Detail. Eine Kompensation der Transmissionswärmeverluste durch die solare Erwärmung erfolgt durch die Wärmespeicherung des raumabschließenden Bauteils zeitversetzt in den Abend- und Morgenstunden. Bei der Holzverkleidung ist lediglich eine leichte Kompensation zu erkennen.

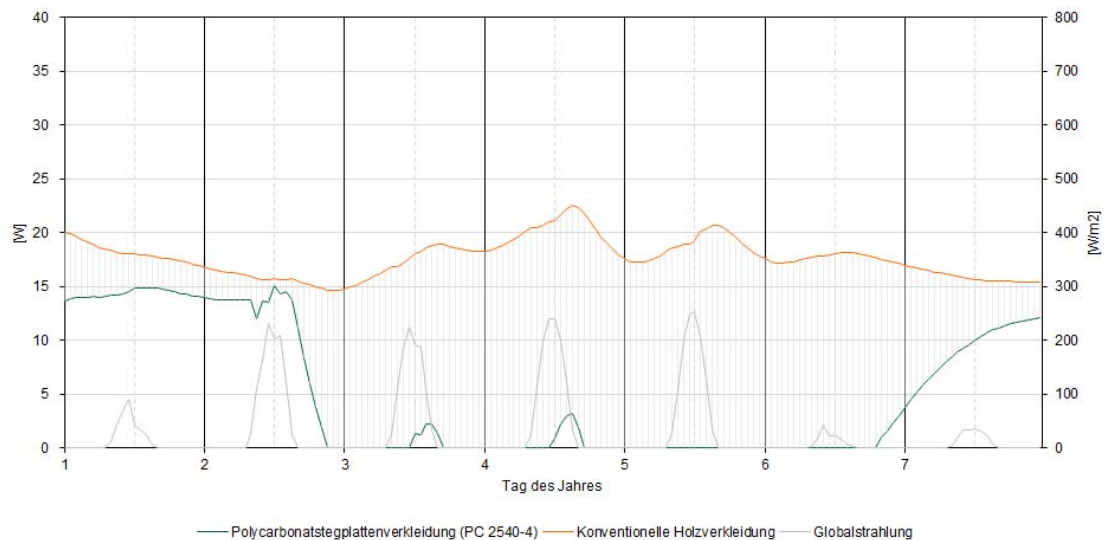


Abbildung 9.8.3-12: Transmissionswärmeverluste der Polycarbonatstegplattenfassade ggü. einer konventionellen Holzverkleidung im Wochenverlauf

Durch die transluzente Polycarbonatstegplattenverkleidung können im Vergleich zur konventionellen Holzverkleidung Transmissionswärmeverluste um rund 55% effektiv kompensiert werden.

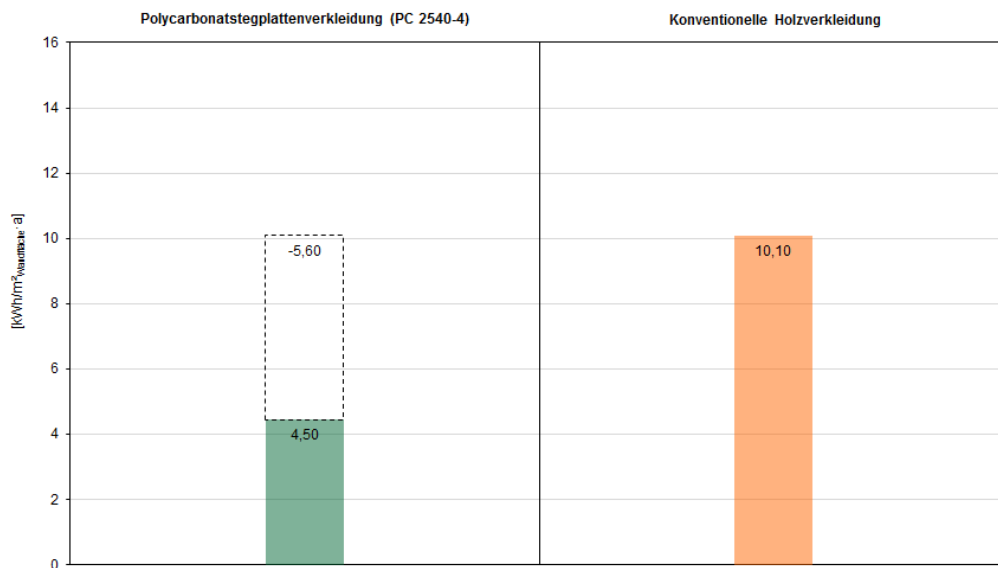


Abbildung 9.8.3-13: Transmissionswärmeverluste der Polycarbonatstegplattenfassade ggü. einer konventionellen Holzverkleidung, absolut pro  $\text{m}^2$  Wandfläche und Jahr

### Kann bei einer Erhöhung des Wärmedurchlasswiderstandes der Fassadenverkleidung Dämmstoff der raumabschließenden Bauteile eingespart werden?

Nachfolgende Diagramme zeigen auf welche energetischen Potentiale bzw. Risiken sich in Bezug auf den Transmissionswärmeverlust ergeben, wenn der Wärmedurchlasswiderstand der raum-abschließenden Bauteile vermindert und der der transluzenten Fassadenverkleidung erhöht wird. Betrachtung mit jeweils konstant angesetztem Volumenstrom von  $120 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Im Heizperiodenverlauf sind die Auswirkungen durch die Veränderung der Wärmedurchlasswiderstände deutlich zu erkennen.

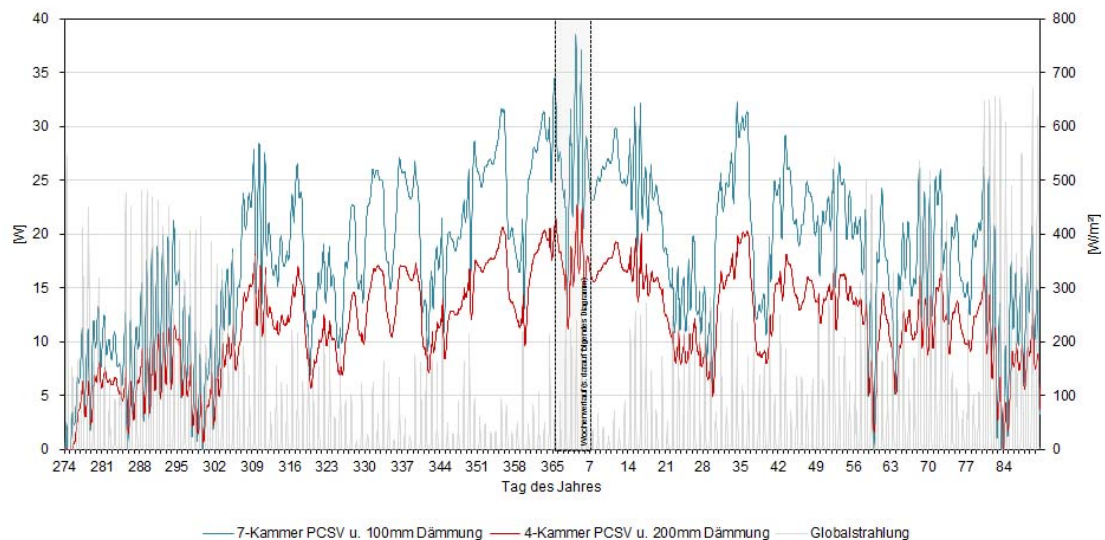


Abbildung 9.8.3-14: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade bei Verschiebung der U-Werte, Jahresverlauf

Die Transmissionswärmeverluste können bei einer 7-Kammer Polycarbonatstegplattenverkleidung zwar durch die bessere Dämmung zur Außenluft und der geringeren Dämmstärke des raumabschließenden Bauteils schneller und effizienter kompensiert werden, jedoch entweicht dem Gebäude durch die geringere Dämmstärke in den Abend- und Nachtstunden bzw. an Tagen ohne solare Eintrahlung auch wieder mehr Wärme wodurch die Transmissionswärmeverluste viel höher ausfallen.

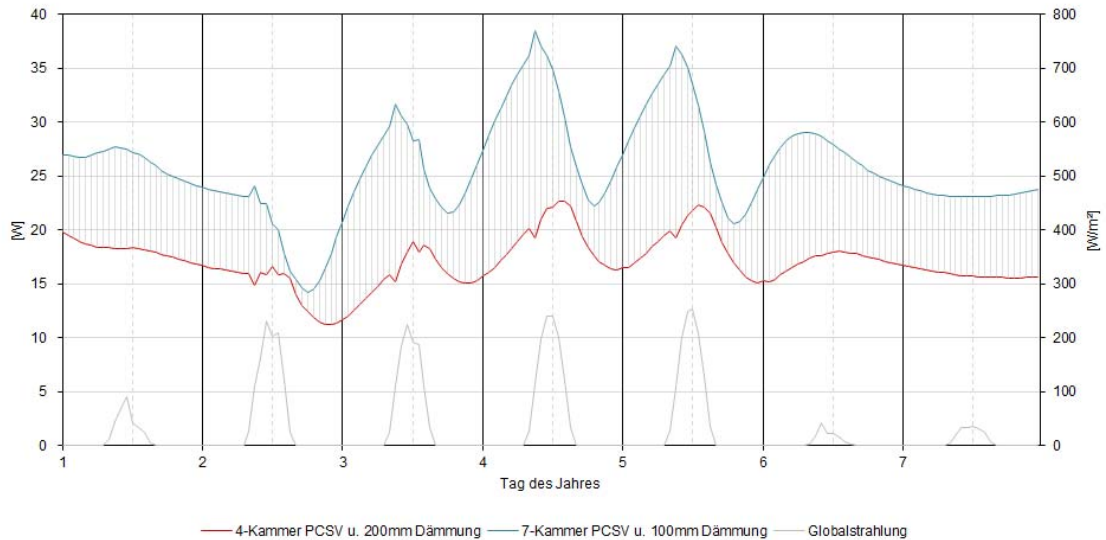


Abbildung 9.8.3-15: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade bei Verschiebung der U-Werte, Wochenverlauf

Die Verteilung der Wärmedurchlasswiderstände von der opaken in die transluzente Bauteilschicht hat einen zu 35% erhöhten Transmissionswärmeverlust zur Folge. Diese Variante erscheint somit als energetisch nicht sinnvoll. Nachfolgende Simulationsschritte werden auf Basis der 4-Kammer Polycarbonatstegplattenvariante durchgeführt.

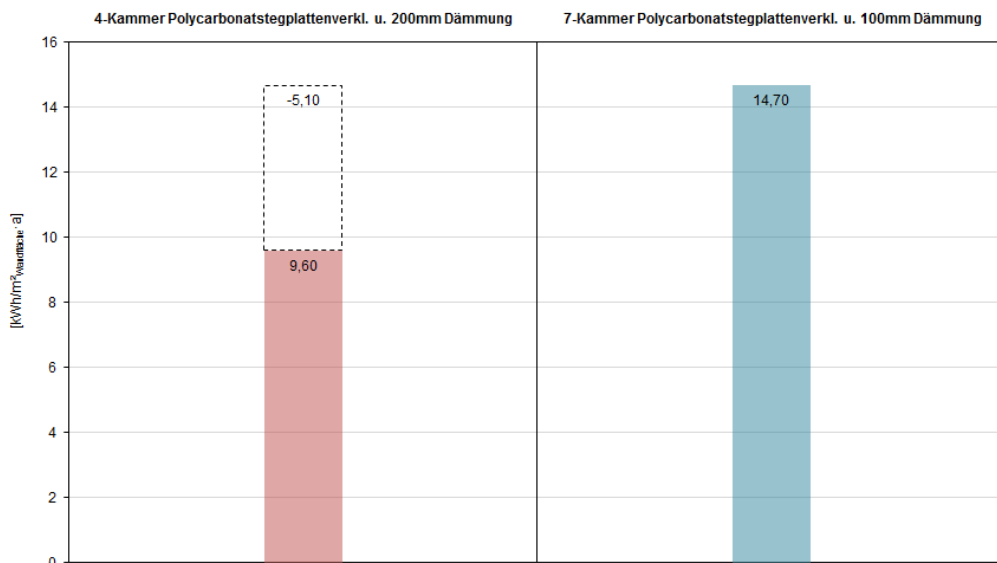


Abbildung 9.8.3-16: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade bei Verschiebung der U-Werte, absolut pro m² Wandfläche und Jahr

### Wie verhält sich der Transmissionswärmeverlust /-gewinn im Fall die aktivierte Fassadenfläche nicht als Kollektor genutzt wird?

Das nachfolgende Diagramm zeigt auf, wie sich der Transmissionswärmeverlust verhält, wenn die Polycarbonatsteg-plattenfassade anstatt dem im Falle einer Anbindung an das Lüftungssystem konstant herbeigeführten Luftstrom, eine ruhende Luftschicht aufweist.

Wird die Fassade nicht als Kollektor genutzt und an das Lüftungssystem angebunden, so kann der Transmissionswärmeverlust durch den entstehenden "Warmluftpuffer" über die gesamte Heizperiode um rund 53% minimiert werden.

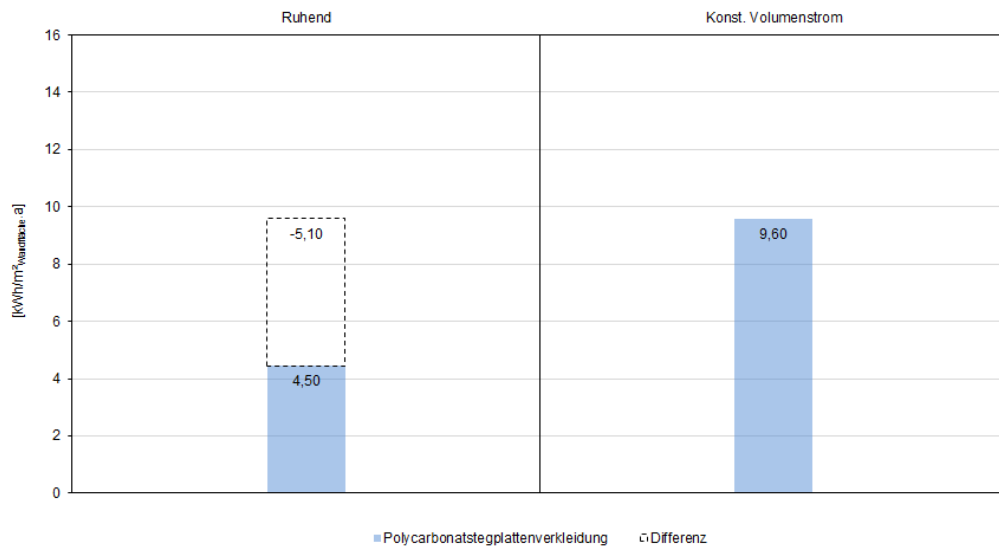


Abbildung 9.8.3-17: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade bei ruhender Luftschicht ggü. einem konstanten Volumenstrom, absolut pro m² Wandfläche und Jahr

### Weisen aktivierte Fassadenflächen in Nord-, Ost- u. Westausrichtung ebenfalls durch eine Verminderung von Transmissionswärmeverlusten energetische Potentiale auf?

Das nachfolgende Diagramm zeigt auf, ob es in Bezug auf den Transmissionswärmeverlust energetisch sinnvoll erscheint, die Fassadenflächen in Nord-, Ost- und Westausrichtung ebenfalls mit einer Polycarbonatstegplattenverkleidung auszubilden oder ob diese Fassadenflächen keinen energetischen Mehrwert bieten und aus wirtschaftlichen sowie ökologischen Gründen geradezu konventionell mit einer Holzverkleidung ausgebildet werden können.?

Mit einer Polycarbonatstegplattenverkleidung können im Gegensatz zur konventionellen Holzverkleidung auch in Nord-, Ost u. Westausrichtung Transmissions-wärmeverluste effektiv um rund 30-45% minimiert werden.

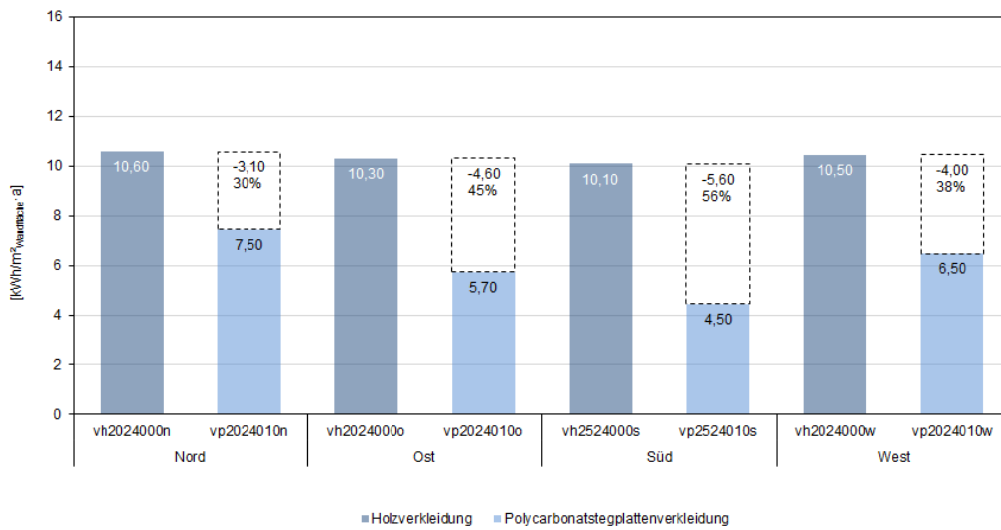


Abbildung 9.8.3-18: Transmissionswärmeverluste der solaraktiven Fassade in Abhängigkeit Orientierung, absolut pro m² Wandfläche und Jahr

### Welchen Einfluss hat die unterschiedliche Wärmeleit- und Wärmespeicherfähigkeit von Dämmstoffen auf die erzielten Transmissionswärmegewinne?

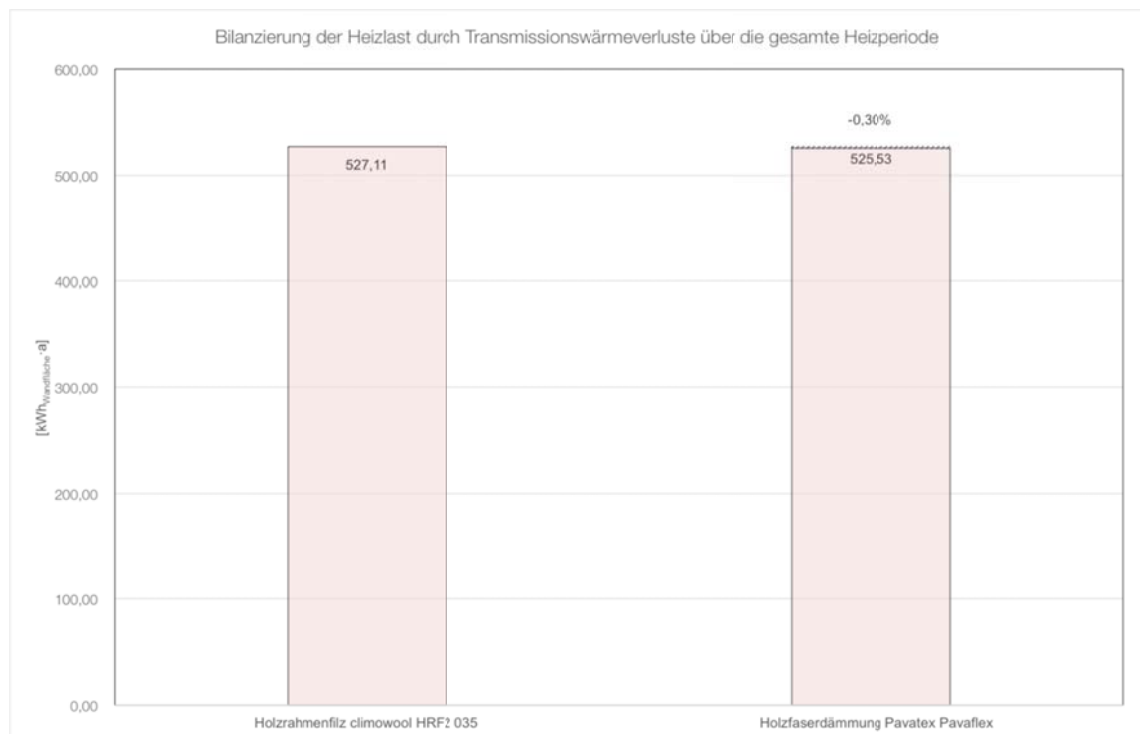


Abbildung 9.8.3-19: Einfluss von Wärmeleit- und speicherfähigkeit des Dämmstoffes auf die Wirkungsweise von solaraktiven Fassaden

### Einfluss auf die Transmissionswärmeverluste des Gesamtgebäudes

In Abhängigkeit zur Ausrichtung der Fassadenflächen konnten somit unterschiedlich hohe Einsparmöglichkeiten in Bezug auf die Transmissionswärmeverluste ermittelt werden. Erwar-

tungsgemäß fallen die Einsparungen für die Südfassade am höchsten aus. Hier lassen sich ca. 55,4 % der Transmissionswärmeverluste einsparen. Selbst nach Norden orientierte Fläche kommen jedoch noch auf eine Einsparung von ca. 29,2%. Für Flächen die nach Osten bzw. Westen orientiert sind liegen die Einsparungen bei 44,7 % bzw. 38,1 %. Der Unterschied zwischen diesen beiden Orientierungen kommt dadurch zu Stande, dass die Aussenlufttemperaturen im Tagesverlauf in der Regel ansteigen und sich eine Aufheizung am Vormittag (Osten) dadurch energetisch mehr lohnt, als eine Aufheizung am Nachmittag (Westen), wenn die Aussenlufttemperatur ohnehin schon höher liegt.

Auf das gesamte Gebäude bezogen ergeben sich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anteile an opaken Wandflächen eine Gesamtersparnis von ca. 40,1% der Transmissionswärmeverluste durch opake Aussenwände.

	flächenbezogener, jährlicher Transmissionswärmeverlust [kWh/m <sup>2</sup> a]	Fassadenfläche opak [m <sup>2</sup> ]	jährlicher Transmissions- wärmeverlust [kWh/a]	Transmissionswärmeverlust 50 Jahre [kWh]	Differenz
<b>Referenz Leistenschalung</b>					
Nord	10,60	36,50	386,90	19.345,00	
Ost	10,30	36,50	375,95	18.797,50	
Süd	10,10	20,60	208,06	10.403,00	
West	10,50	31,70	332,85	16.642,50	
<b>Total</b>		<b>125,30</b>	<b>1.303,76</b>	<b>65.188,00</b>	
<b>Einsparung Polycarbonat</b>					
Nord	-3,10	36,50	-113,15	-5.657,50	-29,2%
Ost	-4,60	36,50	-167,90	-8.395,00	-44,7%
Süd	-5,60	20,60	-115,36	-5.768,00	-55,4%
West	-4,00	31,70	-126,80	-6.340,00	-38,1%
<b>Total</b>		<b>125,30</b>	<b>-523,21</b>	<b>-26.160,50</b>	<b>-40,1%</b>

Abbildung 9.8.3-20: Einfluss einer vollflächigen, solaraktiven Fassade auf die Transmissionswärmeverluste des +++Hauses

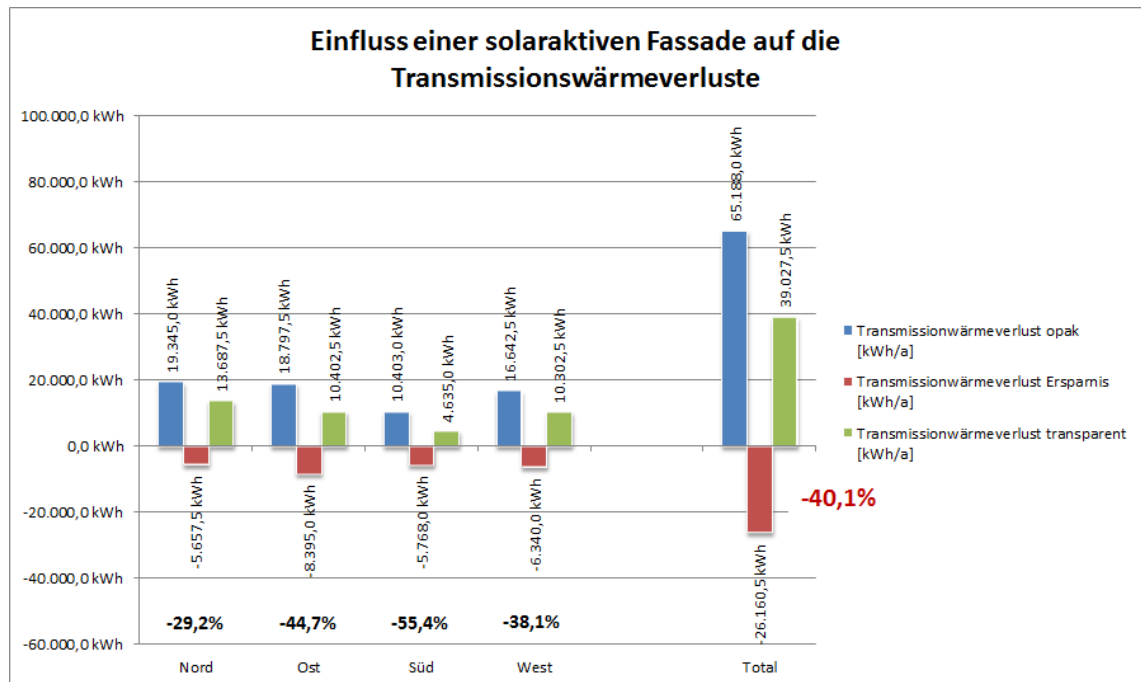


Abbildung 9.8.3-21: Einfluss einer vollflächigen, solaraktiven Fassade auf die Transmissionswärmeverluste des +++Hauses

## Reduktion von Lüftungswärmeverlusten

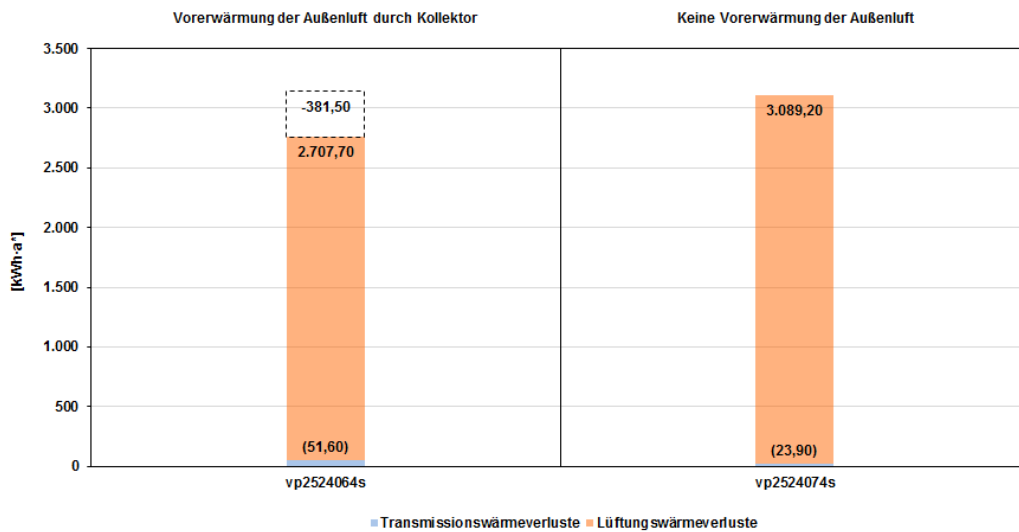
Folgende Fragestellungen wurden in Bezug auf die Reduktion von Lüftungswärmeverlusten untersucht:

**In wie fern können Lüftungswärmeverluste durch die Kollektorvorerwärmung der Zuluft kompensiert werden?**

Das nachfolgende Diagramm zeigt auf, welches energetische Potenzial die Luftzuführung durch den Kollektor im Vergleich zu einer konventionellen Fensterlüftung bieten kann.

Die Lüftungswärmeverluste die durch den stündlichen Luftaustausch von 120m<sup>3</sup> entstehen, können durch die solare Vorerwärmung im Heizperiodenverlauf um rund 12% kompensiert werden.



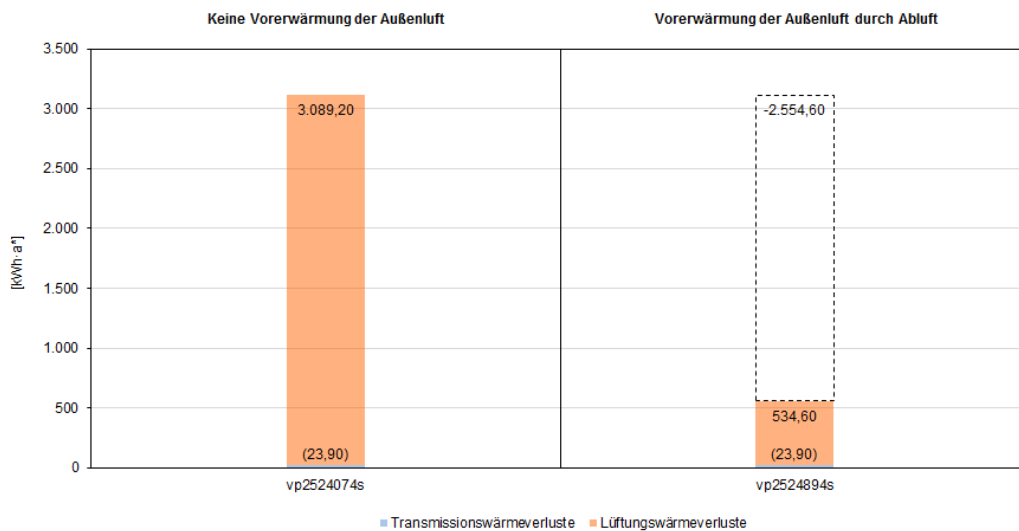


\*Achtung: Lüftungswärmeverluste sind für das gesamte Gebäude/a bilanziert, Transmissionswärmeverluste lediglich pro Kollektorfläche/a.

Abbildung 9.8.3-22: Potenziale von solaraktiven Fassaden zur Reduktion von Lüftungs- und Transmissionswärmeverlusten im Vergleich

### Wie effektiv können Lüftungswärmeverluste ohne Einbindung des Kollektors durch die Wärmerückgewinnung kompensiert werden?

Die Lüftungswärmeverluste die durch den stündlichen Luftaustausch von 120m<sup>3</sup> entstehen, können durch den hohen Wärmerückgewinnungsgrad des Lüftungssystems erheblich kompensiert werden.



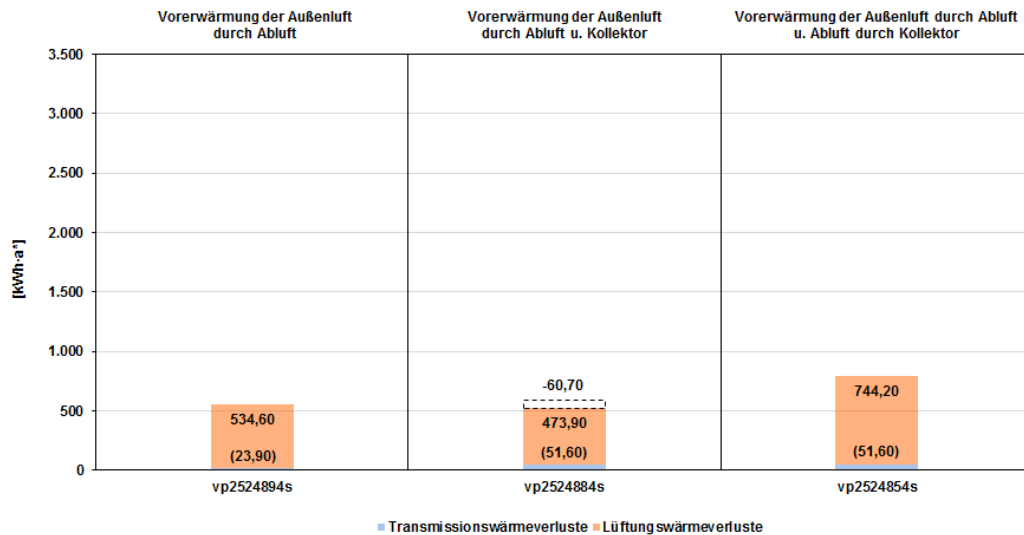
\*Achtung: Lüftungswärmeverluste sind für das gesamte Gebäude/a bilanziert, Transmissionswärmeverluste lediglich pro Kollektorfläche/a.

Abbildung 9.8.3-23: Potenziale von solaraktiven Fassaden zur Reduktion von Transmissionswärmeverlusten im Vergleich zur Reduktion von Lüftungswärmeverlusten durch eine Lüftungsanlage mit WRG

### Können durch die Einbindung des Kollektors zusätzlich Lüftungswärmeverluste kompensiert werden?

Durch die Einbindung eines Kollektors kann eine zusätzliche Kompensation der Lüftungswärmeverluste erzielt werden, diese fällt in Verbindung des Wärmetauschers mit rund 11% durch den hohen Wärmerückgewinnungsgrad des Lüftungssystems jedoch gering aus. Eine

weitere Variante beabsichtigt die Vorerwärmung der Abluft durch den Kollektor um ein höheres Temperaturniveau für die Wärmerückgewinnung zu erreichen. Die Analyse zeigt, dass die Abluft die durch den Kollektor geführt wird im Tagesverlauf ein höheres Temperaturniveau erlangt, jedoch in den Abend- und Nachtstunden im Kollektor an Temperatur verliert und somit höhere Lüftungswärmeverluste resultieren.



\*Achtung: Lüftungswärmeverluste sind für das gesamte Gebäude/a bilanziert, Transmissionswärmeverluste lediglich pro Kollektorfläche/a.

Abbildung 9.8.3-24: Potenziale von solaraktiven Fassaden zur Reduktion von Lüftungs- und Transmissionswärmeverlusten, sowie eine mögliche Reduktion von Lüftungswärmeverlusten durch eine Lüftungsanlage mit WRG im Vergleich

### Bietet eine Ausrichtung der Kollektorfläche in Richtung Ost oder West im Vergleich zur südlichen Ausrichtung zusätzlichen energetischen Mehrwert?

Die Ausrichtung in Ost und West weist trotz der Überdachungen auf der Südseite keine höheren energetischen Erträge auf. Die Südausrichtung des Kollektors erscheint energetisch am effektivsten.

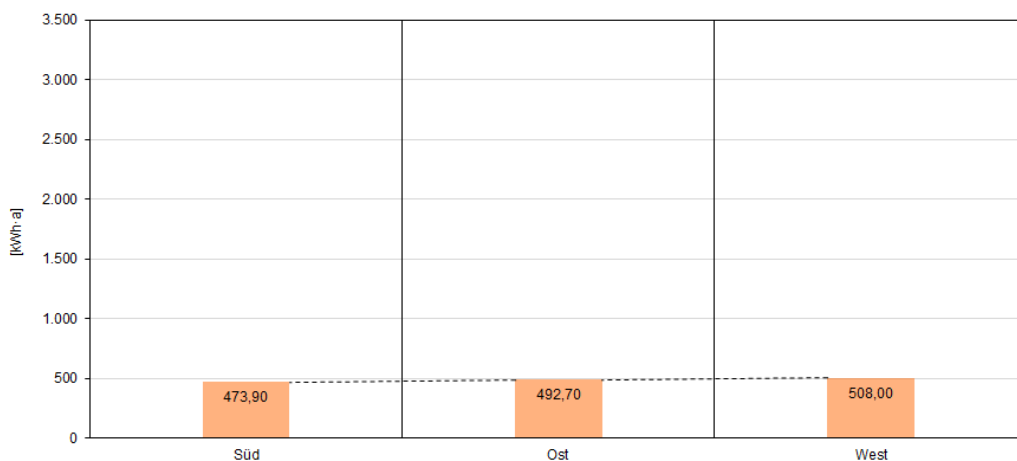


Abbildung 9.8.3-25: Effektivität von Kollektorflächen in Abhängigkeit zur Orientierung

## Kombinationsmöglichkeiten in Bezug auf die Lüftungswärmeverluste des Gebäudes

Durch eine Vorwärmung der Aussenluft lassen sich ca. 12,3 % der Lüftungswärmeverluste einsparen. Das sind jährlich immerhin 382 kWh. Eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erzielt allerdings deutlich höhere Einsparungen von 82,7% und absolut ca. 2.555 kWh/a. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, auf die Lüftungsanlage mit WRG bzw. die WRG zu Gunsten der solaraktiven Fassade zu verzichten. Kombiniert man beide Technologien miteinander, so erzielt man durch die solaraktive Fassade nur noch einen zusätzlichen Vorteil in Höhe von 2% der Lüftungswärmeverluste. Das sind absolut nur noch ca. 61 kWh/a.

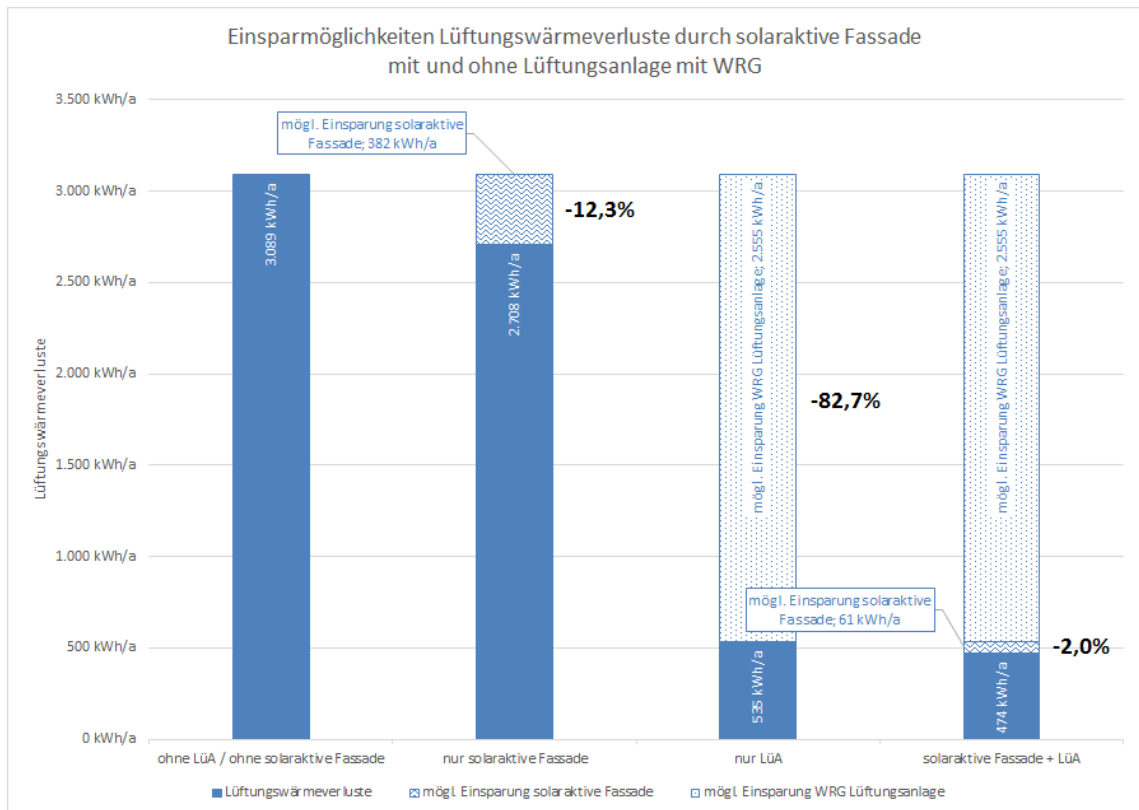


Abbildung 9.8.3-26: Einsparmöglichkeiten Lüftungswärmeverluste durch solaraktive Fassade mit und ohne Lüftungsanlage mit WRG

## Sommerlicher Wärmeschutz

Untersucht wurde die Fragestellung, ob die Erwärmung des Fassadenzwischenraumes im Sommerfall zur Überhitzung des Innenraums führt?

Das nachfolgende Diagramm zeigt auf, wie sich die Kühllast des Innenraums sowie die Oberflächentemperatur des raumabschließenden Bauteils verhält, wenn die Polycarbonatstegplattenfassade eine ruhende Luftschicht bzw. alternativ eine Luftschicht mit konstantem Luftstrom aufweist. Im Vergleich auch die Auswirkungen bei einer konventionellen Holzfassade.

Wird der Fassadenzwischenraum nicht mit einem konstanten Volumenstrom durchlüftet, können im Sommerfall Absorberflächentemperaturen von bis zu 130°C entstehen. Durch den Wärmeübertrag kommt es auch im Innenraum zu erhöhten Oberflächentemperaturen, im Sommerfall können diese bei über 23°C als durchaus unangenehm empfunden werden. Lüftungsklappen die an Sommertagen geöffnet werden können erscheinen deshalb als zwingend

notwendig. Ein Temperaturunterschied von  $0,30^{\circ}\text{C}$  zwischen Holz- und durchlüfteter Polycarbonatstegplattenfassade wird die gefühlte Temperatur im Innenraum nur sehr geringfügig beeinflussen. Die Kühllaststeigerung von  $+2,70 \text{ kWh}\cdot\text{a}$  kann ohne energetischen Aufwand über eine natürliche Fensterlüftung kompensiert werden.

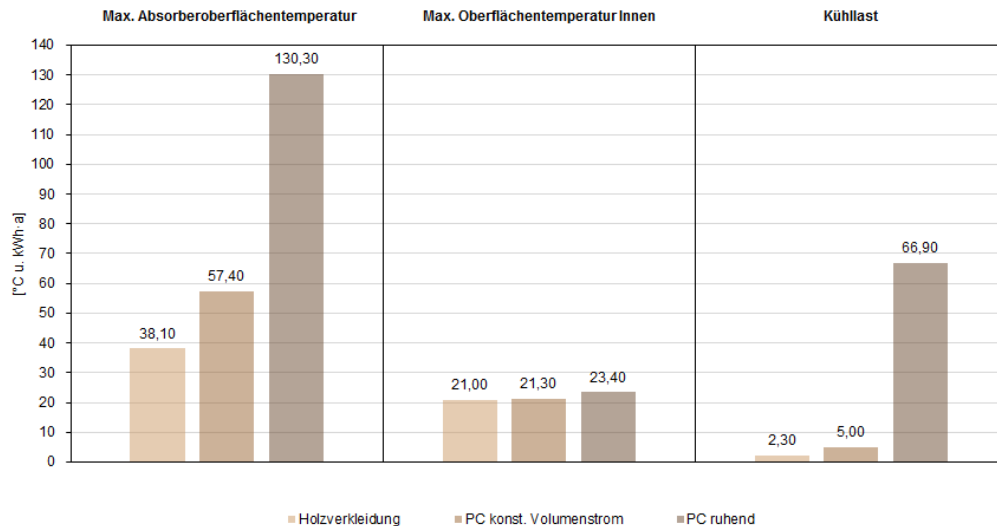


Abbildung 9.8.3-27: sommerlicher Wärmeschutz, Einfluss einer solaraktiven Fassade auf max. Oberflächentemperaturen innen und aussen, sowie die daraus resultierende Kühllast bei ruhender und durchströmter Luftschicht

## 9.9 AP 9 Nasszellen

### 9.9.1 Fertignasszellen – Modulbauweise

Fertignasszellen sind im Bauwesen noch relativ wenig verbreitet und kommen vor allem aus dem Bereich des Schiffsbaus. Der serielle Charakter von immer baugleichen Kabinen hat den entscheidenden Vorteil, dass Fertignasszellen in großen Stückzahlen zu vertretbaren Kosten industriell gefertigt werden können. So werden zum Beispiel die Bodenwannen solcher Zellen mit speziell hierfür angefertigten Werkzeugen im Tiefziehverfahren aus Stahlblech hergestellt. Die Herstellung der Werkzeuge ist dabei sehr kostenintensiv. Diese Kosten müssen auf die mit dem Werkzeug hergestellten Elemente umgelegt werden, was dazu führt, dass sich diese Art der Bauweise erst ab vierstelligen Stückzahlen anfängt zu rechnen.

Für den Baubereich haben die Hersteller von Fertignasszellen daher alternative Konstruktionen mit einfach gekanteten und verklebten Blechen entwickelt, die die Bauweise deutlich schneller in einen wirtschaftlichen Bereich bringen. Allerdings liegen auch hierbei die erforderlichen Stückzahlen immer noch in einer Größenordnung von ca. 50 Stück, damit sich derartige Konstruktionen, gegenüber der herkömmlichen Einzelmontage aus einer Vielzahl von Gewerken rechnen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde gemeinsam mit der Fa. Stengel (Hersteller von Fertignasszellen) deren Fertigungsweise analysiert, um zum einen die Möglichkeiten für einen Einsatz im +++Haus auszuloten, aber auch um potentielle Vor- und Nachteile gegenüber herkömmlich montierten Bädern herauszuarbeiten.

## erforderliche Standardisierung - das Bad als Möbel

Wie bereits erläutert, konnte seitens der Hersteller bereits durch eine angepasste Bauweise die Mindeststückzahlen für Fertignasszellen, deutlich gesenkt werden. Gleichzeitig liegen diese aber immer noch in einer Größenordnung von ca. 50 Stück, was dafür sorgt, dass diese allenfalls im seriellen Wohnungsbau oder in Hotels zum Tragen kommen. Die Verfasser haben dabei die Erfahrung gemacht, dass trotzdem auch in Gebäuden, die sich von Ihrer Art her eigentlich eine solche Bauweise eignen würden (Pflegeheime, Seniorenwohnanlagen, etc.), diese oftmals nicht zum Tragen kommt, da Bäder, die auf den ersten Blick identisch sind, dann im Detail doch Unterschiede aufweisen, die eine komplett serielle Fertigung erschweren und damit unwirtschaftlich machen. Dies gilt in besonderem Maße für die Bestandssanierung.

Es erschließt sich in diesem Zusammenhang nicht, warum ein solch elementares Bauteil, wie die minimierte Badzelle des Wohnungsbaus, die darüber hinaus in den allermeisten Fällen, die immer gleichen Funktionen aus Waschtisch, WC, Dusche, ggf. Duschwand oder zusätzliche Badewanne erfüllt, sich standhaft einer Standardisierung entzieht und immer wieder individuell aus Einzelsystemen (Gipskartonwände, Abdichtungssysteme, Sanitärobjekten, ...) zusammengesetzt wird, die letztlich jedes für sich genommen standardisierte Bauweisen darstellen. Dies ist umso verwunderlicher, da an dieser Stelle, die Gewerkedichte (Trockenbauer, Estrichleger, Fliesenleger, Elektriker, Sanitärinstallateur, Heizungsbauer, ...) und das damit einhergehende Fehlerpotential so groß ist wie an kaum einer anderen Stelle im Bauwesen. Die hierin begründeten Optimierungspotentiale werden im folgenden Abschnitt Qualitätssicherung noch detaillierter beschrieben.

Die Problematik liegt nach Auffassung der Verfasser darin begründet, dass mit den vorhandenen Mitteln der Produktionstechnik versucht wird, den etablierten Entscheidungs- und Bauabläufen, sowie den Erwartungshaltungen von Planern, Bauherrn, etc. gerecht zu werden, anstatt ein Produkt zu etablieren, dass die Vorstellungen und das Verständnis von einem neu denkt und dabei die Vorteile, die in einer industriellen Fertigung begründet sind, in höherem Maße ausspielen kann.

Schaut man sich den modernen Möbelbau an, kann man von diesem lernen, wie es in Bezug auf ein solches Produkt "Bad" gelingen könnte, dieses auch als Einzelstück zu wirtschaftlichen Konditionen anbieten zu können. Gegenüber der herkömmlichen Bauweise, die in Bezug auf den Standardisierungsgrad auf Ebene von Baustoffen und Bauweisen, im Falle von Sanitärobjekten vielleicht noch auf Ebene von Einzelteilen verbleibt, muss es das Ziel sein, den Standardisierungsgrad eine Stufe anzuheben, ohne ihn auf der anderen Seite so weit zu treiben, dass dabei ein komplettes Bad herauskommt, das man dann entweder kaufen kann oder nicht. Dem Möbelbau gelingt dies in der Form, als dass eine Standardisierung von Standardbreiten, -tiefen, etc. stattgefunden hat.

Die Fa. Stengel hat so z.B. unter dem Markennamen D-19 [D-19, 2015] ein modulares Küchensystem aus Metallbauteilen auf den Markt gebracht, dass dieses Prinzip stärker noch als der klassische Küchenbau verinnerlicht. Aber auch der klassische Küchenbauer, der seine Küchen aus Sperrholzkörpern, Fronten, etc. und somit auf eine begrenzte Anzahl von immer gleichen Bauteilen zurückgreift, wendet dieses Prinzip an und kann so mit sehr wenigen individuellen Bauteilen (Passleisten, etc.) Küchen für völlig individuelle Grundrisse realisieren, ohne dass dieselbe Küche in einer Anzahl von mindestens 50 Stück abgenommen werden müssten, damit sich die Rüstkosten rechnen.

Diesen Gedanken auf den Bau von Bädern zu übertragen und ein Bad-Bausystem zu entwickeln und dabei die beiden nachfolgend noch erläuterten Punkte Qualitätssicherung und Recyclierbarkeit mit zu bearbeiten, hätte nach Auffassung der Verfasser ein enormes Potential.

## Qualitätssicherung

Wie bereits angesprochen sind Bäder im Bauwesen extrem mangelbehaftet und haben insbesondere in Kombination mit den feuchteempfindlichen Baustoffen des Holzbaus ein enormes Schadenspotential mit Gefahren für Mensch und Umwelt. Neben der ebenfalls bereits erwähnten hohen Gewerkedichte in Bädern, gibt es eine Vielzahl von Abhängigkeiten von Produktsystemen, Materialver- und unverträglichkeiten (Weichmacherwanderungen, ...), die zu einer Fülle von Fehlerquellen führen und deren Vermeidung und Kontrolle im Baualltag an vielen Stellen nicht oder nur unvollständig zu bewältigen ist. Schaut man sich die Verarbeitungsrichtlinien von zum Beispiel handelsüblichen Abdichtungssystemen an und betrachtet dann, wie die Realität auf Baustellen auch bei und allzu oft entgegen der akribischen Planung aussieht, so liegt sicherlich auf der Hand, welche hohen Qualitätssicherungspotentiale in einer Badzelle stecken, die industriell gefertigt und auf der Baustelle nur noch angeschlossen werden muss.



Abbildung 9.9.1-1: Abdichtungen in Nasszellen - Theorie, Bild 1+2: SOPRO-Planer, Kapitel 3.  
<http://www.sopro.de/~run/views/service/sopro-planer.html>,

Abbildung 9.9.1-2: Abdichtungen in Nasszellen - Praxis, Bild 3: Architektur Contor Müller Schlüter

## Recyclingpotential

Üblicherweise werden Bäder heutzutage in Trockenbauweise mit Abdichtungssystemen und keramischen Belägen hergestellt. Diese Bauweise führt zu einem Abfallaufkommen, das nicht einfach zu verwerten ist. Gips ist sowohl in Bezug auf den Keramikschutt, als auch auf die Kunststoffabdichtungsfolien ein Störstoff. Ein Recycling wird in der Regel nicht möglich, da es keine entsprechenden Technologien hierfür gibt. Des Weiteren ist Gips auch im Zusammenhang mit Holzbaustoffen problematisch, als dass er sowohl eine stoffliche, als auch eine energetische Verwertung erheblich stört (vgl. [El khouli et al., 2014, Tabelle 3.39, S. 56]).

Fertignasszellen werden hingegen im Wesentlichen aus Stahlblechen hergestellt. Stahl ist zwar in seiner Herstellung energieintensiv, hat aber ein gutes Recyclingpotential. Im Sinne einer guten Trennbarkeit sollte bei einer Optimierung der Anteil an geklebten Verbindungen reduziert werden. Fertignasszellen können innen zwar auch mit Fliesenbelägen versehen werden. Aus wirtschaftlicher und aus ökobilanzieller Sicht sollte hierauf allerdings nach Möglichkeit verzichtet werden. Vielfach werden die Bleche dazu genutzt um mittels entsprechender Prägungen und Dekore Fliesen nach zu empfinden. Aus Sicht der Verfasser wird hierdurch allerdings gestalterisches Potential vertan, da der Nutzer immer das Gefühl haben wird, im Vergleich zur Fliese ein kostengünstigeres Produkt erworben zu haben. Nutzt man hingegen die Möglichkeiten des Materials der mittels Folienkaschierungen völlig freien Gestaltungsmöglichkeiten, so ergibt sich eine eigene Ästhetik, die als Mehrwert empfunden werden kann. so können z.B. sehr kostengünstig beliebige grafische und fotografische Elemente auf die Bleche appliziert werden, die zu einer spannenden Innenraumgestaltung führen können.

### 9.9.2 Wassersparende Armaturen

Der Effizienzgedanke ist mittlerweile auch fest mit der Ressource Trinkwasser verbunden. Zahlreiche Armaturenhersteller bieten Produkte mit optimierten Durchflussraten oder Einhebel-Armaturen, die Warmwasser nur bei Linksstellung zumischen und bei Mittelstellung nur Kaltwasser fließt.

Die reine „Kaltwasserstellung“ ist bei herkömmlichen Einhebelmischern rechts außen. Verbraucherbeobachtungen haben ergeben, dass Nutzer aufgrund optischer Gründe Einhebelarmaturen meist in Mittelstellung nutzen und somit stets auch Warmwasser abgerufen wird, obwohl meist keines gebraucht wird. Moderne Einhebelmischer beugen diesem Phänomen vor und sind so eingestellt, dass das bei Mittelstellung nur Kaltwasser fließt und erst bei Linksstellung des Armatur-Hebels Warmwasser beigemischt wird. Je nach Leitungslänge vom Warmwasserbereiter zur Armatur kommt das erzeugte Warmwasser erst gar nicht am Waschtisch an sondern erwärmt nur die Wasserleitung. Auf diese Weise erzeugt eine Familie 5 bis 10 Kubikmeter Heißwasser [Stiftung Warentest, 2002], das nicht genutzt wird - was sich letztlich im Energiebedarf für die Warmwasserbereitung niederschlägt.

Untersuchungen der TU Berlin haben ergeben, dass bei der Nutzung herkömmlicher Einhebelarmaturen diese zudem aufgrund ihrer Bauweise oft bis zum Anschlag hochgezogen werden und somit der maximale Wasserdurchfluss erzielt wird, ohne dass er tatsächlich benötigt wird. Moderne Armaturen mit eingebauter „Wasserbremse“ verfügen über einen Widerstand z.B. mit Hilfe einer Feder, der den Hebel vorzeitig abbremst und nur eine Durchflussrate von rund 6 Litern pro Minute zulässt. Überwindet der Nutzer diesen Widerstand fließt das Wasser bei Bedarf mit einer erhöhten Durchflussrate von ca. 11-13 Litern pro Minute (zum Beispiel, wenn ein Gefäß mit Wasser gefüllt werden muss).

### 9.9.3 Oberflächen mit Nanobeschichtung für „Easy-to-clean-Effekt“

Sanitäreinrichtungselemente mit einer siliziumoxid-basierten Beschichtung weisen einen geringeren Pflegeaufwand auf als herkömmliche Keramikoberflächen. Die Beschichtung ist wasserabweisend, Wassertropfen perlen ab und hinterlassen somit kaum Kalkablagerungen. Die Anti-Haft-Eigenschaft ermöglicht, leichte Verschmutzungen einfach durch alleiniges Abbrausen der Oberflächen vollständig zu entfernen. Auf diese Weise kann der Trinkwasserbedarf und der Einsatz von Reinigungsmitteln im Sanitärbereich deutlich verringert werden.

### 9.9.4 Grauwassernutzung

Die Grauwassernutzung ist eine weitere Möglichkeit den Trinkwasserbedarf eines Einfamilienhauses zu reduzieren. Unter Grauwassernutzung versteht man die Zweitnutzung von gering verschmutztem Abwasser (Abwasser aus dem Handwaschbecken, der Dusche oder der Badewanne).

Das Abwasser wird hierbei gesammelt und recycelt indem ungelöste (Haare, Flusen) und gelöste Stoffe (Seife, Waschmittel) sowie Bakterien oder Mikroorganismen ohne chemische Zusatzstoffe herausgefiltert werden. Das so gewonnene Grauwasser kann ohne hygienisches Risiko für die Toilettenspülung, zum Putzen oder die Gartenbewässerung genutzt werden.

Grauwasseranlagen sind als Varianten für das Aufstellen im Keller oder als Unter-Erdreich-verbaute Anlagen erhältlich. Im Neubau ist die Installation eines erforderlichen separaten Grauwassernetzes problemlos möglich (Zusatzkosten ca. 1.000 EUR) die Grauwasseranlage an sich kostet 5.000-6.000 EUR. Die Zweifachnutzung des Trinkwassers kann laut Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V. den häuslichen Trinkwasserbedarf um rund 50 Prozent reduzieren.

Eine Grauwasseranlage ist daher vor dem Hintergrund des Budgetrahmens des +++Hauses nach Auffassung der Verfasser allerdings keine relevante Alternative. Die oben beschriebenen relativ kostengünstigen Maßnahmen zur Trinkwasserbedarfsreduktion erscheinen in diesem Zusammenhang deutlich attraktiver.

## **9.10 AP 10 Anbauten**

### **9.10.1 Tragprofile aus Stahl und Aluminium im Vergleich**

Der dem Forschungsbericht zu Grunde liegende Wettbewerbsentwurf sah sowohl auf der Straßen- als auch auf der Gartenseite großzügige Anbauten in Form von Carports, Loggien, Balkonen, etc. vor. Hintergrund war ein im Programm des Wettbewerbs geforderter Carport. Aus gestalterischen Gründen, hatten die Entwurfsverfasser sich damals dazu entschieden, nicht einfach einen Carport in klassischer Optik vor das Haus zu stellen, der wie ein Fremdkörper vor dem Haus steht, sondern das Thema so zu interpretieren das es sich in das gestalterische Konzept des Gebäudes einfügt. Hierzu war es eben notwendig, den baulichen Umfang über einen reinen Carport hinaus auszudehnen und mit zusätzlichen Funktionen zu versehen. Gleichzeitig wurden die zusätzlich entstehenden horizontalen Elemente als potentielle Flächen zur Gewinnung von regenerativen Energien verstanden. Die tragende Primärkonstruktion der vorgeschlagenen Konstruktionen wurden aus gestalterischen Gründen aus Metallprofilen gedacht. Eine Ausführung aus Holz ist zwar grundsätzlich technisch möglich, auch wenn der Aufwand für den Holzschutz und die damit verbundene Dauerhaftigkeit durchaus Fragen bzgl. der Nachhaltigkeit aufwirft. Aus gestalterischer Sicht sind die damit verbundenen massiven Holzquerschnitte darüber hinaus jedoch ohnehin nicht befriedigend, da sie das eigentliche Gebäude überfrachten und in den Hintergrund drängen würden.

Somit wurden die Konstruktionen alternativ in Stahl und in Aluminium untersucht. Auf Grundlage der statischen Vorbemessung wurde zunächst auf Bauteilebene eine Ökobilanz erstellt. Referenz war hierbei ein IPE 140 Profil mit einem Längengewicht von ca. 13,2 kg/m. Ein Aluminiumprofil mit einer vergleichbaren Tragfähigkeit kommt hingegen auf ein Längengewicht von ca. 6,28 kg/m. Aus diesen Mengen ergibt sich für das Aluminiumprofil mit 15,54 kg CO<sub>2</sub>-äqv. je Meter gegenüber dem Stahlprofil mit 12,97 kg CO<sub>2</sub>-äqv. je Meter eine etwas schlechtere Treibhauspotential.



MATERIAL	GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADPE	ADPF	PENRT	Beitrag GWP +++Haus	Differenz GWP +++Haus	Beitrag PENRT +++Haus	Differenz PENRT +++Haus
Aluminiumprofil (eloxiert)	15,54 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000005 kg R11 äqv.	0,052534605 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,003596797 kg Phos äqv.	0,003136891 kg Ethen äqv.	0,000010119 kg Sb äqv.	179,05 MJ	218,62 MJ	4,010,89 kg CO <sub>2</sub> äqv.	+661,41 kg CO <sub>2</sub> äqv.	56.440,44 MJ	+13.733,69 MJ
Stahlprofil (S235)	12,97 kg CO <sub>2</sub> äqv.	0,000000001 kg R11 äqv.	0,035948656 kg SO <sub>2</sub> äqv.	0,003267507 kg Phos äqv.	0,004403651 kg Ethen äqv.	0,000002067 kg Sb äqv.	146,01 MJ	165,42 MJ	3,349,48 kg CO <sub>2</sub> äqv.		42.706,75 MJ	

Abbildung 9.10.1-1: Ökobilanzdaten von Metallprofilen für Anbauten

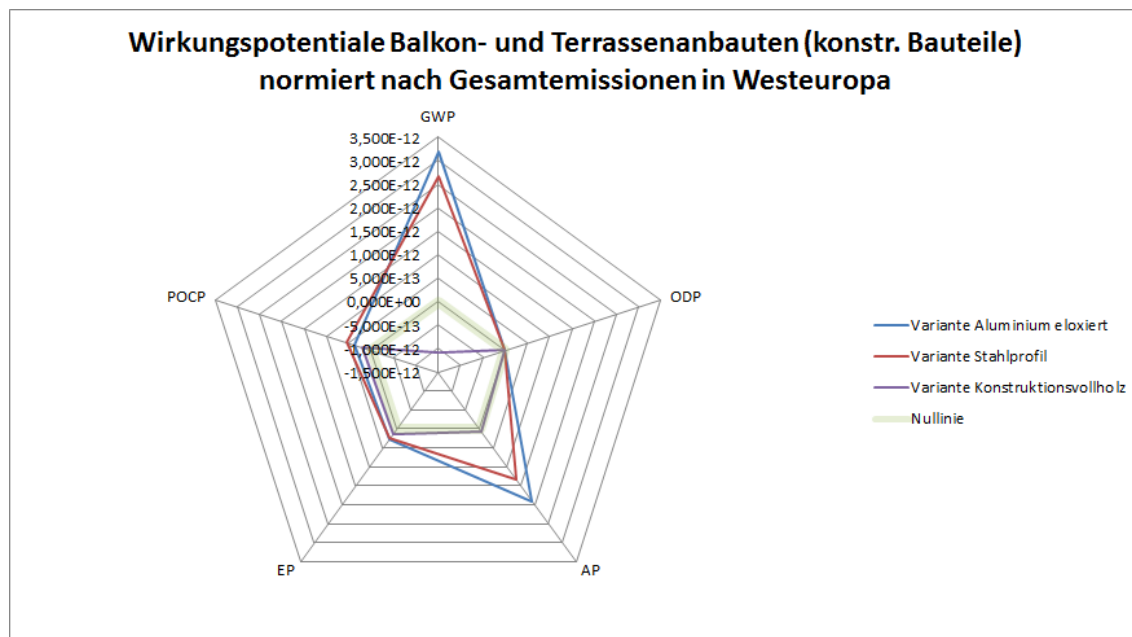


Abbildung 9.10.1-2: Umweltwirkungen von Metallprofilen für Anbauten, normiert

Aus der normierten Darstellung, die zudem zu Vergleichszwecken die Emissionen eines Holzbalkens mit einem Querschnitt von 10/20 enthält, wird deutlich, dass es neben dem Treibhauspotential (GWP) zudem in der Kategorie Versauerungspotential (AP) zu größeren Emissionen kommt. Auch hier schneidet das Aluminiumprofil gegenüber dem Stahlprofil in einem ähnlichen Verhältnis schlechter ab. In Bezug auf das Überdüngungspotential (EP) sind die Emissionen auf vergleichbarem, niedrigem Niveau. In Bezug auf das bodennahe Ozonbildungspotential (POCP) schneidet das Stahlprofil geringfügig schlechter ab. Die Emissionen liegen hier aber für beide Profile auf vergleichsweise niedrigem Profil. Somit wäre in Bezug auf die Ökobilanz eine Ausführung in Stahl vorteilhafter. Auch was die Kosten angeht, ist die Stahlkonstruktion die deutlich wirtschaftlichere Konstruktion.

Aus der statischen Vorbemessung ergeben sich für die Konstruktionen folgende Gesamtmaterialmengen

AUSFÜHRUNG	Materialmenge	resultierendes GWP	Anteil am GWP der Konstruktion Variante Ökonomisch	Anteil am GWP des +++Hauses Variante Ökonomisch / 1b
Stahlprofile	3.409 kg	3.349,48 kg CO <sup>2</sup> äqv.	13,34 %	6,25 %
Aluminiumprofile	2.710 kg	4.010,89 kg CO <sup>2</sup> äqv.	15,97 %	7,48 %

Abbildung 9.10.1-3: Einfluss möglicher Anbauten auf das Treibhauspotential des +++Hauses

Im Zuge der Analysen wurde somit deutlich, dass die Konstruktionen einen nicht unerheblichen, von der Wirkung her negativen Einfluss, auf die Ergebnisse der Ökobilanz haben. Zudem handelt es sich bei den Konstruktionen auch aus ökonomischer Sicht um vergleichsweise aufwändige Bauteile, die insbesondere kostensensible Bauherren, die für das Projekt als Zielgruppe gewählt wurden, kaum realisieren dürften. Da die Entwurfsverfasser darüber hinaus die Funktion und Notwendigkeit eines Carports auch bereits zum Zeitpunkt der Wettbe-

werbsbearbeitung kritisch gesehen hatten, letztlich zum damaligen Zeitpunkt aber das Funktionsprogramm der Auslobung erfüllen wollten, kommt man nun auf Basis der Ergebnisse zu der Erkenntnis, dass sich ein Entfall der Konstruktionen die nachhaltigste Möglichkeit zur Optimierung der Ökobilanz und des Kostenrahmens des +++Hauses darstellt. Dies gilt insbesondere für die großzügige Konstruktion mit Carport, etc. vor dem Haus.

Wie aus den berechneten Dimensionen der Photovoltaik ist es jedoch für manche Konzepte durchaus erforderlich, die zusätzlichen Flächen der Balkonkonstruktion auf der Südseite zu realisieren. Will man nur diesen Teil realisieren, ergibt sich folgendes Bild.

AUSFÜHRUNG	Materialmenge	resultierendes GWP	Anteil am GWP der Konstruktion Variante Ökonomisch	Anteil am GWP des +++Hauses Variante Ökonomisch / 1b
Stahlprofile	1.012 kg	994,33 kg CO <sup>2</sup> äqv.	3,96 %	1,77 %
Aluminiumprofile	804,5 kg	1.190,67 kg CO <sup>2</sup> äqv.	4,74 %	2,22 %

Abbildung 9.10.1-4: Einfluss möglicher Anbauten auf das Treibhauspotential des +++Hauses (nur Balkone Südseite)

Der Einfluss auf die Ökobilanz des Gebäudes wird im Verhältnis deutlich geringer. Gleichwohl zeigt sich auch hier, dass es grundsätzlich vorteilhaft ist, das Gebäude so zu konzipieren, dass es sich mit einer möglichst kleinen Photovoltaikanlage realisieren lässt. Sobald die eigentlichen Dachflächen nicht mehr ausreichen, müssen die zur Schaffung weiterer Flächen (will man diese nicht einfach auf das Grundstück stellen) erforderlichen Maßnahmen mit berücksichtigt werden. Dies hat einen verschlechternden Einfluss auf die Ökobilanz und erfordert zusätzliche geldliche Mittel.

## 9.11 AP 11 Ökobilanz

### 9.11.1 Bauteile

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden zunächst die Ökobilanzdaten auf Bauteil- und Bauteilschichtenebene zusammengestellt. Die Ergebnisse sind vollständig in die bauteilbezogenen Arbeitspakete eingeflossen und wurden in den entsprechenden Kapiteln bereits vollständig dokumentiert.

### 9.11.2 Gebäude (Konstruktion)

Des Weiteren wurden die Ökobilanzdaten, wie bereits im Kapitel 7.3.1 Bauweisen beschrieben, für 3 grundlegende konstruktive Varianten auf Gebäudeebene in der Software LEGEP modelliert. Die Ergebnisse sind in dem genannten Kapitel bereits ausführlich dokumentiert. Darüber hinaus sind umfangreiche Auswertungen aus der Software in den Kapiteln 9.11.4 - 9.11.7 enthalten.

### 9.11.3 Gebäude (Nutzung)

Für die ökobilanzielle Bewertung der Nutzungsphase, war es zunächst erforderlich, diese zunächst konzeptionell erarbeitet werden, da für diesen Bereich aktuell noch keine verbindlichen Standards verfügbar sind, wie es etwa für den Bereich der Konstruktion der Fall ist (Ökobaudat, Hersteller und Branchen-EPDs, etc.).

Relativ einfach gestaltet sich die Bewertung noch in Bezug auf direkte Verbräuche. Für die unterschiedlichen Energieträger Gas, Netzstrom, etc. sind Daten bzgl. des Treibhauspotenti-

als verfügbar [Großklos, 2014]. Auch für erneuerbare Energiequellen sind dort Daten verfügbar. Es fehlen allerdings Daten zu den weiteren Umweltwirkungskategorien.

<b>Treibhauspotential deutscher Strommix 2014</b>	617 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>
<b>Treibhauspotential Photovoltaikstrom</b>	75 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>
<b>Treibhauspotential Gas (Flüssiggas)</b>	261 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>
<b>Treibhauspotential von Solarwärme (Flachkollektor)</b>	13 g CO <sub>2</sub> -Äqv./kWh <sub>End</sub>

Abbildung 9.11.3-1: Treibhauspotential unterschiedlicher Energiequellen

Komplexer ist die Frage, wie nicht direkt verbrauchter Photovoltaikstrom zu bewerten ist, der also zunächst ins Netz eingespeist und zeitversetzt wieder aus diesem bezogen wird. Ebenso war zu klären, wie es zu bewerten ist, wenn Photovoltaikanlagen überdimensioniert werden, um mit den Überschüssen Treibhauspotentiale zu kompensieren. Die Hintergründe und resultierenden konzeptionellen Festlegungen wurden im Kapitel 7.3 Methoden zur Erreichung einer ausgeglichenen CO<sub>2</sub>-Bilanz ausführlich dokumentiert. Zusammenfassend wurde für das Forschungsprojekt festgelegt, dass bei der ökobilanziellen Bewertung nicht zwischen direkt und indirekt genutztem Photovoltaikstrom unterschieden wird und für eingespeiste Überkapazitäten die Differenz zwischen den Werten für PV-Strom und deutschem Strommix als Verdrängungswert gutgeschrieben wird. Netzverluste werden vernachlässigt.

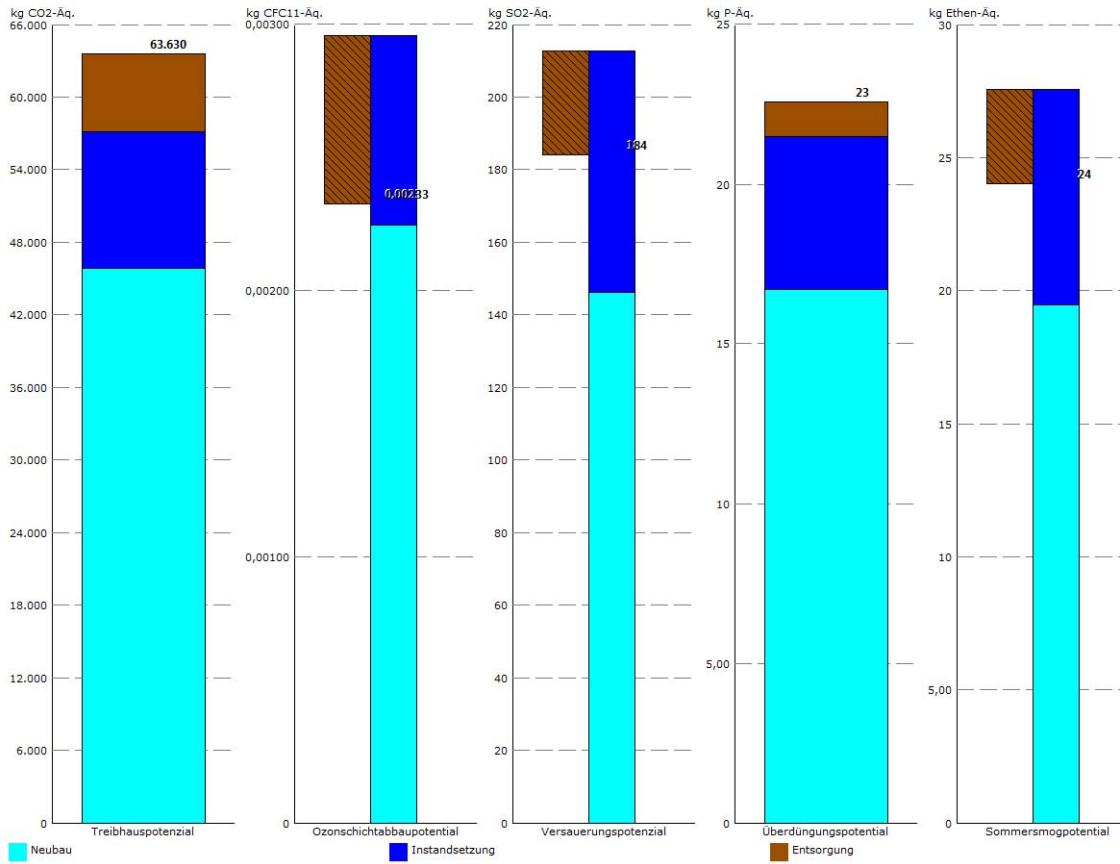
In Summe ergeben sich folgende Treibhauspotentiale:

		KONSTRUKTION				
		Ökonomisch	Ausbalanciert	Ökologisch	Mineralisch	
		25,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	19,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	5,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	63,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	
NUTZUNG	Variante 1a	33,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	58,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	52,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	38,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	96,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
	Variante 1b	28,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	53,6 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	47,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	33,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	92,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
	Variante 2	31,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	56,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	50,4 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	36,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	94,4 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
	Variante 3	117,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	143,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	137,2 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	123,1 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	181,5 t CO <sub>2</sub> -Äqv.
	Variante 4	100,7 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	125,8 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	120,0 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	105,9 t CO <sub>2</sub> -Äqv.	164,3 t CO <sub>2</sub> -Äqv.

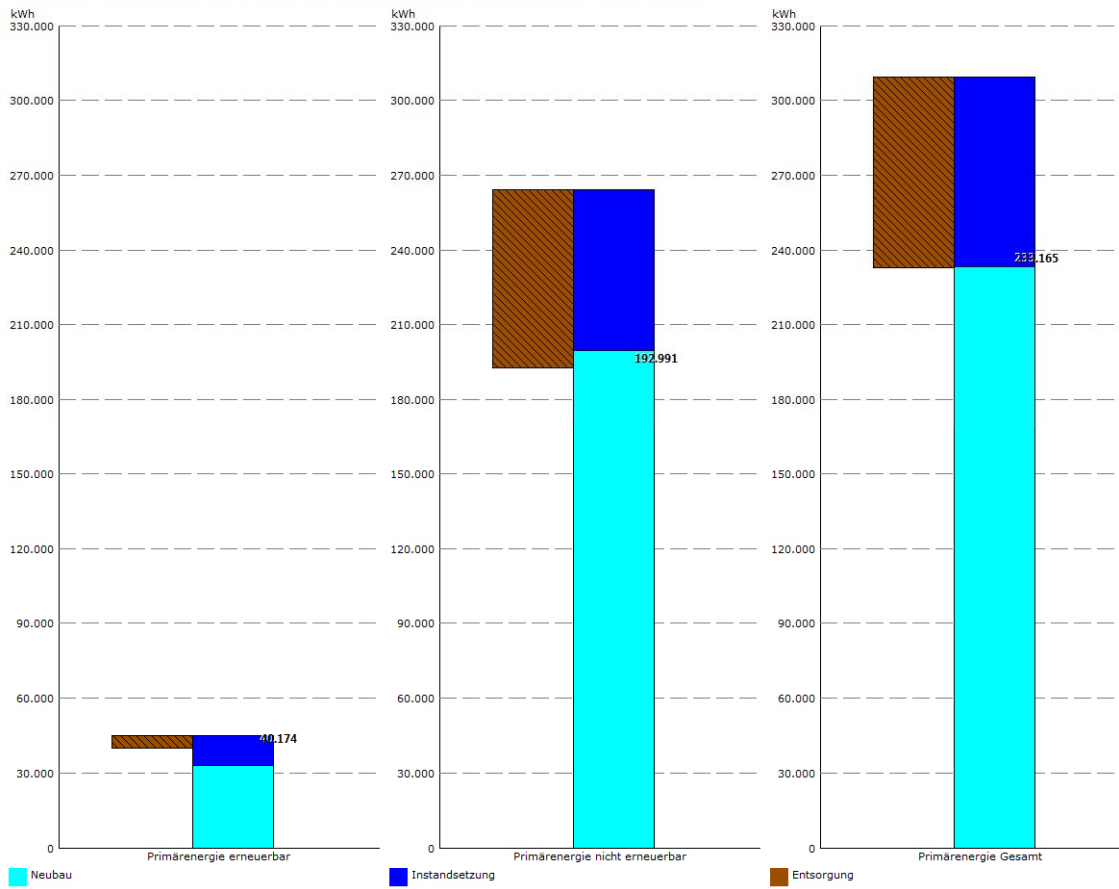
Abbildung 9.11.3-2: Treibhauspotential der +++Haus Varianten (Technikkonzept + Konstruktion)

### 9.11.4 Ökobilanzdaten Mineralisches Gebäude

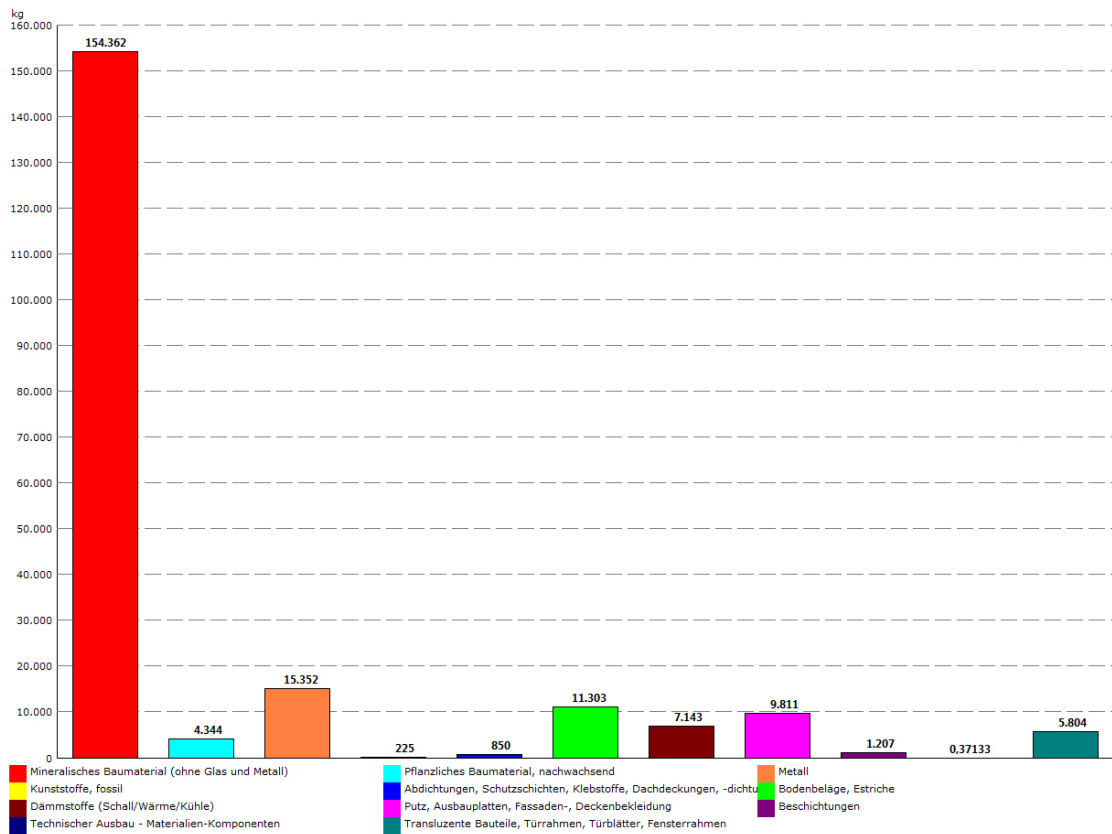
Wirkungsbilanz nach Kriterien  
und Lebenszyklusphase (Ökobau.dat 4/2010)



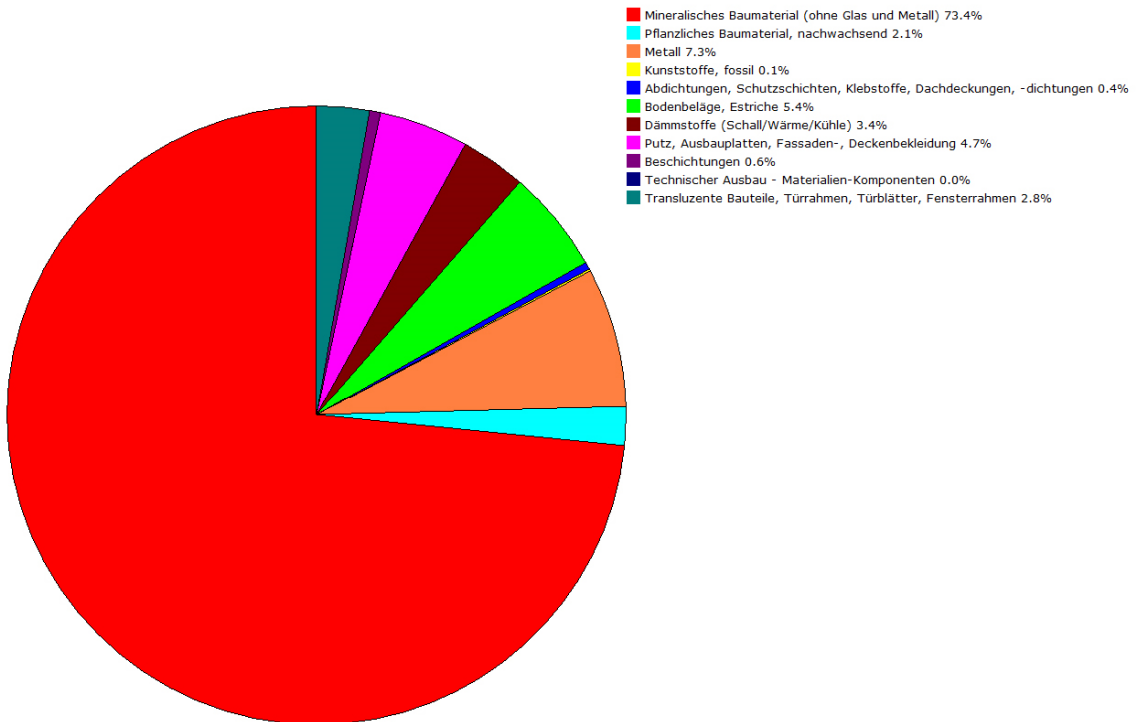
Energie- und Stofffluss nach Lebenszyklusphase (Ökobau.dat 4/2010)



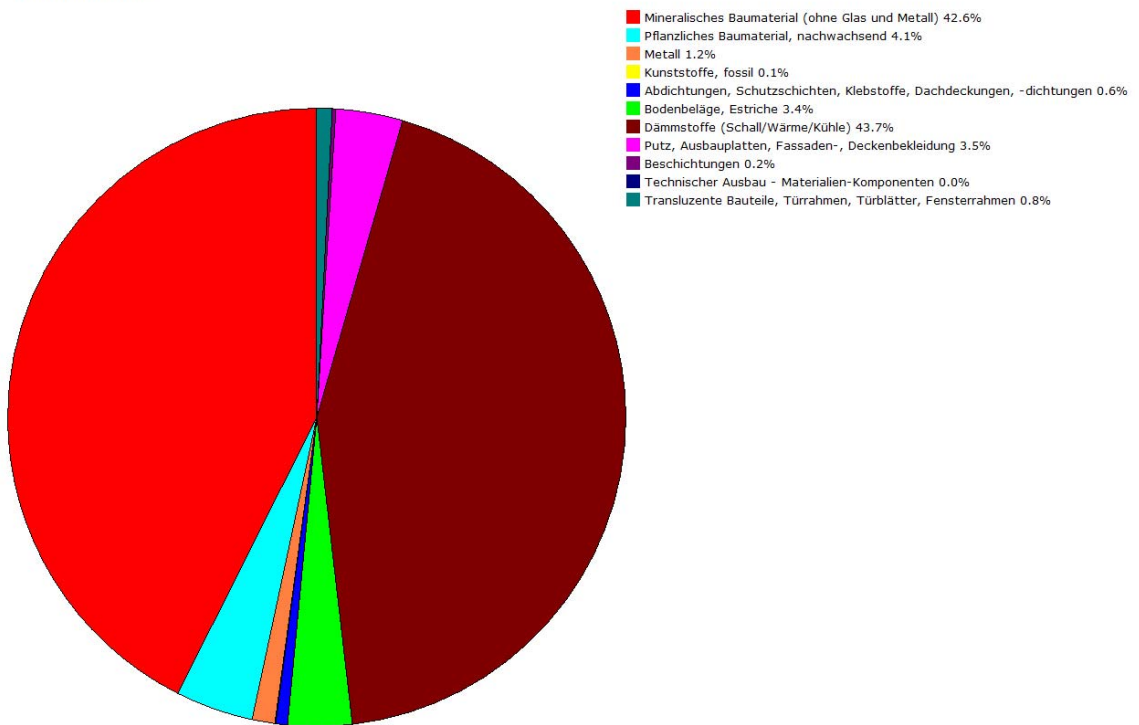
Materialanteile



Materialanteile



Volumenanteile





### 9.11.5 Ökobilanzdaten Variante Ökonomisch

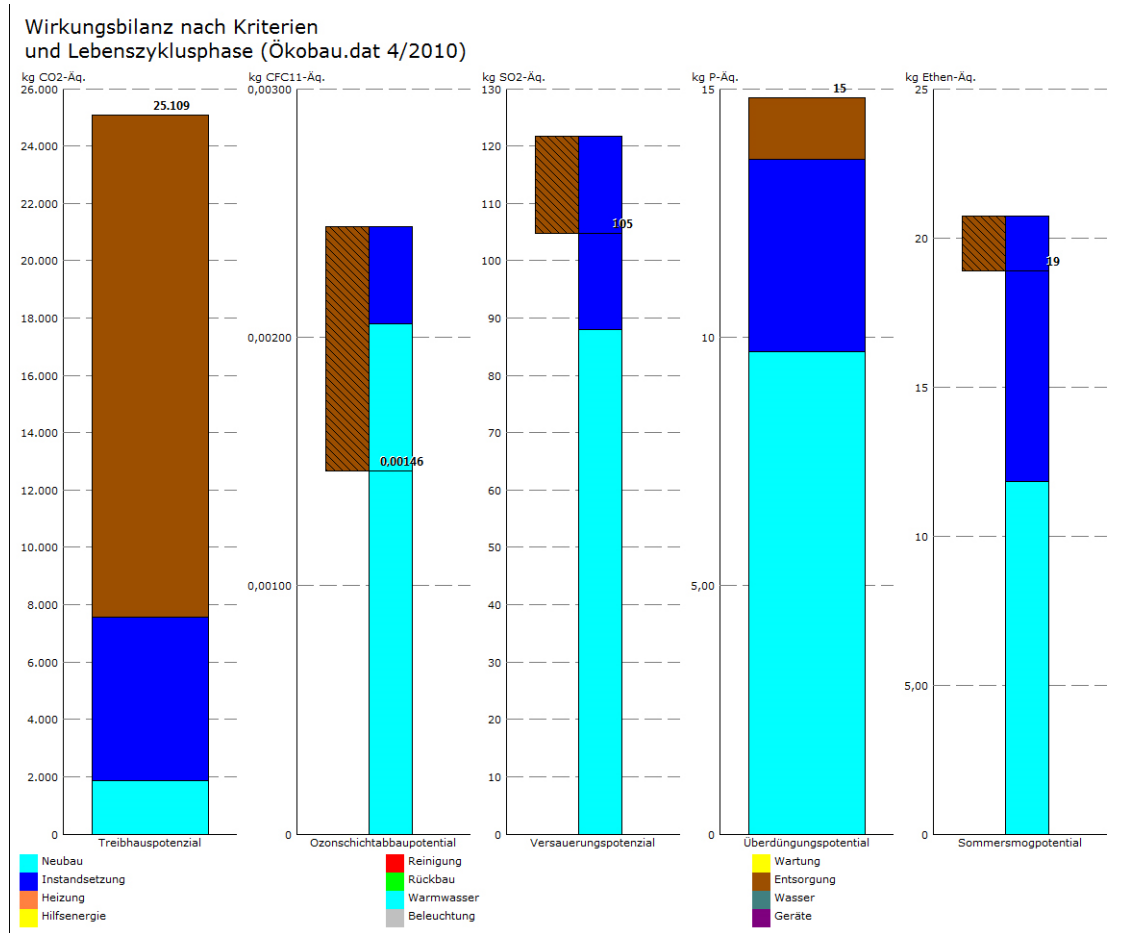


Abbildung 9.11.5-1: Ökobilanzdaten Variante Ökonomisch, Wirkungsbilanz

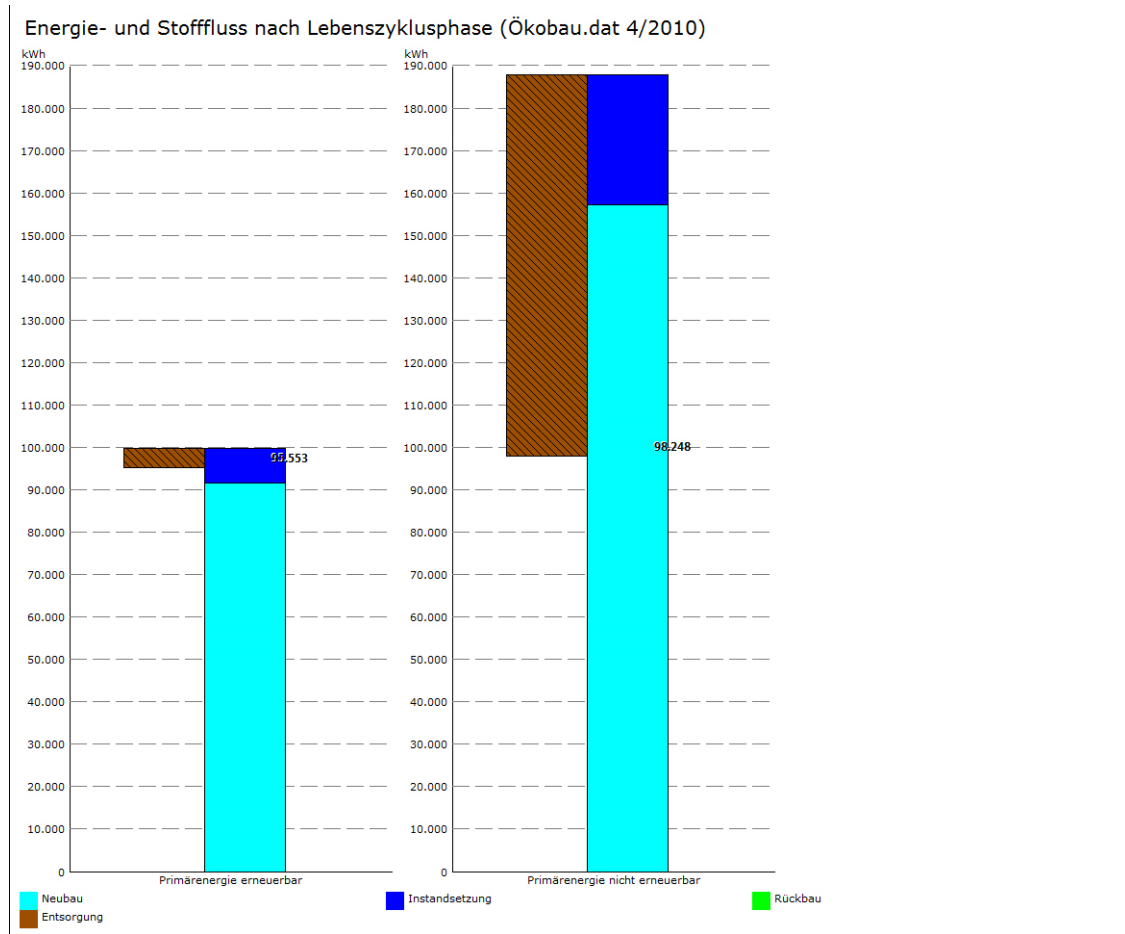


Abbildung 9.11.5-2: Ökobilanzdaten Variante Ökonomisch, Energie- und Stofffluss

### Materialanteile

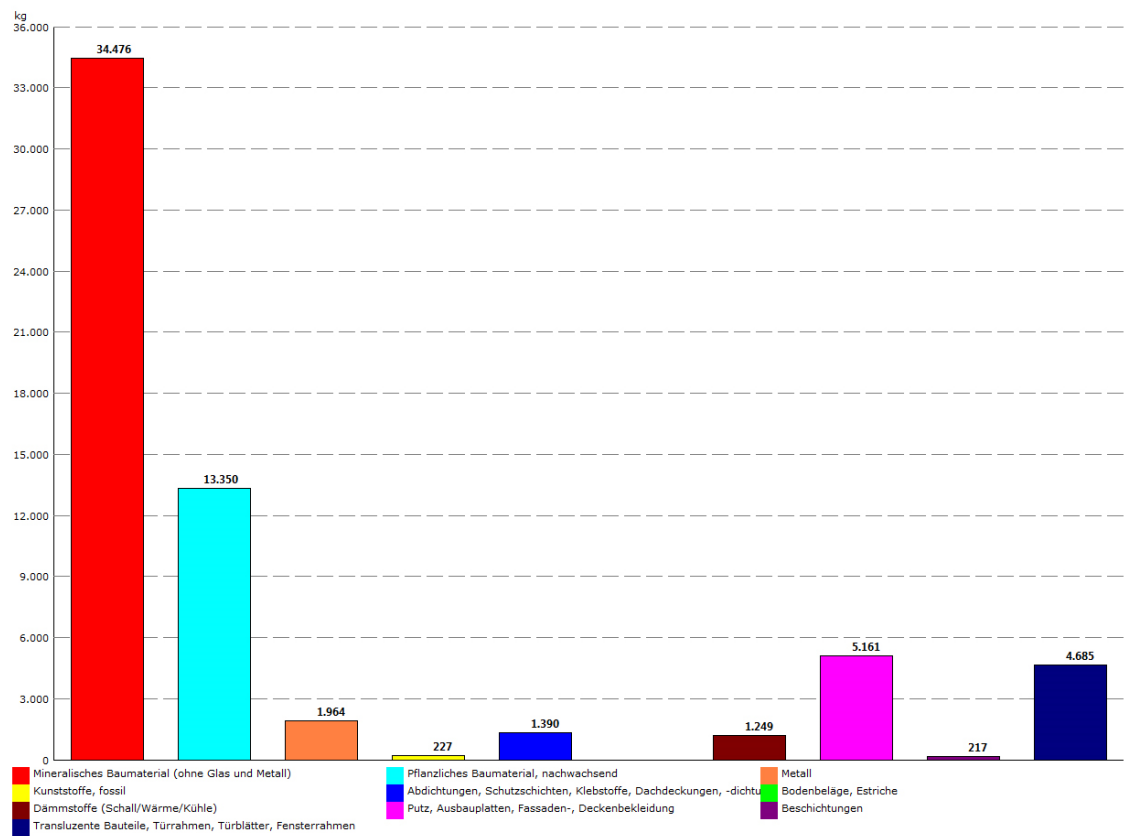


Abbildung 9.11.5-3: Materialanteile Variante Ökonomisch, absolut

Materialanteile

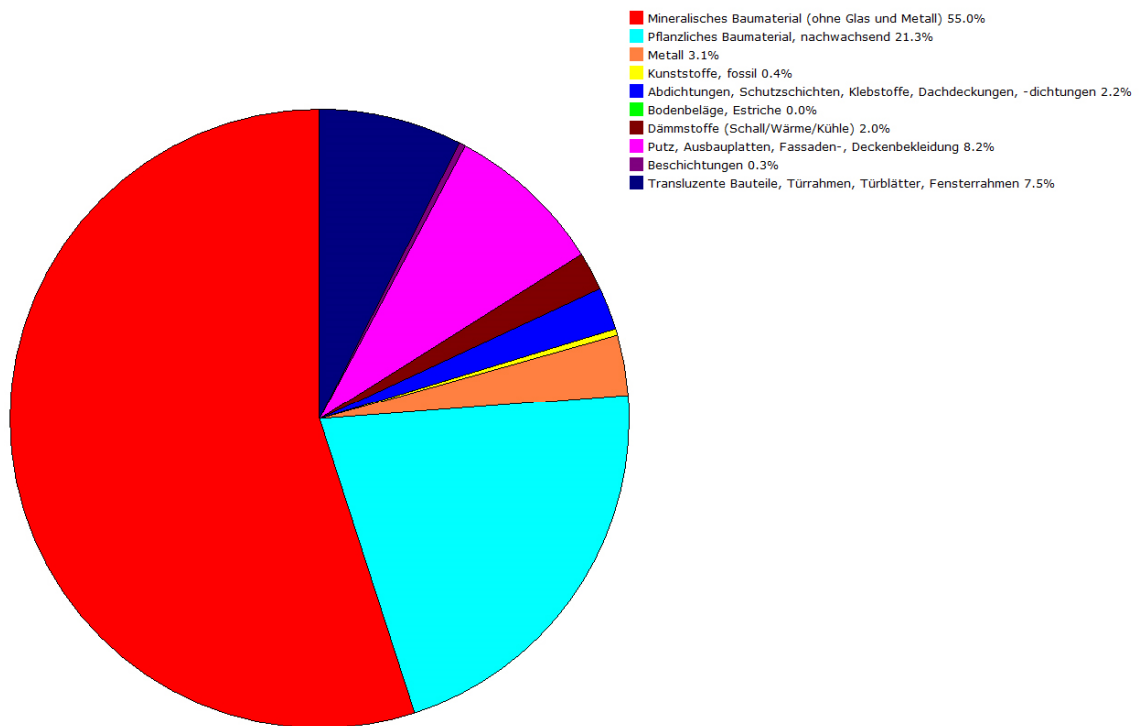


Abbildung 9.11.5-4: Materialanteile Variante Ökonomisch, prozentual

Volumenanteile

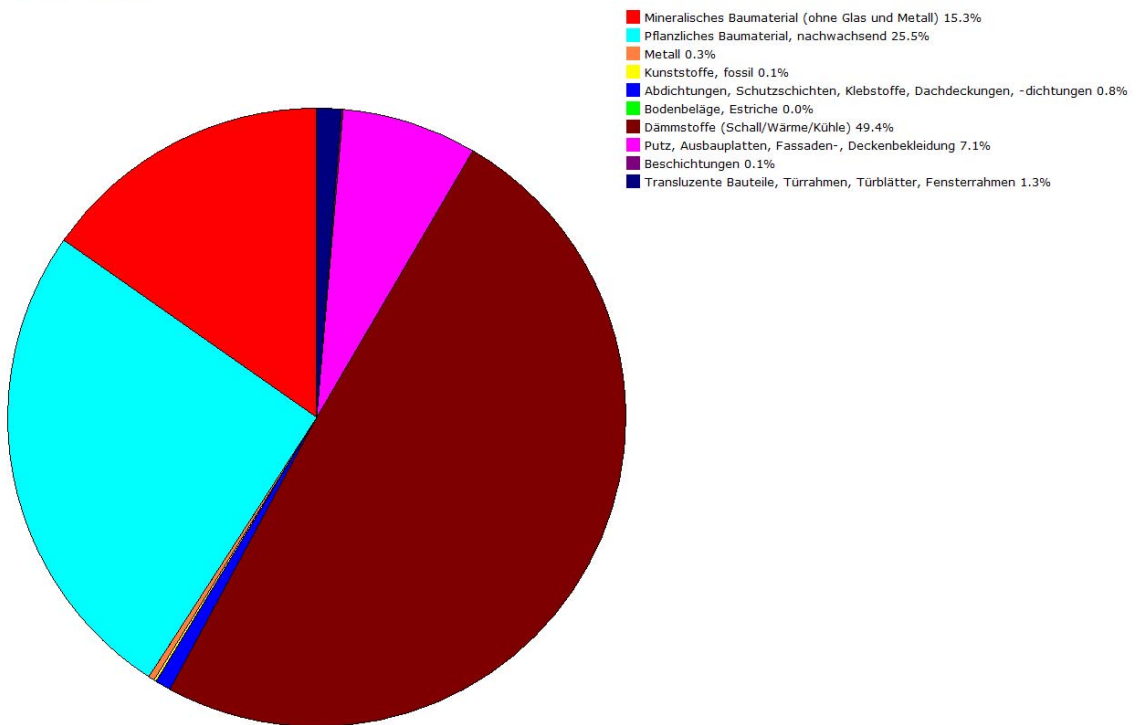


Abbildung 9.11.5-5: Volumenanteile Variante Ökonomisch, prozentual

### 9.11.6 Ökobilanzdaten Variante Ausbalanciert

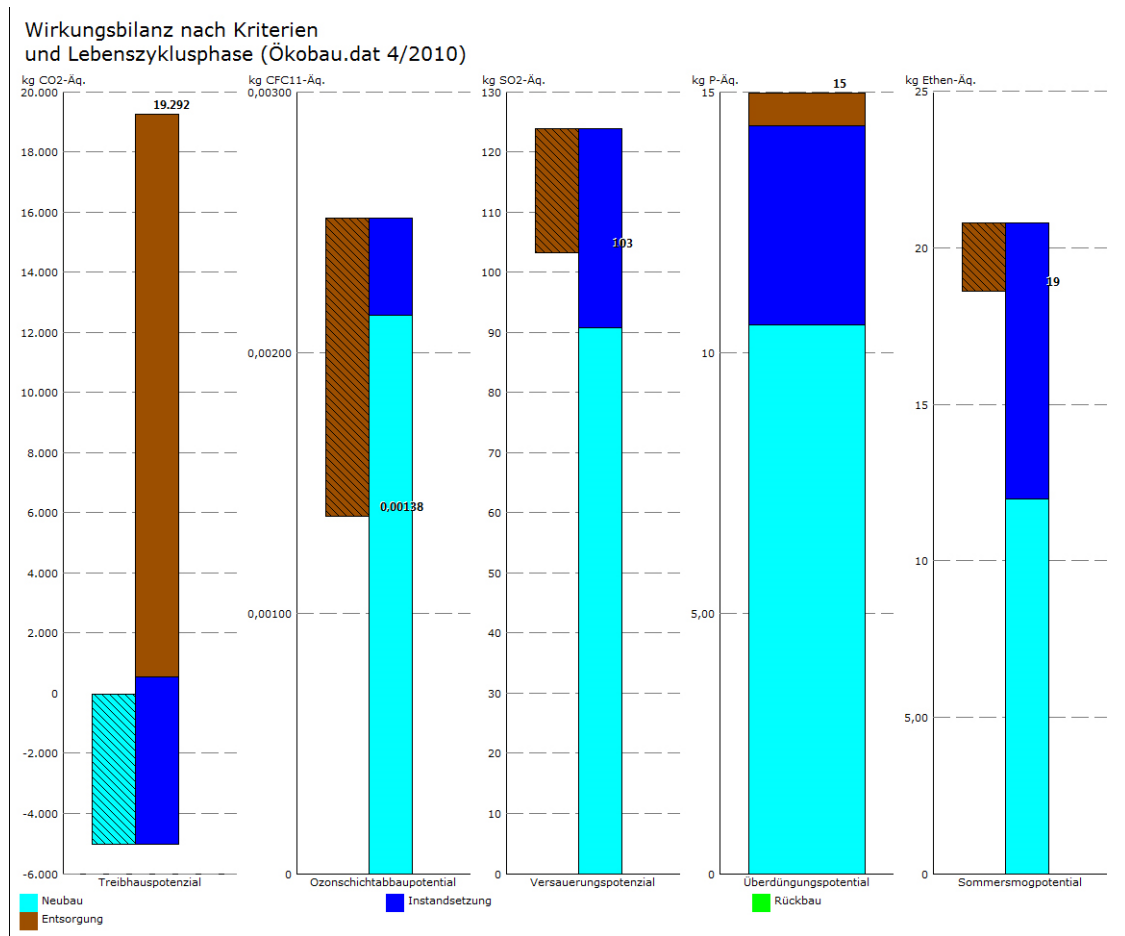


Abbildung 9.11.6-1: Ökobilanzdaten Variante Ausbalanciert, Wirkungsbilanz

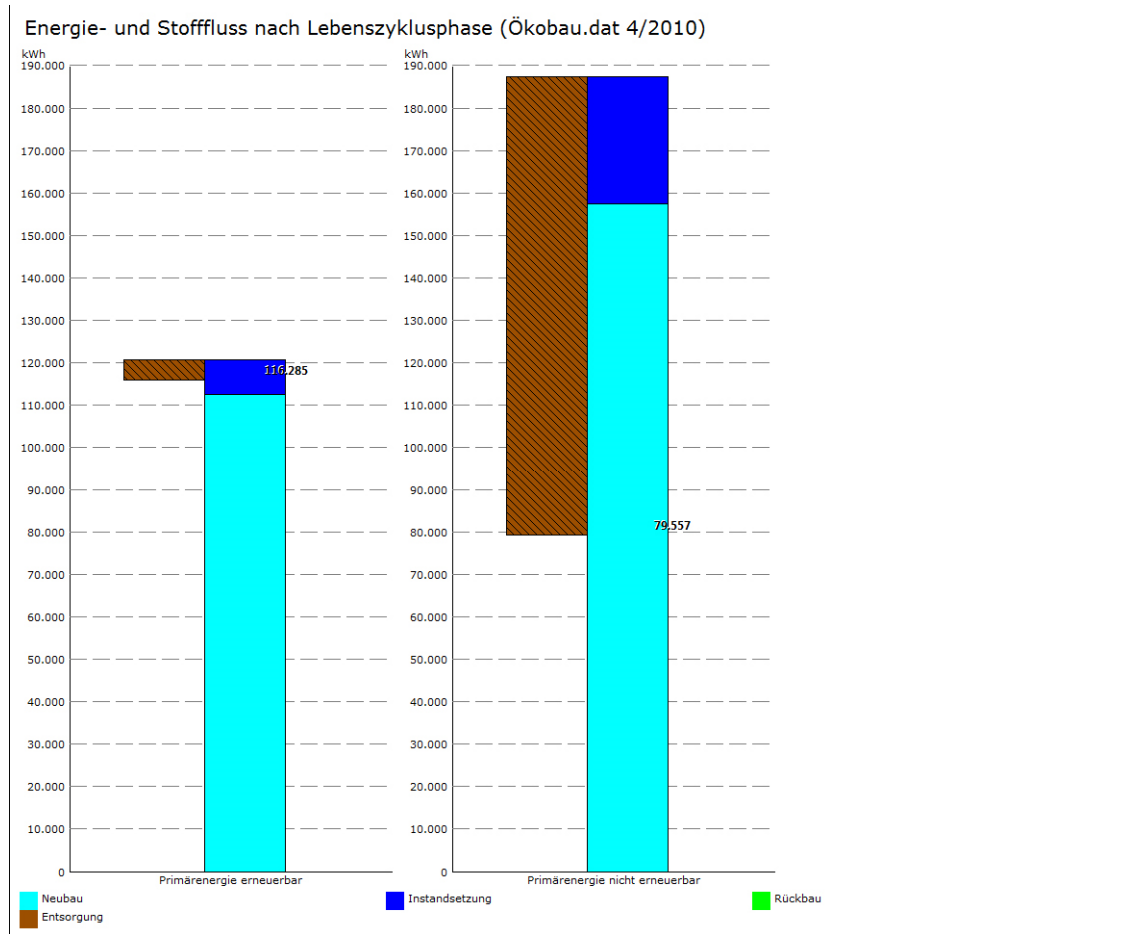


Abbildung 9.11.6-2: Ökobilanzdaten Variante Ausbalanciert, Energie- und Stofffluss

Materialanteile

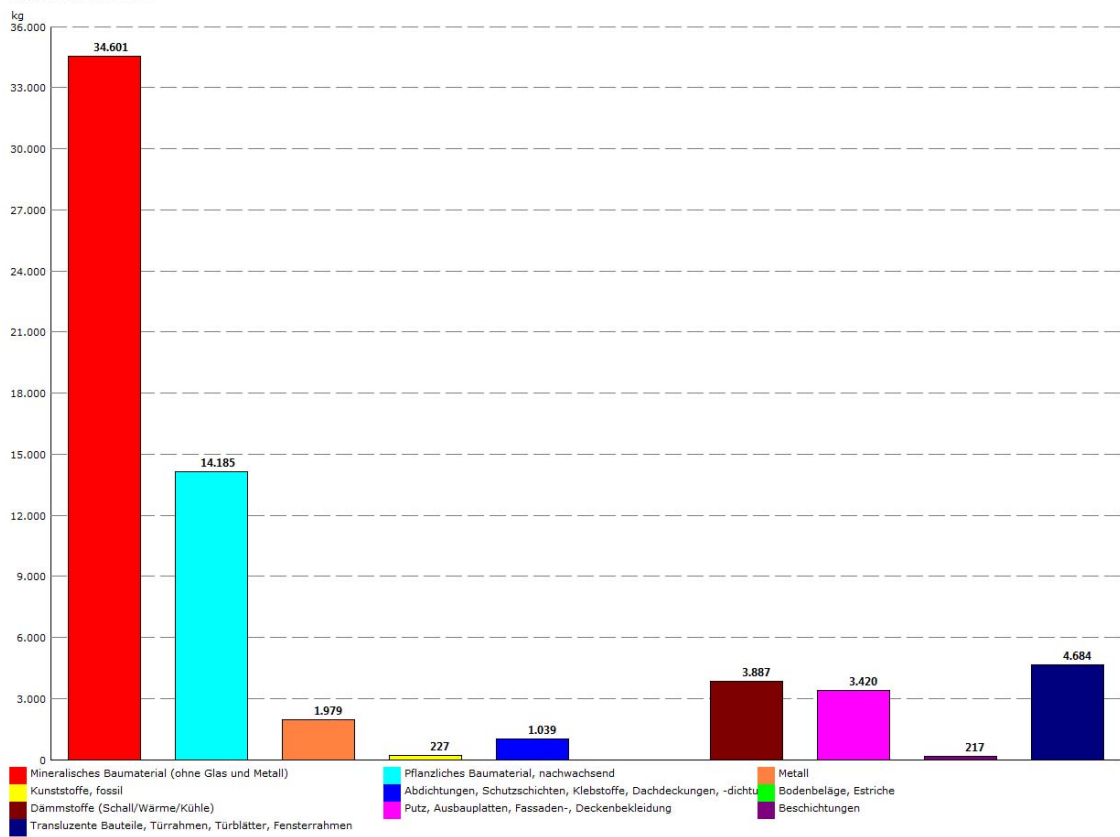


Abbildung 9.11.6-3: Materialanteile Variante Ausbalanciert, absolut



Materialanteile

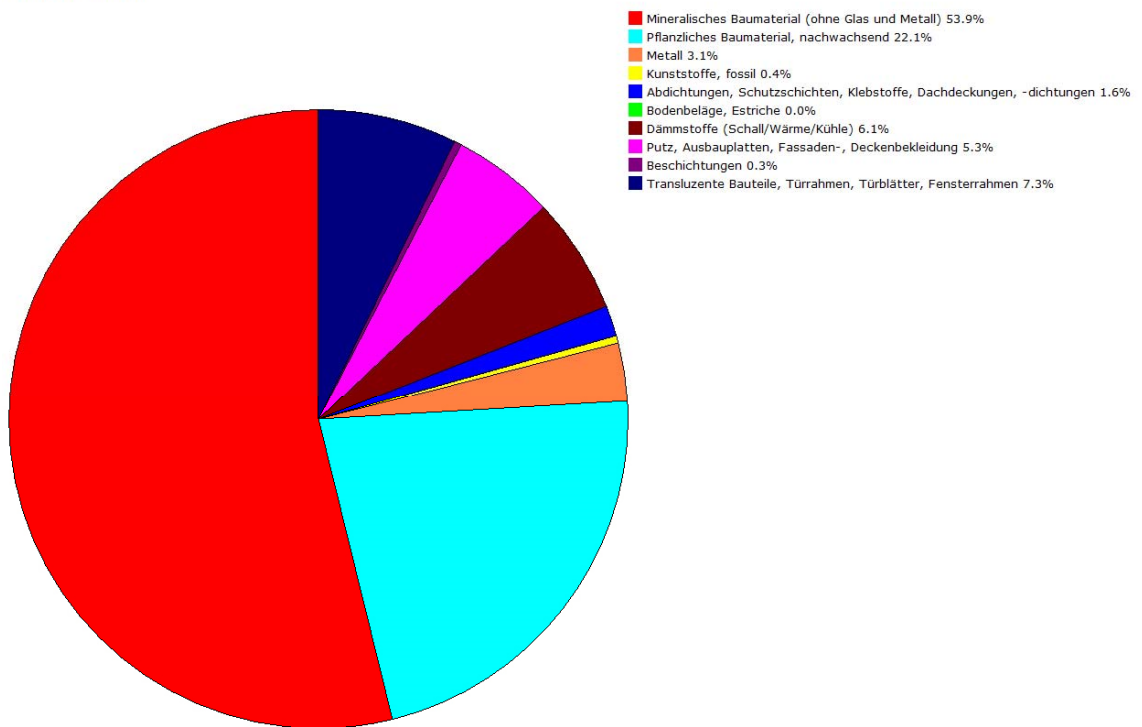


Abbildung 9.11.6-4: Materialanteile Variante Ausbalanciert, prozentual

Volumenanteile

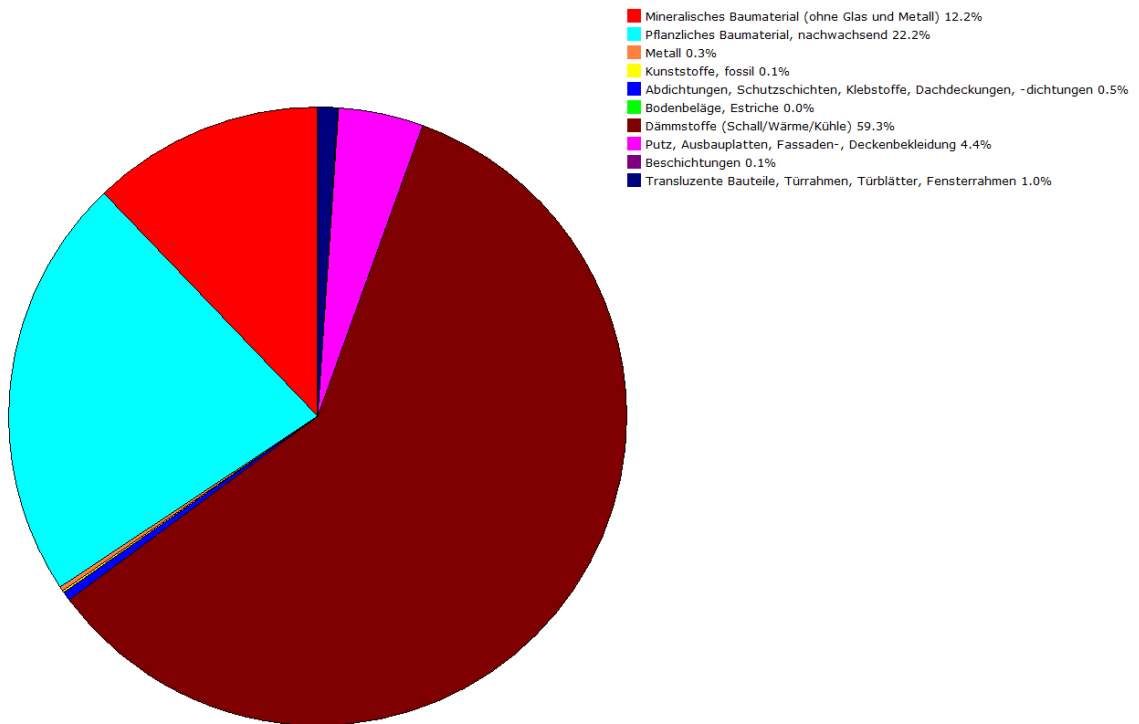


Abbildung 9.11.6-5: Volumenanteile Variante Ausbalanciert, prozentual

### 9.11.7 Ökobilanzdaten Variante Ökologisch

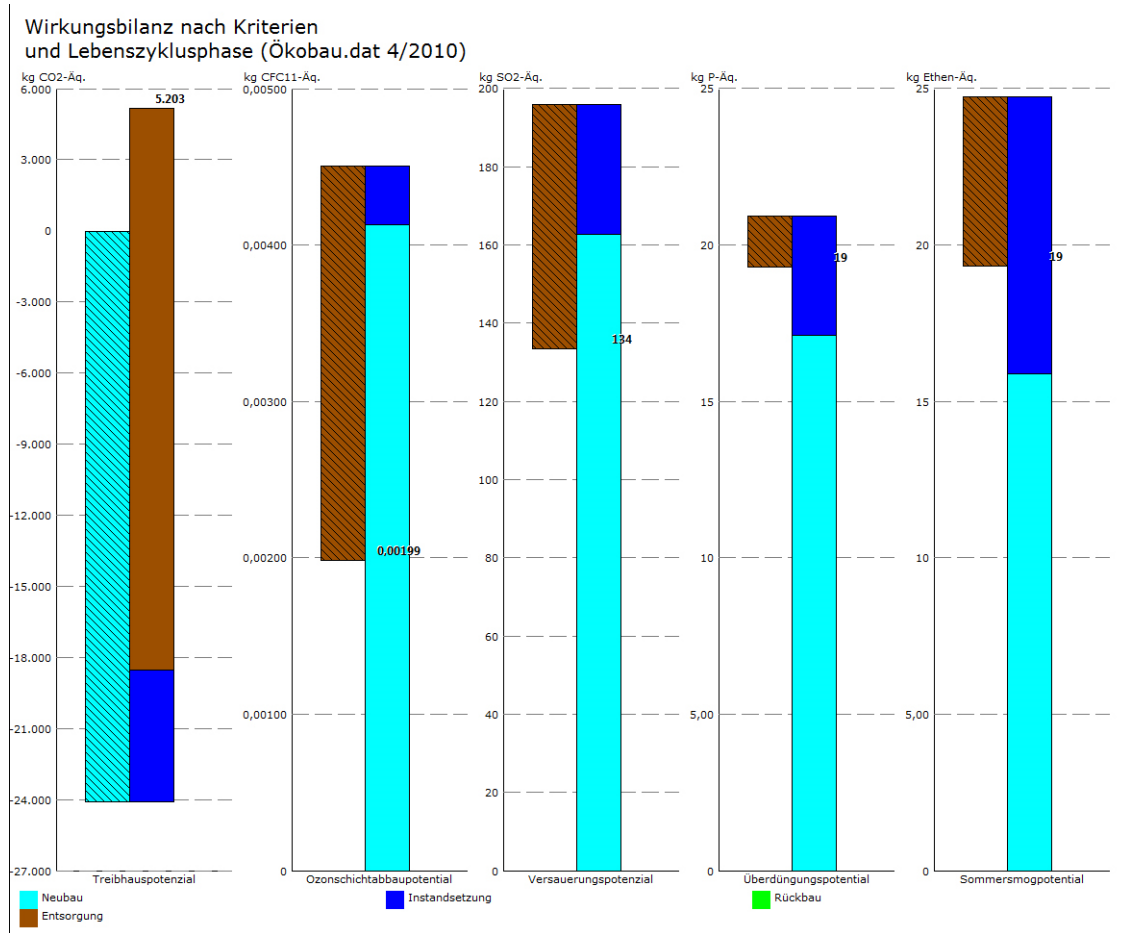


Abbildung 9.11.7-1: Ökobilanzdaten Variante Ökologisch, Wirkungsbilanz

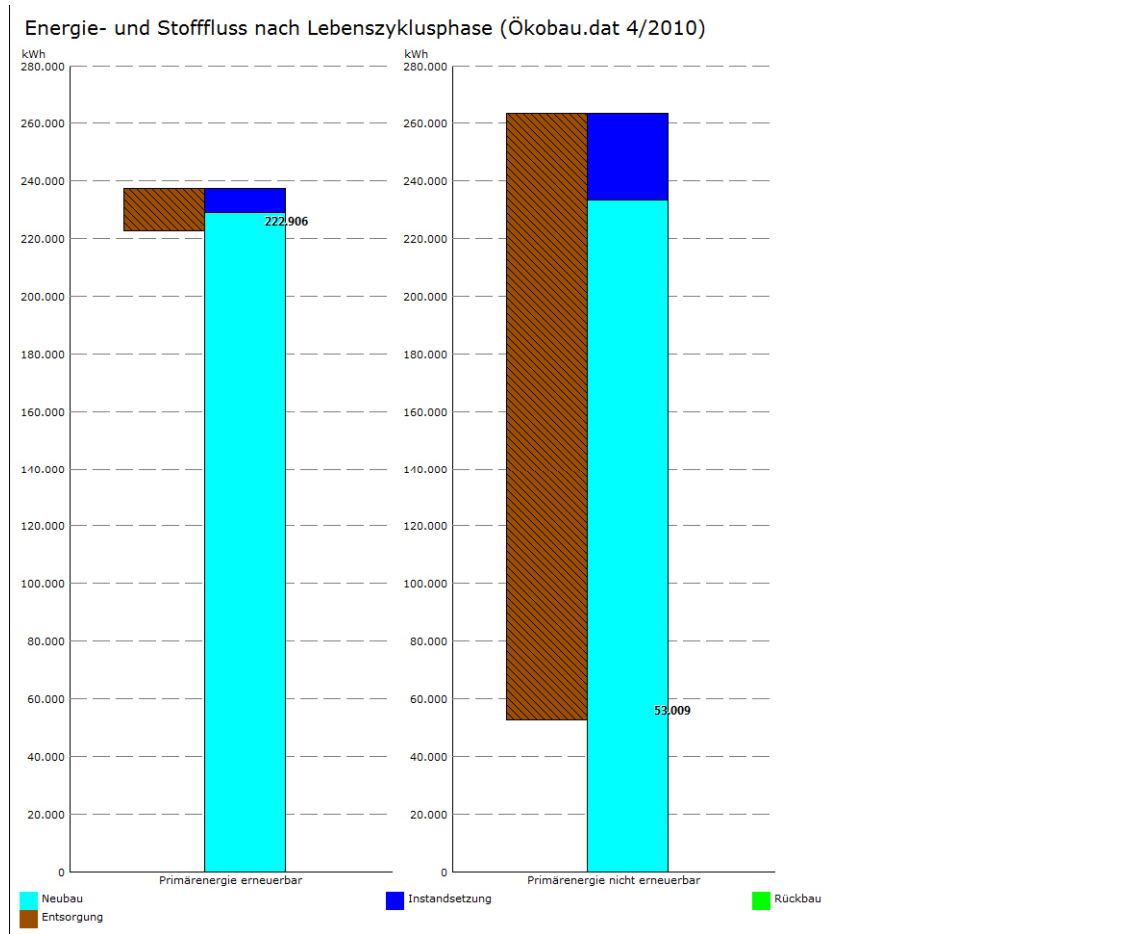


Abbildung 9.11.7-2: Ökobilanzdaten Variante Ökologisch, Energie- und Stofffluss

Materialanteile

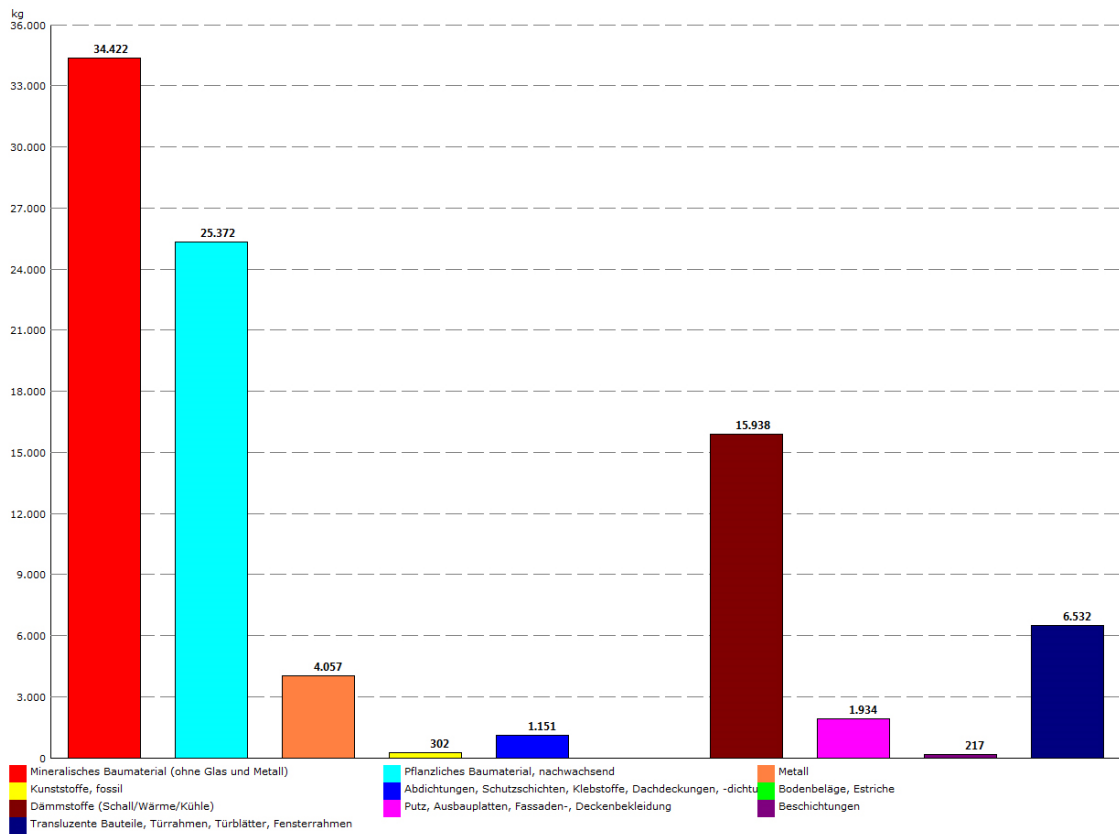


Abbildung 9.11.7-3: Materialanteile Variante Ökologisch, absolut

Materialanteile

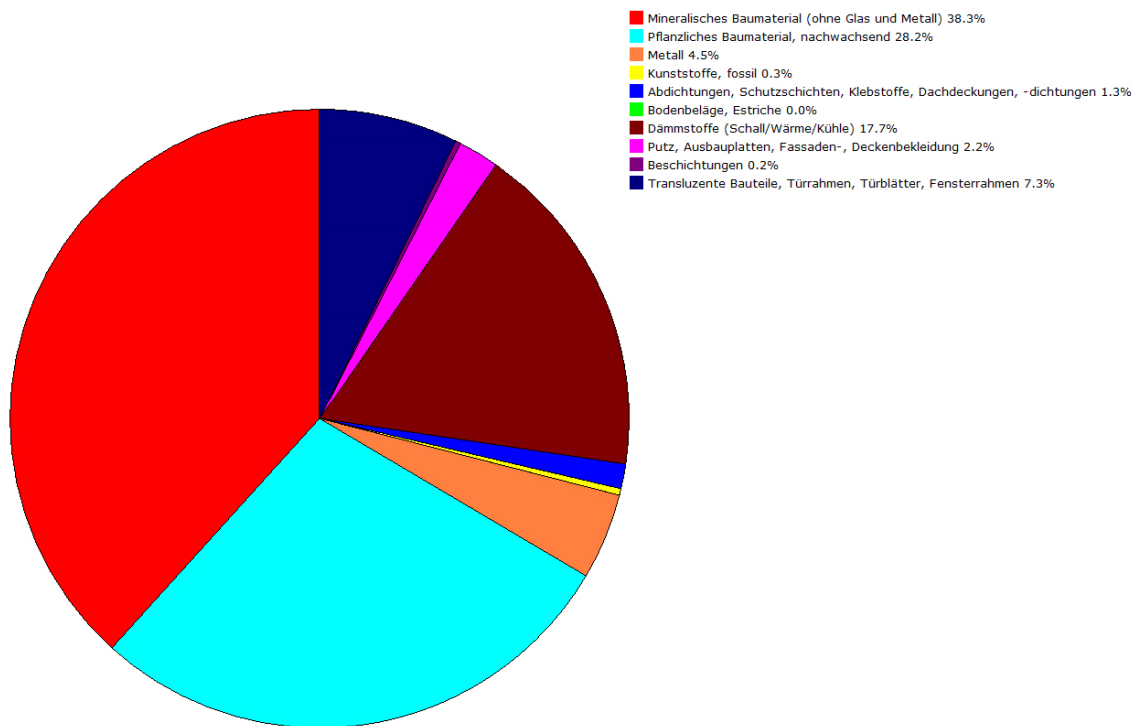


Abbildung 9.11.7-4: Materialanteile Variante Ökologisch, prozentual

Volumenanteile

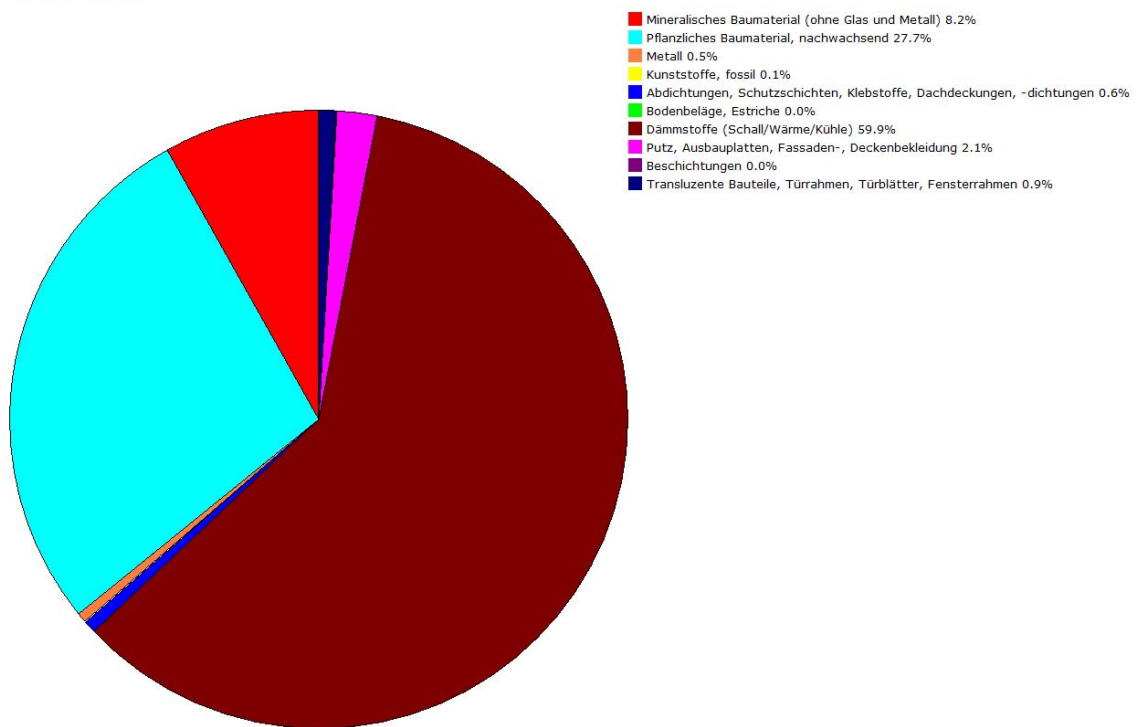


Abbildung 9.11.7-5: Volumenanteile Variante Ökologisch, prozentual

## 10 Anlagen

**A1: Literaturliste**

**A2: Plan - 2-geschossige Loftwohnung**

**A3: Plan – Wohnung mit Schlafebene und zus. Bad**

**A4: Plan – Wohnung mit Schlafebene, Ankleidezimmer und zus. Bad**

**A5: Plan – Wohnung mit Schlafebene, Arbeitszimmer und zus. Bad**

**A6: Plan – Wohnung mit Schlafzimmer, Kinderzimmer und zus. Bad**

**A7: Plan – Wohnung mit Schlafzimmer, 2 Kinderzimmern und zus. Bad**

**A8: Plan – Wohnung mit Schlafzimmer, 2 Kinderzimmern, Arbeitszimmer und zus. Bad**

**A9: Plan – Teilung in 2 Wohneinheiten**

**A10: statische Berechnung**

**A11: statische Vorbemessung Anbauten**



## A1: Literaturliste

	Quelle
[Agora, 2015]	EEG-Rechner, URL: <a href="http://www.agora-energiewende.de/service/eeg-rechner/">http://www.agora-energiewende.de/service/eeg-rechner/</a> (abgerufen: 15.07.2015), Agora Energiewende, Berlin, 2015
[AktivPlus e.V., 2015]	AktivPlus e.V., Hintergrund - der Verein AktivPlus, URL: <a href="http://www.aktivplusev.de/wp-content/uploads/2014/03/aktivplus_verein_hintergrund.pdf">http://www.aktivplusev.de/wp-content/uploads/2014/03/aktivplus_verein_hintergrund.pdf</a> (abgerufen: 16.07.2015) AktivPlus e.V, Frankfurt, 2015
[Alamdari et al., 1983]	Alamdari, F., Hammond, G.P., Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms, in BSER&T, Vol. 4, No. 3, Sage Publications, New York, 1983
[Albrecht et al., 2005]	Albrecht, M., Scherg, R., Materialökologie - Gesundheitsbezogene Bewertung von Baustoffen und Einrichtungsmaterialien, URL: <a href="http://www.iba-albrecht.de/IBA_Materialoekologie.pdf">http://www.iba-albrecht.de/IBA_Materialoekologie.pdf</a> (abgerufen: 21.01.2015) iba - Ingenieurbüro Albrecht, Tübingen, 2005
[Albrecht et al., 2008]	Albrecht, S., Rüter, S., Welling, J., Knauf, M., Mantau, U., Braune, A., Baitz, M., Weimar, H., Sörgel, S., Kreissig, J., Deimling, J., Hellwig, S., Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern, Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie Nr. 2008/5, Johan Heinrich von Thünen Institut, Hamburg, 2008
[Balck, 2013]	Balck, H. Methoden und Instrumente für das LifeCycle Benchmarking für Gebäude und Technische Anlagen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013
[BASF, 2015]	BASF SE Performance Materials, SLENTITE – die Hochleistungs-Dämmplatte. Maßgeschneidertes Klimamanagement, URL: <a href="http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/de_DE/function/convensions:/publish/content/group/News_und_Medien/Polyurethan/Slente_DE.pdf">http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/de_DE/function/convensions:/publish/content/group/News_und_Medien/Polyurethan/Slente_DE.pdf</a> (abgerufen: 22.01.2015) BASF Polyurethanes GmbH, Lemförde, 2015

	Quelle
[bbs, 2013]	Kreislaufwirtschaft Bau c/o Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 - Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010, URL: <a href="http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_8.pdf">http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_8.pdf</a> Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., Berlin, 2013
[BBSR, 2011]	Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), URL: <a href="http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html">http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html</a> (abgerufen: 09.07.2014) Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung, Bonn, 2011
[Becker, 2013]	Becker, N., Ressourceneffizienz der Tragwerke, VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 2, URL: <a href="http://www.ressourcendeutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Bau-5_08012013-Web.pdf">http://www.ressourcendeutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Bau-5_08012013-Web.pdf</a> (abgerufen: 22.01.2014) VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, 2013
[Becker, 2014]	Becker, N., Ressourceneffizienz der Dämmstoffe im Hochbau, VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 7, URL: <a href="http://www.ressourcendeutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-07-Ressourceneffizienz-der-Daemmstoffe-im-Hochbau.pdf">http://www.ressourcendeutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-07-Ressourceneffizienz-der-Daemmstoffe-im-Hochbau.pdf</a> (abgerufen: 22.01.2014) VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, 2014
[Beier et al., 2009]	Beier, W., Biologisch abbaubare Kunststoffe, URL: <a href="https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3834.pdf">https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3834.pdf</a> (abgerufen: 22.01.2015) Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2009
[Bergmann, 2014]	Bergmann, A. (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP) Vortrag: Monitoring von Modellhäusern im Effizienzhaus Plus Standard, Fachkongress: 1. Aktivhaus Plus Symposium, 7. CEB Clean Energy Building, Stuttgart, 07.03.2014
[BINE, 2006]	Münter, M., Gebäude sanieren – Studentenwohnheim, URL: <a href="http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2006/Projekt-Info_04-2006/projekt_0406internet-x.pdf">http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2006/Projekt-Info_04-2006/projekt_0406internet-x.pdf</a> (abgerufen: 29.10.2013) FIZ Karlsruhe GmbH, Eggenstein-Leopoldshafen, 2006

Quelle	
<b>[BKI, 2012]</b>	BKI Baukosteninformationszentrum, BKI Baukosten Gebäude 2012, Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, Stuttgart, 2012
<b>[BKI, 2013a]</b>	BKI Baukosteninformationszentrum, BKI Baukosten Bauelemente 2013: Statistische Kostenkennwerte Teil 2, Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Stuttgart, 2013
<b>[BKI, 2013b]</b>	BKI Baukosteninformationszentrum, BKI Baukosten Positionen 2013: Statistische Kostenkennwerte, Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Stuttgart, 2013
<b>[Blaß et al., 2008]</b>	H. J. Blaß; T. Uibel Zukunft Holz URL: <a href="http://www.baulinks.de/webplugin/2008/1618.php4">http://www.baulinks.de/webplugin/2008/1618.php4</a> (abgerufen am: 29.07.2014) Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2008
<b>[BMUB, 2011]</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Datenbasis Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude, Referat II6 "Bauen und Umwelt" im BBSR, Berlin, 2011
<b>[BMUB, 2013]</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, ÖKOBAUDAT - Informationsportal Nachhaltiges Bauen, URL: <a href="http://oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html">http://oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html</a> (abgerufen: 15.09.2015) BMUB, Berlin, 2013
<b>[BMUB, 2014]</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Datenbasis Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude, Referat II6 "Bauen und Umwelt" im BBSR, Berlin, 2014
<b>[BMVBS, 2011]</b>	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen Büro- und Verwaltung, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2011
<b>[BMVBS, 2013-I]</b>	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Nachhaltiges Bauen des Bundes, URL: <a href="http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/veroeffentlichungen/Flyer_deutsch.pdf">http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/veroeffentlichungen/Flyer_deutsch.pdf</a> (abgerufen am 29.10.2013) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2013

	Quelle
[BMVBS, 2013-II]	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Drei Dimensionen des Nachhaltigen Bauens, URL: <a href="http://www.nachhaltigesbauen.de/nachhaltiges-bauen/nachhaltiges-bauen/drei-dimensionen-des-nachhaltigen-bauens.html">http://www.nachhaltigesbauen.de/nachhaltiges-bauen/nachhaltiges-bauen/drei-dimensionen-des-nachhaltigen-bauens.html</a> (abgerufen: 29.10.2013) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2013
[BMVBS, 2013-III]	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB), URL: <a href="http://www.nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem-nachhaltiges-bauen-fuer-bundesgebaeude-bnb.html">http://www.nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem-nachhaltiges-bauen-fuer-bundesgebaeude-bnb.html</a> (abgerufen am 29.10.2013), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2013
[Borsch-Laaks, 2006]	Borsch-Laaks, R., Risiko Dampfkonvektion, Wann gibt es wirklich Schäden?, in: Holzbau - die neu quadriga, 3/2006 Verlag Kastner, Wolnzach, 2006
[Borsch-Laaks, 2009]	Borsch-Laaks, R., Wie undicht ist dicht genug? Zur Zulässigkeit von Fehlstellen in Luftdichtheitsschichten und Dampfsperren, in: Aachener Bausachverständigentage 2009: Dauerstreitpunkte - Beurteilungsprobleme bei Dach, Wand und Keller, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
[Borsch-Laaks, 2010]	Borsch-Laaks, R., Die Dampfkonvektion, Ein Risiko – aber nicht überall, in: Holzbau - die neu quadriga, 1/2010 Verlag Kastner, Wolnzach, 2010
[Borsch-Laaks, 2013-II]	Borsch-Laaks, Beste Lösungen für den Wärmeschutz - Architektur und Wärmebrücken entscheiden über den Aufwand, Vortrag im Rahmen der 1. Wuppertaler Wärmeschutz-Tagung am 19.09.2013 Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2013
[Borsch-Laaks, 2013]	Borsch-Laaks, R., Tauwasserschutz im Holzbau, in: Urbaner Holzbau - Chancen und Potenziale für die Stadt URL: <a href="http://informationsdienst-holz.de/urbaner-holzbau/kapitel-4-der-zeitgenoessische-holzbau/tauwasserschutz-im-holzbau/">http://informationsdienst-holz.de/urbaner-holzbau/kapitel-4-der-zeitgenoessische-holzbau/tauwasserschutz-im-holzbau/</a> (abgerufen: 10.03.2015) DOM publishers, Berlin, 2013
[Braungart et al., 2009]	Braungart, M., Cradle to Cradle, Vintage, London, 2009

Quelle	
<b>[Buschmann, 2003]</b>	Buschmann, R., Umweltverträglichkeit von Gebäudedämmstoffen, URL: <a href="http://www.schleswig-holstein.de/UmweltLandwirtschaft/DE/Abfall/_DL/daemmstoffe_pdf_blob=publicationFile.pdf">http://www.schleswig-holstein.de/UmweltLandwirtschaft/DE/Abfall/_DL/daemmstoffe_pdf_blob=publicationFile.pdf</a> (abgerufen: 17.12.2014) Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 2003
<b>[Carroll, 1980]</b>	Carroll, J.A., An MRT method of computing radiant energy exchange in rooms. Proceedings of the 2nd Systems Simulation & Economic Analysis Conference, San Diego, Systems Simulation & Economic Analysis Conference, San Diego, 1980
<b>[CML, 2013]</b>	Institute of Environmental Studies (CML), CML-IA Characterisation Factors, CML-IA Database, Version 4.2, URL: <a href="http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html">http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html</a> (abgerufen: 05.08.2014) Universiteit Leiden, Leiden, 2013
<b>[Coldewey, 2011]</b>	Coldewey, J., Das agile Manifest, in: OBJEKTspektrum 02/2011, URL: <a href="http://www.sigs-data.com.de/fileadmin/user_upload/zeitschriften/os/2011/02/coldewey_manifest_OS_02_11.pdf">http://www.sigs-data.com.de/fileadmin/user_upload/zeitschriften/os/2011/02/coldewey_manifest_OS_02_11.pdf</a> (abgerufen: 29.10.2013), SIGS DATACOM GmbH, Troisdorf, 2011
<b>[D-19, 2015]</b>	D-19 GmbH, Produktkataloge Küche, Wohnen und Büro, URL: <a href="http://www.d-19.de/images/pdfflipper-files/kuechen.pdf">http://www.d-19.de/images/pdfflipper-files/kuechen.pdf</a> (abgerufen: 17.07.2015), URL: <a href="http://www.d-19.de/images/pdfflipper-files/wohnen.pdf">http://www.d-19.de/images/pdfflipper-files/wohnen.pdf</a> (abgerufen: 17.07.2015), URL: <a href="http://www.d-19.de/images/pdfflipper-files/buero.pdf">http://www.d-19.de/images/pdfflipper-files/buero.pdf</a> (abgerufen: 17.07.2015) D-19 GmbH, Ellwangen, 2015
<b>[de Wild-Scholten et al., 2012]</b>	de Wild-Scholten, M, van der Meulen, R., Carbon- and Environmental Footprinting of Photovoltaic Modules, URL: <a href="http://smartgreenscans.nl/publications/deWildScholten-2012-Carbon-and-environmental-footprinting-of-photovoltaic-modules.pdf">http://smartgreenscans.nl/publications/deWildScholten-2012-Carbon-and-environmental-footprinting-of-photovoltaic-modules.pdf</a> (abgerufen: 06.01.2014) SmartGreenScans, Groet, NL, 2012
<b>[de Wild-Scholten et al., 2014]</b>	de Wild-Scholten, M, van der Meulen, R., Environmental aspects of photovoltaics, URL: <a href="http://smartgreenscans.nl/publications/deWildScholten-2014-Environmental-aspects-of-PV.pdf">http://smartgreenscans.nl/publications/deWildScholten-2014-Environmental-aspects-of-PV.pdf</a> (abgerufen: 06.01.2014) SmartGreenScans, Groet, NL, 2012

Quelle	
<b>[de Wild-Scholten, 2013]</b>	de Wild-Scholten, M, Energy payback time and carbon footprint of commercial photo-voltaic systems, in: Solar Energy Materials & Solar Cells #119 Elsevier, Amsterdam, NL, 2013
<b>[Dederich, 2013]</b>	Dederich, L. Holzhauskonzepte, URL: <a href="http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/broschuere_holzhauskonzepte_web.pdf">http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/broschuere_holzhauskonzepte_web.pdf</a> (abgerufen: 08.07.2014) Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen, 2013
<b>[DGAW, 2010]</b>	Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., Rohstoffe aus Abfällen - Rückgewinnung von Gips aus Gipsabfällen und synthetischen Gipsen, URL: <a href="http://www.dgaw.de/files/uploaded/100421_dgaw-arbeitspapier-rueckgewinnung-von-gips_1287067519.pdf">http://www.dgaw.de/files/uploaded/100421_dgaw-arbeitspapier-rueckgewinnung-von-gips_1287067519.pdf</a> (abgerufen: 21.08.2014) DGAW e.V., Berlin, 2010
<b>[DGNB, 2009]</b>	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., Das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen, DGNB e.V., Stuttgart, 2009
<b>[DIBt, 2010]</b>	Deutsches Institut für Bautechnik Grundsätze zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten in Innenräumen, URL: <a href="https://www.dibt.de/en/Divisions/data/Aktuelles_Ref_II_4_6.pdf">https://www.dibt.de/en/Divisions/data/Aktuelles_Ref_II_4_6.pdf</a> (abgerufen: 08.07.2014) Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2010
<b>[DIBt, 2011]</b>	Deutsches Institut für Bautechnik Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser, URL: <a href="https://www.dibt.de/de/Fachbereiche/data/Aktuelles_Ref_II_6_5.pdf">https://www.dibt.de/de/Fachbereiche/data/Aktuelles_Ref_II_6_5.pdf</a> (abgerufen: 08.07.2014) Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2011
<b>[DIBt, 2014]</b>	Deutsches Institut für Bautechnik Innenraumrelevante Bauprodukte, deren allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) Aussagen zum Gesundheitsschutz enthalten, URL: <a href="https://www.dibt.de/de/Fachbereiche/data/Aktuelles_Ref_II_6_Liste_Gesundheitsschutz.pdf">https://www.dibt.de/de/Fachbereiche/data/Aktuelles_Ref_II_6_Liste_Gesundheitsschutz.pdf</a> (abgerufen: 08.07.2014) Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2014
<b>[DIN 276:2008-12]</b>	DIN 276:2008-12, Kosten im Bauwesen, Beuth Verlag, Berlin, 2009
<b>[DIN 4109-B2:1989-11]</b>	DIN 4109-B2:1989-11, Schallschutz im Hochbau - Beiblatt 2 zu DIN 4109, Beuth Verlag, Berlin, 1989

Quelle	
<b>[DIN EN 15643-1:2010-12]</b>	DIN EN 15643-1:2010-12, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 1: Allgemeine Rahmenbedingungen, Beuth Verlag, Berlin, 2010
<b>[DIN EN 15643-2:2011-05]</b>	DIN EN 15643-2:2011-05, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität, Beuth Verlag, Berlin, 2011
<b>[DIN EN 15643-3:2012-04]</b>	DIN EN 15643-3:2012-04, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 3: Rahmenbedingungen für die Bewertung der sozialen Qualität, Beuth Verlag, Berlin, 2012
<b>[DIN EN 15643-4:2012-04]</b>	DIN EN 15643-4:2012-04, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 4: Rahmenbedingungen für die Bewertung der ökonomischen Qualität, Beuth Verlag, Berlin, 2012
<b>[DIN EN 15804:2012-04]</b>	DIN EN 15804:2012-04, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Beuth Verlag, Berlin, 2012
<b>[DIN EN 15978:2010-06]</b>	DIN EN 15978:2010-06, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode, Beuth Verlag, Berlin, 2010
<b>[DIN EN ISO 14040:2009-11]</b>	DIN EN ISO 14040:2009-11, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Beuth Verlag, Berlin, 2009
<b>[DIN EN ISO 14044:2006-10]</b>	DIN EN ISO 14044:2006-10, Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, Beuth Verlag, Berlin, 2009
<b>[Dorsch et al., 2014]</b>	Dorsch, L., Kaiser, C., Niklasch, W., Schöpgens, H., Spritzendorfer, J. Marktübersicht - Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, URL: <a href="http://mediathek.fnr.de/dammstoffe-aus-nachwachsenden-rohstoffen.html">http://mediathek.fnr.de/dammstoffe-aus-nachwachsenden-rohstoffen.html</a> (abgerufen: 08.07.2014) Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen, 2014

Quelle	
<b>[Dortmund, 2013]</b>	Stadt Dortmund, »EnergiePlusHäuser« in Dortmund, Dokumentation des Architektenwettbewerbs, URL: <a href="http://www.dortmund.de/media/p/energieplushaeuser/energieplushuser_1/Dokumentation_Wettbewerb_EnergiePlusHaeuser.pdf">http://www.dortmund.de/media/p/energieplushaeuser/energieplushuser_1/Dokumentation_Wettbewerb_EnergiePlusHaeuser.pdf</a> (abgerufen: 29.10.2013) Stadtplanungs- und Bauordnungsamt, Dortmund, 2013
<b>[E-Lab, 2015]</b>	E-Lab Projekt GmbH, B10, URL: <a href="http://www.aktivhaus-b10.de/home/">http://www.aktivhaus-b10.de/home/</a> (abgerufen: 18.09.2015) E-Lab Projekt GmbH, Stuttgart, 2015
<b>[Ebel et al., 2003]</b>	Ebel, W., Großklos, M., Knissel, J., Loga, T., Müller, K., Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern Eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der ‚Gartenhofsiedlung Lummerlund‘ in Wiesbaden-Dotzheim, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2003
<b>[EC JRC-IES, 2010]</b>	European Commission Jointed Research Center, Institute for Environment and Sustainability, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance, URL: <a href="http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=86">http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=86</a> (abgerufen: 06.08.2014) Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2010
<b>[EDSL, 2000]</b>	Environmental Design Solutions Limited, Building Analysis Theory Manual, URL: <a href="http://edsl.myzen.co.uk/downloads/manuals/Theory%20Manual.zip">http://edsl.myzen.co.uk/downloads/manuals/Theory%20Manual.zip</a> (abgerufen: 16.07.2015) Environmental Design Solutions Limited, Milton Keynes - UK, 2000
<b>[EEG, 2014]</b>	EEG 2014 - Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz) in: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2014 Teil I Nr. 33, ausgegeben zu Bonn am 24. Juli 2014, URL: <a href="http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl114s1066.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl114s1066.pdf%27]__1436968529128">http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl114s1066.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl114s1066.pdf%27]__1436968529128</a> (abgerufen: 15.07.2015)
<b>[Eicker et al., 2012]</b>	Eicker, U., Löffler, A., Dalibard, A., Thumm, F., Bossert, M., Kestic, D. Stegplatten aus Polycarbonat - Potenziale und neue Anwendungen, URL: <a href="http://www.irbnet.de/daten/baufo/20128035619/F_2819_Abschlussbericht.pdf">http://www.irbnet.de/daten/baufo/20128035619/F_2819_Abschlussbericht.pdf</a> (abgerufen: 25.06.2015) Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012



Quelle	
<b>[El khouli et al., 2014]</b>	El khouli, S., John, V., Zeumer, M., Nachhaltig konstruieren - Vom Tragwerksentwurf bis zur Material: Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren, Institut für internationale Architekturdokumentation, München, 2014
<b>[EnEV, 2007]</b>	EnEV 2007 - Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik für Gebäude (Energieeinsparver- ordnung), Stand: 24.07.2007 in: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 34, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2007, URL: <a href="http://www.enev-onli-&lt;br/&gt;ne.net/enev_2007/enev2007_070726_bundesanzeiger leseversion.&lt;br/&gt;pdf">http://www.enev- onli- ne.net/enev_2007/enev2007_070726_bundesanzeiger leseversion. pdf</a> (abgerufen am 09.07.14)
<b>[EnEV, 2009]</b>	EnEV 2009 - Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverord- nung, Stand: 29.04.2009 in: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 23, ausgegeben zu Bonn am 30. April 2009, URL: <a href="http://www.enev-onli-&lt;br/&gt;ne.org/enev_2009_volltext/enev_2009_0_090430_bundesgesetzbl&lt;br/&gt;att_amtliche_fassung leseversion.pdf">http://www.enev- onli- ne.org/enev_2009_volltext/enev_2009_0_090430_bundesgesetzbl att_amtliche_fassung leseversion.pdf</a> (abgerufen am 29.07.13)
<b>[EnEV, 2014]</b>	EnEV 2014- Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinspar- verordnung, Stand: 18.11.2013 in: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 67, ausgegeben zu Bonn am 21. November 2013, URL: <a href="http://www.enev-onli-&lt;br/&gt;ne.com/enev_2014_volltext/enev_2014_verkuendung_bundesgese&lt;br/&gt;tzblatt_21.11.2013.pdf">http://www.enev- onli- ne.com/enev_2014_volltext/enev_2014_verkuendung_bundesgese tzblatt_21.11.2013.pdf</a> (abgerufen am 09.07.14)
<b>[EPD-DRW-2012111-D]</b>	Institut Bauen und Umwelt e.V. Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 Steinwolle-Dämmstoffe im niedrigen Rohdichtebereich, Deutsche ROCKWOOL Mineralwoll GmbH & Co. OHG, URL: <a href="http://download.rockwool.de/media/273625/wu_umwelt-&lt;br/&gt;produktdeklaration_epd_niedrige_rd.pdf">http://download.rockwool.de/media/273625/wu_umwelt- produktdeklaration_epd_niedrige_rd.pdf</a> (abgerufen: 06.07.2015) Institut Bauen und Umwelt e.V., Königswinter, 2012
<b>[EPD-DRW-2012121-D]</b>	Institut Bauen und Umwelt e.V. Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 Steinwolle-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich, Deutsche ROCKWOOL Mineralwoll GmbH & Co. OHG, URL: <a href="http://download.rockwool.de/media/273634/wu_umwelt-&lt;br/&gt;produktdeklaration_epd_mittlere_rd.pdf">http://download.rockwool.de/media/273634/wu_umwelt- produktdeklaration_epd_mittlere_rd.pdf</a> (abgerufen: 06.07.2015) Institut Bauen und Umwelt e.V., Königswinter, 2012

Quelle	
<b>[EPD-DRW-2012131-D]</b>	<p>Institut Bauen und Umwelt e.V.  Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804  Steinwolle-Dämmstoffe im hohen Rohdichtebereich, Deutsche  ROCKWOOL Mineralwoll GmbH &amp; Co. OHG,  URL: <a href="http://download.rockwool.de/media/273643/wu_umwelt-produktdeklaration_epd_hohe_rd.pdf">http://download.rockwool.de/media/273643/wu_umwelt-produktdeklaration_epd_hohe_rd.pdf</a> (abgerufen: 06.07.2015)  Institut Bauen und Umwelt e.V., Königswinter, 2012</p>
<b>[EPD-SDT-2012112-D]</b>	<p>Institut Bauen und Umwelt e.V.  Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804  climowool und SCHWENK Glaswolle, SCHWENK Dämmtechnik  GmbH &amp; Co. KG,  URL: <a href="http://bau-umwelt.de/download/CY1doo866X13b6a2a17foXeec/EPD_SDT_201212_D.pdf">http://bau-umwelt.de/download/CY1doo866X13b6a2a17foXeec/EPD_SDT_201212_D.pdf</a> (abgerufen: 06.07.2015)  Institut Bauen und Umwelt e.V., Königswinter, 2012</p>
<b>[Erhorn et al., 2013]</b>	<p>Erhorn, H., Hegner, H.-D.  Das Effizienzhaus Plus, ein baulicher Beitrag zur Energiewende,  in: Detail Green 2/2013, S. 84-91  Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München,  2013</p>
<b>[Erhorn et al., 2014]</b>	<p>Erhorn, H., Hauser, G., Bergmann, A. (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)  Wege zum Effizienzhaus Plus,  URL:  <a href="http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Kompetenzen/waermetechnik/energiekonzepte/wissenstransfer/2014-01_Broschuere_Wege-zum-Effizienzhaus-Plus.pdf">http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Kompetenzen/waermetechnik/energiekonzepte/wissenstransfer/2014-01_Broschuere_Wege-zum-Effizienzhaus-Plus.pdf</a> (abgerufen: 02.04.2014)  Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin, Januar 2014</p>
<b>[Erhorn et al., März 2013]</b>	<p>Erhorn, H., Bergmann, A., Beckert, M., Reiß, J. (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)  Messtechnische und energetische Validierung des BMVBS-Effizienzhaus Plus in Berlin,  URL:  <a href="http://www.bmvi.de/cae/servlet/contentblob/108560/publicationFile/70457/berlin-kurzbericht.pdf?gtp=79028_liste%253D4">http://www.bmvi.de/cae/servlet/contentblob/108560/publicationFile/70457/berlin-kurzbericht.pdf?gtp=79028_liste%253D4</a> (abgerufen: 16.07.2014)  Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart, März 2013</p>
<b>[Essel et al., 2012]</b>	<p>Essel, R., Carus, M.,  Meta-Analyse von Ökobilanzen für bio-basierte Polymere in der  Produktion von Proganic,  URL: <a href="http://www.nova-institut.de/download/Meta-LCA">http://www.nova-institut.de/download/Meta-LCA</a> (abgerufen: 22.01.2015)  nova--Institut GmbH, Hürth, 2012</p>

Quelle	
<b>[Eurogypsum, 2014a]</b>	Eurogypsum, Living with Gypsum: From Raw Material to Finished Products URL: <a href="http://www.eurogypsum.org/_uploads/dbsattachedfiles/livingwithgypsum.pdf">http://www.eurogypsum.org/_uploads/dbsattachedfiles/livingwithgypsum.pdf</a> (abgerufen: 21.08.2014, Eurogypsum, Brüssel, 2014
<b>[Eurogypsum, 2014b]</b>	Eurogypsum Secretary General URL: <a href="http://gypsumtogypsum.org/">http://gypsumtogypsum.org/</a> (abgerufen: 21.08.2014, Eurogypsum, Brüssel, 2014
<b>[Filleux et al., 2005]</b>	Filleux, C., Gütermann, A., Solare Luftheizsysteme - Konzepte Systemtechnik Planung, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2005
<b>[FNR, 2014]</b>	Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen 2014, URL: <a href="http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/gf/gfg_band_47_bauen_mit_nachwachsenden_rohstoffen_vo4.pdf">http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/gf/gfg_band_47_bauen_mit_nachwachsenden_rohstoffen_vo4.pdf</a> (abgerufen: 15.07.2014) Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow-Prüzen, 2014
<b>[Fraunhofer IBP, 2011]</b>	Fraunhofer Institut für Bauphysik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Wege zum Effizienzhaus-Plus, URL: <a href="http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Kompetenzen/waermetechnik/energiekonzepte/gebaeudekonzepte/2011_04-Effizienzhaus-PlusBarrierefrei3tcm45-97341.pdf">http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Kompetenzen/waermetechnik/energiekonzepte/gebaeudekonzepte/2011_04-Effizienzhaus-PlusBarrierefrei3tcm45-97341.pdf</a> (abgerufen: 16.07.2015) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2011
<b>[Fraunhofer IBP, 2012]</b>	Fraunhofer Institut für Bauphysik, Effizienzhaus-Plus Rechner, URL: <a href="http://www.effizienzhaus-plus-rechner.de/">http://www.effizienzhaus-plus-rechner.de/</a> (abgerufen: 16.07.2015) Fraunhofer IBP, Stuttgart, 2012
<b>[Fraunhofer IBP, Steckbrief 0, 2014]</b>	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Effizienzhaus-Plus mit Elektromobilität, Berlin (Steckbrief 0), URL: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Berlin/berlin_node.html</a> (abgerufen: 16.07.2014) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, Mai 2014
<b>[Fraunhofer IBP, Steckbrief 1, 2014]</b>	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Effizienzhaus-Plus Green[r]evolution Huf Haus (Steckbrief 1), URL: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Huf/huf_node.html</a> (abgerufen: 14.07.2014) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, Mai 2014

Quelle	
<b>[Fraunhofer IBP, Steckbrief 12, 2012]</b>	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Effizienzhaus-Plus Luxhaus frame (Steckbrief 12), URL: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Luxhaus/luxhaus_node.html</a> (abgerufen: 02.04.2014) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, November 2012
<b>[Fraunhofer IBP, Steckbrief 2, 2012]</b>	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Effizienzhaus-Plus Plan 550 Schwörer Haus KG (Steckbrief 2), URL: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schworer/schworer_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Schworer/schworer_node.html</a> (abgerufen: 02.04.2014) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, September 2012
<b>[Fraunhofer IBP, Steckbrief 3, 2013]</b>	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Effizienzhaus-Plus Concept-M Bien-Zenker (Steckbrief 3), URL: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Bien-Zenker/bien-zenker_node.html</a> (abgerufen: 02.04.2014) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, April 2013
<b>[Fraunhofer IBP, Steckbrief 4, 2014]</b>	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Effizienzhaus-Plus Generation 5.0 Weber Haus (Steckbrief 4), URL: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/WeberHaus/weberhaus_node.html</a> (abgerufen: 14.07.2014) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, Mai 2014
<b>[Fraunhofer IBP, Steckbrief 5, 2012]</b>	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Effizienzhaus-Plus VIO 400 Finger Haus GmbH (Steckbrief 5), URL: <a href="http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger_node.html">http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/Finger/finger_node.html</a> (abgerufen: 02.04.2014) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, November 2012
<b>[Fthenakis, 2011]</b>	Fthenakis, V., Kim, H.C., Frischknecht, R., Raugei, M., Sinha, P., Stucki, M., Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, URL: <a href="https://www.bnl.gov/pv/files/pdf/226_Task12_LifeCycle_Inventories.pdf">https://www.bnl.gov/pv/files/pdf/226_Task12_LifeCycle_Inventories.pdf</a> (abgerufen: 07.01.2014) IEA Photovoltaic Power Systems Programme, St. Ursen, CH, 2011
<b>[Gough, 1982]</b>	Gough, M.C.B., Modelling heat flow in buildings: an eigenfunction approach. PhD dissertation, University of Cambridge, Cambridge, 1982
<b>[Graubner et al., 2008]</b>	Graubner, C.-A., Knauff A. Ökobilanzstudie Gegenüberstellung Massivhaus / Holzbauweise, TU Darmstadt, Institut für Massivbau, Darmstadt, 2008

	Quelle
[Großklos, 2014]	Großklos, M., Kumulierter Energieaufwand und CO <sub>2</sub> - Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und –versorgungen, URL: <a href="http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/kea.pdf">http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/kea.pdf</a> (abgerufen: 28.01.2015) Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2014
[Gugerli et al., 2009]	Gugerli, H., Frischknecht, R., Kasser, U., Lenzlinger, M. Graue Energie im Fokus, in: Faktor kompakt 01, URL: <a href="http://www.faktor.ch/faktor-kompakt.html?file=files/pdf/graue_energie.pdf">http://www.faktor.ch/faktor-kompakt.html?file=files/pdf/graue_energie.pdf</a> (abgerufen: 08.07.2014) Faktor Verlag, Zürich, 2009
[Gärtner et al., 2013]	Gärtner, S., Hienz, G., Keller, H., Müller-Lindenlauf, M., Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich, URL: <a href="http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU%202013_Umweltbewertung%20Holzkaskadennutzung.pdf">http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU%202013_Umweltbewertung%20Holzkaskadennutzung.pdf</a> (abgerufen: 08.07.2014) ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, 2013
[Hafner et al., 2012a]	Hafner, A., Ott, S., Winter, S., Herausforderung Ökologie und Nachhaltigkeitsbewertung - Ökologische Betrachtung von Holzbauten, in: Holzbau - die neu quadriga, 2/2012 Verlag Kastner, Wolnzach, 2012
[Hafner et al., 2012b]	Hafner, A., Ott, S., Winter, S., Holzbauten Nutzung und Lebenszyklus - Ökobilanzen für Bauwerke: Standards und praktische Anwendung in: Holzbau - die neu quadriga, 3/2012 Verlag Kastner, Wolnzach, 2012
[Hagel, 2012]	Hagel, G. (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) Zukunft bauen, Das Magazin der Forschungsinitiative Zukunft Bau 2013 URL: <a href="http://www.forschungsinitiative.de/publikationen/publikation/zukunft-bauen-das-magazin-der-forschungsinitiative-zukunft-bau-2013/">http://www.forschungsinitiative.de/publikationen/publikation/zukunft-bauen-das-magazin-der-forschungsinitiative-zukunft-bau-2013/</a> (abgerufen 02.04.2014) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, Dezember 2012
[Hahn et al., 2014]	Hahn, J., Schardt, M., Schulmeyer, F., Mergler, F., Der Energieinhalt von Holz - LWF Merkblatt 12 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, URL: <a href="http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb-12-energiegehalt-holz.pdf">http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb-12-energiegehalt-holz.pdf</a> (abgerufen: 16.09.2015) Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, 2014

Quelle	
<b>[Hauser et al., 2000]</b>	Hauser, G., Heibel, B., Durchströmte Vorhangfassaden zur Vorwärmung der Zuluft mechanischer Lüftungsanlagen - Zuluftfassade in: Bauphysik der Aussenwände Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2000
<b>[Held, 2010]</b>	Held, M., Photovoltaik aus Sicht der Ökobilanz, Clusterforum „Recycling in der Photovoltaik“, Bauzentrum München, 1. Dezember.2010 URL: <a href="http://www.lbp-gabi.de/refbase/files/36_Held2010.pdf">http://www.lbp-gabi.de/refbase/files/36_Held2010.pdf</a> (abgerufen: 06.01.2015) Fraunhofer IBP, Echterdingen, 2010
<b>[Held, 2013]</b>	Held, M., LCA screening of a recycling process for silicon based PV modules, PV Cycle Conference, Rome 28. Feb. 2013 URL: <a href="http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Fraunhofer_3rd-RC_2013.pdf">http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Fraunhofer_3rd-RC_2013.pdf</a> (abgerufen: 06.01.2015) Fraunhofer IBP, Echterdingen, 2013
<b>[Hildebrand, 2014]</b>	Hildebrand, L. Strategic investment of embodied energy during the architectural planning process, Delft University of Technology, Delft, 2014
<b>[HOAI, 2013]</b>	Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI), Stand: 10.07.2013 in: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 37, ausgegeben zu Bonn am 16. Juli 2013 URL: <a href="http://www.bgbl.de/Xaver/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI#_Bundesanzeiger_BGBI_%2F%2F*[%24oattr_id%3D%27bgbl113037.pdf%27]__1383052279396">http://www.bgbl.de/Xaver/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI#_Bundesanzeiger_BGBI_%2F%2F*[%24oattr_id%3D%27bgbl113037.pdf%27]__1383052279396</a> (abgerufen am 29.10.13)
<b>[Holzabsatzfonds, 2009]</b>	Holzabsatzfonds - Absatzförderungsfonds der deutschen Forst- und Holzwirtschaft, Holzrahmenbau, URL: <a href="http://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/1_Holzbau_Handbuch/R01_To1_F07%20Holzrahmenbau_2009.pdf">http://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/1_Holzbau_Handbuch/R01_To1_F07%20Holzrahmenbau_2009.pdf</a> (abgerufen: 13.08.2014) Holzabsatzfonds, Bonn, 2009
<b>[Horn, 2003]</b>	Horn, G., Wärmebrücken bei Holz-Stegträgern - Widersprüche zwischen Normung und Forschung, URL: <a href="http://www.quadrige-news.de/www.quadrige-news.de/index.php?StoryID=1478">http://www.quadrige-news.de/www.quadrige-news.de/index.php?StoryID=1478</a> (abgerufen: 21.08.2014) in: Holzbau - die neu quadrige, 3/2003 Verlag Kastner, Wolnzach, 2003

Quelle	
<b>[Huber, 2000]</b>	Huber, J., Industrielle Ökologie. Konsistenz, Effizienz und Suffizienz in zyklusanalytischer Betrachtung, in: Global Change - Globaler Wandel. Ursachenkomplexe und Lösungsansätze, Simonis, U.E., Kreibich, R., Berliner Wissenschafts-Verlag, Berlin, 2000
<b>[Icha, 2013a]</b>	Icha, P., Climate Change 07/2013: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012, URL: <a href="https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/climate_change_07_2013_icha_co2emissionen_des_dt_strommixes_webfassung_barrierefrei.pdf">https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/climate_change_07_2013_icha_co2emissionen_des_dt_strommixes_webfassung_barrierefrei.pdf</a> (abgerufen: 06.01.2013) Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2013
<b>[Icha, 2013b]</b>	Icha, P., Climate Change 15/2013: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012, URL: <a href="https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2012">https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2012</a> (abgerufen: 06.01.2013) Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2013
<b>[Isopp, 2009]</b>	Isopp, A. Zu kurz gedacht: Eine Ökobilanz der Dämmstoffe, in: zuschnitt 34.2009 URL: <a href="http://www.proholz.at/fileadmin/flippingbooks/zuschnitt34/files/assets/common/downloads/publication.pdf">http://www.proholz.at/fileadmin/flippingbooks/zuschnitt34/files/assets/common/downloads/publication.pdf</a> (abgerufen: 12.01.2015) proHolz Austria, Wien, 2009
<b>[Kaufmann et al., 2011]</b>	Kaufmann, H., Lubenau, C., Weber-Blaschke, G., Richter, K., König, H., Lattke, F., Bauen mit Holz – Wege in die Zukunft, URL: <a href="https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-29239.pdf">https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-29239.pdf</a> (abgerufen: 27.05.2015) Technische Universität München, München, 2011
<b>[Kehl, 2014]</b>	Kehl, D., Anforderungen an die Luftdichtheit, Kleine Wärmeverluste = hoher Feuchteschutz, in: Holzbau - die neu quadriga, 6/2014 Verlag Kastner, Wolnzach, 2014
<b>[Kempkens, 2013]</b>	Kempkens, W., Energiewende: Batterien verhaseln Klimabilanz von Ökostrom, 18.09.2013 URL: <a href="http://green.wiwo.de/energiewende-energiespeicher-verhaseln-klimabilanz-von-oekostrom/">http://green.wiwo.de/energiewende-energiespeicher-verhaseln-klimabilanz-von-oekostrom/</a> (abgerufen: 11.12.2014) WirtschaftsWoche Online - Handelsblatt GmbH, Düsseldorf, 2013

Quelle	
<b>[Klein et al., 2012]</b>	Klein, D., Schulz, C., LWF Merkblatt 27: Kohlenstoffspeicherung von Bäumen, URL: <a href="http://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/lwf_merkblatt/022680/index.php">http://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/lwf_merkblatt/022680/index.php</a> (abgerufen: 19.01.2015), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2012
<b>[Klöpffer et al., 2009]</b>	Klöpffer, W., Grahl, B., Ökobilanz (LCA) - Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf, Wiley-VCH, Weinheim, 2009
<b>[Knorz et al., 2010]</b>	Knorz, M., Tremel, S. "Technologie und Verwertungslinien von Holz" (TVH) - Holzwerkstoffe, URL: <a href="https://campus.tum.de/tumonline/LV_TX.wbDisplayTerminDoc?pTerminDocNr=3301">https://campus.tum.de/tumonline/LV_TX.wbDisplayTerminDoc?pTerminDocNr=3301</a> (abgerufen: 08.07.2014) TU München - HFM Holzforschung München, München, 2010
<b>[Koch-Jugl et al., 2014]</b>	Koch-Jugl, J., Beer, I., Bolland, T., Dettling, F., Stolzenberg, H.-C., Tietjen, L., Wurbs, J., Debiak, M., Hexabromcyclododecan (HBCD) - Antworten auf häufig gestellte Fragen, URL: <a href="http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/faq_hbcd.pdf">http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/faq_hbcd.pdf</a> (abgerufen: 17.12.2014) Umweltbundesamt - Fachgebiet IV 1.1 - Internationales Chemikalienmanagement, Dessau-Roßlau, 2014
<b>[Krauß et al., 2014]</b>	Krauß, O., Werner, T., Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich, VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 8, URL: <a href="http://www.ressourcen-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-08-Recycling-im-Baubereich.pdf">http://www.ressourcen-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-08-Recycling-im-Baubereich.pdf</a> (abgerufen: 22.01.2014) VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, 2014
<b>[Kreißig et al., 2012]</b>	Kreißig, J., Binder, M. Methodische Grundlagen - Ökobilanzbasierte Umweltindikatoren im Bauwesen, URL: <a href="http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/oekobaudat/pdf/Methodische_Grundlagen__09.08.2012_.pdf">http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/oekobaudat/pdf/Methodische_Grundlagen__09.08.2012_.pdf</a> (abgerufen: 09.07.2014) PE International, Leinfelden-Echterdingen, 2012
<b>[Kuittinen et al., 2013]</b>	Kuittinen, M., Ludvig, A., Weiss, G., Wood in carbon efficient construction - Tools, methods and applications, URL: <a href="http://www.eco2wood.com/2">http://www.eco2wood.com/2</a> (abgerufen: 07.08.2014) CEI-Bois, Brüssel, 2013



Quelle	
<b>[Köhl et al., 2011]</b>	Köhl, M., Kenter, B., Hildebrandt, R., Olschofsky, K., Köhler, R., Rötzer, T., Mette, T., Pretzsch, H., Rüter, S., Köthke, M., Dieter, M., Abiy, M., Makeschin, F., Nutzungsverzicht oder Holznutzung? Auswirkungen auf die CO <sub>2</sub> -Bilanz im langfristigen Vergleich, in: AFZ-DerWald, 15/2011 Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, Hannover, 2011
<b>[Köhnke, 2006]</b>	Köhnke, E., Zu tief Luft geholt? Wann sind Leckagen der Luftdichtung ein Mangel?, in: Holzbau - die neu quadriga, 3/2006 Verlag Kastner, Wolnzach, 2006
<b>[König et al., 2007]</b>	König, H., Linden, W., Erhardt, O., Sachbilanzdaten für den Lebenszyklus für Bauprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen, URL: <a href="http://www.katalyse.de/wp-content/uploads/2013/08/2004abschlussbericht-sabina.pdf">http://www.katalyse.de/wp-content/uploads/2013/08/2004abschlussbericht-sabina.pdf</a> (abgerufen: 21.08.2014) Ascona Gesellschaft für ökologische Projekte, Gröbenzell, 2007
<b>[König et al., 2009]</b>	König, H., Kohler, N., Kreißig, J., Lützkendorf, T. Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung - Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge, Institut für internationale Architekturdokumentation, München, 2009
<b>[König, 2012]</b>	König, H., Bauen mit Holz ist aktiver Klimaschutz - Holzgebäude im Vergleich und das Nachwuchspotential, in: Holzbau - die neu quadriga, 3/2012 Verlag Kastner, Wolnzach, 2012
<b>[Künzel et al., 2010]</b>	Künzel, H., Zirkelbach, D., Trocknungsreserven schaffen, Einfluss des Feuchteintrags aus Dampfkonvektion, in: Holzbau - die neu quadriga, 1/2010 Verlag Kastner, Wolnzach, 2010
<b>[Küttlinger et al., 2000]</b>	Küttlinger, G., Steinmetz, D., Fritzen, K., Holzrahmenbau: Bewährtes Hausbau-System, 3. überarbeitete Auflage, Bruderverlag, Karlsruhe, 2000
<b>[Liersch, 1993]</b>	Liersch, G., Untersuchung des Energietransportes in einer konvektiv hinterlüfteten transparenten Wärmedämmfassade, VDI Verlag, Düsseldorf, 1993
<b>[Lignatur, 2012]</b>	Lignatur AG easy - Die leichte Holzdecke für den cleveren Zimmermann, URL: <a href="http://www.lignatur.ch/fileadmin/ablage/downloads/blaetterkatalog-easy/page.pdf">http://www.lignatur.ch/fileadmin/ablage/downloads/blaetterkatalog-easy/page.pdf</a> (abgerufen: 29.07.2014) Lignatur AG, Waldstatt - CH, 2012

Quelle	
<b>[Lignotrend, 2013]</b>	Lignotrend Produktions GmbH uni*versa Trennwandsystem - Technische Daten, Ausgabe 2013-II, Stand 29.04.2013 Lignotrend Produktions GmbH, Weilheim-Bannholz, 2013
<b>[Lignotrend, 2014]</b>	Lignotrend Produktions GmbH U*psi - Dämmständer - Technische Daten, Ausgabe 2014-II, Stand 22.04.2014 URL: <a href="http://www.lignotrend.de/uploads/tx_userprodukte/2014-04-22_TD%20Upsi_2014-II_D_k.pdf">http://www.lignotrend.de/uploads/tx_userprodukte/2014-04-22_TD%20Upsi_2014-II_D_k.pdf</a> (abgerufen: 19.08.2014) Lignotrend Produktions GmbH, Weilheim-Bannholz, 2014
<b>[M-HFHolzR, 2004]</b>	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise, URL: <a href="http://www.bauministerkonferenz.de/IndexSearch.aspx?method=get&amp;File=b8a84yy3y8b9848o8abb4yb8y9ya8ayybgy884b94ya2aoa1a2aoa3a44b8ob8yoovulloanefvzuj1tt11culyq">http://www.bauministerkonferenz.de/IndexSearch.aspx?method=get&amp;File=b8a84yy3y8b9848o8abb4yb8y9ya8ayybgy884b94ya2aoa1a2aoa3a44b8ob8yoovulloanefvzuj1tt11culyq</a> Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (Bauministerkonferenz), Berlin, 2004
<b>[Marutzky et al., 2009]</b>	Marutzky, R., Schwab, H., Informationsdienst Holz spezial: Span- und Faserplatten, OSB, Mai 2009, URL: <a href="http://www.wki.fraunhofer.de/content/dam/wki/de/documents/publicat/spezial_Span-Faser-OSB_2009-04.pdf">http://www.wki.fraunhofer.de/content/dam/wki/de/documents/publicat/spezial_Span-Faser-OSB_2009-04.pdf</a> (abgerufen: 13.08.2014), Fraunhofer-Institut für Holzforschung / Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e. V. (VHI), Braunschweig / Gießen, 2009
<b>[Mayer et al., 2013]</b>	Mayer, H.-G., Stemmermann, P., Neumann, T. Celitement – Entwicklung eines nachhaltigen Zementes, in: Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen URL: <a href="http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-n-2581499.pdf">http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-n-2581499.pdf</a> (abgerufen: 08.07.2014) Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013
<b>[MBO, 2012]</b>	Musterbauordnung URL: <a href="http://www.bauministerkonferenz.de/IndexSearch.aspx?method=get&amp;File=b8a84yy3y8b9848o8abb4yb8y9ya8ayybgy884b94ya2aoa14849a3abaaa04b8ob8yoovulloanefvzuj1tt11culyq">http://www.bauministerkonferenz.de/IndexSearch.aspx?method=get&amp;File=b8a84yy3y8b9848o8abb4yb8y9ya8ayybgy884b94ya2aoa14849a3abaaa04b8ob8yoovulloanefvzuj1tt11culyq</a> (abgerufen: 30.07.2014), Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (Bauministerkonferenz), Berlin, 2012

	Quelle
<b>[Memmler et al, 2014]</b>	Memmler, M., Schrempf, L., Hermann, S., Schneider, S., Pabst, J., Dreher, M., Climate Change 29/2014: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013, URL: <a href="https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger-2013">https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger-2013</a> (abgerufen: 06.01.2013) Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2014
<b>[Metsä Wood, 2012]</b>	Metsä Wood Deutschland GmbH, Finnwall Holz-Rahmensystem Produktinformation, Stand Juli 2012 Metsä Wood Deutschland GmbH, Bremen, 2012
<b>[Meyer, 2001]</b>	Meyer, S., Wirkung eines hybriden Doppelfassadensystems auf die Energiebilanz und das Raumklima der dahinterliegenden Räume, URL: <a href="http://d-nb.info/962693219/34">http://d-nb.info/962693219/34</a> (abgerufen: 06.01.2015) Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Cottbus, 2001
<b>[Michalsky, 1988]</b>	Michalsky, J.J., The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050), in: Solar Energy Vol. 40, No.3, Elsevier Ltd., New York, 1988
<b>[Moetzl, 2005]</b>	Mötzl, H., Ökologische Bewertung von Holzwerkstoffen, URL: <a href="http://www.forum-holzbau.com/pdf/moetzl_oekologische.pdf">http://www.forum-holzbau.com/pdf/moetzl_oekologische.pdf</a> (abgerufen: 21.08.2014) in Tagungsband zum 3. Internationalen Branchenseminar für Frauen der Holz- und Bauwirtschaft Hochschule für Architektur, Bau und Holz (HSB), Biel, 2005
<b>[Mohrmann, 2007]</b>	Mohrmann, M., Feuchteschäden beim Flachdach, in: Holzbau - die neu quadriga, 3/2007 Verlag Kastner, Wolnzach, 2007
<b>[Morhart, 2014]</b>	Morhart, Alexander, Zurück auf Los beim Effizienzhaus Plus in Berlin, URL: <a href="http://www.enbausa.de/daemmung-fassade/aktuelles/artikel/zurueck-auf-los-beim-effizienzhaus-plus-in-berlin-3933.html">http://www.enbausa.de/daemmung-fassade/aktuelles/artikel/zurueck-auf-los-beim-effizienzhaus-plus-in-berlin-3933.html</a> (abgerufen 16.07.2014) Artikel vom 24.04.2014
<b>[Mösle et al., 2015]</b>	Mösle, P., Oshiro Gama, R., Haun, T., Fauth, J., Kreissig, J., Kieselbach, S., Schöll, S., Sustainability assessment of windows and curtain walls, Drees & Sommer Advanced Building Technologies GmbH, Stuttgart, 2015

Quelle	
<b>[Müller et al., 2007]</b>	Müller, M., Schlüter, C., Fehrmann, R., Voss, K., Morhenne, J., Engelmann, P., Wallbaum, Kaiser, C., Ökologische / ökonomische Bewertung zweier Fassadenkonzepte - Glasfassade versus Kunststofffassade, URL: <a href="http://www.acms-architekten.de/fileadmin/112_REB_DBU-Endbericht.pdf">http://www.acms-architekten.de/fileadmin/112_REB_DBU-Endbericht.pdf</a> (abgerufen: 07.01.2015) Architektur Contor Müller Schlüter, Wuppertal, 2007
<b>[NFA, 2015]</b>	Global Footprint Network, Ecological Footprint and Biocapacity 2011, in: NFA Public Data Package, URL: <a href="http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/public_data_package">http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/public_data_package</a> (abgerufen: 16.09.2015) Global Footprint Network, Oakland/Genf/Brüssel, 2015
<b>[Orme et al., 1994]</b>	Orme M., Liddament M., Wilson A., Tecnical Note AIVC 44, An Analysis and Data Summary of the AIVCs Numerical Database, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1994
<b>[Otto, 2007]</b>	Otto, S., Bedeutung und Verwendung der Begriffe nachhaltige Entwicklung und Nachhaltigkeit. Eine empirische Studie, URL: <a href="http://www.jacobs-university.de/phd/files/1185371576.pdf">http://www.jacobs-university.de/phd/files/1185371576.pdf</a> (abgerufen: 12.08.2014) Jacobs University Bremen, Bremen, 2007
<b>[Paschko et al., 2012]</b>	Paschko, K., Drewer, A., Ökologie von Dämmstoffen, in: Der Bausachverständige, Aug/2012 Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012
<b>[Passivhaus Institut, 2013]</b>	Passivhaus Institut, Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP), URL: <a href="http://www.passiv.de/de/04_phpp/04_phpp.htm#phpp8">http://www.passiv.de/de/04_phpp/04_phpp.htm#phpp8</a> (ab- gerufen: 29.10.2013) Passivhaus Institut, Darmstadt, 2013
<b>[Passivhaus Institut, 2015]</b>	Passivhaus Institut, Kriterien für den Passivhaus-, EnerPHit- und PHI-Energiesparhaus- Standard, URL: <a href="http://passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_gebaeude_de.pdf">http://passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_gebaeude_</a> <a href="http://passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_gebaeude_de.pdf">de.pdf</a> (abgerufen: 10.09.2015), Passivhaus Institut, Darmstadt, 2015
<b>[Peper et al, 2010]</b>	Peper, S., Schnieders, J., Ochs, F., Feist, W. Messtechnische Untersuchung und wissenschaftliche Auswertung zur saisonalen Wärmespeicherung über Sole-Register unter der Bodenplatte eines Passivhauses mit Dämmschürze, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2010

Quelle	
<b>[Peters, 2010]</b>	Peters, H. Umwelt-Produktdeklarationen in der nationalen und internationalen Praxis, in: Detail Green 1/2010, S. 74-77 Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2010
<b>[Pfeifer et al., 2012]</b>	Pfeifer, G., Tersluisen, A., Untersuchungen zum energetischen Verhalten natürlich klimatisierter Gebäude, untersucht an den Beispielen Energieraum / Speichermasse und Luftkollektor / Speichermasse, Technische Universität Darmstadt / Technische Universität Kaiserslautern, Darmstadt / Kaiserslautern, 2012
<b>[Püschel, et al., 2013]</b>	Püschel, D., Teller, M. Umweltgerechte Baustoffe - Graue Energie und Nachhaltigkeit von Gebäuden, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013
<b>[Quasten et al., 2014]</b>	Quasten, G., Wagner, A., Stölzle, R., Dutt, W., Systematisierung und Optimierung der Steuerungsmöglichkeiten mehrschaliger, thermisch aktivierter Fassadensanierungen von Nichtwohngebäuden Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2014
<b>[Rausch et al., 2012]</b>	Rausch, L., Fritsche, U., LCA-EE: Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe, URL: <a href="http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/bio/oeko/2012_LCA-EE-BMU.pdf">http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/bio/oeko/2012_LCA-EE-BMU.pdf</a> (abgerufen: 06.01.2014) INAS - Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH, Darmstadt, 2012
<b>[Rausch et al., 2013]</b>	Rausch, L., Fritsche, U., LCA-EE: Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe, Beitrag zu Workshop „Aktuelle Entwicklungen in der Statistik und Emissionsbilanzierung der erneuerbaren Energien“ URL: <a href="http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/5agee-stat-uba-workshop-2013_rausch.pdf">http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/5agee-stat-uba-workshop-2013_rausch.pdf</a> (abgerufen: 06.01.2014) IINAS - Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH, Darmstadt, 2013
<b>[Rüter et al., 2012]</b>	Rüter, S., Diederichs, S. Ökobilanz Basisdaten für Bauprodukte aus Holz Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie Nr. 2012/1, URL: <a href="http://literatur.vti.bund.de/digbib_extern/dno50490.pdf">http://literatur.vti.bund.de/digbib_extern/dno50490.pdf</a> (abgerufen: 08.07.2013) Johan Heinrich von Thünen Institut, Hamburg, 2012

Quelle	
<b>[Rüter, 2012]</b>	Rüter, S., Kohlenstoffspeicherung in Holz - Die verzögerte Freisetzung von biogenem CO <sub>2</sub> als Beitrag zum Klimaschutz, in: Holzbau - die neu quadriga, 2/2012 Verlag Kastner, Wolnzach, 2012
<b>[Rüter, 2013]</b>	Rüter, S., Der Umweltbeitrag der Holznutzung, in: Urbaner Holzbau - Chancen und Potenziale für die Stadt DOM publishers, Berlin, 2013
<b>[Salthammer et al., 2013]</b>	Salthammer, T., Marutzky, R. Informationsdienst Holz spezial - Bauen und Leben mit Holz, März 2013 DHWDR Deutscher Holzwirtschaftsrat e.V., Berlin, 2013
<b>[Schulze et al., 2013]</b>	Dr. Schulze, E., Wilbrandt, A., Dietel, K., Dr. Oesterreich, D. Sozialwissenschaftliches Monitoring des "Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität", URL: <a href="http://www.bis-berlin.de/downloads/Endbericht_EHPlus.pdf">http://www.bis-berlin.de/downloads/Endbericht_EHPlus.pdf</a> (abgerufen: 16.07.2014) Berliner Institut für Sozialforschung, Berlin, August 2013
<b>[Sobek et al., 2012]</b>	Werner Sobek Stuttgart, Werner Sobek Green Technologies, Universität Stuttgart / Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität Technische Informationen und Details, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, Januar 2012
<b>[Sprengard et. al., 2013]</b>	Sprengard, C., Treml, S., Holm, A., Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, Gräfeling, 2013
<b>[Steico, 2014]</b>	STEICO SE Aussteifende Holzfaser-Dämmplatten im STEICO Bausystem, URL: <a href="http://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Aussteifung_stiffening/STEICO_aussteifende_Daemmlatte_Verarbeitung_de_i.pdf">http://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/German/Aussteifung_stiffening/STEICO_aussteifende_Daemmlatte_Verarbeitung_de_i.pdf</a> (abgerufen: 19.08.2014) STEICO SE, Feldkirchen, 2014
<b>[Stein et al., 2014]</b>	René Stein, Norman Werther, et al. Holz trifft Zement, Sicherheit im Holzbau mit Eternit URL: <a href="http://www.eternit.de/presse/holz-trifft-zement-neue-dokumentation-f-r-holzbau-profis-intelligente-eternit-l-sungen-f-r-den-holzbau.html">http://www.eternit.de/presse/holz-trifft-zement-neue-dokumentation-f-r-holzbau-profis-intelligente-eternit-l-sungen-f-r-den-holzbau.html</a> (abgerufen: 29.07.2014) Eternit AG, Heidelberg, 2014

Quelle	
<b>[Stephenson et al., 1971]</b>	Stephenson, D.G., Mitalas, G.P., Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layer slabs, in: ASHRAE Trans, Vol. 77, II ASHRAE, Atlanta, 1971
<b>[Stiftung Warentest, 2002]</b>	Stiftung Warentest Wassersparende Armaturen: Trend zur Mitte, in: test 07/2002 URL: <a href="http://www.test.de/Wassersparende-Armaturen-Trend-zur-Mitte-1039841-2039841/">http://www.test.de/Wassersparende-Armaturen-Trend-zur-Mitte-1039841-2039841/</a> (abgerufen: 29.07.2014) Stiftung Warentest, Berlin, 2002
<b>[Stucki et al, 2012]</b>	Stucki, M., Flury, K., Frischknecht, R., Warum Solarstrom nicht klimaneutral aber trotzdem umweltfreundlich ist – aktuelle Ökobilanzen zu Fotovoltaik, URL: <a href="http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/stucki-2012-Oekobilanzen-Fotovoltaik-Folien-Skript.pdf">http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/stucki-2012-Oekobilanzen-Fotovoltaik-Folien-Skript.pdf</a> (abgerufen: 06.01.2013) ESU-services GmbH, Uster, CH, 2012
<b>[Tersluisen et al., 2013]</b>	Tersluisen, A., Nasrollahi, K., Untersuchung zur rechnerischen Bilanzierung solarer Luftheizsysteme und -konstruktionen, URL: <a href="http://www.uni-kl.de/hauskybernetik/forschungsprojekte_bilanzierung.html">http://www.uni-kl.de/hauskybernetik/forschungsprojekte_bilanzierung.html</a> (abgerufen: 30.10.2013) Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Architektur, Kaiserslautern, 2013
<b>[Umweltbundesamt, 2015]</b>	Umweltbundesamt Der CO <sub>2</sub> Rechner, URL: <a href="http://uba.klimaktiv-co2-rechner.de/de_DE/popup/start/">http://uba.klimaktiv-co2-rechner.de/de_DE/popup/start/</a> (abgerufen: 16.09.2015) Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2015
<b>[VFF et al., 2014]</b>	Verband Fenster + Fassade, Bundesverband Flachglas e.V., Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern - Aktualisierung März 2014 der Studie „Im neuen Licht: Energetische Modernisierung von alten Fenstern“, URL: <a href="http://www.die-hauswende.de/fileadmin/user_upload/03-2014_Studie_Mehr_Energie_sparen_mit_neuen_Fenstern.pdf">http://www.die-hauswende.de/fileadmin/user_upload/03-2014_Studie_Mehr_Energie_sparen_mit_neuen_Fenstern.pdf</a> (abgerufen: 24.05.2015) Verband Fenster + Fassade, Frankfurt, 2014
<b>[von Houwald et al., 2012]</b>	von Houwald, B., Wortner, P., Kreißig, J., Peters, H., Entwicklung von Umweltproduktdeklarationen für transparente Bauelemente – Fenster und Glas – für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, URL: <a href="http://www.irbnet.de/daten/rswb/12079018181.pdf">http://www.irbnet.de/daten/rswb/12079018181.pdf</a> (abgerufen: 17.03.2015) Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012

	Quelle
<b>[WBGU, 2009]</b>	wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderungen, Der WBGU-Budgetansatz, URL: <a href="http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/factsheets/fs2009-fs3/wbgu_factsheet_3.pdf">http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/factsheets/fs2009-fs3/wbgu_factsheet_3.pdf</a> (abgerufen: 16.09.2015) wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderungen, Berlin, 2009
<b>[Weber Haus, 2014]</b>	Weber Haus Bau- und Ausstattungsbeschreibung, URL: <a href="http://www.weberhaus.de/downloads/">http://www.weberhaus.de/downloads/</a> (abgerufen: 02.04.2014) Deutschland, 01.02.2014
<b>[WECOBIS, 2015]</b>	WECOBIS - Ökologisches Baustoffinformationssystem, URL: <a href="http://www.wecobis.de">http://www.wecobis.de</a> (abgerufen: 13.01.2015) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin/München, 2015
<b>[Weeber et al., 2010]</b>	Weeber, R., Küchel, L., Baumann, d., Weeber, h. Ein- und Zweifamilienhäuser im Lebens- und Nutzungszyklus Anpassung im Bestand, anpassungsfähiger Neubau, Konzepte, Verfahren, Produkte, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2010
<b>[Wegener et al., 1997]</b>	Wegener, G., Zimmer, B., Frühwald, A., Scharai-Rad, M. Ökobilanzen Holz - Fakten lesen, verstehen und Handeln, Absatzförderungsfonds der deutschen Forst- und Holzwirtschaft, Bonn, 1997
<b>[Weiß et al., 2001]</b>	Weiß, R.-G., Paproth, O. Leitfaden ökologische Dämmstoffe - Wärmedämmung für Wohn- gesundheit und Energieeinsparung, URL: <a href="https://www.nabu.de/downloads/studien/leitfadendaemm.pdf">https://www.nabu.de/downloads/studien/leitfadendaemm.pdf</a> (abgerufen: 08.07.2014) Naturschutzbund Deutschland e.V., Bonn, 2001
<b>[Werther et al., 2014]</b>	Norman Werther, Stefan Winter Klimatische Verhältnisse in Kriechkellern - Forschungsergebnisse und Praxisregeln URL: <a href="http://www.baufachinformation.de/thema/Kriechkeller">http://www.baufachinformation.de/thema/Kriechkeller</a> (ab- gerufen: 29.07.2014) TU München, München, 2014
<b>[wiki: Agile Software- entwicklung]</b>	Seite "Agile Softwareentwicklung" in: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 16. Ok- tober 2013, 10:54 UTC, URL: <a href="http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Agile_Softwareentwicklung&amp;oldid=123502434">http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Agile_Softwareentwicl ung&amp;oldid=123502434</a> (abgerufen: 29.10.2013)

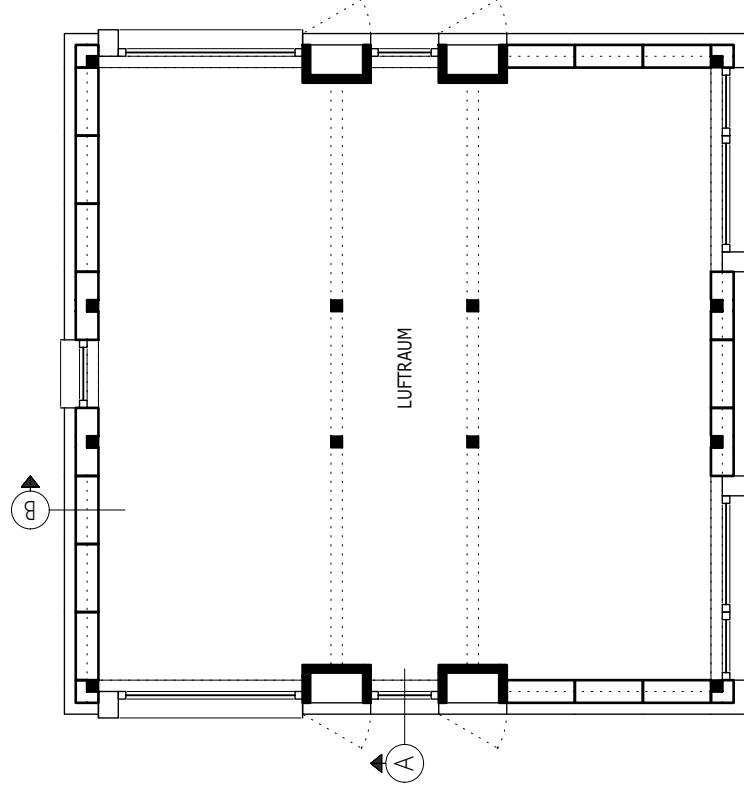


Quelle	
<b>[wiki: Biokapazität]</b>	Seite „Biokapazität“, in: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 29. Mai 2015, URL: <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Biokapazit%C3%A4t">https://de.wikipedia.org/wiki/Biokapazit%C3%A4t</a> (abgerufen: 16.09.2015)
<b>[wiki: CO2-Bilanz]</b>	Seite „CO2-Bilanz“, in: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 29. Mai 2015, URL: <a href="https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=CO2-Bilanz&amp;oldid=142589034">https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=CO2-Bilanz&amp;oldid=142589034</a> (abgerufen: 16.09.2015)
<b>[wiki: Cradle to Cradle]</b>	Seite „Cradle to Cradle“, in: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 7. März 2013, URL: <a href="http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Cradle_to_Cradle&amp;oldid=115093822">http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Cradle_to_Cradle&amp;oldid=115093822</a> (abgerufen: 30.10.2013)
<b>[wiki: Ökologieorientierte Betriebswirtschaftslehre]</b>	Seite „Ökologieorientierte Betriebswirtschaftslehre“, in: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 2. Februar 2014, URL: <a href="http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%96kologieorientierte_Betriebswirtschaftslehre&amp;oldid=127148807">http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%96kologieorientierte_Betriebswirtschaftslehre&amp;oldid=127148807</a> (abgerufen: 12.08.2014)
<b>[wiki: Ökologischer Fußabdruck]</b>	Seite „Ökologischer Fußabdruck“, in: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 29. Mai 2015, URL: <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96kologischer_Fu%C3%9Fabdruck">https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96kologischer_Fu%C3%9Fabdruck</a> (abgerufen: 16.09.2015)
<b>[Winter, 2013]</b>	Winter, S., Berechnungen zur Nachhaltigkeit - Entwicklungen und Ausblick, URL: <a href="http://www.forum-holzbau.com/pdf/IHF_13_Winter.pdf">http://www.forum-holzbau.com/pdf/IHF_13_Winter.pdf</a> (abgerufen: 18.12.2014) forum-holzbau, Frasdorf, 2013
<b>[Wolf Bavaria, 2013]</b>	Wolf Bavaria GmbH, Schalldämmung richtig planen - Planungsordner, Wolf Bavaria GmbH, Heilsbronn, 2013
<b>[Zegowitz, 2014]</b>	Zegowitz, A., Schaumglasschotter als Wärmedämmung, Präsentation im Rahmen des Fachsymposium des Fraunhofer Instituts für Bauphysik IBP, Dämmstoffe neue Erkenntnisse und Messmethoden URL: <a href="http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/en/documents/Schaumglasschotter-Zegowitztcm1021-97648.pdf">http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/en/documents/Schaumglasschotter-Zegowitztcm1021-97648.pdf</a> (abgerufen: 13.01.2015) Fraunhofer IBP, Stuttgart, 2014

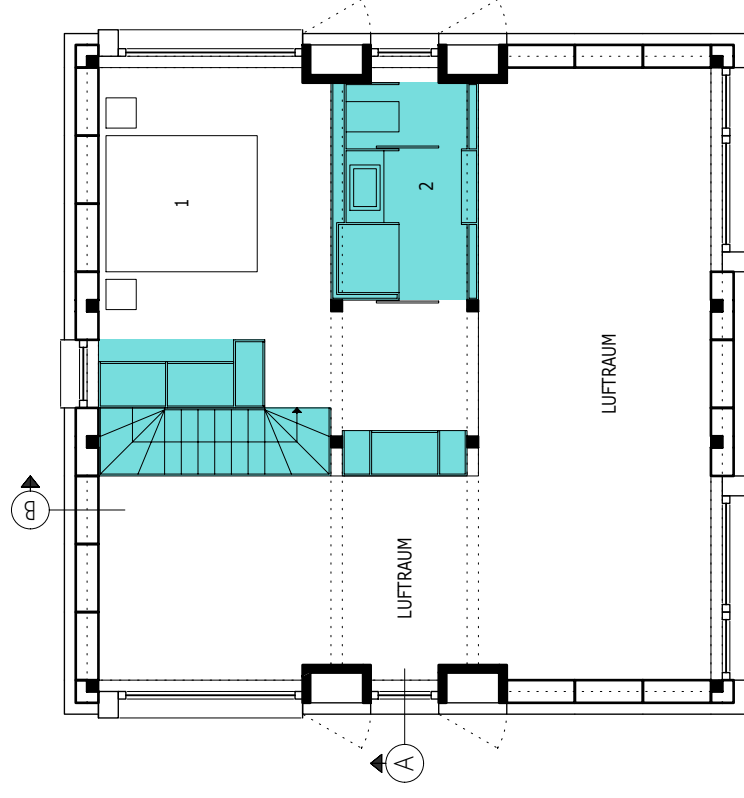
Quelle	
<b>[Zeumer et al., 2009]</b>	Zeumer, M., John, V., Hartwig, J. Nachhaltiger Materialeinsatz – Graue Energie im Lebenszyklus, in: Detail Green 1/2009, S. 54-60 Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2009
<b>[Ziesing , 2015]</b>	Ziesing, H.-J., Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2014, URL: <a href="http://www.ag-energiebilanzen.de/#ageb_jahresbericht2014">http://www.ag-energiebilanzen.de/#ageb_jahresbericht2014</a> (abgerufen: 15.07.2015) Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Berlin, 2015
<b>[Ziesing et. al, 2012]</b>	Ziesing, H.-J., Görgen, R., Maaßen, U., Nickel, M., et. al. Energie in Zahlen, Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen, URL: <a href="http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&amp;fileName=ageb_broschuere_2012_web.pdf">http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&amp;fileName=ageb_broschuere_2012_web.pdf</a> (abgerufen: 17.12.2014) AG Energiebilanzen e.V., Köln, 2010



EG



10G









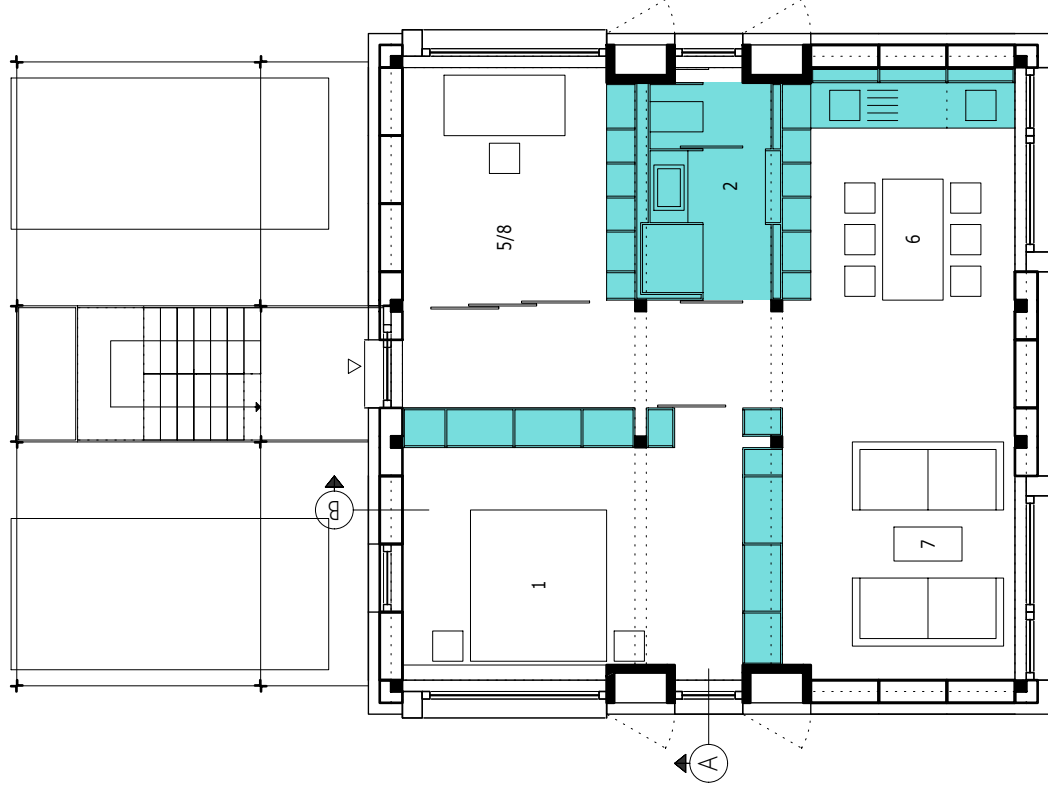








EG



10G



**Beschreibung:**

.....

**Baustoffe**

Stahlbeton:	C 25/30
Betonstahl:	BSt 500/550 S + M
Holz	C24 (KVH)
Holzwerkstoffe	OSB/3+4

**Berechnungsgrundlagen:**

Die zur Zeit gültigen amtlichen technischen Bestimmungen.

EC 1 (DIN EN 1991 ff)	Lastannahmen
EC 2 (DIN EN 1992 ff)	Beton und Stahlbeton
EC 3 (DIN EN 1993 ff)	Stahlbau
EC 5 (DIN EN 1995 ff)	Holzbauwerke
DIN 1053	Mauerwerk

**Software**

PC-Programme von:

Statikprogramme	Friedrich+Lochner, pcae, u.a.
FEM	infograph
CAD	Strakon

<b>INGENIEURBÜRO B I L D</b> Beratende Ingenieure VBI für Hoch-, Industrie- und Brückenbau 58093 Hagen Emster Straße 25 info@drbild.de Tel. 0 23 31 - 55 00 5 + 95 09 - 0 Fax 55 00 4	Projekt-Nr. : <b>070 - 14</b>
Bauwerk : +++ Haus	Seite : 3

## Inhaltsverzeichnis

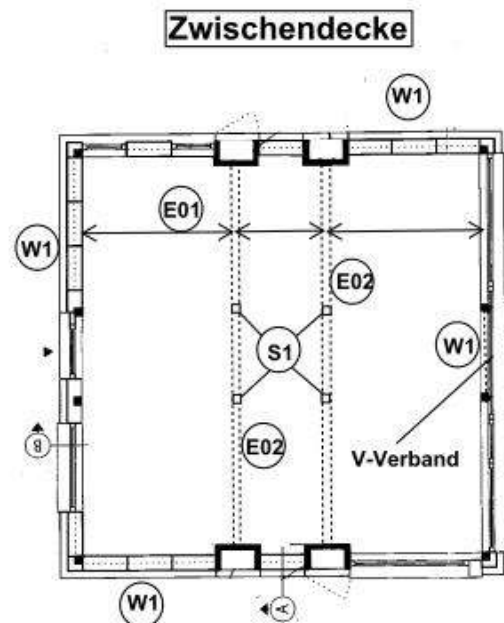
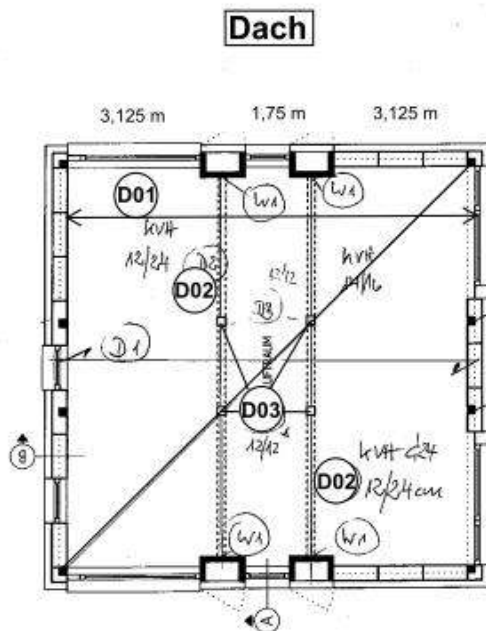
Inhaltsverzeichnis	3
Positionsplan	4
Dach	5
Pos. D01a: Kertoschichtholz Kerto -Q h= 69mm	5
Pos. D01b: Dachbalken mit Schalung: C24 (KVH) b/H = 6/16 cm e =62,5 cm + OSB h = 25 mm	10
OSB/>= 3 Schalung h = 25 mm	10
Pos. D02: Mittelbalken Annahmen KVH b/h = 12/ 24 cm	15
Pos. D03 Stützen KVH b/h = 12/12 cm	20
Decke über EG	24
Pos. E01a Deckenkonstruktion über EG "Lignatur easy" h = 12 cm	24
Pos. E01b Deckenbalken mit Schalung C24 (KVH) b/h =6/18 cm e = 62,5 cm + OSB h = 22 mm	25
Pos. Schalung OSB/3 h = 22 mm	25
Pos. E01c Decken Decke mit Kerto-S-Balken (b/h = 69/200mm e = 125cm) und Kerto-Q- Plat....	31
Pos.Schalung Kerto-Q	31
Pos. Balken Kerto-S b/h = 51/220 mm oder 69/200mm e= 125cm	32
Pos. E02: Mittelbalken KVH b/h = 12/24 cm für Decke ü. EG	33
Pos. E03 Anschluss an Stütze:	37
1. Variante Balkenträger - verdeckt!	37
2. Variante vorgestellte Stiel	37
Pos. S1 Holzstütze 4 x b/h = 12/12 cm KVH	38
Pos. S1alternativ Holzstütze durchlaufend 4 x b/h = 14/20 cm KVH	49
Stabilität:	60
Wände	60
Pos. W1a Wandstiel KVH b/h = 14/20 cm	60
Pos. W1b Wandstiel Finnjoist b/h = 89x220 mm	72
Abschlussseite	200

**Positionsplan**

Projekt: 070-14

Bauvorhaben: +++ Haus

Planinhalt: Positionsplan P1

**Material:**

Nadelholz: C24 (KVH)

Holzwerkstoffe: OSB/&gt;=3

Kerto-Q Schichtholz

Kerto-S

MetsäWood Finnjoist

Lignatur easy

Stahl: S235JR

### Dach

Es werden zwei Alternativen untersucht:

1. Das Dach wird durch ein Furnierschichtholz überspannt => Pos. D01a
2. Die Dachkonstruktion ist "klassisch": Schalung auf Balkensystem => Pos. D01b

Jeweils erfolgt die Dämmung als Aufdachdämmung!

Die Unterdecke ist auf der sicheren Seite auch hinsichtlich möglicher Techniklasten angesetzt!

### Pos. D01a: Kertoschichtholz Kerto -Q h= 69mm

Lasten:

Dichtung g1 =			0,10 kN/m <sup>2</sup>
Dämmung g2 =			0,26 kN/m <sup>2</sup>
Tragschale g3 =	0,069*5	=	0,34 kN/m <sup>2</sup>
Unterdecke g4 =			0,20 kN/m <sup>2</sup>
<b>Summe aus ständigen Lasten =</b>			<b><u>0,90 kN/m<sup>2</sup></u></b>
Photovoltaik q =			<b>0,15 kN/m<sup>2</sup></b>

Schnee: um möglichst viele Schneelastzonen einzuschließen, wird mit **s = 3,0 kN/m<sup>2</sup>** bemessen.  
 Bei  $\mu_1 = 0,8$  für Flachdächer entspricht dieser Wert der SLZ 2a bei H = 770 m ü.NN (sk = 3,75 kN/m<sup>2</sup>)

Bemessung erfolgt für C24: Um den E-Modul für kerto bei der Bemessung bzw. bei den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen zu berücksichtigen, wird die Breite des 1m belasteten Dachstreifens auf 95,5 cm reduziert.

Kerto -Q :  $E_{o,mean} = 10500 \text{ N/mm}^2$

C24:  $E_{o,mean} = 11000 \text{ N/mm}^2$

$n_v = 10,5/11 = 0,955$

Position: 070-D1-Kertoschicht

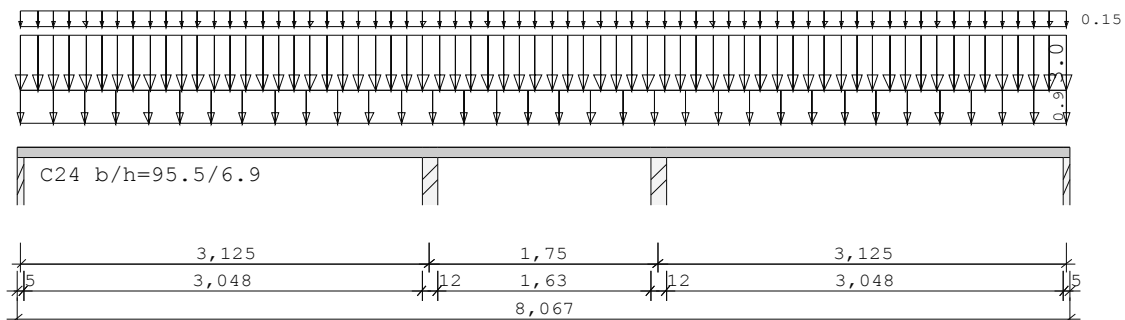
11.07.2014

Seite: 1

### **Position: 070-D1-Kertoschicht**

Durchlaufträger DLT10 01/2014/A Win 8

Maßstab 1 : 50



Holzträger über 3 Felder C24  
 E-Modul  $E_{mean} = 11000 \text{ N/mm}^2$  DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12

Position: 070-D1-Kertoschicht

11.07.2014

Seite: 2

System	Länge	Querschnittswerte			
Feld	L (m)	b (cm)	h (cm)	ly (cm <sup>4</sup> )	
1	3.13	konstant	95.5	6.9	2614.4
2	1.75	konstant	95.5	6.9	2614.4
3	3.13	konstant	95.5	6.9	2614.4

Trägerbezogene Lasten (kN,m)							
Belastung (kN,m)	Lasttyp : 1=Gleichlast über L 3=Einzelmoment bei a 5=Dreieckslast über L			2=Einzellast bei a 4=Trapezlast von a - a+b 6=Trapezlast über L			
Typ EG Gr	VK	g_l/r	q_l/r	Fak.	Abst. Lb/Lc	ausPOS	Phi
1 J		0.90	3.00	1.00			
1 E		0.00	0.15	1.00			pv

Einwirkungen:							
Nr	KI	Bezeichnung	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	$\gamma$	KLED
E	1	Lagerräume	1.00	0.90	0.80	1.50	lang
J	3	Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00	1.50	kurz

EN 1991-1-1:2002 3.3.1 2(P) ist berücksichtigt.  
 Alle Einwirkungen werden als unabhängige betrachtet.  
 Schadensfolgeklasse CC 2 nach EN 1990 Tab. B1 ->  $K_{Fi} = 1.0$  Tab. B3  
 In den folgenden Tabellen steht am Ende der Zeilen ein Verweis auf die Nummer der zug. Überlagerung (siehe unten).  
 In Tabellen mit Gammafachen Schnittgrößen steht zusätzlich ein Verweis auf die Leiteinwirkung.

Ergebnisse für 1-fache Lasten							
Feldmomente Maximum ( kNm , kN )							
Feld		Mf	M li	M re	V li	V re	komb
1	x0 = 1.34	3.65	0.00	-2.79	5.43	-7.22	2
2	x0 = 0.88	0.48	-1.07	-1.07	3.54	-3.54	3
3	x0 = 1.79	3.65	-2.79	0.00	7.22	-5.43	2

Stützmomente Maximum ( kNm , kN )							
Stütze	M li	M re	V li	V re	max F	min F	komb
1	0.00	0.00	0.00	5.43	5.43	1.06	2
2	-3.62	-3.62	-7.49	5.26	12.75	0.56	5
3	-3.62	-3.62	-5.26	7.49	12.75	0.56	7
4	0.00	0.00	-5.43	0.00	5.43	1.06	2

Auflagerkräfte ( kN )						
Stütze	aus g	max q	min q	Vollast	max	min
1	1.18	4.25	-0.12	5.32	5.43	1.06
2	2.42	10.33	-1.86	10.88	12.75	0.56
3	2.42	10.33	-1.86	10.88	12.75	0.56
4	1.18	4.25	-0.12	5.32	5.43	1.06
Summe:	7.20	29.16	-3.96	32.40	36.36	3.24

Auflagerkräfte ( kN )								
EG	Stütze 1		Stütze 2		Stütze 3		Stütze 4	
	max	min	max	min	max	min	max	min
g	1.2	1.2	2.4	2.4	2.4	2.4	1.2	1.2
E	0.2	0.0	0.5	-0.1	0.5	-0.1	0.2	0.0
J	4.1	-0.1	9.8	-1.8	9.8	-1.8	4.1	-0.1
Sum	5.4	1.1	12.7	0.6	12.7	0.6	5.4	1.1



Position: 070-D1-Kertoschicht  
 11.07.2014

Seite: 3

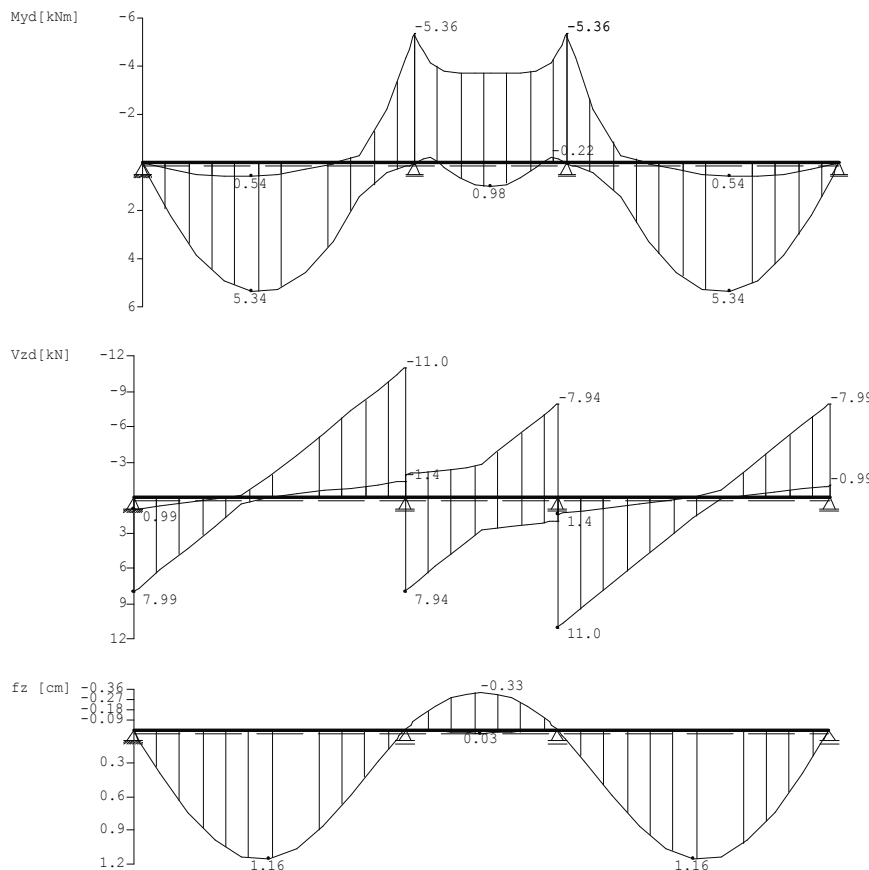
Feld Nr.	maximale			minimale		
	x (m)	f (cm)	Komb	x (m)	f (cm)	komb
1	1.56	1.16	2	3.12	0.00	4
2	0.88	0.03	3	0.88	-0.33	2
3	1.56	1.16	2	0.00	0.00	6

 Ergebnisse für  $\gamma$ -fache Lasten  
 Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G * K_{Fi} = 1.35$  feldweise konstant

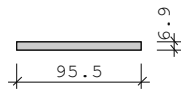
Feldmomente Maximum							( kNm , kN )	
Feld	x0 =	Mfd	Mdli	Mdre	V li	V re	komb	
1	x0 = 1.34	5.37	0.00	-4.05	7.99	-10.58	J	2
2	x0 = 0.88	0.98	-1.29	-1.29	5.20	-5.20	J	3
3	x0 = 1.79	5.37	-4.05	0.00	10.58	-7.99	J	2

Stützmomente Maximum						( kNm , kN )		
Stütze	Mdli	Mdre	Vdli	Vdre	max F	min F	komb	
1	0.00	0.00	0.00	7.99	7.99	0.99	J	2
2	-5.36	-5.36	-11.00	7.94	18.94	-0.56	J	5
3	-5.36	-5.36	-7.94	11.00	18.94	-0.56	J	7
4	0.00	0.00	-7.99	0.00	7.99	0.99	J	2

Maßstab 1 : 75



Bemessung: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 C24

 Nutzungsklasse 1  $k_{def} = 0.60$   $\gamma_M = 1.30$   $\gamma_M(A) = 1.00$ 

 $E_{mean} = 1100 \text{ kN/cm}^2$   $G_{mean} = 69 \text{ kN/cm}^2$   
 $f_{m,k}, M_y = 24.0 \text{ N/mm}^2$   $f_{m,k}, M_z = 24.0 \text{ N/mm}^2$   
 $f_{v,k}, V_z = 4.0 \text{ N/mm}^2$   $f_{v,k}, V_y = 4.0 \text{ N/mm}^2$ 

Spannungen mit FLBemHo901 gerechnet. (Version 9.0.2.5)

 Normalspannungen  $b/h = 95.5/6.9$ 

Der Druckgurt ist kontinuierlich gehalten.

Feld Nr.	x (m)	$M_{y,d}$ (kNm)	$\sigma_{d,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{d,u}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{crit}$	$k_{mod}$	$\sigma_d/f_{m,d}$	komb
1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1
	1.34	5.37	-7.09	7.09	1.00	0.90	0.37	J 2
	3.13	-5.36	7.08	-7.08	1.00	0.90	0.36	J 5
2	0.00	-5.36	7.08	-7.08	1.00	0.90	0.36	J 5
	0.88	-3.70	4.88	-4.88	1.00	0.90	0.25	J 2
	1.75	-5.36	7.08	-7.08	1.00	0.90	0.36	J 7

Spannungen mit FLBemHo901 gerechnet. (Version 9.0.2.5)

 Normalspannungen  $b/h = 95.5/6.9$ 

Der Druckgurt ist kontinuierlich gehalten.

Feld Nr.	x (m)	$M_{y,d}$ (kNm)	$\sigma_{d,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{d,u}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{crit}$	$k_{mod}$	$\sigma_d/f_{m,d}$	komb
3	0.00	-5.36	7.08	-7.08	1.00	0.90	0.36	J 7
	1.79	5.37	-7.09	7.09	1.00	0.90	0.37	J 2
	3.13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90	0.00	J 2

 Der Beiwert  $kh = 1.17$  nach EN 1995 3.2 (3) ist berücksichtigt.

 Schubspannungen  $b/h = 95.5/6.9$ 

Stütze Nr.	x (m)	$V_{z,d}$ (kN)	$\tau_D$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{mod}$	$\tau_d/f_{v,d}$	komb
1 re	0.086	7.48	0.17	0.90	0.12	J 2
2 li	0.129	-10.23	0.23	0.90	0.13 *	J 5
	re	0.129	7.18	0.16	0.90	0.09 *
3 li	0.129	-7.18	0.16	0.90	0.09 *	J 7
	re	0.129	10.23	0.23	0.90	0.13 *
4 li	0.086	-7.48	0.17	0.90	0.12	J 2

 EN 1995 6.1.7 :  $k_{cr} = 0.50$ 

 \* :  $k_{cr}$  nach DIN EN 1995-1-1/NA: 2010-12 NDP 6.1.7(2) um 30% erhöht.

 Auflager  $f_{c,90,k} = 2.50 \text{ N/mm}^2$ 

Stütze Nr.	b (cm)	d (cm)	max F (kN)	$k_{mod}$	$k_{c90}$	$\sigma_{c,90,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\eta$	komb
1	5.0	95.5	8.0	0.90	1.50	0.10	1.73	0.04	J 2
2	12.0	95.5	18.9	0.90	1.50	0.11	1.73	0.04	J 5
3	12.0	95.5	18.9	0.90	1.50	0.11	1.73	0.04	J 7
4	5.0	95.5	8.0	0.90	1.50	0.10	1.73	0.04	J 2



Nachweis Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12  
(2.2.3 , 7.2)

zul  $w_{inst} < L/300$

zul  $w_{fin} < L/200$

zul  $w_{net} < L/250$

Feld	x1 (mm)		wgB (	wqB mm	w	zul w )	$\eta$	
1	1563	inst:	2.4	9.2	11.6	10.4	<b>1.11</b>	2
		fin:	3.8	9.4	13.2	15.6	0.85	2
		net:	3.8	9.4	13.2	12.5	<b>1.06</b>	2
2	875	inst:	-0.6	-2.8	-3.3	5.8	0.57	2
		fin:	-0.9	-2.8	-3.7	8.8	0.43	2
		net:	-0.9	-2.8	-3.7	7.0	0.53	2
3	1563	inst:	2.4	9.2	11.6	10.4	<b>1.11</b>	2
		fin:	3.8	9.4	13.2	15.6	0.85	2
		net:	3.8	9.4	13.2	12.5	<b>1.06</b>	2

In der folgenden Tabelle sind die Lasten mit der internen Numerierung angegeben. Die anschließende Tabelle der gerechneten Kombinationen referenziert auf diese Nummern.

Belastung (kN,m)	Lasttyp : 1=Gleichlast über L 3=Einzelmoment bei a 5=Dreieckslast über L				2=Einzellast bei a 4=Trapezlast von a - a+b 6=Trapezlast über L						
	Nr.	Feld	Typ	Grp	g1	q1	g2	q2	Faktor	Abstand	Länge
1	1	4	J	1	0.90	3.00	0.90	3.00	1.00	0.00	3.13
		4	E	2	0.00	0.15	0.00	0.15	1.00	0.00	3.13
2	2	4	J	3	0.90	3.00	0.90	3.00	1.00	0.00	1.75
		4	E	4	0.00	0.15	0.00	0.15	1.00	0.00	1.75
3	3	4	J	5	0.90	3.00	0.90	3.00	1.00	0.00	3.13
		4	E	6	0.00	0.15	0.00	0.15	1.00	0.00	3.13

Gerechnete Kombinationen aus 6 Lasten

Last	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15
	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
1	.	x	.	.	x	x	.	x	.	x	.	.	.	.	.
2	.	.	x	.	x	.	x	.	x	.	.	.	.	.	.
3	.	x	.	x	.	.	x	x	.	x	.	.	.	.	.
4	.	x	.	.	x	x	.	x	.	.	x	.	.	x	x
5	.	.	x	.	x	.	x	.	.	.	.	x	.	x	.
6	.	x	.	x	.	.	x	.	.	x	x	.	x	.	.

Die vorstehenden Kombinationen werden wie folgt bearbeitet:  
Beim Nachweis der Tragsicherheit werden die ständigen Lasten je einzeln alternierend mit  $\gamma_G = 1,00 / 1,35$  beaufschlagt.  
Wenn in einer Kombination p-Lasten aus unterschiedlichen Einwirkungen vorhanden sind, dann wird jeweils untersucht, welche Einwirkung die Leiteinwirkung ist.  
Die Auswirkung der Lasteinwirkungsdauer wird ebenfalls geprüft.

**Die Überschreitung der Verformungen kann - am Absolutwert von 0,8 mm betrachtet - vernachlässigt werden. Die Überschreitung ergibt sich auch nur bei der recht hoch angenommen Schneelast!**



**Pos. D01b: Dachbalken mit Schalung: C24 (KVH) b/H = 6/16 cm e = 62,5 cm + OSB h = 25 mm**

aus Pos. Aufdachdämmung!:

Lasten:

Dichtung g1 =		0,10 kN/m <sup>2</sup>
Dämmung g2 =		0,26 kN/m <sup>2</sup>
Schalung OSB g3 =	0,025*7	= 0,17 kN/m <sup>2</sup>
Balken g4 =	0,06*0,16*5/0,625	= 0,08 kN/m <sup>2</sup>
Unterdecke g5 =		0,20 kN/m <sup>2</sup>

**Summe aus ständigen Lasten = 0,81 kN/m<sup>2</sup>**

Schnee: um möglichst viele Schneelastzonen einzuschließen, wird mit **s = 3,0 kN/m<sup>2</sup>** bemessen.  
Bei  $\mu_1 = 0,8$  für Flachdächer entspricht dieser Wert der SLZ 2a bei H = 770 m ü.NN (sk = 3,75 kN/m<sup>2</sup>)

**OSB/>= 3 Schalung h = 25 mm**

z.B. OSB- Sterling:

SterlingOSB/3-Zero nach DIN EN 300 als Dachbepunktung<sup>1)</sup> Tabelle 4.1  
Erforderliche Plattendicke d [mm] für NKL 1 / NKL 2

e [m]	$\alpha$ [°]	gk [kN/m <sup>2</sup> DF]								gk [kN/m <sup>2</sup> DF]							
		0,25		0,50		1,00		1,25		0,25		0,50		1,00		1,25	
		$s_k = 0,85 \text{ kN/m}^2$				$q_w = 0,80 \text{ kN/m}^2$				$s_k = 1,25 \text{ kN/m}^2$				$q_w = 0,80 \text{ kN/m}^2$			
		NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2
0,625	0	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	30	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	45	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
0,833	0	15	15	15	15	18	18	18	18	15	15	15	15	18	18	18	22
	15	15	15	15	15	18	18	18	18	15	15	15	15	18	18	18	22
	30	15	15	15	15	18	18	18	18	15	15	15	15	18	18	18	22
	45	15	15	15	15	15	18	18	18	15	15	15	15	15	18	18	18
1,000	0	15	18	18	18	22	22	22	22	18	18	18	22	22	22	22	22
	15	15	18	18	18	22	22	22	22	18	18	18	18	22	22	22	22
	30	15	18	18	18	22	22	22	22	18	18	18	18	22	22	22	22
	45	15	15	18	18	18	22	22	22	15	15	18	18	18	22	22	22
1,250	0	22	22	22	22	25	25	25	2x22	22	22	22	25	25	2x22	25	2x22
	15	18	22	22	22	25	25	25	2x22	22	22	22	25	25	2x22	25	2x22
	30	22	22	22	22	25	25	25	2x22	22	22	22	25	25	2x22	25	2x22
	45	18	22	22	22	25	25	25	2x22	18	22	22	25	25	25	25	2x22

<sup>1)</sup> Randbedingungen für Berechnung:  
- Plattenbreite b = 1,25 m, Platten mit Nut-und-Feder  
- Verlegung als 2-Feldträger, orthogonal zu den Dachsparren  
- Windlasten: Geschwindigkeitsdruck q = 0,80 kN/m<sup>2</sup> für Gebäude h ≤ 18 m in Windzone 2 (Binnenland), h ≤ 1.000 m.ü.d.M.  
- Schneelasten:  $s_k = 0,85 \text{ kN/m}^2$  entspricht Schneelastzone (SLZ) 1 bis h = 505 m, SLZ 2 bis h = 285 m, SLZ 3 bis h = 186 m.ü.d.M.  
 $s_k = 1,25 \text{ kN/m}^2$  entspricht Schneelastzone (SLZ) 1 bis h = 680 m, SLZ 2 bis h = 410 m, SLZ 3 bis h = 291 m.ü.d.M.  
Die Tabellen ersetzen keinen statischen Nachweis. Dieser ist bauwerksbezogen nach DIN 1052 zu führen.

**e = 1,25/2 = 0,625 m => Faktor 2!**

Lastenvergleich:

aus Bem.-Tab.:	$q_d = (1,25*1,35+1,25*0,8*1,5)*2$	= 6,375 kN/m <sup>2</sup>
vorh. Lasten:	$q_d = 0,73*1,35+0,15*1,5+3,0*1,5$	= 5,711 kN/m <sup>2</sup> < 6,375 kN/m <sup>2</sup>

Position: D01b

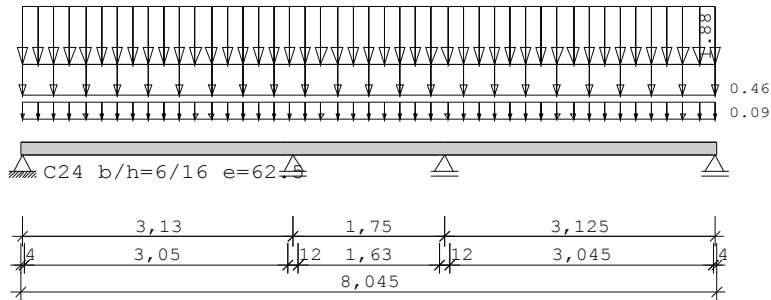
11.07.2014

Seite: 1

**Position: D01b Dachbalken e = 62,5 cm**

Holzträger HO7 01/2014/A Win 8

Maßstab 1 : 75


 Flächenlast: ständige Flächenlast  $g = 0.73 \text{ kN/m}^2$   
 veränderliche Flächenlast  $q = 3.00 \text{ kN/m}^2$  EW J

**Trägerbezogene Lasten (kN,m)**

Belastung (kN,m)	Lasttyp : 1=Gleichlast über L 3=Einzelmoment bei a 5=Dreieckslast über L	2=Einzellast bei a 4=Trapezlast von a - a+b 6=Trapezlast über L					
Typ EG Gr	VK	$g$ l/r	$q$ l/r	Fak.	Abst. Lb/Lc	ausPOS	Phi
1 E		0.00*	0.15*	1.00			PV

\*: Der Lastwert wird intern mit dem Balkenabstand multipliziert.

**Einwirkungen:**

Nr	KI	Bezeichnung	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	$\gamma$	KLED
E	1	Lagerräume	1.00	0.90	0.80	1.50	lang
J	3	Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00	1.50	kurz

EN 1991-1-1:2002 3.3.1 2(P) ist berücksichtigt.  
 Alle Einwirkungen werden als unabhängige betrachtet.  
 Schadensfolgeklasse CC 2 nach EN 1990 Tab. B1 ->  $K_{Fi} = 1.0$  Tab. B3  
 In den folgenden Tabellen steht am Ende der Zeilen ein Verweis auf die Nummer der zug. Überlagerung (siehe unten).  
 In Tabellen mit Gammafachen Schnittgrößen steht zusätzlich ein Verweis auf die Leiteinwirkung.

**Auflagerkräfte**

Stütze	aus g	max q	min q	Vollast	max	min
1	0.96	4.26	-0.12	5.10	5.22	0.84
2	1.97	10.34	-1.86	10.45	12.31	0.10
3	1.96	10.33	-1.87	10.42	12.29	0.09
4	0.96	4.25	-0.12	5.09	5.21	0.84
Summe:	5.84	29.18	-3.97	31.06	35.03	1.88

Position: D01b

11.07.2014

Seite: 2

Auflagerkräfte		( kN/m )							
EG	Stütze 1		Stütze 2		Stütze 3		Stütze 4		
	max	min	max	min	max	min	max	min	
g	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	
E	0.2	0.0	0.5	-0.1	0.5	-0.1	0.2	0.0	
J	4.1	-0.1	9.9	-1.8	9.8	-1.8	4.1	-0.1	
Sum	5.2	0.8	12.3	0.1	12.3	0.1	5.2	0.8	

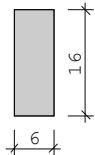
 Ergebnisse für  $\gamma$ -fache Lasten

 Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G * K_{Fi} = 1.35$  feldweise konstant

Feldmomente Maximum		( kNm , kN )						
Feld		Mfd	Mdli	Mdre	V li	V re	komb	
1	x0 = 1.35	3.24	0.00	-2.43	4.81	-6.36	J	2
2	x0 = 0.88	0.65	-0.72	-0.72	3.12	-3.12	J	3
3	x0 = 1.78	3.23	-2.42	0.00	6.35	-4.80	J	2

Stützmomente Maximum		( kNm , kN )						
Stütze		Mdli	Mdre	Vdli	Vdre	max F	min F	komb
1		0.00	0.00	0.00	4.81	4.81	0.48	J 2
2		-3.25	-3.25	-6.62	4.83	11.45	-0.61	J 5
3		-3.24	-3.24	-4.82	6.61	11.43	-0.62	J 7
4		0.00	0.00	-4.80	0.00	4.80	0.48	J 2

Bemessung: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 C24

 Nutzungsklasse 1  $k_{def} = 0.60$   $\gamma_M = 1.30$   $\gamma_M(A) = 1.00$   $e = 62.5$  cm

 $E_{mean} = 1100$  kN/cm<sup>2</sup>     $G_{mean} = 69$  kN/cm<sup>2</sup>  
 $f_{m,k,My} = 24.0$  N/mm<sup>2</sup>     $f_{m,k,Mz} = 24.0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{v,k,Vz} = 4.0$  N/mm<sup>2</sup>     $f_{v,k,Vy} = 4.0$  N/mm<sup>2</sup>

Spannungen mit FLBemHo901 gerechnet. (Version 9.0.2.5)

 Normalspannungen  $b/h = 6/16$ 

Der Druckgurt ist kontinuierlich gehalten.

Feld Nr.	x (m)	My,d (kNm)	$\sigma_{d,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{d,u}$ (N/mm <sup>2</sup> )	k <sub>crit</sub>	k <sub>mod</sub>	$\sigma_d/f_{m,d}$	komb
1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90	0.00	1
	1.35	3.24	-12.65	12.65	1.00	0.90	0.76	J 2
	3.13	-3.25	12.68	-12.68	1.00	0.90	0.76	J 5
2	0.00	-3.25	12.68	-12.68	1.00	0.90	0.76	J 5
	0.88	-2.25	8.79	-8.79	1.00	0.90	0.53	J 2
	1.75	-3.24	12.64	-12.64	1.00	0.90	0.76	J 7
3	0.00	-3.24	12.64	-12.64	1.00	0.90	0.76	J 7
	1.78	3.23	-12.62	12.62	1.00	0.90	0.76	J 2
	3.13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90	0.00	J 4

 Der Beiwert  $kh = 1.00$  nach EN 1995 3.2 (3) ist berücksichtigt.

Position: D01b

11.07.2014

Seite: 3

Stütze Nr.	x (m)	Vz,d (kN)	$\tau_D$ (N/mm <sup>2</sup> )	kmod	$\tau_d/fv,d$	komb
1 re	0.180	4.17	0.65	0.90	0.47	J 2
2 li	0.220	-5.84	0.91	0.90	0.51 *	J 5
re	0.220	4.04	0.63	0.90	0.35 *	J 5
3 li	0.220	-4.03	0.63	0.90	0.35 *	J 7
re	0.220	5.83	0.91	0.90	0.51 *	J 7
4 li	0.180	-4.16	0.65	0.90	0.47	J 2

EN 1995 6.1.7 : kcr = 0.50  
 \* :kcr nach DIN EN 1995-1-1/NA: 2010-12 NDP 6.1.7(2) um 30% erhöht.

Auflager		fc,90,k = 2.50 N/mm <sup>2</sup>							
Stütze Nr.	b (cm)	d (cm)	max F (kN)	kmod	kc90	$\sigma_{c,90,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	fc,90,d	$\eta$	komb
1	4.0	6.0	4.8	0.90	1.50	1.14	1.73	0.44	J 2
2	12.0	6.0	11.4	0.90	1.50	1.06	1.73	0.41	J 5
3	12.0	6.0	11.4	0.90	1.50	1.06	1.73	0.41	J 7
4	4.0	6.0	4.8	0.90	1.50	1.14	1.73	0.44	J 2

Nachweis Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 (2.2.3 , 7.2)									
zul w <sub>inst</sub> < L/300			zul w <sub>fin</sub> < L/150			zul w <sub>net</sub> < L/250			
Feld	x1 (mm)	wgB (	wqB mm	w	zul w	$\eta$			
1	1565	inst:	1.6	7.4	8.9	10.4	0.85	2	
		fin:	2.5	7.5	10.0	20.9	0.48	2	
		net:	2.5	7.5	10.0	12.5	0.80	2	
2	875	inst:	-0.4	-2.2	-2.6	5.8	0.44	2	
		fin:	-0.6	-2.3	-2.8	11.7	0.24	2	
		net:	-0.6	-2.3	-2.8	7.0	0.41	2	
3	1563	inst:	1.6	7.3	8.9	10.4	0.85	2	
		fin:	2.5	7.5	10.0	20.8	0.48	2	
		net:	2.5	7.5	10.0	12.5	0.80	2	

In der folgenden Tabelle sind die Lasten mit der internen Numerierung angegeben. Die anschließende Tabelle der gerechneten Kombinationen referenziert auf diese Nummern.

Belastung (kN,m)	Lasttyp : 1=Gleichlast über L 3=Einzelmoment bei a 5=Dreieckslast über L				2=Einzellast bei a 4=Trapezlast von a - a+b 6=Trapezlast über L						
	Nr.	Feld	Typ	Grp	g1	q1	g2	q2	Faktor	Abstand	Länge
1	1	4	J 1	4	0.73	3.00	0.73	3.00	0.63	0.00	3.13
			E 2		0.00	0.09	0.00	0.09	1.00	0.00	3.13
2	2	4	J 3	4	0.73	3.00	0.73	3.00	0.63	0.00	1.75
			E 4		0.00	0.09	0.00	0.09	1.00	0.00	1.75
3	3	4	J 5	4	0.73	3.00	0.73	3.00	0.63	0.00	3.13
			E 6		0.00	0.09	0.00	0.09	1.00	0.00	3.13



Gerechnete Kombinationen aus 6 Lasten

Last	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15
1	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
2	.	x	.	.	x	x	.	x	.	x	.	.	.	.	.
3	.	.	x	.	x	.	x	.	x	.	.	.	.	.	.
4	.	x	.	.	x	x	.	x	.	.	x	.	.	x	x
5	.	.	x	.	x	.	x	.	.	.	.	x	.	x	.
6	.	x	.	x	.	.	x	.	.	x	x	.	x	.	.

Die vorstehenden Kombinationen werden wie folgt bearbeitet:  
 Beim Nachweis der Tragsicherheit werden die ständigen Lasten je einzeln alternierend mit  $\gamma_G = 1,00 / 1,35$  beaufschlagt.  
 Wenn in einer Kombination p-Lasten aus unterschiedlichen Einwirkungen vorhanden sind, dann wird jeweils untersucht, welche Einwirkung die Leiteinwirkung ist.  
 Die Auswirkung der Lasteinwirkungsdauer wird ebenfalls geprüft.



**Pos. D02: Mittelbalken Annahmen KVH b/h = 12/ 24 cm**

auf der sicheren Seite als Einfeldträger bemessen!

Lasten für Außenwände und Mittelbalken Pos: G/PV/Schnee

g1 =	3,125*0,9*0,5	=	1,41 kN/m
g2 =	1,75*0,9*0,5	=	0,79 kN/m
q1 =	3,125*0,15*0,5	=	0,23 kN/m
q2 =	1,75*0,15*0,5	=	0,13 kN/m
s1 =	3,0*3,125*0,5	=	4,69 kN/m
s2 =	3,0*1,75*0,5	=	2,63 kN/m

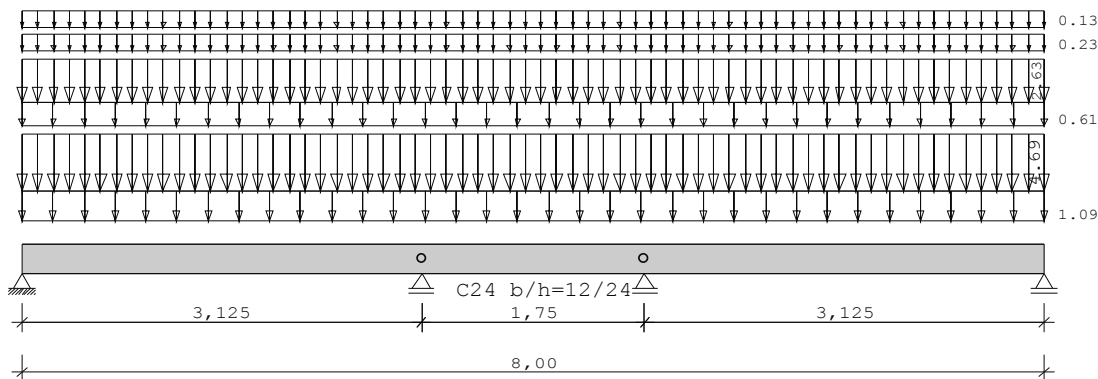
Position: 070-D2  
14.07.2014

Seite: 1

**Position: 070-D2**

Durchlaufträger DLT10 01/2014/A Win 8

Maßstab 1 : 50



Holzträger über 3 Felder C24  
E-Modul  $E_{mean} = 11000 \text{ N/mm}^2$  DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12

System	Länge	Querschnittswerte			
Feld	L (m)		b (cm)	h (cm)	ly (cm <sup>4</sup> )
1	3.13	konstant	12.0	24.0	13824.0
2	1.75	konstant	12.0	24.0	13824.0
3	3.13	konstant	12.0	24.0	13824.0

Gelenke : in Feld 2 bei x = 0.00 m  
in Feld 3 bei x = 0.00 m

**Trägerbezogene Lasten (kN,m)**

Typ	EG	Gr	VK	Lasttyp : 1=Gleichlast über L 3=Einzelmoment bei a 5=Dreieckslast über L			2=Einzellast bei a 4=Trapezlast von a - a+b 6=Trapezlast über L		
				g <sub>l/r</sub>	q <sub>l/r</sub>	Fak.	Abst. Lb/Lc	ausPOS	Phi
1	J			1.09	4.69	1.00		3,125m	
1	J			0.61	2.63	1.00		1,75m	
1	E			0.00	0.23	1.00			PV
1	E			0.00	0.13	1.00			PV

Eigengewicht des Trägers ist mit Gamma = 6.0 kN/m<sup>3</sup> berücksichtigt.

Einwirkungen:			ψ0	ψ1	ψ2	γ	KLED
Nr	KI	Bezeichnung					
E	1	Lagerräume	1.00	0.90	0.80	1.50	lang
J	3	Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00	1.50	kurz

EN 1991-1-1:2002 3.3.1 2(P) ist berücksichtigt.  
 Alle Einwirkungen werden als unabhängige betrachtet.  
 Schadensfolgeklasse CC 2 nach EN 1990 Tab. B1 ->  $K_{Fi} = 1.0$  Tab. B3  
 In den folgenden Tabellen steht am Ende der Zeilen ein Verweis auf  
 die Nummer der zug. Überlagerung (siehe unten).  
 In Tabellen mit Gammafachen Schnittgrößen steht zusätzlich ein  
 Verweis auf die Leiteinwirkung.

**Ergebnisse für 1-fache Lasten**

Feldmomente Maximum		( kNm , kN )						
Feld		Mf	M li	M re	V li	V re	komb	
1	x0 = 1.56	11.66	0.00	0.00	14.93	-14.93	2	
2	x0 = 0.88	3.66	0.00	0.00	8.36	-8.36	3	
3	x0 = 1.56	11.66	0.00	0.00	14.93	-14.93	4	

Stützmomente Maximum		( kNm , kN )						
Stütze		M li	M re	V li	V re	max F	min F	komb
1		0.00	0.00	0.00	14.93	14.93	2.93	2
2		0.00	0.00	-14.93	8.36	23.28	4.56	3
3		0.00	0.00	-8.36	14.93	23.28	4.56	4
4		0.00	0.00	-14.93	0.00	14.93	2.93	4

Auflagerkräfte		( kN )						
Stütze		aus g	max q	min q	Vollast	max	min	
1		2.93	12.00	0.00	14.93	14.93	2.93	
2		4.56	18.72	0.00	23.28	23.28	4.56	
3		4.56	18.72	0.00	23.28	23.28	4.56	
4		2.93	12.00	0.00	14.93	14.93	2.93	
Summe:		14.98	61.44	0.00	76.42	76.42	14.98	

Auflagerkräfte		( kN )							
EG	Stütze 1	Stütze 2	Stütze 3	Stütze 4					
	max	min	max	min	max	min	max	min	
g	2.9	2.9	4.6	4.6	4.6	4.6	2.9	2.9	
E	0.6	0.0	0.9	0.0	0.9	0.0	0.6	0.0	
J	11.4	0.0	17.8	0.0	17.8	0.0	11.4	0.0	
Sum	14.9	2.9	23.3	4.6	23.3	4.6	14.9	2.9	

Durchbiegungen		maximale				minimale			
Feld Nr.	x (m)	f (cm) Komb		x (m)	f (cm) komb				
1	1.56	0.78	2	0.00	0.00	0			
2	0.88	0.08	3	1.75	0.00	0			
3	1.56	0.78	4	3.12	0.00	0			

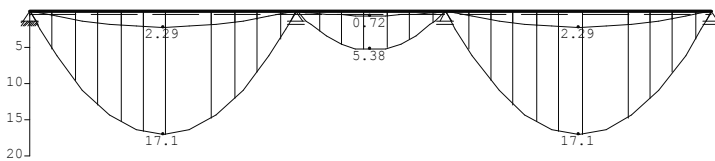
Ergebnisse für  $\gamma$ -fache Lasten  
 Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G * K_{Fi} = 1.35$  feldweise konstant

Feldmomente Maximum		( kNm , kN )						
Feld		Mfd	Mdli	Mdre	V li	V re	komb	
1	x0 = 1.56	17.15	0.00	0.00	21.95	-21.95	J 2	
2	x0 = 0.88	5.38	0.00	0.00	12.29	-12.29	J 3	
3	x0 = 1.56	17.15	0.00	0.00	21.95	-21.95	J 4	

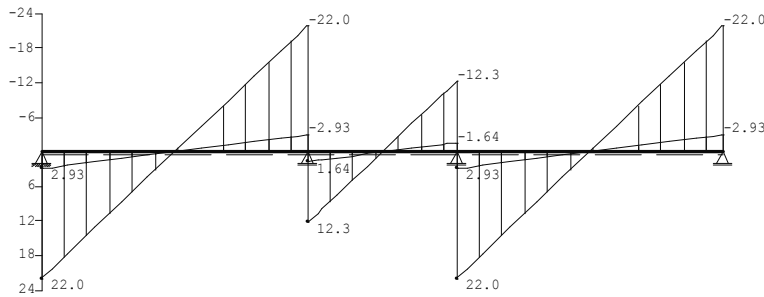
Stützmomente Maximum					( kNm , kN )		
Stütze	Mdli	Mdre	Vdli	Vdre	max F	min F	komb
1	0.00	0.00	0.00	21.95	21.95	2.93	J 2
2	0.00	0.00	-21.95	12.29	34.24	4.56	J 3
3	0.00	0.00	-12.29	21.95	34.24	4.56	J 4
4	0.00	0.00	-21.95	0.00	21.95	2.93	J 4

Maßstab 1 : 75

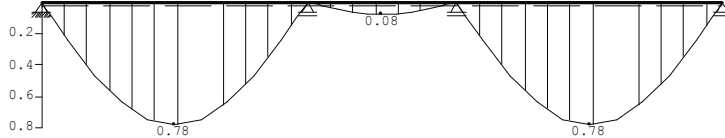
Myd [kNm]



Vzd [kN]

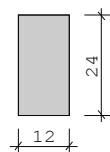


fz [cm]



Bemessung: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 C24

Nutzungsklasse 1 kdef = 0.60  $\gamma_M = 1.30$   $\gamma_M(A) = 1.00$



$E_{mean} = 1100 \text{ kN/cm}^2$      $G_{mean} = 69 \text{ kN/cm}^2$   
 $f_{m,k,My} = 24.0 \text{ N/mm}^2$      $f_{m,k,Mz} = 24.0 \text{ N/mm}^2$   
 $f_{v,k,Vz} = 4.0 \text{ N/mm}^2$      $f_{v,k,Vy} = 4.0 \text{ N/mm}^2$

Position: 070-D2

14.07.2014

Seite: 4

 Spannungen mit FLBemHo901 gerechnet. (Version 9.0.2.5)  
 Normalspannungen  $b/h = 12/24$ 

Der Druckgurt ist nur an den Auflagern gehalten.

Feld Nr.	x (m)	$M_{y,d}$ (kNm)	$\sigma_{d,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{d,u}$ (N/mm <sup>2</sup> )	k <sub>crit</sub>	k <sub>mod</sub>	$\sigma_d/f_{m,d}$	komb
1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1
	1.56	17.15	-14.89	14.89	1.00	0.90	0.90	J 2
	3.13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90	0.00	J 2
2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1
	0.88	5.38	-4.67	4.67	1.00	0.90	0.28	J 3
	1.75	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90	0.00	J 3
3	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1
	1.56	17.15	-14.89	14.89	1.00	0.90	0.90	J 4
	3.13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90	0.00	J 4

 Der Bewehrt  $kh = 1.00$  nach EN 1995 3.2 (3) ist berücksichtigt.

 Schubspannungen  $b/h = 12/24$ 

Stütze Nr.	x (m)	$V_{z,d}$ (kN)	$\tau_D$ (N/mm <sup>2</sup> )	k <sub>mod</sub>	$\tau_d/f_{v,d}$	komb
1 re	0.240	18.58	0.97	0.90	0.70	J 2
2 li	0.240	-18.58	0.97	0.90	0.70	J 2
	0.240	8.92	0.46	0.90	0.34	J 3
3 li	0.240	-8.92	0.46	0.90	0.34	J 3
	0.240	18.58	0.97	0.90	0.70	J 4
4 li	0.240	-18.58	0.97	0.90	0.70	J 4

EN 1995 6.1.7 :  $k_{cr} = 0.50$

 Nachweis Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12  
 (2.2.3 , 7.2)

 $zul w_{inst} < L/300$ 
 $zul w_{fin} < L/200$ 
 $zul w_{net} < L/250$ 

Feld	x1 (mm)	wgB (mm)	wqB (mm)	w	zul w	$\eta$
1	1563	inst: 1.5	6.3	7.8	10.4	0.75
		fin: 2.4	6.4	8.9	15.6	0.57
		net: 2.4	6.4	8.9	12.5	0.71
2	875	inst: 0.2	0.6	0.8	5.8	0.13
		fin: 0.2	0.6	0.9	8.8	0.10
		net: 0.2	0.6	0.9	7.0	0.12
3	1563	inst: 1.5	6.3	7.8	10.4	0.75
		fin: 2.4	6.4	8.9	15.6	0.57
		net: 2.4	6.4	8.9	12.5	0.71

In der folgenden Tabelle sind die Lasten mit der internen Numerierung angegeben. Die anschließende Tabelle der gerechneten Kombinationen referenziert auf diese Nummern.

Nr.	Feld	Typ	Grp	Lasttyp : 1=Gleichlast über L 3=Einzelmoment bei a 5=Dreieckslast über L				2=Einzellast bei a 4=Trapezlast von a - a+b 6=Trapezlast über L		
				g1	q1	g2	q2	Faktor	Abstand	Länge
1	1	4	J 1	1.09	4.69	1.09	4.69	1.00	0.00	3.13
4	4	J 1	0.61	2.63	0.61	2.63	1.00	0.00	3.13	
7	4	E 2	0.00	0.23	0.00	0.23	1.00	0.00	3.13	
10	4	E 2	0.00	0.13	0.00	0.13	1.00	0.00	3.13	
2	2	4	J 3	1.09	4.69	1.09	4.69	1.00	0.00	1.75
5	4	J 3	0.61	2.63	0.61	2.63	1.00	0.00	1.75	
8	4	E 4	0.00	0.23	0.00	0.23	1.00	0.00	1.75	
11	4	E 4	0.00	0.13	0.00	0.13	1.00	0.00	1.75	

In der folgenden Tabelle sind die Lasten mit der internen Numerierung angegeben. Die anschließende Tabelle der gerechneten Kombinationen referenziert auf diese Nummern.

Belastung (kN,m)	Lasttyp : 1=Gleichlast über L 3=Einzelmoment bei a 5=Dreieckslast über L						2=Einzellast bei a 4=Trapezlast von a - a+b 6=Trapezlast über L				
	Nr.	Feld	Typ	Grp	g1	q1	g2	q2	Faktor	Abstand	Länge
3	3	4	J	5	1.09	4.69	1.09	4.69	1.00	0.00	3.13
6		4	J	5	0.61	2.63	0.61	2.63	1.00	0.00	3.13
9		4	E	6	0.00	0.23	0.00	0.23	1.00	0.00	3.13
12		4	E	6	0.00	0.13	0.00	0.13	1.00	0.00	3.13

**Gerechnete Kombinationen aus 12 Lasten**

Last	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11
1	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
2	.	x	.	.	x	.	.	.	.	.	.
3	.	.	x	.	x	.	.	.	.	.	.
4	.	x	.	.	x	.	.	.	.	.	.
5	.	.	x	.	x	x	.	.	.	.	.
6	.	.	.	x	.	x	.	.	.	.	.
7	.	x	.	.	x	.	x	.	.	x	.
8	.	.	x	.	x	x	.	x	.	x	x
9	.	.	.	x	.	x	.	.	x	.	x
10	.	x	.	.	x	.	x	.	.	x	.
11	.	.	x	.	x	x	.	x	.	x	x
12	.	.	.	x	.	x	.	.	x	.	x

Die vorstehenden Kombinationen werden wie folgt bearbeitet:  
 Beim Nachweis der Tragsicherheit werden die ständigen Lasten je einzeln alternierend mit  $\gamma_G = 1,00 / 1,35$  beaufschlagt.  
 Wenn in einer Kombination p-Lasten aus unterschiedlichen Einwirkungen vorhanden sind, dann wird jeweils untersucht, welche Einwirkung die Leiteinwirkung ist.  
 Die Auswirkung der Lasteinwirkungsdauer wird ebenfalls geprüft.

**Pos. D03 Stützen KVH b/h = 12/12 cm**

 Lasten aus D02: G1/PV/S1 = 2,93/ 0,6/ 11,44 kN  
 G2/PV/S2 = 1,63/ 0,3/ 6,40 kN

Nachweis siehe auch Decke über EG

 Position: 070-D3-Stütze  
 14.07.2014

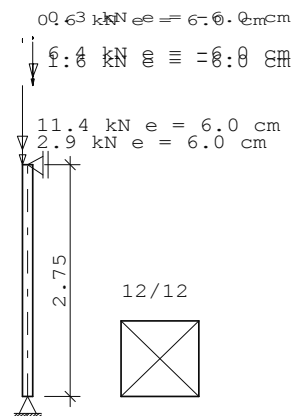
Seite: 1

**Position: 070-D3-Stütze**

Holzstütze HO1 01/2014/A Win 8

Berechnungsgrundlagen: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12

PENDELSTÜTZE: H = 2.75 m 12/12 cm Nadelholz C24

 Nutzungskl = 1 (geschlossen, beheizt; LF<65%; GLWF<15%)  
 Kriechen wird bei Nutzungsklasse 1 nicht berücksichtigt!

**MASSGEBENDE SYSTEMGRÖSSEN für die Nachweise:**

l <sub>efy</sub> =	275 cm	l <sub>efz</sub> =	275 cm
l <sub>efm</sub> =	275 cm	k <sub>m</sub> =	1.00
Lambda =	79.4	k <sub>c</sub> =	0.45

Lastfälle/Einwirkungen:	Psi0	Psi1	Psi2	Gamma	
g1: Ständige Lasten	1.00	1.00	1.00	1.35	
s2: Schnee bis NN +1000m	; k <sub>mod</sub> = 0.50	0.20	0.60, k <sub>def</sub> = 0.00	1.50	0.60
g3: Ständige Lasten	1.00	1.00	1.00	1.35	
s4: Schnee bis NN +1000m	; k <sub>mod</sub> = 0.50	0.20	0.60, k <sub>def</sub> = 0.00	1.50	0.60
q5: Lagerräume	1.00	0.90	0.80	1.50	
q6: Lagerräume	; k <sub>mod</sub> = 1.00	0.90	0.70, k <sub>def</sub> = 0.80	1.50	0.60

**charakteristische Einwirkungen:**

Lf Nr.	V <sub>x</sub> (kN)	e <sub>z</sub> (cm)	H <sub>z</sub> (kN)	x <sub>H</sub> (cm)	q <sub>z</sub> (kN/m)	k <sub>mod</sub>	LED
1	2.9	6	0.00	0	0.00	0.60	ständig
2	11.4	6	0.00	0	0.00	0.90	kurz
3	1.6	-6	0.00	0	0.00	0.60	ständig
4	6.4	-6	0.00	0	0.00	0.90	kurz
5	0.6	6	0.00	0	0.00	0.70	lang
6	0.3	-6	0.00	0	0.00	0.70	lang

**KOMBINATIONEN für Tragfähigkeit (ständig, vorübergehend)**

T8 : 1.35g+1.50s2+1.50q5  
 Gebrauchsfähigkeit permanent  
 G16 : 1.00g+0.80q5+0.80q6  
 Gebrauchsfähigkeit selten/rar  
 G30 : 1.00g+1.00s2+1.00s4+1.00q5+1.00q6

**Kombinations-Auswirkungen:**

Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED
1	-6.2	0.00	0.04	0.1	0.0	0.0	G	ständig
2	-23.3	1.13	0.41	0.1	0.2	0.2	S0A	kurz
3	-15.8	-0.47	-0.17	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
4	-7.1	0.00	0.06	0.1	0.0	0.1	NLE	lang
5	-6.6	0.00	0.03	0.1	0.0	0.0	NLE	lang
6	-32.9	0.00	0.20	0.1	0.3	0.3	S0A	kurz
7	-32.9	0.00	0.20	0.1	0.3	0.3	S0A	kurz
8	-24.2	1.19	0.43	0.1	0.2	0.2	S0A	kurz
9	-15.6	0.67	0.25	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
10	-23.8	1.11	0.40	0.1	0.2	0.2	S0A	kurz
11	-15.2	0.59	0.22	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
12	-16.7	-0.42	-0.15	0.1	0.1	0.2	S0A	kurz
13	-11.9	0.00	-0.05	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
14	-16.2	-0.50	-0.18	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
15	-11.4	0.00	-0.08	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
16	-7.5	0.00	0.05	0.1	0.0	0.1	NLE	lang
17	-7.5	0.00	0.05	0.1	0.0	0.1	NLE	lang
18	-33.8	0.00	0.22	0.1	0.3	0.3	S0A	kurz
19	-33.8	0.00	0.22	0.1	0.3	0.3	S0A	kurz
20	-20.4	0.00	0.14	0.1	0.1	0.2	S0A	kurz
21	-33.4	0.00	0.19	0.1	0.3	0.3	S0A	kurz
22	-33.4	0.00	0.19	0.1	0.3	0.3	S0A	kurz
23	-20.0	0.00	0.11	0.1	0.1	0.2	S0A	kurz
24	-24.7	1.16	0.42	0.1	0.2	0.2	S0A	kurz
25	-16.1	0.65	0.24	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
26	-16.1	0.65	0.24	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
27	-17.1	-0.44	-0.16	0.1	0.1	0.2	S0A	kurz
28	-12.3	0.00	-0.06	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
29	-12.3	0.00	-0.06	0.1	0.1	0.1	S0A	kurz
30	-34.3	0.00	0.21	0.1	0.3	0.3	S0A	kurz
31	-34.3	0.00	0.21	0.1	0.3	0.3	S0A	kurz
32	-20.9	0.00	0.13	0.1	0.2	0.2	S0A	kurz
33	-20.9	0.00	0.13	0.1	0.2	0.2	S0A	kurz

**Kombinations-SPANNUNGEN**

Kombi Nr.	Sigmac (MN/m2)	Sigmat (MN/m2)	Stabilität (MN/m2)	Tau (MN/m2)
1	-0.43(0.04)	-0.12(zg)	1.25(0.13)	0.01(0.00)
2	-3.48(0.24)	1.68(zg)	6.88(0.47)	0.09(0.03)
3	-1.45(0.10)	0.27(zg)	3.79(0.26)	0.04(0.01)
4	-0.49(0.04)	-0.03(zg)	1.55(0.14)	0.01(0.01)
5	-0.46(0.04)	-0.23(zg)	1.24(0.11)	0.01(0.00)
6	-2.29(0.16)	-0.66(zg)	6.68(0.46)	0.04(0.02)
7	-2.29(0.16)	-0.66(zg)	6.68(0.46)	0.04(0.02)
8	-3.65(0.25)	1.77(zg)	7.18(0.49)	0.09(0.03)
9	-2.04(0.14)	0.87(zg)	4.36(0.30)	0.05(0.02)
10	-3.41(0.23)	1.57(zg)	6.87(0.47)	0.08(0.03)
11	-1.80(0.12)	0.67(zg)	4.06(0.28)	0.04(0.02)
12	-1.30(0.09)	0.05(zg)	3.77(0.26)	0.03(0.01)
13	-0.82(0.06)	-0.45(zg)	2.20(0.15)	0.01(0.00)
14	-1.53(0.11)	0.32(zg)	3.94(0.27)	0.04(0.01)
15	-0.79(0.05)	-0.18(zg)	2.36(0.16)	0.02(0.01)
16	-0.52(0.05)	-0.14(zg)	1.54(0.14)	0.01(0.00)
17	-0.52(0.05)	-0.14(zg)	1.54(0.14)	0.01(0.00)
18	-2.35(0.16)	-0.57(zg)	6.98(0.48)	0.05(0.02)
19	-2.35(0.16)	-0.57(zg)	6.98(0.48)	0.05(0.02)

Kombinations-SPANNUNGEN				
Kombi Nr.	Sigmac (MN/m2)	Sigmat (MN/m2)	Stabilität (MN/m2)	Tau (MN/m2)
20	-1.42(0.10)	-0.30(zg)	4.26(0.29)	0.03(0.01)
21	-2.32(0.16)	-0.77(zg)	6.67(0.46)	0.04(0.01)
22	-2.32(0.16)	-0.77(zg)	6.67(0.46)	0.04(0.01)
23	-1.39(0.10)	-0.50(zg)	3.96(0.27)	0.02(0.01)
24	-3.58(0.25)	1.66(zg)	7.17(0.49)	0.09(0.03)
25	-1.97(0.14)	0.76(zg)	4.35(0.30)	0.05(0.02)
26	-1.97(0.14)	0.76(zg)	4.35(0.30)	0.05(0.02)
27	-1.39(0.10)	0.10(zg)	3.92(0.27)	0.03(0.01)
28	-0.85(0.06)	-0.40(zg)	2.34(0.16)	0.01(0.00)
29	-0.85(0.06)	-0.40(zg)	2.34(0.16)	0.01(0.00)
30	-2.38(0.16)	-0.68(zg)	6.97(0.48)	0.04(0.02)
31	-2.38(0.16)	-0.68(zg)	6.97(0.48)	0.04(0.02)
32	-1.45(0.10)	-0.41(zg)	4.25(0.29)	0.03(0.01)
33	-1.45(0.10)	-0.41(zg)	4.25(0.29)	0.03(0.01)

SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
g1	-2.9	0.18	275	0.06	0	0.06	0.06	
s2	-11.4	0.69	275	0.25	0	0.25	0.25	
g3	-1.6	-0.10	275	-0.04	0	-0.04	-0.04	
s4	-6.4	-0.38	275	-0.14	0	-0.14	-0.14	
q5	-0.6	0.04	275	0.01	0	0.01	0.01	
q6	-0.3	-0.02	275	-0.01	0	-0.01	-0.01	
T1	-6.2	0.11	275	0.04	14	0.04	0.04	
T2	-23.3	1.13	275	0.41	14	0.41	0.41	
T3	-15.8	-0.47	275	-0.17	14	-0.17	-0.17	
T4	-7.1	0.16	275	0.06	14	0.06	0.06	
T5	-6.6	0.08	275	0.03	14	0.03	0.03	
T6	-32.9	0.56	275	0.20	14	0.20	0.20	
T7	-32.9	0.56	275	0.20	14	0.20	0.20	
T8	-24.2	1.19	275	0.43	14	0.43	0.43	
T9	-15.6	0.67	275	0.25	14	0.25	0.25	
T10	-23.8	1.11	275	0.40	14	0.40	0.40	
T11	-15.2	0.59	275	0.22	14	0.22	0.22	
T12	-16.7	-0.42	275	-0.15	14	-0.15	-0.15	
T13	-11.9	-0.13	275	-0.05	14	-0.05	-0.05	
T14	-16.2	-0.50	275	-0.18	14	-0.18	-0.18	
T15	-11.4	-0.21	275	-0.08	14	-0.08	-0.08	
T16	-7.5	0.13	275	0.05	14	0.05	0.05	
T17	-7.5	0.13	275	0.05	14	0.05	0.05	
T18	-33.8	0.61	275	0.22	14	0.22	0.22	
T19	-33.8	0.61	275	0.22	14	0.22	0.22	
T20	-20.4	0.39	275	0.14	14	0.14	0.14	
T21	-33.4	0.53	275	0.19	14	0.19	0.19	
T22	-33.4	0.53	275	0.19	14	0.19	0.19	
T23	-20.0	0.31	275	0.11	14	0.11	0.11	
T24	-24.7	1.16	275	0.42	14	0.42	0.42	
T25	-16.1	0.65	275	0.24	14	0.24	0.24	
T26	-16.1	0.65	275	0.24	14	0.24	0.24	
T27	-17.1	-0.44	275	-0.16	14	-0.16	-0.16	
T28	-12.3	-0.16	275	-0.06	14	-0.06	-0.06	
T29	-12.3	-0.16	275	-0.06	14	-0.06	-0.06	
T30	-34.3	0.59	275	0.21	14	0.21	0.21	
T31	-34.3	0.59	275	0.21	14	0.21	0.21	
T32	-20.9	0.36	275	0.13	14	0.13	0.13	
T33	-20.9	0.36	275	0.13	14	0.13	0.13	



**SPANNUNGSNACHWEISE: für Max.-Werte**

T8	Zugseite	SigmaZg=	1.77 MN/m2	gezogene Faserseite (mech.)
T8	Druck	Sigmac =	-3.65 MN/m2	< 14.54 MN/m2 (0.25)
T8	Stabilität	Sigmac =	7.18 MN/m2	< 14.54 MN/m2 (0.49)
T8	Schub	TauV =	0.09 MN/m2	< 2.77 MN/m2 (0.03)

**DURCHBIEGUNGEN für ExtremalWerte:**

infolge permanenter/quasi-ständiger Einwirkungen				
G16	wpq fin	=	0.13 cm	< H/200 (0.09)
infolge rarer/seltener Einwirkungen				
G30	wrq inst	=	0.29 cm	< H/300 (0.31)
G30	wrq fin	=	0.33 cm	< H/200 (0.24)

Lf Nr	Schwelle b/h cm	Aufstand lba/lia cm	Abstand li/re cm	Aef/kc90 cm2/-	Pressung MN/m2
T30	12.0/10.0	12/12	10/100	216/1.25	1.59 < 2.16( 0.73)

**Decke über EG**

Es werden vier Alternativen untersucht:

Ausführung der Decke mit

1. "Lignatur easy" => Pos. E01a
2. "klassisch": Schalung auf KVH-Balkensystem => Pos. E01b
3. mit Kerto-S-Balken und Kerto-Q- Platte => Pos. E01c
4. Brettspertholzplatten (X-Lam => Fa. Derix) => Pos. E01d (( evt. Option, noch gerechnet))

Die Unterdecke ist auf der sicheren Seite auch hinsichtlich möglicher Techniklasten angesetzt!

**Pos. E01a Deckenkonstruktion über EG "Lignatur easy" h = 12 cm**

Lasten:

Belag g1 =	0,40 kN/m <sup>2</sup>
Trockenestrich *TSD g2 =	0,30 kN/m <sup>2</sup>
Konstruktion g3 =	0,37 kN/m <sup>2</sup>
Unterdecke g4 =	0,23 kN/m <sup>2</sup>

**Summe aus ständigen Lasten = 1,30 kN/m<sup>2</sup>**

q1 =	2,00 kN/m <sup>2</sup>
qtwz =	0,80 kN/m <sup>2</sup>

**Auszüge aus dem "Workbook der Fa. Lignatur:**

Eigengewicht Element

	h (mm)	kg/m <sup>2</sup>		h (mm)	kg/m <sup>2</sup>
	120	37		120	33
	140	39		140	35
	160	42		160	36
	180	44		180	38
	200	47		200	39
	220	49		220	41
	240	52		240	42
	280	63		280	45
	320	68		320	48

Statik Decke

	l (m)	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	10
	h (mm)	120	140	160	180	200	220	280	280	320	-	-
	q <sub>n</sub> = 200kg/m <sup>2</sup>											
	q <sub>k</sub> = 0kg/m <sup>2</sup>											
	g = 47kg/m <sup>2</sup>											
	w (mm)	8	9	9	9	10	11	7	9	9	-	-

**Pos. E01b Deckenbalken mit Schalung C24 (KVH) b/h =6/18 cm e = 62,5 cm + OSB h = 22 mm**

Lasten:

Belag g1 = 0,40 kN/m<sup>2</sup>  
 Trockenstrich \*TSD g2 = 0,30 kN/m<sup>2</sup>  
 Konstruktion g3 =0,06\*0,18/0,625\*5+0,16 = 0,25 kN/m<sup>2</sup>  
 Unterdecke g4 = 0,25 kN/m<sup>2</sup>

**Summe aus ständigen Lasten = 1,20 kN/m<sup>2</sup>**

q1 = 2,00 kN/m<sup>2</sup>  
 qtwz = 0,80 kN/m<sup>2</sup>

**Pos. Schalung OSB/3 h = 22 mm**

SterlingOSB/3-Zero nach DIN EN 300 als Deckenbeplankung <sup>1)</sup>													Tabelle 5.1	
Erforderliche Plattendicke d [mm] für NKL 1 / NKL 2														
Belastung: Eigengewicht g <sub>k</sub> [kN/m <sup>2</sup> ] und Nutzlast q <sub>k</sub> [kN/m <sup>2</sup> ] bzw. Q <sub>k</sub> [kN]														
Balkenabstand e [m]	g <sub>k</sub>	0,50				1,00				1,50				
		2,00		3,00		2,00		3,00		2,00		3,00		
		NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	
0,500		15	15	15	18	15	15	15	18	15	15	15	18	
0,600		15	18	18	18	18	18	18	22	18	18	18	22	
0,625		18	18	18	22	18	18	18	22	18	18	22	22	
0,650		18	18	22	22	18	18	22	22	18	22	22	22	
0,700		18	22	22	22	18	22	22	22	22	22	22	25	
0,800		22	22	25	25	22	25	25	25	22	25	25	2x22	
0,833		22	22	25	25	22	25	25	2x22	25	25	25	2x22	
1,000		25	2x22	2x22	2x25	2x22	2x22	2x22	2x25	2x22	2x25	2x25	2x25	

1) Randbedingungen für Berechnung:  
 - Plattenbreite b = 1,25 m, Platten mit Nut-und-Feder  
 - Verlegung als 2-Feldträger orthogonal zu den Deckenbalken  
 - Lastannahmen und Nachweise gem. Kap. 5.3  
 Die Tabellen ersetzen keinen statischen Nachweis. Dieser ist bauwerksbezogen nach DIN 1052 zu führen.

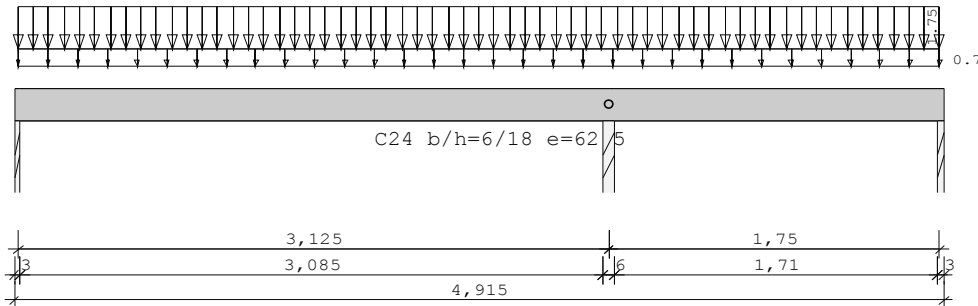
Position: 070-E01b  
 14.07.2014

Seite: 1

**Position: 070-E01b**

Durchlaufträger DLT10 01/2014/A Win 8

Maßstab 1 : 33


 Holzträger über 2 Felder  $e = 62.5$  cm C24  
 E-Modul  $E_{\text{mean}} = 11000$  N/mm<sup>2</sup> DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12

System	Länge	Querschnittswerte			
Feld	L (m)		b (cm)	h (cm)	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )
1	3.13	konstant	6.0	18.0	2916.0
2	1.75	konstant	6.0	18.0	2916.0

Gelenke : in Feld 2 bei  $x = 0.00$  m

 Flächenlast: ständige Flächenlast  $g = 1.12$  kN/m<sup>2</sup>  
 veränderliche Flächenlast  $q = 2.80$  kN/m<sup>2</sup> EW A

Einwirkungen:							
Nr	KI	Bezeichnung	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	$\gamma$	KLED
A	1	Wohnräume	0.70	0.50	0.30	1.50	mittel

 Schadensfolgeklasse CC 2 nach EN 1990 Tab. B1 ->  $K_{Fi} = 1.0$  Tab. B3  
 In den folgenden Tabellen steht am Ende der Zeilen ein Verweis auf die Nummer der zug. Überlagerung (siehe unten).  
 In Tabellen mit Gammafachen Schnittgrößen steht zusätzlich ein Verweis auf die Leiteinwirkung.

Ergebnisse für 1-fache Lasten								
Feldmomente Maximum						( kNm , kN )		
Feld		Mf	M li	M re	V li	V re	komb	
1	$x_0 =$	1.56	2.99	0.00	0.00	3.83	-3.83	2
2	$x_0 =$	0.88	0.94	0.00	0.00	2.14	-2.14	3

Position: 070-E01b  
 14.07.2014

Seite: 2

Stützmomente Maximum							( kNm , kN )	
Stütze	M li	M re	V li	V re	max F	min F	komb	
1	0.00	0.00	0.00	3.83	3.83	1.09	2	
2	0.00	0.00	-3.83	2.14	5.97	1.71	3	
3	0.00	0.00	-2.14	0.00	2.14	0.61	3	

Auflagerkräfte							( kN )	
Stütze	aus g	max q	min q	Vollast	max	min		
1	1.09	2.73	0.00	3.83	3.83	1.09		
2	1.71	4.27	0.00	5.97	5.97	1.71		
3	0.61	1.53	0.00	2.14	2.14	0.61		
Summe:	3.41	8.53	0.00	11.94	11.94	3.41		

Auflagerkräfte							( kN )	
EG	Stütze 1		Stütze 2		Stütze 3			
	max	min	max	min	max	min		
g	1.1	1.1	1.7	1.7	0.6	0.6		
A	2.7	0.0	4.3	0.0	1.5	0.0		
Sum	3.8	1.1	6.0	1.7	2.1	0.6		

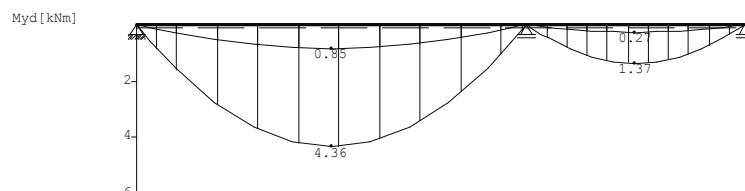
Durchbiegungen		maximale		minimale		
Feld Nr.	x (m)	f (cm) Komb		x (m)	f (cm) komb	
1	1.56	0.95	2	0.00	0.00	0
2	0.88	0.09	3	1.75	0.00	0

 Ergebnisse für  $\gamma$ -fache Lasten  
 Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G * K_{Fi} = 1.35$  feldweise konstant

Feldmomente Maximum							( kNm , kN )	
Feld		Mfd	Mdli	Mdre	V li	V re	komb	
1	$x_0 = 1.56$	4.36	0.00	0.00	5.58	-5.58	A 2	
2	$x_0 = 0.88$	1.37	0.00	0.00	3.12	-3.12	A 3	

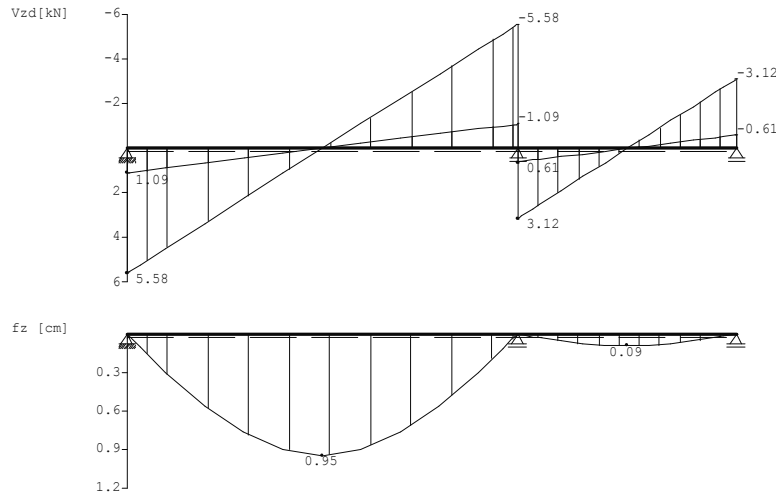
Stützmomente Maximum							( kNm , kN )	
Stütze		Mdli	Mdre	Vdli	Vdre	max F	min F	komb
1		0.00	0.00	0.00	5.58	5.58	1.09	A 2
2		0.00	0.00	-5.58	3.12	8.70	1.71	A 3
3		0.00	0.00	-3.12	0.00	3.12	0.61	A 3

Maßstab 1 : 50



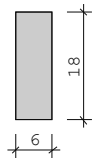
Position: 070-E01b  
 14.07.2014

Seite: 3



Bemessung: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 C24

Nutzungsklasse 1  $k_{def} = 0.60$   $\gamma_M = 1.30$   $\gamma_M(A) = 1.00$



$E_{mean} = 1100 \text{ kN/cm}^2$      $G_{mean} = 69 \text{ kN/cm}^2$   
 $f_{m,k}, M_y = 24.0 \text{ N/mm}^2$      $f_{m,k}, M_z = 24.0 \text{ N/mm}^2$   
 $f_{v,k}, V_z = 4.0 \text{ N/mm}^2$      $f_{v,k}, V_y = 4.0 \text{ N/mm}^2$

Spannungen mit FLBemHo901 gerechnet. (Version 9.0.2.5)  
 Normalspannungen  $b/h = 6/18$

Der Druckgurt ist kontinuierlich gehalten.

Feld Nr.	x (m)	$M_{y,d}$ (kNm)	$\sigma_{d,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{d,u}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{crit}$	$k_{mod}$	$\sigma_{d}/f_{m,d}$	komb
1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1
	1.56	4.36	-13.45	13.45	1.00	0.80	0.91	A 2
	3.13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.80	0.00	A 2
2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1
	0.88	1.37	-4.22	4.22	1.00	0.80	0.29	A 3
	1.75	0.00	0.00	0.00	1.00	0.80	0.00	A 3

Der Beiwert  $kh = 1.00$  nach EN 1995 3.2 (3) ist berücksichtigt.

Schubspannungen  $b/h = 6/18$

Stütze Nr.	x (m)	$V_{z,d}$ (kN)	$\tau_D$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{mod}$	$\tau_d/f_{v,d}$	komb
1 re	0.190	4.90	0.68	0.80	0.55	A 2
2 li	0.210	-4.83	0.67	0.80	0.54	A 2
re	0.210	2.37	0.33	0.80	0.27	A 3
3 li	0.190	-2.45	0.34	0.80	0.28	A 3

EN 1995 6.1.7 :  $k_{cr} = 0.50$

Auflager $f_{c,90,k} = 2.50 \text{ N/mm}^2$									
Stütze Nr.	b (cm)	d (cm)	max F (kN)	kmod	kc90	$\sigma_{c,90,d}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,d}$	$\eta$	komb
1	3.0	8.0	5.6	0.80	1.50	1.55	1.54	0.67	A 2
2	6.0	8.0	8.7	0.80	1.50	1.21	1.54	0.52	A 4
3	3.0	8.0	3.1	0.80	1.00	0.87	1.54	0.56	A 3

**Nachweis Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12**

(2.2.3 , 7.2)

 zul  $w_{inst} < L/300$ 

 zul  $w_{fin} < L/150$ 

 zul  $w_{net} < L/250$ 

Feld	x1 (mm)	wgB (	wqB mm	w	zul w	$\eta$		
1	1563	inst:	2.7	6.8	9.5	10.4	0.91	2
		fin:	4.3	8.0	12.3	20.8	0.59	2
		net:	4.3	8.0	12.3	12.5	0.99	2
2	875	inst:	0.3	0.7	0.9	5.8	0.16	3
		fin:	0.4	0.8	1.2	11.7	0.10	3
		net:	0.4	0.8	1.2	7.0	0.17	3

**Schwingungsnachweis Feld 1 DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12**

Nachweis Eigenfrequenz:  $m = 196 \text{ kg/m}^2$   
 Balken: 6/18  $EI = 0.321 \text{ MNm}^2$   
 Beiwert f. Durchlaufwirkung  $k_f = 1.25$   
 $f_0 = 10.30 \text{ Hz}$

Durchbiegung infolge Einzellast F

zul  $w_F = 1.80 \text{ mm/kN}$   
 $w_F = 1.44 \text{ mm/kN}$   $E_{ta} = 0.80$

 Schwinggeschwindigkeit infolge Einheitsimpuls  $v \leq b \cdot (f_1 \cdot K_{si} - 1)$ 

modaler Dämpfungsbeiwert

Beiwert

$K_{si} = 0.010$   
 $b = 102.20$   
 zul  $v = 0.0158 \text{ m}/(\text{Ns}^2)$   
 $\gamma = 0.99$   
 $v = 0.0042 \text{ m}/(\text{Ns}^2)$   $E_{ta} = 0.27$

 Schwinggeschwindigkeit infolge Tritt  $v \leq 6 \cdot b \cdot (f_1 \cdot K_{si} - 1)$ 

zul  $v = 0.0946 \text{ m/sec}$   
 $\gamma = 0.99$   
 $v = 0.2301 \text{ m/sec}$   $E_{ta} = 2.43$

Beschleunigung

zul  $a = 0.1000 \text{ m/sec}^2$  Wohlbefinden  
 $a = 14.8122 \text{ m/sec}^2$   $E_{ta} = 148.12$

**Schwingungsnachweis Feld 2 DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12**

Nachweis Eigenfrequenz:  $m = 196 \text{ kg/m}^2$   
 Balken: 6/18  $EI = 0.321 \text{ MNm}^2$   
 Beiwert f. Durchlaufwirkung  $k_f = 1.25$   
 $f_0 = 32.86 \text{ Hz}$

Durchbiegung infolge Einzellast F

zul  $w_F = 1.80 \text{ mm/kN}$   
 $w_F = 0.25 \text{ mm/kN}$   $E_{ta} = 0.14$

 Schwinggeschwindigkeit infolge Einheitsimpuls  $v \leq b \cdot (f_1 \cdot K_{si} - 1)$ 

modaler Dämpfungsbeiwert

Beiwert

$K_{si} = 0.010$   
 $b = 164.77$   
 zul  $v = 0.0325 \text{ m}/(\text{Ns}^2)$   
 $\gamma = 0.99$   
 $v = 0.0064 \text{ m}/(\text{Ns}^2)$   $E_{ta} = 0.20$

 Schwinggeschwindigkeit infolge Tritt  $v \leq 6 \cdot b \cdot (f_1 \cdot K_{si} - 1)$

**Schwingungsnachweis Feld 2 DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12**

$$\begin{aligned} \text{zul } v &= 0.1949 \text{ m/sec} \\ \gamma &= 0.99 \\ v &= 0.3529 \text{ m/sec} \quad \text{Eta} = 1.81 \end{aligned}$$

Beschleunigung

$$\begin{aligned} \text{zul } a &= 0.1000 \text{ m/sec}^2 \quad \text{Wohlbefinden} \\ a &= 26.4504 \text{ m/sec}^2 \quad \text{Eta} = 264.50 \end{aligned}$$

In der folgenden Tabelle sind die Lasten mit der internen Numerierung angegeben. Die anschließende Tabelle der gerechneten Kombinationen referenziert auf diese Nummern.

Nr.	Feld	Typ	Grp	Lasttyp : 1=Gleichlast über L 3=Einzelmoment bei a 5=Dreieckslast über L				2=Einzellast bei a 4=Trapezlast von a - a+b 6=Trapezlast über L		
				g1	q1	g2	q2	Faktor	Abstand	Länge
1	1	4	A 1	1.12	2.80	1.12	2.80	0.63	0.00	3.13
2	2	4	A 2	1.12	2.80	1.12	2.80	0.63	0.00	1.75

**Gerechnete Kombinationen aus 2 Lasten**

Last	K1	K2	K3	K4
1	g	g	g	g
2	.	x	.	x
2	.	.	x	x

Die vorstehenden Kombinationen werden wie folgt bearbeitet:  
 Beim Nachweis der Tragsicherheit werden die ständigen Lasten je einzeln alternierend mit  $\gamma_G = 1,00 / 1,35$  beaufschlagt.  
 Wenn in einer Kombination p-Lasten aus unterschiedlichen Einwirkungen vorhanden sind, dann wird jeweils untersucht, welche Einwirkung die Leiteinwirkung ist.  
 Die Auswirkung der Lasteinwirkungsdauer wird ebenfalls geprüft.



<b>INGENIEURBÜRO B I L D</b> Beratende Ingenieure VBI für Hoch-, Industrie- und Brückenbau 58093 Hagen Emster Straße 25 info@drbild.de Tel. 0 23 31 - 55 00 5 + 95 09 - 0 Fax 55 00 4	Projekt-Nr. : <b>070 - 14</b>
Bauwerk : +++ Haus	Seite : 31

**Pos. E01c Decken Decke mit Kerto-S-Balken (b/h = 69/200mm e = 125cm) und Kerto-Q- Platte (h=24mm)**

**Pos.Schalung Kerto-Q**

Lasten:

Belag g1 = 0,40 kN/m<sup>2</sup>  
 Trockenestrich \*TSD g2 = 0,30 kN/m<sup>2</sup>

**Summe aus ständigen Lasten = 0,70 kN/m<sup>2</sup>**

q1 = 2,00 kN/m<sup>2</sup>  
 qtwz = 0,80 kN/m<sup>2</sup>

für Tabelle: auf der sicheren Seite mit g = 0,5 (-0,2 kN/m<sup>2</sup>) und q = 3,0 (+0,2 kN/m<sup>2</sup>)  
 => für h = 24 mm L<= 1,25 m (mindestens 3 Feldträger)

VORBEMESSUNG VON KERTO-Q-PLATTEN FÜR DECKENSCHALUNG (ZWEIFELDTRÄGER)*									
		MAXIMALE SPANNWEITE l [m]							
AUFLAST	g <sub>k,auf</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	0,25				0,50			
NUTZLAST	q <sub>k</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	2,0	3,0	4,0	5,0	2,0	3,0	4,0	5,0
	21	1,26	1,12	1,02	0,96	1,22	1,09	1,01	0,94
	24	1,44	1,28	1,17	1,09	1,39	1,25	1,15	1,08
	27	1,64	1,46	1,34	1,25	1,59	1,42	1,31	1,23
	33	2,00	1,78	1,63	1,52	1,93	1,74	1,60	1,50
	39	2,35	2,10	1,93	1,80	2,27	2,05	1,89	1,77
PLATTENSTÄRKE [mm]	45	2,70	2,41	2,22	2,07	2,62	2,36	2,18	2,04

**Pos. Balken Kerto-S b/h = 51/220 mm oder 69/200mm e= 125cm**

Lasten:

Belag g1 = 0,40 kN/m<sup>2</sup>  
 Trockenstrich \*TSD g2 = 0,30 kN/m<sup>2</sup>  
 Schalung+Kerto-S g3 = (0,024+0,063\*0,24/1,25)\*4,8 = 0,17 kN/m<sup>2</sup>  
 Unterdecke g4 = 0,25 kN/m<sup>2</sup>

**Summe aus ständigen Lasten = 1,12 kN/m<sup>2</sup>**

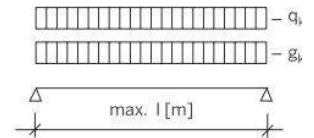
q1 = 1,50 kN/m<sup>2</sup>  
 qtwz = 0,80 kN/m<sup>2</sup>

g<sub>Kerto-S</sub> = 1,25\*1,12 = 1,40 kN/m

q<sub>Kerto-S</sub> = 1,25\*2,3 = 2,88 kN/m

für Tabelle Kerto-S: g ~1,5 kN/m und q ~ 3,0 kN/m

VORBEMESSUNG



**VORBEMESSUNG EINFELDTRÄGER – KERTO-S**

BALKENLAGE		1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00
g <sub>s</sub> [kN/m]		1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00
q <sub>s</sub> [kN/m]		2,00		3,00		4,00		5,00		6,00		6,00		6,00		
b [mm]	h [mm]	SPANNWEITE l [m] FÜR EINFELDTRÄGER														
45	180	2,84	2,69	2,56	2,56	2,46	2,36	2,36	2,28	2,21	2,21	2,15	2,09	2,09	2,04	1,99
	200	3,15	2,98	2,85	2,85	2,73	2,63	2,63	2,54	2,46	2,46	2,39	2,32	2,32	2,26	2,21
	220	3,47	3,28	3,13	3,13	3,00	2,89	2,89	2,79	2,70	2,70	2,62	2,55	2,55	2,49	2,43
	240	3,78	3,58	3,41	3,41	3,27	3,15	3,15	3,04	2,95	2,95	2,86	2,78	2,78	2,71	2,65
	260	4,09	3,88	3,70	3,70	3,54	3,41	3,41	3,30	3,19	3,19	3,10	3,02	3,02	2,94	2,87
	280	4,40	4,17	3,98	3,98	3,82	3,67	3,67	3,55	3,44	3,44	3,34	3,25	3,25	3,17	3,09
	300	4,72	4,47	4,26	4,26	4,09	3,94	3,94	3,80	3,68	3,68	3,58	3,48	3,48	3,39	3,31
	320	5,04	4,77	4,54	4,54	4,35	4,19	4,19	4,04	3,91	3,91	3,80	3,70	3,70	3,61	3,53
	340	5,36	5,09	4,84	4,84	4,63	4,46	4,46	4,29	4,15	4,15	4,03	3,92	3,92	3,83	3,75
	360	5,68	5,40	5,13	5,13	4,90	4,72	4,72	4,53	4,38	4,38	4,25	4,14	4,14	4,05	3,97
51	200	3,29	3,12	2,98	2,98	2,85	2,75	2,75	2,65	2,57	2,57	2,50	2,43	2,43	2,37	2,31
	220	3,62	3,43	3,27	3,27	3,14	3,02	3,02	2,92	2,83	2,83	2,75	2,67	2,67	2,61	2,54
	240	3,95	3,74	3,57	3,57	3,42	3,30	3,30	3,18	3,09	3,09	3,00	2,92	2,92	2,84	2,78
	260	4,27	4,05	3,86	3,86	3,71	3,57	3,57	3,45	3,34	3,34	3,25	3,16	3,16	3,08	3,01
	280	4,60	4,36	4,16	4,16	3,99	3,84	3,84	3,71	3,60	3,60	3,49	3,40	3,40	3,32	3,24
	300	4,93	4,67	4,46	4,46	4,27	4,12	4,12	3,98	3,85	3,85	3,74	3,64	3,64	3,55	3,47
	320	5,26	4,99	4,76	4,76	4,55	4,39	4,39	4,24	4,10	4,10	3,98	3,87	3,87	3,78	3,70
	340	5,59	5,31	5,07	5,07	4,84	4,67	4,67	4,51	4,36	4,36	4,23	4,11	4,11	4,02	3,94
	360	5,92	5,63	5,37	5,37	5,12	4,94	4,94	4,76	4,60	4,60	4,46	4,33	4,33	4,24	4,16
	380	6,25	5,95	5,67	5,67	5,39	5,19	5,19	4,99	4,81	4,81	4,66	4,52	4,52	4,43	4,35
57	200	3,42	3,24	3,10	3,10	2,97	2,86	2,86	2,76	2,68	2,68	2,60	2,53	2,53	2,47	2,41
	240	4,10	3,89	3,71	3,71	3,56	3,43	3,43	3,31	3,21	3,21	3,12	3,04	3,04	2,96	2,89
	280	4,78	4,53	4,33	4,33	4,15	4,00	4,00	3,87	3,75	3,75	3,64	3,54	3,54	3,45	3,37
	320	5,46	5,17	4,94	4,94	4,74	4,57	4,57	4,41	4,28	4,28	4,16	4,05	4,05	3,95	3,85
	360	6,13	5,82	5,55	5,55	5,33	5,13	5,13	4,96	4,81	4,81	4,67	4,55	4,55	4,44	4,33
	380	6,46	6,14	5,85	5,85	5,61	5,39	5,39	5,20	5,03	5,03	4,88	4,75	4,75	4,64	4,53
	400	6,79	6,46	6,15	6,15	5,89	5,65	5,65	5,44	5,25	5,25	5,09	4,95	4,95	4,83	4,72
	420	7,12	6,78	6,45	6,45	6,17	5,91	5,91	5,68	5,47	5,47	5,29	5,14	5,14	5,02	4,91
	440	7,45	7,11	6,76	6,76	6,45	6,17	6,17	5,92	5,69	5,69	5,49	5,32	5,32	5,20	5,09
	460	7,78	7,43	7,06	7,06	6,73	6,43	6,43	6,16	5,91	5,91	5,69	5,50	5,50	5,38	5,27
63	200	3,54	3,36	3,21	3,21	3,08	2,96	2,96	2,86	2,78	2,78	2,70	2,63	2,63	2,56	2,50
	240	4,25	4,03	3,84	3,84	3,69	3,55	3,55	3,44	3,33	3,33	3,24	3,15	3,15	3,07	3,00
	280	4,95	4,69	4,48	4,48	4,30	4,14	4,14	4,01	3,88	3,88	3,77	3,67	3,67	3,58	3,50
	320	5,65	5,36	5,12	5,12	4,91	4,73	4,73	4,57	4,44	4,44	4,31	4,20	4,20	4,09	4,00
	360	6,34	6,02	5,75	5,75	5,52	5,32	5,32	5,14	4,99	4,99	4,85	4,72	4,72	4,60	4,50
	380	6,67	6,33	6,03	6,03	5,77	5,55	5,55	5,35	5,18	5,18	5,02	4,87	4,87	4,75	4,64
	400	7,00	6,64	6,31	6,31	6,03	5,79	5,79	5,57	5,38	5,38	5,20	5,03	5,03	4,91	4,80
	420	7,33	6,95	6,60	6,60	6,30	6,04	6,04	5,80	5,59	5,59	5,39	5,20	5,20	5,07	4,96
	440	7,66	7,26	6,89	6,89	6,57	6,29	6,29	6,03	5,80	5,80	5,59	5,38	5,38	5,25	5,14
	460	7,99	7,57	7,18	7,18	6,84	6,54	6,54	6,25	5,99	5,99	5,76	5,54	5,54	5,41	5,30
69	200	3,66	3,47	3,31	3,31	3,18	3,06	3,06	2,96	2,87	2,87	2,79	2,71	2,71	2,65	2,59
	240	4,38	4,16	3,97	3,97	3,81	3,67	3,67	3,55	3,44	3,44	3,34	3,26	3,26	3,18	3,10
	280	5,10	4,84	4,62	4,62	4,44	4,28	4,28	4,14	4,01	4,01	3,90	3,80	3,80	3,70	3,62
	320	5,82	5,53	5,28	5,28	5,07	4,88	4,88	4,72	4,58	4,58	4,45	4,34	4,34	4,23	4,13
	360	6,54	6,21	5,93	5,93	5,70	5,49	5,49	5,31	5,15	5,15	5,01	4,88	4,88	4,76	4,65
	380	6,87	6,52	6,21	6,21	5,95	5,71	5,71	5,51	5,33	5,33	5,17	5,02	5,02	4,90	4,79
	400	7,20	6,83	6,50	6,50	6,22	5,96	5,96	5,74	5,54	5,54	5,36	5,19	5,19	5,07	4,96
	420	7,53	7,14	6,79	6,79	6,48	6,20	6,20	5,96	5,74	5,74	5,54	5,36	5,36	5,23	5,12
	440	7,86	7,45	7,08	7,08	6,75	6,45	6,45	6,20	5,96	5,96	5,74	5,54	5,54	5,41	5,30
	460	8,19	7,76	7,37	7,37	7,02	6,70	6,70	6,43	6,18	6,18	5,94	5,72	5,72	5,59	5,48

**Pos. E02: Mittelbalken KVH b/h = 12/24 cm für Decke ü. EG**

auf der sicheren Seite als Einfeldträger bemessen!

Lasten für Mittelbalken Pos.E02:

$$g_1 = 1,3 \cdot 3,125 \cdot 0,5 = 2,03 \text{ kN/m}$$

$$g_2 = 1,3 \cdot 1,75 \cdot 0,5 = 1,14 \text{ kN/m}$$

$$q_1 = 2,3 \cdot 3,125 \cdot 0,5 = 3,59 \text{ kN/m}$$

$$q_2 = 2,3 \cdot 1,75 \cdot 0,5 = 2,01 \text{ kN/m}$$

(Lastweiterleitung  $q = 1,5 + 0,8 = 2,3 \text{ kN/m}^2$ )

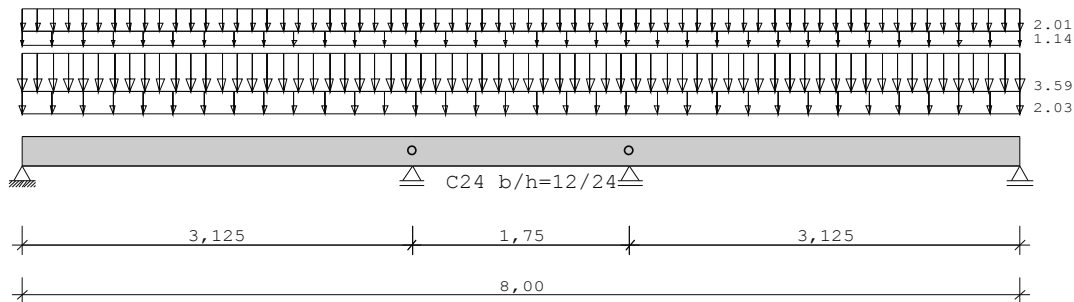
Position: 070-E02  
21.07.2014

Seite: 1

**Position: 070-E02**

Durchlaufträger DLT10 01/2014/A Win 8

Maßstab 1 : 50



Holzträger über 3 Felder C24  
E-Modul  $E_{mean} = 11000 \text{ N/mm}^2$  DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12

System	Länge	Querschnittswerte			
Feld	L (m)	b (cm)	h (cm)	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	
1	3.13	konstant	12.0	24.0	13824.0
2	1.75	konstant	12.0	24.0	13824.0
3	3.13	konstant	12.0	24.0	13824.0

Gelenke : in Feld 2 bei  $x = 0.00 \text{ m}$   
in Feld 3 bei  $x = 0.00 \text{ m}$

Trägerbezogene Lasten (kN,m)							
Typ	EG	Gr	VK	Lasttyp : 1=Gleichlast über L		2=Einzellast bei a	
				$g_{l/r}$	$q_{l/r}$	Fak.	Abst. Lb/Lc
1	J			2.03	3.59	1.00	3,125m
1	J			1.14	2.01	1.00	1,75m

Eigengewicht des Trägers ist mit  $\gamma = 6.0 \text{ kN/m}^3$  berücksichtigt.

Einwirkungen:							
Nr	KI	Bezeichnung	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	$\gamma$	KLED
J	3	Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00	1.50	kurz

Schadensfolgeklasse CC 2 nach EN 1990 Tab. B1 ->  $K_{Fi} = 1.0$  Tab. B3  
In den folgenden Tabellen steht am Ende der Zeilen ein Verweis auf die Nummer der zug. Überlagerung (siehe unten).  
In Tabellen mit Gammafachen Schnittgrößen steht zusätzlich ein Verweis auf die Leiteinwirkung.

**Ergebnisse für 1-fache Lasten**
**Feldmomente Maximum**

( kNm , kN )

Feld	Mf	M li	M re	V li	V re	komb
1 x0 = 1.56	10.92	0.00	0.00	13.97	-13.97	2
2 x0 = 0.88	3.42	0.00	0.00	7.82	-7.82	3
3 x0 = 1.56	10.92	0.00	0.00	13.97	-13.97	4

**Stützmomente Maximum**

( kNm , kN )

Stütze	M li	M re	V li	V re	max F	min F	komb
1	0.00	0.00	0.00	13.97	13.97	5.22	2
2	0.00	0.00	-13.97	7.82	21.80	8.15	3
3	0.00	0.00	-7.82	13.97	21.80	8.15	4
4	0.00	0.00	-13.97	0.00	13.97	5.22	4

**Auflagerkräfte**

( kN )

Stütze	aus g	max q	min q	Vollast	max	min
1	5.22	8.75	0.00	13.97	13.97	5.22
2	8.15	13.65	0.00	21.80	21.80	8.15
3	8.15	13.65	0.00	21.80	21.80	8.15
4	5.22	8.75	0.00	13.97	13.97	5.22
Summe:	26.74	44.80	0.00	71.54	71.54	26.74

**Auflagerkräfte**

( kN )

EG	Stütze 1		Stütze 2		Stütze 3		Stütze 4	
	max	min	max	min	max	min	max	min
g	5.2	5.2	8.1	8.1	8.1	8.1	5.2	5.2
J	8.8	0.0	13.7	0.0	13.7	0.0	8.8	0.0
Sum	14.0	5.2	21.8	8.1	21.8	8.1	14.0	5.2

**Durchbiegungen**

maximale

minimale

Feld Nr.	x (m)	f (cm) Komb	x (m)	f (cm) komb
1	1.56	0.73 2	0.00	0.00 0
2	0.88	0.07 3	1.75	0.00 0
3	1.56	0.73 4	3.12	0.00 0

**Ergebnisse für γ-fache Lasten**

 Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_G \cdot K_{Fi} = 1.35$  feldweise konstant

**Feldmomente Maximum**

( kNm , kN )

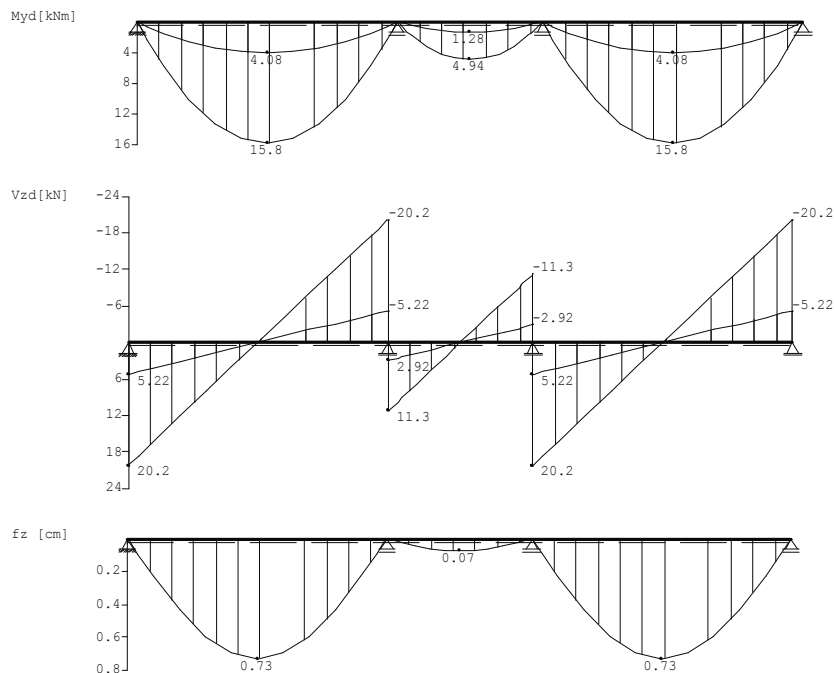
Feld	Mfd	Mdli	Mdre	V li	V re	komb
1 x0 = 1.56	15.76	0.00	0.00	20.18	-20.18	J 2
2 x0 = 0.88	4.94	0.00	0.00	11.30	-11.30	J 3
3 x0 = 1.56	15.76	0.00	0.00	20.18	-20.18	J 4

**Stützmomente Maximum**

( kNm , kN )

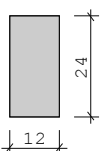
Stütze	Mdli	Mdre	Vdli	Vdre	max F	min F	komb
1	0.00	0.00	0.00	20.18	20.18	5.22	J 2
2	0.00	0.00	-20.18	11.30	31.47	8.15	J 3
3	0.00	0.00	-11.30	20.18	31.47	8.15	J 4
4	0.00	0.00	-20.18	0.00	20.18	5.22	J 4

Maßstab 1 : 75



Bemessung: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 C24

Nutzungsklasse 1  $k_{def} = 0.60$   $\gamma_M = 1.30$   $\gamma_M(A) = 1.00$



$E_{mean} = 1100 \text{ kN/cm}^2$      $G_{mean} = 69 \text{ kN/cm}^2$   
 $f_{m,k}, M_y = 24.0 \text{ N/mm}^2$      $f_{m,k}, M_z = 24.0 \text{ N/mm}^2$   
 $f_{v,k}, V_z = 4.0 \text{ N/mm}^2$      $f_{v,k}, V_y = 4.0 \text{ N/mm}^2$

Spannungen mit FLBemHo901 gerechnet. (Version 9.0.2.5)  
 Normalspannungen  $b/h = 12/24$

Der Druckgurt ist nur an den Auflagern gehalten.

Feld Nr.	x (m)	$M_{y,d}$ (kNm)	$\sigma_{d,o}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{d,u}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{crit}$	$k_{mod}$	$\sigma_d/f_{m,d}$	komb
1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1
	1.56	15.76	-13.68	13.68	1.00	0.90	0.82	J 2
	3.13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90	0.00	J 2
2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1
	0.88	4.94	-4.29	4.29	1.00	0.90	0.26	J 3
	1.75	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90	0.00	J 3
3	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1
	1.56	15.76	-13.68	13.68	1.00	0.90	0.82	J 4
	3.13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.90	0.00	J 4

Der Beiwert  $kh = 1.00$  nach EN 1995 3.2 (3) ist berücksichtigt.

Stütze Nr.		x (m)	Vz,d (kN)	$\tau_D$ (N/mm <sup>2</sup> )	k <sub>mod</sub>	$\tau_d/f_{v,d}$	komb
1	re	0.240	17.08	0.89	0.90	0.64	J 2
2	li	0.240	-17.08	0.89	0.90	0.64	J 2
	re	0.240	8.20	0.43	0.90	0.31	J 3
3	li	0.240	-8.20	0.43	0.90	0.31	J 3
	re	0.240	17.08	0.89	0.90	0.64	J 4
4	li	0.240	-17.08	0.89	0.90	0.64	J 4
EN 1995 6.1.7 : k <sub>cr</sub>			=	0.50			

Nachweis Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12  
 (2.2.3 , 7.2)  
 zul W<sub>inst</sub> < L/300                      zul W<sub>fin</sub> < L/200                      zul W<sub>net</sub> < L/250

Feld	x1 (mm)		wgB (	wqB mm	w	zul w )	$\eta$	
1	1563	inst:	2.7	4.6	7.3	10.4	0.70	2
		fin:	4.4	4.6	8.9	15.6	0.57	2
		net:	4.4	4.6	8.9	12.5	0.72	2
2	875	inst:	0.3	0.4	0.7	5.8	0.12	3
		fin:	0.4	0.4	0.9	8.8	0.10	3
		net:	0.4	0.4	0.9	7.0	0.13	3
3	1563	inst:	2.7	4.6	7.3	10.4	0.70	4
		fin:	4.4	4.6	8.9	15.6	0.57	4
		net:	4.4	4.6	8.9	12.5	0.72	4

In der folgenden Tabelle sind die Lasten mit der internen Numerierung angegeben. Die anschließende Tabelle der gerechneten Kombinationen referenziert auf diese Nummern.

Nr.	Feld	Typ	Grp	Lasttyp : 1=Gleichlast über L 3=Einzelmoment bei a 5=Dreieckslast über L				2=Einzellast bei a 4=Trapezlast von a - a+b 6=Trapezlast über L		
				g1	q1	g2	q2	Faktor	Abstand	Länge
1	1	4	J 1	2.03	3.59	2.03	3.59	1.00	0.00	3.13
				1.14	2.01	1.14	2.01	1.00	0.00	3.13
2	2	4	J 2	2.03	3.59	2.03	3.59	1.00	0.00	1.75
				1.14	2.01	1.14	2.01	1.00	0.00	1.75
3	3	4	J 3	2.03	3.59	2.03	3.59	1.00	0.00	3.13
				1.14	2.01	1.14	2.01	1.00	0.00	3.13

**Gerechnete Kombinationen aus 6 Lasten**

Last	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	g	g	g	g	g	g
2	.	x	.	.	x	.
3	.	.	x	.	x	.
4	.	x	.	.	x	.
5	.	.	x	.	x	.
6	.	.	.	x	.	x

Die vorstehenden Kombinationen werden wie folgt bearbeitet:  
 Beim Nachweis der Tragsicherheit werden die ständigen Lasten je einzeln alternierend mit  $\gamma_{G1}$  = 1,00 / 1,35 beaufschlagt.

<b>INGENIEURBÜRO B I L D</b> Beratende Ingenieure VBI für Hoch-, Industrie- und Brückenbau 58093 Hagen Emster Straße 25 info@drbild.de Tel. 0 23 31 - 55 00 5 + 95 09 - 0 Fax 55 00 4	Projekt-Nr. : <b>070 - 14</b>
Bauwerk : +++ Haus	Seite : 37

Position: 070-E02  
21.07.2014

Seite: 5

Gerechnete Kombinationen aus 6 Lasten

Last	K1	K2	K3	K4	K5	K6
------	----	----	----	----	----	----

Wenn in einer Kombination p-Lasten aus unterschiedlichen Einwirkungen vorhanden sind, dann wird jeweils untersucht, welche Einwirkung die Leiteinwirkung ist.  
Die Auswirkung der Lasteinwirkungsdauer wird ebenfalls geprüft.

### Pos. E03 Anschluss an Stütze:

max Vd = 20,2 kN

#### 1. Variante Balkenträger - verdeckt!

z.B. Simpson Strong Tie Typ Balkenträger BT4-200-B oder BTALU-200-B: Rd = 21,4\*0,8/1,3 kN  
 maximal 20 Nägel für den Stützenanschluss: b = 120 mm  
 Rd = 23,4 kN > 20,2 kN

#### 2. Variante vorgestellte Stiel

an die

b = 12 cm

$k_{c,90} * f_{c,90,d} = 1,5 * 0,25 * 0,8 / 1,3 = 0,231 \text{ kN/cm}^2$

erf. Auflagertiefe  $t = 20,2 / 0,231 / 12 - 3 = 4,29 \text{ cm}$

**Pos. S1 Holzstütze 4 x b/h = 12/12 cm KVH**

Annahme : Stütze in Deckenhöhe gehalten!

 Lasten aus D02: G1/S1 = 2,93/ 0,6/ 11,44 kN  
                   G2/S2 = 1,63/ 0,3/ 6,40 kN  
 aus E02 G3/Q1 = 5,22/ 8,75 kN  
           G4/Q2 = 2,93/ 4,90 kN

Position: 070-S1

21.07.2014

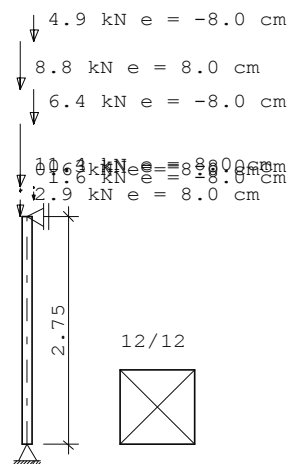
Seite: 1

**Position: 070-S1**

Holzstütze HO1 01/2014/A Win 8

Berechnungsgrundlagen: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12

PENDELSTÜTZE: H = 2.75 m 12/12 cm Nadelholz C24

 Nutzungskl = 1 (geschlossen, beheizt; LF<65%; GLWF<15%)  
 Kriechen wird bei Nutzungsklasse 1 nicht berücksichtigt!

**MASSGEBENDE SYSTEMGRÖSSEN für die Nachweise:**

lefy =	275 cm	lelz =	275 cm
lefm =	275 cm	km =	1.00
Lambda =	79.4	kc =	0.45

Lastfälle/Einwirkungen:	Psi0	Psi1	Psi2	Gamma
g1: Ständige Lasten	1.00	1.00	1.00	1.35
g2: Ständige Lasten	1.00	1.00	0.60, kdef =	0.60
g3: Lagerräume	1.00	0.90	0.80, kdef =	0.60
g4: Lagerräume	1.00	0.90	0.80, kdef =	0.60
s5: Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00, kdef =	0.60
s6: Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00, kdef =	0.60
q7: Wohnräume	0.70	0.50	0.30, kdef =	0.60
q8: Wohnräume	0.70	0.50	0.30, kdef =	0.60

**charakteristische Einwirkungen:**

Lf Nr.	Vx (kN)	ez (cm)	Hx (kN)	xH (cm)	qx (kN/m)	kmod	LED
1	2.9	8	0.00	0	0.00	0.60	ständig
2	1.6	-8	0.00	0	0.00	0.60	ständig
3	0.6	8	0.00	0	0.00	0.70	lang
4	0.3	-8	0.00	0	0.00	0.70	lang
5	11.4	8	0.00	0	0.00	0.90	kurz
6	6.4	-8	0.00	0	0.00	0.90	kurz
7	8.8	8	0.00	0	0.00	0.80	mittel
8	4.9	-8	0.00	0	0.00	0.80	mittel



**KOMBINATIONEN für Tragfähigkeit (ständig, vorübergehend)**

T54 : 1.35g+1.50s5+1.50q3+1.05q7  
 Gebrauchsfähigkeit permanent  
 G118 : 1.00g+0.80q3+0.80q4+0.30q7+0.30q8  
 G120 : 1.00g+0.30q7+0.80q3+0.80q4+0.30q8  
 Gebrauchsfähigkeit selten/rar  
 G190 : 1.00g+1.00s5+1.00q3+1.00q4+1.00s6+0.70q7+0.70q8

**Kombinations-Auswirkungen:**

Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED
1	-6.2	0.00	0.05	0.1	0.0	0.1	G	ständig
2	-7.1	0.21	0.08	0.2	0.0	0.1	NLE	lang
3	-6.6	0.00	0.04	0.2	0.0	0.1	NLE	lang
4	-23.3	1.51	0.55	0.1	0.2	0.3	S0A	kurz
5	-15.8	-0.63	-0.23	0.1	0.1	0.2	S0A	kurz
6	-19.3	1.19	0.43	0.2	0.2	0.3	NLA	mittel
7	-13.5	-0.45	-0.16	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
8	-7.5	0.18	0.06	0.2	0.0	0.1	NLE	lang
9	-7.5	0.18	0.06	0.2	0.0	0.1	NLE	lang
10	-15.6	0.90	0.33	0.2	0.1	0.2	S0A	kurz
11	-24.2	1.59	0.58	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz
12	-11.9	0.00	-0.06	0.2	0.1	0.1	S0A	kurz
13	-16.7	-0.56	-0.20	0.2	0.1	0.2	S0A	kurz
14	-16.2	0.95	0.34	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
15	-20.2	1.26	0.46	0.2	0.2	0.3	NLA	mittel
16	-12.2	0.00	-0.07	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
17	-14.4	-0.38	-0.14	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
18	-15.2	0.79	0.29	0.2	0.1	0.2	S0A	kurz
19	-23.8	1.48	0.54	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz
20	-11.4	-0.28	-0.10	0.2	0.1	0.1	S0A	kurz
21	-16.2	-0.66	-0.24	0.2	0.1	0.2	S0A	kurz
22	-15.8	0.84	0.31	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
23	-19.7	1.15	0.42	0.2	0.2	0.3	NLA	mittel
24	-11.8	-0.31	-0.11	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
25	-14.0	-0.48	-0.18	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
26	-32.9	0.75	0.27	0.1	0.4	0.4	S0A	kurz
27	-32.9	0.75	0.27	0.1	0.4	0.4	S0A	kurz
28	-32.5	2.25	0.82	0.2	0.4	0.4	S0A	kurz
29	-27.9	1.88	0.68	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz
30	-28.5	1.10	0.40	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz
31	-22.1	0.00	0.09	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz
32	-24.9	0.00	0.04	0.2	0.3	0.3	S0A	kurz
33	-24.1	0.81	0.29	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz
34	-20.9	-1.04	-0.38	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz
35	-18.3	-0.83	-0.30	0.2	0.2	0.2	S0A	kurz
36	-26.6	0.60	0.22	0.3	0.3	0.4	NLA	mittel
37	-26.6	0.60	0.22	0.3	0.3	0.4	NLA	mittel
38	-16.1	0.86	0.31	0.2	0.1	0.2	S0A	kurz
39	-16.1	0.86	0.31	0.2	0.1	0.2	S0A	kurz
40	-24.7	1.55	0.56	0.2	0.3	0.3	S0A	kurz
41	-12.3	0.00	-0.08	0.2	0.1	0.1	S0A	kurz
42	-12.3	0.00	-0.08	0.2	0.1	0.1	S0A	kurz
43	-17.1	-0.59	-0.22	0.2	0.1	0.2	S0A	kurz
44	-16.7	0.91	0.33	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel
45	-16.7	0.91	0.33	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel
46	-20.6	1.23	0.45	0.3	0.2	0.3	NLA	mittel
47	-12.7	0.00	-0.09	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
48	-12.7	0.00	-0.09	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
49	-14.9	-0.41	-0.15	0.2	0.1	0.2	NLA	mittel
50	-20.4	0.51	0.19	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz
51	-33.8	0.82	0.30	0.2	0.4	0.4	S0A	kurz
52	-33.8	0.82	0.30	0.2	0.4	0.4	S0A	kurz
53	-24.8	1.63	0.59	0.2	0.3	0.3	S0A	kurz
54	-33.4	2.32	0.84	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz
55	-28.8	1.95	0.71	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz
56	-20.8	0.49	0.18	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz

Kombinations-Auswirkungen:									
Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED	
57	-29.4	1.17	0.43	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
58	-23.0	0.00	0.11	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
59	-21.0	0.56	0.20	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
60	-25.8	0.00	0.07	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
61	-25.0	0.88	0.32	0.2	0.3	0.3	S0A	kurz	
62	-17.0	-0.58	-0.21	0.2	0.1	0.2	S0A	kurz	
63	-21.8	-0.97	-0.35	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
64	-19.2	-0.76	-0.28	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
65	-21.4	0.54	0.19	0.3	0.2	0.3	NLA	mittel	
66	-27.5	0.67	0.25	0.3	0.3	0.4	NLA	mittel	
67	-27.5	0.67	0.25	0.3	0.3	0.4	NLA	mittel	
68	-20.0	0.00	0.15	0.2	0.2	0.2	S0A	kurz	
69	-33.4	0.71	0.26	0.2	0.4	0.4	S0A	kurz	
70	-33.4	0.71	0.26	0.2	0.4	0.4	S0A	kurz	
71	-24.4	1.53	0.55	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
72	-33.0	2.21	0.80	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz	
73	-28.3	1.84	0.67	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
74	-20.3	0.00	0.14	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
75	-28.9	1.07	0.39	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
76	-22.5	0.00	0.07	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
77	-20.6	0.46	0.17	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
78	-25.4	0.00	0.03	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
79	-24.5	0.77	0.28	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
80	-16.6	-0.69	-0.25	0.2	0.1	0.2	S0A	kurz	
81	-21.4	-1.08	-0.39	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
82	-18.8	-0.87	-0.32	0.2	0.2	0.2	S0A	kurz	
83	-20.9	0.00	0.16	0.3	0.2	0.3	NLA	mittel	
84	-27.1	0.57	0.21	0.3	0.3	0.4	NLA	mittel	
85	-27.1	0.57	0.21	0.3	0.3	0.4	NLA	mittel	
86	-42.1	1.48	0.54	0.2	0.5	0.6	S0A	kurz	
87	-42.1	1.48	0.54	0.2	0.5	0.6	S0A	kurz	
88	-32.7	1.49	0.54	0.2	0.4	0.4	S0A	kurz	
89	-38.1	0.00	0.12	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz	
90	-38.1	0.00	0.12	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz	
91	-26.9	0.00	-0.05	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
92	-37.6	1.84	0.67	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
93	-35.2	1.29	0.47	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
94	-35.2	1.29	0.47	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
95	-30.1	0.00	-0.11	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
96	-31.4	0.00	0.08	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
97	-31.4	0.00	0.08	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
98	-20.9	0.48	0.17	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
99	-20.9	0.48	0.17	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
100	-34.3	0.78	0.28	0.2	0.4	0.4	S0A	kurz	
101	-34.3	0.78	0.28	0.2	0.4	0.4	S0A	kurz	
102	-25.3	1.60	0.58	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
103	-25.3	1.60	0.58	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
104	-33.9	2.28	0.83	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
105	-29.2	1.91	0.70	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
106	-21.2	0.00	0.16	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
107	-21.2	0.00	0.16	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
108	-29.8	1.14	0.41	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
109	-23.4	0.00	0.10	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
110	-21.5	0.53	0.19	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
111	-21.5	0.53	0.19	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
112	-26.3	0.00	0.05	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
113	-25.4	0.84	0.31	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
114	-17.5	-0.62	-0.23	0.2	0.2	0.2	S0A	kurz	
115	-17.5	-0.62	-0.23	0.2	0.2	0.2	S0A	kurz	
116	-22.3	-1.00	-0.36	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
117	-19.7	-0.80	-0.29	0.2	0.2	0.3	S0A	kurz	
118	-21.8	0.50	0.18	0.3	0.2	0.3	NLA	mittel	
119	-21.8	0.50	0.18	0.3	0.2	0.3	NLA	mittel	
120	-28.0	0.64	0.23	0.3	0.3	0.4	NLA	mittel	
121	-28.0	0.64	0.23	0.3	0.3	0.4	NLA	mittel	
122	-29.6	1.25	0.45	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
123	-43.0	1.55	0.56	0.2	0.5	0.6	S0A	kurz	
124	-43.0	1.55	0.56	0.2	0.5	0.6	S0A	kurz	

Kombinations-Auswirkungen:									
Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED	
125	-33.6	1.56	0.57	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz	
126	-25.6	0.00	0.04	0.2	0.3	0.3	S0A	kurz	
127	-39.0	0.00	0.15	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz	
128	-39.0	0.00	0.15	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz	
129	-27.8	0.00	-0.03	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
130	-30.0	1.22	0.44	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
131	-38.5	1.91	0.69	0.3	0.4	0.6	S0A	kurz	
132	-36.1	1.36	0.49	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
133	-36.1	1.36	0.49	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
134	-26.2	0.00	0.06	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
135	-31.0	0.00	-0.08	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
136	-32.3	0.00	0.11	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
137	-32.3	0.00	0.11	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
138	-29.2	1.14	0.42	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
139	-42.6	1.44	0.53	0.2	0.5	0.6	S0A	kurz	
140	-42.6	1.44	0.53	0.2	0.5	0.6	S0A	kurz	
141	-33.1	1.46	0.53	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz	
142	-25.1	0.00	0.00	0.2	0.3	0.3	S0A	kurz	
143	-38.5	0.00	0.11	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz	
144	-38.5	0.00	0.11	0.2	0.4	0.5	S0A	kurz	
145	-27.3	0.00	-0.07	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
146	-29.5	1.11	0.41	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
147	-38.1	1.80	0.65	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
148	-35.7	1.25	0.46	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
149	-35.7	1.25	0.46	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
150	-25.7	0.00	0.02	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
151	-30.5	0.00	-0.12	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
152	-31.9	0.00	0.07	0.3	0.3	0.5	S0A	kurz	
153	-31.9	0.00	0.07	0.3	0.3	0.5	S0A	kurz	
154	-47.2	1.07	0.39	0.3	0.6	0.7	S0A	kurz	
155	-47.2	1.07	0.39	0.3	0.6	0.7	S0A	kurz	
156	-40.0	0.90	0.33	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	
157	-40.0	0.90	0.33	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	
158	-30.1	1.21	0.44	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
159	-30.1	1.21	0.44	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
160	-43.5	1.52	0.55	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	
161	-43.5	1.52	0.55	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	
162	-34.0	1.53	0.56	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
163	-26.0	0.00	0.02	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
164	-26.0	0.00	0.02	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
165	-39.4	0.00	0.13	0.2	0.5	0.5	S0A	kurz	
166	-39.4	0.00	0.13	0.2	0.5	0.5	S0A	kurz	
167	-28.2	0.00	-0.04	0.2	0.3	0.4	S0A	kurz	
168	-30.4	1.19	0.43	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
169	-30.4	1.19	0.43	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
170	-39.0	1.87	0.68	0.3	0.4	0.6	S0A	kurz	
171	-36.6	1.32	0.48	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
172	-36.6	1.32	0.48	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
173	-26.6	0.00	0.04	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
174	-26.6	0.00	0.04	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
175	-31.4	0.00	-0.10	0.3	0.3	0.5	S0A	kurz	
176	-32.8	0.00	0.09	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
177	-32.8	0.00	0.09	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
178	-34.8	0.84	0.30	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
179	-48.1	1.14	0.41	0.3	0.6	0.7	S0A	kurz	
180	-48.1	1.14	0.41	0.3	0.6	0.7	S0A	kurz	
181	-40.9	0.98	0.36	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	
182	-40.9	0.98	0.36	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	
183	-34.3	0.73	0.27	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
184	-47.7	1.03	0.38	0.3	0.6	0.7	S0A	kurz	
185	-47.7	1.03	0.38	0.3	0.6	0.7	S0A	kurz	
186	-40.5	0.87	0.32	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	
187	-40.5	0.87	0.32	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	
188	-35.2	0.80	0.29	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
189	-35.2	0.80	0.29	0.3	0.4	0.5	S0A	kurz	
190	-48.6	1.10	0.40	0.3	0.6	0.7	S0A	kurz	
191	-48.6	1.10	0.40	0.3	0.6	0.7	S0A	kurz	
192	-41.4	0.94	0.34	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	

Kombinations-Auswirkungen:									
Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED	
193	-41.4	0.94	0.34	0.3	0.5	0.6	S0A	kurz	

Kombinations-SPANNUNGEN				
Kombi Nr.	Sigmac (MN/m2)	Sigmat (MN/m2)	Stabilität (MN/m2)	Tau (MN/m2)
1	-0.43(0.04)	-0.02(zg)	1.35(0.14)	0.01(0.01)
2	-0.64(0.06)	0.13(zg)	1.70(0.15)	0.02(0.01)
3	-0.46(0.04)	-0.16(zg)	1.32(0.12)	0.01(0.00)
4	-4.58(0.31)	2.78(zg)	7.98(0.55)	0.11(0.04)
5	-1.91(0.13)	0.73(zg)	4.24(0.29)	0.05(0.02)
6	-3.60(0.28)	2.12(zg)	6.42(0.50)	0.09(0.04)
7	-1.37(0.11)	0.36(zg)	3.38(0.26)	0.03(0.01)
8	-0.54(0.05)	-0.01(zg)	1.67(0.15)	0.01(0.01)
9	-0.54(0.05)	-0.01(zg)	1.67(0.15)	0.01(0.01)
10	-2.69(0.19)	1.53(zg)	5.01(0.34)	0.07(0.02)
11	-4.80(0.33)	2.92(zg)	8.33(0.57)	0.12(0.04)
12	-0.82(0.06)	-0.32(zg)	2.32(0.16)	0.01(0.00)
13	-1.71(0.12)	0.46(zg)	4.17(0.29)	0.04(0.02)
14	-2.85(0.22)	1.62(zg)	5.25(0.41)	0.07(0.03)
15	-3.82(0.30)	2.27(zg)	6.77(0.52)	0.10(0.04)
16	-0.85(0.07)	-0.27(zg)	2.45(0.19)	0.02(0.01)
17	-1.17(0.09)	0.09(zg)	3.30(0.26)	0.03(0.01)
18	-2.37(0.16)	1.24(zg)	4.63(0.32)	0.06(0.02)
19	-4.48(0.31)	2.64(zg)	7.94(0.55)	0.11(0.04)
20	-0.86(0.06)	0.02(zg)	2.56(0.18)	0.02(0.01)
21	-2.02(0.14)	0.80(zg)	4.42(0.30)	0.05(0.02)
22	-2.53(0.20)	1.34(zg)	4.87(0.38)	0.06(0.03)
23	-3.50(0.27)	1.98(zg)	6.39(0.49)	0.09(0.04)
24	-0.94(0.07)	0.08(zg)	2.70(0.21)	0.02(0.01)
25	-1.48(0.11)	0.44(zg)	3.55(0.27)	0.04(0.01)
26	-2.52(0.17)	-0.12(zg)	7.22(0.50)	0.06(0.02)
27	-2.52(0.17)	-0.12(zg)	7.22(0.50)	0.06(0.02)
28	-6.88(0.47)	4.28(zg)	11.53(0.79)	0.17(0.06)
29	-5.71(0.39)	3.52(zg)	9.73(0.67)	0.14(0.05)
30	-3.47(0.24)	1.22(zg)	7.57(0.52)	0.08(0.03)
31	-1.53(0.11)	-0.84(zg)	4.09(0.28)	0.02(0.01)
32	-1.73(0.12)	-1.42(zg)	4.14(0.29)	0.01(0.00)
33	-2.54(0.17)	0.67(zg)	6.04(0.42)	0.06(0.02)
34	-3.16(0.22)	1.57(zg)	6.23(0.43)	0.08(0.03)
35	-2.53(0.17)	1.15(zg)	5.23(0.36)	0.06(0.02)
36	-2.01(0.16)	-0.10(zg)	5.84(0.45)	0.05(0.02)
37	-2.01(0.16)	-0.10(zg)	5.84(0.45)	0.05(0.02)
38	-2.59(0.18)	1.39(zg)	4.98(0.34)	0.07(0.02)
39	-2.59(0.18)	1.39(zg)	4.98(0.34)	0.07(0.02)
40	-4.70(0.32)	2.79(zg)	8.29(0.57)	0.12(0.04)
41	-0.85(0.06)	-0.25(zg)	2.49(0.17)	0.02(0.01)
42	-0.85(0.06)	-0.25(zg)	2.49(0.17)	0.02(0.01)
43	-1.82(0.12)	0.53(zg)	4.35(0.30)	0.04(0.02)
44	-2.75(0.21)	1.49(zg)	5.21(0.40)	0.07(0.03)
45	-2.75(0.21)	1.49(zg)	5.21(0.40)	0.07(0.03)
46	-3.72(0.29)	2.13(zg)	6.73(0.52)	0.09(0.04)
47	-0.88(0.07)	-0.20(zg)	2.63(0.20)	0.02(0.01)
48	-0.88(0.07)	-0.20(zg)	2.63(0.20)	0.02(0.01)
49	-1.28(0.10)	0.16(zg)	3.48(0.27)	0.03(0.01)
50	-1.63(0.11)	0.08(zg)	4.64(0.32)	0.04(0.01)
51	-2.75(0.19)	0.03(zg)	7.57(0.52)	0.06(0.02)
52	-2.75(0.19)	0.03(zg)	7.57(0.52)	0.06(0.02)
53	-4.95(0.34)	3.02(zg)	8.56(0.59)	0.12(0.04)
54	-7.11(0.49)	4.42(zg)	11.87(0.82)	0.18(0.06)
55	-5.94(0.41)	3.67(zg)	10.08(0.69)	0.15(0.05)
56	-1.56(0.11)	-0.03(zg)	4.61(0.32)	0.04(0.01)
57	-3.70(0.25)	1.37(zg)	7.92(0.54)	0.09(0.03)
58	-1.60(0.11)	-0.69(zg)	4.43(0.31)	0.02(0.01)
59	-1.78(0.12)	0.18(zg)	4.87(0.33)	0.04(0.02)

Kombinations-SPANNUNGEN				
Kombi Nr.	Sigmat (MN/m <sup>2</sup> )	Sigmat (MN/m <sup>2</sup> )	Stabilität (MN/m <sup>2</sup> )	Tau (MN/m <sup>2</sup> )
60	-1.79(0.12)	-1.27(zg)	4.49(0.31)	0.01(0.00)
61	-2.76(0.19)	0.82(zg)	6.39(0.44)	0.07(0.02)
62	-1.79(0.12)	0.51(zg)	4.31(0.30)	0.04(0.02)
63	-2.97(0.20)	1.30(zg)	6.16(0.42)	0.07(0.03)
64	-2.33(0.16)	0.87(zg)	5.16(0.35)	0.06(0.02)
65	-1.73(0.13)	0.07(zg)	4.84(0.37)	0.04(0.02)
66	-2.24(0.17)	0.05(zg)	6.19(0.48)	0.05(0.02)
67	-2.24(0.17)	0.05(zg)	6.19(0.48)	0.05(0.02)
68	-1.39(0.10)	-0.21(zg)	4.25(0.29)	0.03(0.01)
69	-2.43(0.17)	-0.26(zg)	7.19(0.49)	0.05(0.02)
70	-2.43(0.17)	-0.26(zg)	7.19(0.49)	0.05(0.02)
71	-4.63(0.32)	2.74(zg)	8.18(0.56)	0.12(0.04)
72	-6.79(0.47)	4.14(zg)	11.49(0.79)	0.17(0.06)
73	-5.61(0.39)	3.38(zg)	9.70(0.67)	0.14(0.05)
74	-1.41(0.10)	-0.31(zg)	4.23(0.29)	0.03(0.01)
75	-3.37(0.23)	1.09(zg)	7.54(0.52)	0.08(0.03)
76	-1.57(0.11)	-0.98(zg)	4.05(0.28)	0.02(0.01)
77	-1.46(0.10)	-0.11(zg)	4.49(0.31)	0.03(0.01)
78	-1.76(0.12)	-1.56(zg)	4.11(0.28)	0.01(0.00)
79	-2.44(0.17)	0.53(zg)	6.01(0.41)	0.06(0.02)
80	-2.10(0.14)	0.86(zg)	4.55(0.31)	0.05(0.02)
81	-3.28(0.23)	1.64(zg)	6.40(0.44)	0.08(0.03)
82	-2.64(0.18)	1.22(zg)	5.40(0.37)	0.07(0.02)
83	-1.45(0.11)	-0.21(zg)	4.46(0.35)	0.03(0.01)
84	-1.92(0.15)	-0.23(zg)	5.81(0.45)	0.04(0.02)
85	-1.92(0.15)	-0.23(zg)	5.81(0.45)	0.04(0.02)
86	-4.89(0.34)	1.38(zg)	10.77(0.74)	0.11(0.04)
87	-4.89(0.34)	1.38(zg)	10.77(0.74)	0.11(0.04)
88	-4.69(0.32)	2.07(zg)	9.36(0.64)	0.11(0.04)
89	-2.64(0.18)	-1.67(zg)	6.82(0.47)	0.03(0.01)
90	-2.64(0.18)	-1.67(zg)	6.82(0.47)	0.03(0.01)
91	-1.87(0.13)	-1.45(zg)	4.55(0.31)	0.01(0.00)
92	-5.81(0.40)	2.72(zg)	11.12(0.76)	0.14(0.05)
93	-4.16(0.29)	1.30(zg)	9.15(0.63)	0.10(0.04)
94	-4.16(0.29)	1.30(zg)	9.15(0.63)	0.10(0.04)
95	-2.09(0.14)	-1.21(zg)	5.51(0.38)	0.02(0.01)
96	-2.18(0.15)	-1.55(zg)	5.46(0.38)	0.02(0.01)
97	-2.18(0.15)	-1.55(zg)	5.46(0.38)	0.02(0.01)
98	-1.54(0.11)	-0.06(zg)	4.60(0.32)	0.04(0.01)
99	-1.54(0.11)	-0.06(zg)	4.60(0.32)	0.04(0.01)
100	-2.66(0.18)	-0.11(zg)	7.53(0.52)	0.06(0.02)
101	-2.66(0.18)	-0.11(zg)	7.53(0.52)	0.06(0.02)
102	-4.85(0.33)	2.89(zg)	8.53(0.59)	0.12(0.04)
103	-4.85(0.33)	2.89(zg)	8.53(0.59)	0.12(0.04)
104	-7.02(0.48)	4.29(zg)	11.84(0.81)	0.17(0.06)
105	-5.84(0.40)	3.53(zg)	10.05(0.69)	0.14(0.05)
106	-1.47(0.10)	-0.16(zg)	4.57(0.31)	0.03(0.01)
107	-1.47(0.10)	-0.16(zg)	4.57(0.31)	0.03(0.01)
108	-3.60(0.25)	1.24(zg)	7.89(0.54)	0.09(0.03)
109	-1.63(0.11)	-0.83(zg)	4.40(0.30)	0.02(0.01)
110	-1.69(0.12)	0.04(zg)	4.83(0.33)	0.04(0.01)
111	-1.69(0.12)	0.04(zg)	4.83(0.33)	0.04(0.01)
112	-1.83(0.13)	-1.41(zg)	4.46(0.31)	0.01(0.00)
113	-2.66(0.18)	0.68(zg)	6.36(0.44)	0.06(0.02)
114	-1.90(0.13)	0.59(zg)	4.48(0.31)	0.05(0.02)
115	-1.90(0.13)	0.59(zg)	4.48(0.31)	0.05(0.02)
116	-3.08(0.21)	1.37(zg)	6.33(0.44)	0.08(0.03)
117	-2.44(0.17)	0.95(zg)	5.33(0.37)	0.06(0.02)
118	-1.63(0.13)	-0.06(zg)	4.81(0.37)	0.04(0.02)
119	-1.63(0.13)	-0.06(zg)	4.81(0.37)	0.04(0.02)
120	-2.15(0.17)	-0.09(zg)	6.15(0.48)	0.05(0.02)
121	-2.15(0.17)	-0.09(zg)	6.15(0.48)	0.05(0.02)
122	-3.92(0.27)	1.57(zg)	8.18(0.56)	0.09(0.03)
123	-5.12(0.35)	1.52(zg)	11.12(0.76)	0.12(0.04)
124	-5.12(0.35)	1.52(zg)	11.12(0.76)	0.12(0.04)
125	-4.92(0.34)	2.22(zg)	9.70(0.67)	0.12(0.04)
126	-1.78(0.12)	-1.48(zg)	4.23(0.29)	0.01(0.00)
127	-2.71(0.19)	-1.53(zg)	7.16(0.49)	0.03(0.01)

Kombinations-SPANNUNGEN				
Kombi Nr.	Sigmat (MN/m <sup>2</sup> )	Sigmat (MN/m <sup>2</sup> )	Stabilität (MN/m <sup>2</sup> )	Tau (MN/m <sup>2</sup> )
128	-2.71(0.19)	-1.53(zg)	7.16(0.49)	0.03(0.01)
129	-1.93(0.13)	-1.72(zg)	4.48(0.31)	0.01(0.00)
130	-3.85(0.26)	1.47(zg)	8.16(0.56)	0.09(0.03)
131	-6.04(0.42)	2.87(zg)	11.47(0.79)	0.14(0.05)
132	-4.39(0.30)	1.45(zg)	9.50(0.65)	0.10(0.04)
133	-4.39(0.30)	1.45(zg)	9.50(0.65)	0.10(0.04)
134	-1.82(0.13)	-1.38(zg)	4.46(0.31)	0.01(0.00)
135	-2.15(0.15)	-1.48(zg)	5.44(0.37)	0.02(0.01)
136	-2.25(0.15)	-1.40(zg)	5.81(0.40)	0.02(0.01)
137	-2.25(0.15)	-1.40(zg)	5.81(0.40)	0.02(0.01)
138	-3.60(0.25)	1.29(zg)	7.80(0.54)	0.09(0.03)
139	-4.80(0.33)	1.24(zg)	10.73(0.74)	0.11(0.04)
140	-4.80(0.33)	1.24(zg)	10.73(0.74)	0.11(0.04)
141	-4.60(0.32)	1.93(zg)	9.32(0.64)	0.11(0.04)
142	-1.75(0.12)	-1.73(zg)	3.88(0.27)	0.00(0.00)
143	-2.67(0.18)	-1.81(zg)	6.78(0.47)	0.02(0.01)
144	-2.67(0.18)	-1.81(zg)	6.78(0.47)	0.02(0.01)
145	-1.90(0.13)	-1.37(zg)	4.73(0.33)	0.01(0.00)
146	-3.53(0.24)	1.19(zg)	7.77(0.53)	0.08(0.03)
147	-5.71(0.39)	2.59(zg)	11.09(0.76)	0.14(0.05)
148	-4.06(0.28)	1.16(zg)	9.12(0.63)	0.09(0.03)
149	-4.06(0.28)	1.16(zg)	9.12(0.63)	0.09(0.03)
150	-1.79(0.12)	-1.66(zg)	4.08(0.28)	0.00(0.00)
151	-2.12(0.15)	-1.13(zg)	5.68(0.39)	0.03(0.01)
152	-2.21(0.15)	-1.68(zg)	5.43(0.37)	0.01(0.00)
153	-2.21(0.15)	-1.68(zg)	5.43(0.37)	0.01(0.00)
154	-3.85(0.26)	-0.18(zg)	10.36(0.71)	0.08(0.03)
155	-3.85(0.26)	-0.18(zg)	10.36(0.71)	0.08(0.03)
156	-3.16(0.22)	-0.15(zg)	8.78(0.60)	0.07(0.02)
157	-3.16(0.22)	-0.15(zg)	8.78(0.60)	0.07(0.02)
158	-3.83(0.26)	1.44(zg)	8.15(0.56)	0.09(0.03)
159	-3.83(0.26)	1.44(zg)	8.15(0.56)	0.09(0.03)
160	-5.03(0.35)	1.39(zg)	11.08(0.76)	0.11(0.04)
161	-5.03(0.35)	1.39(zg)	11.08(0.76)	0.11(0.04)
162	-4.83(0.33)	2.08(zg)	9.67(0.66)	0.12(0.04)
163	-1.81(0.12)	-1.61(zg)	4.19(0.29)	0.01(0.00)
164	-1.81(0.12)	-1.61(zg)	4.19(0.29)	0.01(0.00)
165	-2.74(0.19)	-1.66(zg)	7.13(0.49)	0.03(0.01)
166	-2.74(0.19)	-1.66(zg)	7.13(0.49)	0.03(0.01)
167	-1.96(0.13)	-1.64(zg)	4.66(0.32)	0.01(0.00)
168	-3.75(0.26)	1.33(zg)	8.12(0.56)	0.09(0.03)
169	-3.75(0.26)	1.33(zg)	8.12(0.56)	0.09(0.03)
170	-5.95(0.41)	2.73(zg)	11.43(0.79)	0.14(0.05)
171	-4.29(0.30)	1.31(zg)	9.47(0.65)	0.10(0.04)
172	-4.29(0.30)	1.31(zg)	9.47(0.65)	0.10(0.04)
173	-1.85(0.13)	-1.51(zg)	4.43(0.30)	0.01(0.00)
174	-1.85(0.13)	-1.51(zg)	4.43(0.30)	0.01(0.00)
175	-2.18(0.15)	-1.40(zg)	5.61(0.39)	0.02(0.01)
176	-2.28(0.16)	-1.54(zg)	5.78(0.40)	0.02(0.01)
177	-2.28(0.16)	-1.54(zg)	5.78(0.40)	0.02(0.01)
178	-2.84(0.20)	0.02(zg)	7.78(0.53)	0.06(0.02)
179	-4.08(0.28)	-0.03(zg)	10.71(0.74)	0.09(0.03)
180	-4.08(0.28)	-0.03(zg)	10.71(0.74)	0.09(0.03)
181	-3.39(0.23)	0.00(zg)	9.12(0.63)	0.07(0.03)
182	-3.39(0.23)	0.00(zg)	9.12(0.63)	0.07(0.03)
183	-2.51(0.17)	-0.26(zg)	7.39(0.51)	0.06(0.02)
184	-3.75(0.26)	-0.31(zg)	10.33(0.71)	0.08(0.03)
185	-3.75(0.26)	-0.31(zg)	10.33(0.71)	0.08(0.03)
186	-3.07(0.21)	-0.29(zg)	8.74(0.60)	0.07(0.02)
187	-3.07(0.21)	-0.29(zg)	8.74(0.60)	0.07(0.02)
188	-2.74(0.19)	-0.11(zg)	7.74(0.53)	0.06(0.02)
189	-2.74(0.19)	-0.11(zg)	7.74(0.53)	0.06(0.02)
190	-3.99(0.27)	-0.17(zg)	10.68(0.73)	0.08(0.03)
191	-3.99(0.27)	-0.17(zg)	10.68(0.73)	0.08(0.03)
192	-3.30(0.23)	-0.14(zg)	9.09(0.63)	0.07(0.03)
193	-3.30(0.23)	-0.14(zg)	9.09(0.63)	0.07(0.03)

Position: 070-S1

21.07.2014

Seite: 8

SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
g1	-2.9	0.23	275	0.09	0	0.09	0.09	
g2	-1.6	-0.13	275	-0.05	0	-0.05	-0.05	
q3	-0.6	0.05	275	0.02	0	0.02	0.02	
q4	-0.3	-0.02	275	-0.01	0	-0.01	-0.01	
s5	-11.4	0.92	275	0.33	0	0.33	0.33	
s6	-6.4	-0.51	275	-0.19	0	-0.19	-0.19	
q7	-8.8	0.70	275	0.25	0	0.25	0.25	
q8	-4.9	-0.39	275	-0.14	0	-0.14	-0.14	
T1	-6.2	0.14	275	0.05	14	0.05	0.05	
T2	-7.1	0.21	275	0.08	14	0.08	0.08	
T3	-6.6	0.10	275	0.04	14	0.04	0.04	
T4	-23.3	1.51	275	0.55	14	0.55	0.55	
T5	-15.8	-0.63	275	-0.23	14	-0.23	-0.23	
T6	-19.3	1.19	275	0.43	14	0.43	0.43	
T7	-13.5	-0.45	275	-0.16	14	-0.16	-0.16	
T8	-7.5	0.18	275	0.06	14	0.06	0.06	
T9	-7.5	0.18	275	0.06	14	0.06	0.06	
T10	-15.6	0.90	275	0.33	14	0.33	0.33	
T11	-24.2	1.59	275	0.58	14	0.58	0.58	
T12	-11.9	-0.17	275	-0.06	14	-0.06	-0.06	
T13	-16.7	-0.56	275	-0.20	14	-0.20	-0.20	
T14	-16.2	0.95	275	0.34	14	0.34	0.34	
T15	-20.2	1.26	275	0.46	14	0.46	0.46	
T16	-12.2	-0.20	275	-0.07	14	-0.07	-0.07	
T17	-14.4	-0.38	275	-0.14	14	-0.14	-0.14	
T18	-15.2	0.79	275	0.29	14	0.29	0.29	
T19	-23.8	1.48	275	0.54	14	0.54	0.54	
T20	-11.4	-0.28	275	-0.10	14	-0.10	-0.10	
T21	-16.2	-0.66	275	-0.24	14	-0.24	-0.24	
T22	-15.8	0.84	275	0.31	14	0.31	0.31	
T23	-19.7	1.15	275	0.42	14	0.42	0.42	
T24	-11.8	-0.31	275	-0.11	14	-0.11	-0.11	
T25	-14.0	-0.48	275	-0.18	14	-0.18	-0.18	
T26	-32.9	0.75	275	0.27	14	0.27	0.27	
T27	-32.9	0.75	275	0.27	14	0.27	0.27	
T28	-32.5	2.25	275	0.82	14	0.82	0.82	
T29	-27.9	1.88	275	0.68	14	0.68	0.68	
T30	-28.5	1.10	275	0.40	14	0.40	0.40	
T31	-22.1	0.24	275	0.09	14	0.09	0.09	
T32	-24.9	0.11	275	0.04	14	0.04	0.04	
T33	-24.1	0.81	275	0.29	14	0.29	0.29	
T34	-20.9	-1.04	275	-0.38	14	-0.38	-0.38	
T35	-18.3	-0.83	275	-0.30	14	-0.30	-0.30	
T36	-26.6	0.60	275	0.22	14	0.22	0.22	
T37	-26.6	0.60	275	0.22	14	0.22	0.22	
T38	-16.1	0.86	275	0.31	14	0.31	0.31	
T39	-16.1	0.86	275	0.31	14	0.31	0.31	
T40	-24.7	1.55	275	0.56	14	0.56	0.56	
T41	-12.3	-0.21	275	-0.08	14	-0.08	-0.08	
T42	-12.3	-0.21	275	-0.08	14	-0.08	-0.08	
T43	-17.1	-0.59	275	-0.22	14	-0.22	-0.22	
T44	-16.7	0.91	275	0.33	14	0.33	0.33	
T45	-16.7	0.91	275	0.33	14	0.33	0.33	
T46	-20.6	1.23	275	0.45	14	0.45	0.45	
T47	-12.7	-0.24	275	-0.09	14	-0.09	-0.09	
T48	-12.7	-0.24	275	-0.09	14	-0.09	-0.09	
T49	-14.9	-0.41	275	-0.15	14	-0.15	-0.15	
T50	-20.4	0.51	275	0.19	14	0.19	0.19	
T51	-33.8	0.82	275	0.30	14	0.30	0.30	
T52	-33.8	0.82	275	0.30	14	0.30	0.30	
T53	-24.8	1.63	275	0.59	14	0.59	0.59	
T54	-33.4	2.32	275	0.84	14	0.84	0.84	
T55	-28.8	1.95	275	0.71	14	0.71	0.71	
T56	-20.8	0.49	275	0.18	14	0.18	0.18	
T57	-29.4	1.17	275	0.43	14	0.43	0.43	
T58	-23.0	0.31	275	0.11	14	0.11	0.11	

SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	N <sub>x</sub> (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	x <sub>m</sub> (cm)	V (kN)	x <sub>v</sub> (cm)	V <sub>u</sub> (kN)	V <sub>o</sub> (kN)	M <sub>u</sub> (kNm)
T59	-21.0	0.56	275	0.20	14	0.20	0.20	
T60	-25.8	0.18	275	0.07	14	0.07	0.07	
T61	-25.0	0.88	275	0.32	14	0.32	0.32	
T62	-17.0	-0.58	275	-0.21	14	-0.21	-0.21	
T63	-21.8	-0.97	275	-0.35	14	-0.35	-0.35	
T64	-19.2	-0.76	275	-0.28	14	-0.28	-0.28	
T65	-21.4	0.54	275	0.19	14	0.19	0.19	
T66	-27.5	0.67	275	0.25	14	0.25	0.25	
T67	-27.5	0.67	275	0.25	14	0.25	0.25	
T68	-20.0	0.41	275	0.15	14	0.15	0.15	
T69	-33.4	0.71	275	0.26	14	0.26	0.26	
T70	-33.4	0.71	275	0.26	14	0.26	0.26	
T71	-24.4	1.53	275	0.55	14	0.55	0.55	
T72	-33.0	2.21	275	0.80	14	0.80	0.80	
T73	-28.3	1.84	275	0.67	14	0.67	0.67	
T74	-20.3	0.38	275	0.14	14	0.14	0.14	
T75	-28.9	1.07	275	0.39	14	0.39	0.39	
T76	-22.5	0.20	275	0.07	14	0.07	0.07	
T77	-20.6	0.46	275	0.17	14	0.17	0.17	
T78	-25.4	0.07	275	0.03	14	0.03	0.03	
T79	-24.5	0.77	275	0.28	14	0.28	0.28	
T80	-16.6	-0.69	275	-0.25	14	-0.25	-0.25	
T81	-21.4	-1.08	275	-0.39	14	-0.39	-0.39	
T82	-18.8	-0.87	275	-0.32	14	-0.32	-0.32	
T83	-20.9	0.43	275	0.16	14	0.16	0.16	
T84	-27.1	0.57	275	0.21	14	0.21	0.21	
T85	-27.1	0.57	275	0.21	14	0.21	0.21	
T86	-42.1	1.48	275	0.54	14	0.54	0.54	
T87	-42.1	1.48	275	0.54	14	0.54	0.54	
T88	-32.7	1.49	275	0.54	14	0.54	0.54	
T89	-38.1	0.33	275	0.12	14	0.12	0.12	
T90	-38.1	0.33	275	0.12	14	0.12	0.12	
T91	-26.9	-0.15	275	-0.05	14	-0.05	-0.05	
T92	-37.6	1.84	275	0.67	14	0.67	0.67	
T93	-35.2	1.29	275	0.47	14	0.47	0.47	
T94	-35.2	1.29	275	0.47	14	0.47	0.47	
T95	-30.1	-0.30	275	-0.11	14	-0.11	-0.11	
T96	-31.4	0.22	275	0.08	14	0.08	0.08	
T97	-31.4	0.22	275	0.08	14	0.08	0.08	
T98	-20.9	0.48	275	0.17	14	0.17	0.17	
T99	-20.9	0.48	275	0.17	14	0.17	0.17	
T100	-34.3	0.78	275	0.28	14	0.28	0.28	
T101	-34.3	0.78	275	0.28	14	0.28	0.28	
T102	-25.3	1.60	275	0.58	14	0.58	0.58	
T103	-25.3	1.60	275	0.58	14	0.58	0.58	
T104	-33.9	2.28	275	0.83	14	0.83	0.83	
T105	-29.2	1.91	275	0.70	14	0.70	0.70	
T106	-21.2	0.45	275	0.16	14	0.16	0.16	
T107	-21.2	0.45	275	0.16	14	0.16	0.16	
T108	-29.8	1.14	275	0.41	14	0.41	0.41	
T109	-23.4	0.27	275	0.10	14	0.10	0.10	
T110	-21.5	0.53	275	0.19	14	0.19	0.19	
T111	-21.5	0.53	275	0.19	14	0.19	0.19	
T112	-26.3	0.14	275	0.05	14	0.05	0.05	
T113	-25.4	0.84	275	0.31	14	0.31	0.31	
T114	-17.5	-0.62	275	-0.23	14	-0.23	-0.23	
T115	-17.5	-0.62	275	-0.23	14	-0.23	-0.23	
T116	-22.3	-1.00	275	-0.36	14	-0.36	-0.36	
T117	-19.7	-0.80	275	-0.29	14	-0.29	-0.29	
T118	-21.8	0.50	275	0.18	14	0.18	0.18	
T119	-21.8	0.50	275	0.18	14	0.18	0.18	
T120	-28.0	0.64	275	0.23	14	0.23	0.23	
T121	-28.0	0.64	275	0.23	14	0.23	0.23	
T122	-29.6	1.25	275	0.45	14	0.45	0.45	
T123	-43.0	1.55	275	0.56	14	0.56	0.56	
T124	-43.0	1.55	275	0.56	14	0.56	0.56	
T125	-33.6	1.56	275	0.57	14	0.57	0.57	
T126	-25.6	0.10	275	0.04	14	0.04	0.04	



SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
T127	-39.0	0.41	275	0.15	14	0.15	0.15	
T128	-39.0	0.41	275	0.15	14	0.15	0.15	
T129	-27.8	-0.07	275	-0.03	14	-0.03	-0.03	
T130	-30.0	1.22	275	0.44	14	0.44	0.44	
T131	-38.5	1.91	275	0.69	14	0.69	0.69	
T132	-36.1	1.36	275	0.49	14	0.49	0.49	
T133	-36.1	1.36	275	0.49	14	0.49	0.49	
T134	-26.2	0.15	275	0.06	14	0.06	0.06	
T135	-31.0	-0.23	275	-0.08	14	-0.08	-0.08	
T136	-32.3	0.29	275	0.11	14	0.11	0.11	
T137	-32.3	0.29	275	0.11	14	0.11	0.11	
T138	-29.2	1.14	275	0.42	14	0.42	0.42	
T139	-42.6	1.44	275	0.53	14	0.53	0.53	
T140	-42.6	1.44	275	0.53	14	0.53	0.53	
T141	-33.1	1.46	275	0.53	14	0.53	0.53	
T142	-25.1	0.00	275	0.00	14	0.00	0.00	
T143	-38.5	0.30	275	0.11	14	0.11	0.11	
T144	-38.5	0.30	275	0.11	14	0.11	0.11	
T145	-27.3	-0.18	275	-0.07	14	-0.07	-0.07	
T146	-29.5	1.11	275	0.41	14	0.41	0.41	
T147	-38.1	1.80	275	0.65	14	0.65	0.65	
T148	-35.7	1.25	275	0.46	14	0.46	0.46	
T149	-35.7	1.25	275	0.46	14	0.46	0.46	
T150	-25.7	0.04	275	0.02	14	0.02	0.02	
T151	-30.5	-0.34	275	-0.12	14	-0.12	-0.12	
T152	-31.9	0.18	275	0.07	14	0.07	0.07	
T153	-31.9	0.18	275	0.07	14	0.07	0.07	
T154	-47.2	1.07	275	0.39	14	0.39	0.39	
T155	-47.2	1.07	275	0.39	14	0.39	0.39	
T156	-40.0	0.90	275	0.33	14	0.33	0.33	
T157	-40.0	0.90	275	0.33	14	0.33	0.33	
T158	-30.1	1.21	275	0.44	14	0.44	0.44	
T159	-30.1	1.21	275	0.44	14	0.44	0.44	
T160	-43.5	1.52	275	0.55	14	0.55	0.55	
T161	-43.5	1.52	275	0.55	14	0.55	0.55	
T162	-34.0	1.53	275	0.56	14	0.56	0.56	
T163	-26.0	0.07	275	0.02	14	0.02	0.02	
T164	-26.0	0.07	275	0.02	14	0.02	0.02	
T165	-39.4	0.37	275	0.13	14	0.13	0.13	
T166	-39.4	0.37	275	0.13	14	0.13	0.13	
T167	-28.2	-0.11	275	-0.04	14	-0.04	-0.04	
T168	-30.4	1.19	275	0.43	14	0.43	0.43	
T169	-30.4	1.19	275	0.43	14	0.43	0.43	
T170	-39.0	1.87	275	0.68	14	0.68	0.68	
T171	-36.6	1.32	275	0.48	14	0.48	0.48	
T172	-36.6	1.32	275	0.48	14	0.48	0.48	
T173	-26.6	0.12	275	0.04	14	0.04	0.04	
T174	-26.6	0.12	275	0.04	14	0.04	0.04	
T175	-31.4	-0.27	275	-0.10	14	-0.10	-0.10	
T176	-32.8	0.25	275	0.09	14	0.09	0.09	
T177	-32.8	0.25	275	0.09	14	0.09	0.09	
T178	-34.8	0.84	275	0.30	14	0.30	0.30	
T179	-48.1	1.14	275	0.41	14	0.41	0.41	
T180	-48.1	1.14	275	0.41	14	0.41	0.41	
T181	-40.9	0.98	275	0.36	14	0.36	0.36	
T182	-40.9	0.98	275	0.36	14	0.36	0.36	
T183	-34.3	0.73	275	0.27	14	0.27	0.27	
T184	-47.7	1.03	275	0.38	14	0.38	0.38	
T185	-47.7	1.03	275	0.38	14	0.38	0.38	
T186	-40.5	0.87	275	0.32	14	0.32	0.32	
T187	-40.5	0.87	275	0.32	14	0.32	0.32	
T188	-35.2	0.80	275	0.29	14	0.29	0.29	
T189	-35.2	0.80	275	0.29	14	0.29	0.29	
T190	-48.6	1.10	275	0.40	14	0.40	0.40	
T191	-48.6	1.10	275	0.40	14	0.40	0.40	
T192	-41.4	0.94	275	0.34	14	0.34	0.34	
T193	-41.4	0.94	275	0.34	14	0.34	0.34	

**SPANNUNGSNACHWEISE: für Max.-Werte**

T54 Zugseite	SigmaZg=	4.42 MN/m2	gezogene Faserseite (mech.)
T54 Druck	Sigmac =	-7.11 MN/m2	< 14.54 MN/m2 (0.49)
T54 Stabilität	Sigmac =	11.87 MN/m2	< 14.54 MN/m2 (0.82)
T54 Schub	TauV =	0.18 MN/m2	< 2.77 MN/m2 (0.06)

**DURCHBIEGUNGEN für Extremalwerte:**

infolge permanenter/quasi-ständiger Einwirkungen					
G120	wpq fin =	0.31 cm	<	H/200	(0.22)
infolge rarer/seltener Einwirkungen					
G190	wrq inst =	0.58 cm	<	H/300	(0.63)
G190	wrq fin =	0.69 cm	<	H/200	(0.50)

Lf Nr	Schwelle b/h cm	Aufstand lba/lla cm	Abstand li/re cm	Aef/kc90 cm2/-	Pressung MN/m2
T19012.0/14.0		12/16	20/100	264/1.25	1.84 < 2.16(0.85)

**Pos. S1alternativ Holzstütze durchlaufend 4 x b/h = 14/20 cm KVH**

für den Fall, dass die Stütze durchgehend vom Dach bis Bodenplatte steht und keine horizontale Halterung in der Decke ü. EG möglich wäre

 Lasten aus D02: G1/S1 = 2,93/ 0,6/ 11,44 kN  
                   G2/S2 = 1,63/ 0,3/ 6,40 kN  
 aus E02 G3/Q1 = 5,22/ 8,75 kN  
                   G4/Q2 = 2,93/ 4,90 kN

 Position: 070-S1a  
 21.07.2014

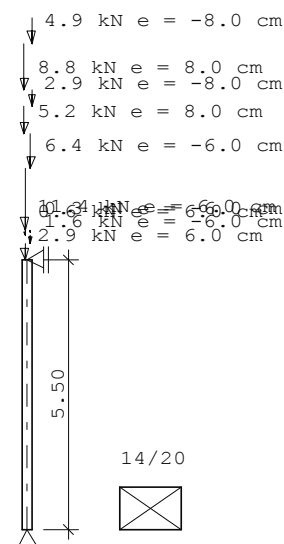
Seite: 1

**Position: 070-S1a**

Holzstütze HO1 01/2014/A Win 8

Berechnungsgrundlagen: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12

PENDELSTÜTZE: H = 5.50 m 14/20 cm Nadelholz C24

 Nutzungskl = 1 (geschlossen, beheizt; LF<65%; GLWF<15%)  
 Kriechen wird bei Nutzungsklasse 1 nicht berücksichtigt!

**MASSGEBENDE SYSTEMGRÖSSEN für die Nachweise:**

lefy =	550 cm	lefz =	550 cm
lefm =	550 cm	km =	1.00
Lambda =	136.1	kc =	0.17

Lastfälle/Einwirkungen:	Psi0	Psi1	Psi2	Gamma
g1: Ständige Lasten	1.00	1.00	1.00	1.35
	; kmod =		0.60, kdef =	0.60
g2: Ständige Lasten	1.00	1.00	1.00	1.35
	; kmod =		0.60, kdef =	0.60
q3: Lagerräume	1.00	0.90	0.80	1.50
	; kmod =		0.70, kdef =	0.60
q4: Lagerräume	1.00	0.90	0.80	1.50
	; kmod =		0.70, kdef =	0.60
s5: Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00	1.50
	; kmod =		0.90, kdef =	0.60
s6: Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00	1.50
	; kmod =		0.90, kdef =	0.60
g7: Ständige Lasten	1.00	1.00	1.00	1.35
	; kmod =		0.60, kdef =	0.60
g8: Ständige Lasten	1.00	1.00	1.00	1.35
	; kmod =		0.60, kdef =	0.60
q9: Wohnräume	0.70	0.50	0.30	1.50
	; kmod =		0.80, kdef =	0.60
q10: Wohnräume	0.70	0.50	0.30	1.50
	; kmod =		0.80, kdef =	0.60

## charakteristische Einwirkungen:

Lf Nr.	Vx (kN)	ez (cm)	H <sub>z</sub> (kN)	xH (cm)	q <sub>z</sub> (kN/m)	kmod	LED
1	2.9	6	0.00	0	0.00	0.60	ständig
2	1.6	-6	0.00	0	0.00	0.60	ständig
3	0.6	6	0.00	0	0.00	0.70	lang
4	0.3	-6	0.00	0	0.00	0.70	lang
5	11.4	6	0.00	0	0.00	0.90	kurz
6	6.4	-6	0.00	0	0.00	0.90	kurz
7	5.2	8	0.00	0	0.00	0.60	ständig
8	2.9	-8	0.00	0	0.00	0.60	ständig
9	8.8	8	0.00	0	0.00	0.80	mittel
10	4.9	-8	0.00	0	0.00	0.80	mittel

**KOMBINATIONEN für Tragfähigkeit (ständig, vorübergehend)**

T54 : 1.35g+1.50s5+1.50q3+1.05q9  
 T190 : 1.35g+1.50s5+1.50q3+1.50q4+1.50s6+1.05q9+1.05q10  
 Gebrauchsfähigkeit permanent  
 G118 : 1.00g+0.80q3+0.80q4+0.30q9+0.30q10  
 Gebrauchsfähigkeit selten/rar  
 G190 : 1.00g+1.00s5+1.00q3+1.00q4+1.00s6+0.70q9+0.70q10

**Kombinations-Auswirkungen:**

Kombi Nr.	N <sub>x</sub> (kN)	M <sub>y</sub> (kNm)	V <sub>z</sub> (kN)	w <sub>pq</sub> (cm)	w <sub>r inst</sub> (cm)	w <sub>r fin</sub> (cm)	EWG	LED
1	-17.2	0.00	0.06	0.3	0.0	0.1	G	ständig
2	-18.1	0.00	0.07	0.3	0.0	0.1	NLE	lang
3	-17.6	0.00	0.06	0.3	0.0	0.1	NLE	lang
4	-34.3	1.38	0.25	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
5	-26.8	0.00	-0.04	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
6	-30.3	1.40	0.26	0.3	0.1	0.3	NLA	mittel
7	-24.5	0.00	-0.04	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel
8	-18.5	0.00	0.07	0.3	0.0	0.1	NLE	lang
9	-18.5	0.00	0.07	0.3	0.0	0.1	NLE	lang
10	-26.6	0.00	0.17	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
11	-35.2	1.44	0.26	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
12	-22.9	0.00	0.02	0.3	0.0	0.2	S0A	kurz
13	-27.7	0.00	-0.03	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
14	-27.2	1.14	0.21	0.4	0.1	0.2	NLA	mittel
15	-31.2	1.46	0.26	0.4	0.1	0.3	NLA	mittel
16	-23.2	0.00	0.00	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel
17	-25.4	0.00	-0.03	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel
18	-26.2	0.00	0.15	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
19	-34.8	1.36	0.25	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
20	-22.4	0.00	0.01	0.3	0.0	0.1	S0A	kurz
21	-27.2	0.00	-0.05	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
22	-26.8	1.06	0.19	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel
23	-30.7	1.38	0.25	0.3	0.1	0.3	NLA	mittel
24	-22.8	0.00	-0.02	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel
25	-25.0	0.00	-0.05	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel
26	-43.9	0.00	0.15	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz
27	-43.9	0.00	0.15	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz
28	-43.5	2.12	0.38	0.3	0.2	0.4	S0A	kurz
29	-38.9	1.92	0.35	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz
30	-39.5	0.00	0.18	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz
31	-33.1	0.00	0.05	0.3	0.1	0.3	S0A	kurz
32	-35.9	0.00	0.09	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz
33	-35.1	0.00	0.20	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz
34	-31.9	0.00	-0.12	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
35	-29.3	0.00	-0.10	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
36	-37.6	0.00	0.15	0.4	0.2	0.3	NLA	mittel
37	-37.6	0.00	0.15	0.4	0.2	0.3	NLA	mittel
38	-27.1	0.00	0.16	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
39	-27.1	0.00	0.16	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
40	-35.7	1.41	0.26	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
41	-23.3	0.00	0.02	0.3	0.0	0.2	S0A	kurz
42	-23.3	0.00	0.02	0.3	0.0	0.2	S0A	kurz
43	-28.1	0.00	-0.04	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz
44	-27.7	1.11	0.20	0.4	0.1	0.2	NLA	mittel
45	-27.7	1.11	0.20	0.4	0.1	0.2	NLA	mittel
46	-31.6	1.43	0.26	0.4	0.1	0.3	NLA	mittel

Position: 070-S1a  
 21.07.2014

Seite: 3

Kombinations-Auswirkungen:									
Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED	
47	-23.7	0.00	-0.01	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel	
48	-23.7	0.00	-0.01	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel	
49	-25.9	0.00	-0.04	0.3	0.1	0.2	NLA	mittel	
50	-31.4	0.00	0.12	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
51	-44.8	0.00	0.16	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
52	-44.8	0.00	0.16	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
53	-35.8	1.66	0.30	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
54	-44.4	2.17	0.39	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
55	-39.8	1.97	0.36	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
56	-31.8	0.00	0.09	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
57	-40.4	0.00	0.19	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
58	-34.0	0.00	0.06	0.3	0.1	0.3	S0A	kurz	
59	-32.0	0.00	0.16	0.4	0.1	0.3	S0A	kurz	
60	-36.8	0.00	0.10	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
61	-36.0	0.00	0.21	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
62	-28.0	0.00	-0.05	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
63	-32.8	0.00	-0.11	0.3	0.1	0.3	S0A	kurz	
64	-30.2	0.00	-0.09	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
65	-32.4	0.00	0.13	0.4	0.2	0.3	NLA	mittel	
66	-38.5	0.00	0.16	0.4	0.2	0.4	NLA	mittel	
67	-38.5	0.00	0.16	0.4	0.2	0.4	NLA	mittel	
68	-31.0	0.00	0.10	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
69	-44.4	0.00	0.14	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
70	-44.4	0.00	0.14	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
71	-35.4	1.58	0.29	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
72	-44.0	2.09	0.38	0.3	0.2	0.4	S0A	kurz	
73	-39.3	1.89	0.34	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
74	-31.3	0.00	0.08	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
75	-39.9	0.00	0.17	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
76	-33.5	0.00	0.05	0.3	0.1	0.3	S0A	kurz	
77	-31.6	0.00	0.14	0.3	0.1	0.3	S0A	kurz	
78	-36.4	0.00	0.09	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
79	-35.5	0.00	0.20	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
80	-27.6	0.00	-0.07	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
81	-32.4	0.00	-0.12	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
82	-29.8	0.00	-0.10	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
83	-31.9	0.00	0.12	0.4	0.1	0.3	NLA	mittel	
84	-38.1	0.00	0.14	0.4	0.2	0.4	NLA	mittel	
85	-38.1	0.00	0.14	0.4	0.2	0.4	NLA	mittel	
86	-53.1	0.00	0.28	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
87	-53.1	0.00	0.28	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
88	-43.7	1.63	0.30	0.3	0.2	0.4	S0A	kurz	
89	-49.1	0.00	0.07	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
90	-49.1	0.00	0.07	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
91	-37.9	0.00	0.00	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
92	-48.7	1.71	0.31	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
93	-46.2	0.00	0.24	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
94	-46.2	0.00	0.24	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
95	-41.1	0.00	0.02	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
96	-42.4	0.00	0.10	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
97	-42.4	0.00	0.10	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
98	-31.9	0.00	0.11	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
99	-31.9	0.00	0.11	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
100	-45.3	0.00	0.15	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
101	-45.3	0.00	0.15	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
102	-36.3	1.63	0.30	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
103	-36.3	1.63	0.30	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
104	-44.9	2.14	0.39	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
105	-40.2	1.94	0.35	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
106	-32.2	0.00	0.09	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
107	-32.2	0.00	0.09	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
108	-40.8	0.00	0.18	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
109	-34.4	0.00	0.06	0.3	0.1	0.3	S0A	kurz	
110	-32.5	0.00	0.15	0.4	0.1	0.3	S0A	kurz	
111	-32.5	0.00	0.15	0.4	0.1	0.3	S0A	kurz	
112	-37.3	0.00	0.10	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
113	-36.4	0.00	0.21	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
114	-28.5	0.00	-0.06	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	

Kombinations-Auswirkungen:									
Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED	
115	-28.5	0.00	-0.06	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
116	-33.3	0.00	-0.11	0.3	0.1	0.3	S0A	kurz	
117	-30.7	0.00	-0.09	0.3	0.1	0.2	S0A	kurz	
118	-32.8	0.00	0.13	0.4	0.2	0.3	NLA	mittel	
119	-32.8	0.00	0.13	0.4	0.2	0.3	NLA	mittel	
120	-39.0	0.00	0.15	0.4	0.2	0.4	NLA	mittel	
121	-39.0	0.00	0.15	0.4	0.2	0.4	NLA	mittel	
122	-40.6	0.00	0.25	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
123	-54.0	0.00	0.29	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
124	-54.0	0.00	0.29	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
125	-44.6	1.68	0.31	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
126	-36.6	0.00	0.04	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
127	-50.0	0.00	0.08	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
128	-50.0	0.00	0.08	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
129	-38.8	0.00	0.01	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
130	-41.0	0.00	0.23	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
131	-49.6	1.76	0.32	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
132	-47.1	0.00	0.25	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
133	-47.1	0.00	0.25	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
134	-37.2	0.00	0.08	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
135	-42.0	0.00	0.03	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
136	-43.3	0.00	0.11	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
137	-43.3	0.00	0.11	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
138	-40.2	0.00	0.23	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
139	-53.6	0.00	0.28	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
140	-53.6	0.00	0.28	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
141	-44.1	1.60	0.29	0.3	0.2	0.4	S0A	kurz	
142	-36.1	0.00	0.03	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
143	-49.5	0.00	0.07	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
144	-49.5	0.00	0.07	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
145	-38.3	0.00	-0.01	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
146	-40.5	0.00	0.21	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
147	-49.1	1.68	0.31	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
148	-46.7	0.00	0.24	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
149	-46.7	0.00	0.24	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
150	-36.7	0.00	0.07	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
151	-41.5	0.00	0.01	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
152	-42.9	0.00	0.09	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
153	-42.9	0.00	0.09	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
154	-58.3	0.00	0.21	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	
155	-58.3	0.00	0.21	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	
156	-51.0	0.00	0.19	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
157	-51.0	0.00	0.19	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
158	-41.1	0.00	0.24	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
159	-41.1	0.00	0.24	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
160	-54.5	0.00	0.29	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
161	-54.5	0.00	0.29	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
162	-45.0	1.66	0.30	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
163	-37.0	0.00	0.04	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
164	-37.0	0.00	0.04	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
165	-50.4	0.00	0.08	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
166	-50.4	0.00	0.08	0.3	0.3	0.4	S0A	kurz	
167	-39.2	0.00	0.00	0.3	0.2	0.3	S0A	kurz	
168	-41.4	0.00	0.22	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
169	-41.4	0.00	0.22	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
170	-50.0	1.73	0.32	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
171	-47.6	0.00	0.25	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
172	-47.6	0.00	0.25	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
173	-37.6	0.00	0.08	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
174	-37.6	0.00	0.08	0.4	0.2	0.3	S0A	kurz	
175	-42.4	0.00	0.02	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
176	-43.8	0.00	0.10	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
177	-43.8	0.00	0.10	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
178	-45.8	0.00	0.17	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
179	-59.2	0.00	0.22	0.4	0.4	0.5	S0A	kurz	
180	-59.2	0.00	0.22	0.4	0.4	0.5	S0A	kurz	
181	-51.9	0.00	0.20	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	
182	-51.9	0.00	0.20	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	

Kombinations-Auswirkungen:									
Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED	
183	-45.3	0.00	0.16	0.4	0.2	0.4	S0A	kurz	
184	-58.7	0.00	0.20	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	
185	-58.7	0.00	0.20	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	
186	-51.5	0.00	0.18	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	
187	-51.5	0.00	0.18	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	
188	-46.2	0.00	0.17	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
189	-46.2	0.00	0.17	0.4	0.3	0.4	S0A	kurz	
190	-59.6	0.00	0.21	0.4	0.4	0.5	S0A	kurz	
191	-59.6	0.00	0.21	0.4	0.4	0.5	S0A	kurz	
192	-52.4	0.00	0.19	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	
193	-52.4	0.00	0.19	0.4	0.3	0.5	S0A	kurz	

Kombinations-SPANNUNGEN				
Kombi Nr.	Sigmac (MN/m2)	Sigmat (MN/m2)	Stabilität (MN/m2)	Tau (MN/m2)
1	-0.61(0.06)	-0.28(zg)	3.82(0.39)	0.01(0.00)
2	-0.64(0.06)	-0.26(zg)	4.05(0.36)	0.01(0.00)
3	-0.63(0.06)	-0.32(zg)	3.90(0.34)	0.01(0.00)
4	-1.40(0.10)	0.07(zg)	8.09(0.56)	0.03(0.01)
5	-0.96(0.07)	-0.75(zg)	5.75(0.40)	0.00(0.00)
6	-1.41(0.11)	0.23(zg)	7.26(0.56)	0.03(0.01)
7	-0.88(0.07)	-0.65(zg)	5.28(0.41)	0.00(0.00)
8	-0.66(0.06)	-0.31(zg)	4.12(0.36)	0.01(0.00)
9	-0.66(0.06)	-0.31(zg)	4.12(0.36)	0.01(0.00)
10	-0.95(0.07)	-0.09(zg)	6.18(0.43)	0.02(0.01)
11	-1.46(0.10)	0.09(zg)	8.31(0.57)	0.03(0.01)
12	-0.82(0.06)	-0.71(zg)	4.86(0.33)	0.00(0.00)
13	-0.99(0.07)	-0.83(zg)	5.90(0.41)	0.00(0.00)
14	-1.14(0.09)	0.10(zg)	6.45(0.50)	0.02(0.01)
15	-1.46(0.11)	0.25(zg)	7.48(0.58)	0.03(0.01)
16	-0.83(0.06)	-0.82(zg)	4.86(0.38)	0.00(0.00)
17	-0.91(0.07)	-0.74(zg)	5.44(0.42)	0.00(0.00)
18	-0.94(0.06)	-0.15(zg)	6.03(0.41)	0.02(0.01)
19	-1.38(0.09)	0.03(zg)	8.17(0.56)	0.03(0.01)
20	-0.80(0.06)	-0.77(zg)	4.71(0.32)	0.00(0.00)
21	-0.97(0.07)	-0.74(zg)	5.86(0.40)	0.00(0.00)
22	-1.07(0.08)	0.04(zg)	6.30(0.49)	0.02(0.01)
23	-1.38(0.11)	0.19(zg)	7.34(0.57)	0.03(0.01)
24	-0.81(0.06)	-0.73(zg)	4.82(0.37)	0.00(0.00)
25	-0.89(0.07)	-0.65(zg)	5.40(0.42)	0.01(0.00)
26	-1.57(0.11)	-0.81(zg)	9.72(0.67)	0.02(0.01)
27	-1.57(0.11)	-0.81(zg)	9.72(0.67)	0.02(0.01)
28	-2.15(0.15)	0.43(zg)	10.50(0.72)	0.04(0.01)
29	-1.93(0.13)	0.41(zg)	9.39(0.65)	0.04(0.01)
30	-1.41(0.10)	-0.50(zg)	8.90(0.61)	0.02(0.01)
31	-1.18(0.08)	-0.92(zg)	7.11(0.49)	0.01(0.00)
32	-1.28(0.09)	-0.80(zg)	7.86(0.54)	0.01(0.00)
33	-1.25(0.09)	-0.21(zg)	8.07(0.56)	0.02(0.01)
34	-1.14(0.08)	-0.54(zg)	7.09(0.49)	0.01(0.00)
35	-1.05(0.07)	-0.56(zg)	6.48(0.45)	0.01(0.00)
36	-1.34(0.10)	-0.58(zg)	8.41(0.65)	0.02(0.01)
37	-1.34(0.10)	-0.58(zg)	8.41(0.65)	0.02(0.01)
38	-0.97(0.07)	-0.13(zg)	6.26(0.43)	0.02(0.01)
39	-0.97(0.07)	-0.13(zg)	6.26(0.43)	0.02(0.01)
40	-1.43(0.10)	0.05(zg)	8.39(0.58)	0.03(0.01)
41	-0.83(0.06)	-0.75(zg)	4.94(0.34)	0.00(0.00)
42	-0.83(0.06)	-0.75(zg)	4.94(0.34)	0.00(0.00)
43	-1.00(0.07)	-0.82(zg)	6.01(0.41)	0.00(0.00)
44	-1.12(0.09)	0.06(zg)	6.53(0.51)	0.02(0.01)
45	-1.12(0.09)	0.06(zg)	6.53(0.51)	0.02(0.01)
46	-1.44(0.11)	0.21(zg)	7.56(0.58)	0.03(0.01)
47	-0.84(0.07)	-0.81(zg)	4.97(0.38)	0.00(0.00)
48	-0.84(0.07)	-0.81(zg)	4.97(0.38)	0.00(0.00)
49	-0.92(0.07)	-0.73(zg)	5.55(0.43)	0.00(0.00)

Kombinations-SPANNUNGEN				
Kombi Nr.	Sigmat (MN/m2)	Sigmat (MN/m2)	Stabilität (MN/m2)	Tau (MN/m2)
50	-1.12(0.08)	-0.53(zg)	7.00(0.48)	0.01(0.00)
51	-1.60(0.11)	-0.79(zg)	9.94(0.68)	0.02(0.01)
52	-1.60(0.11)	-0.79(zg)	9.94(0.68)	0.02(0.01)
53	-1.67(0.11)	0.27(zg)	8.59(0.59)	0.03(0.01)
54	-2.21(0.15)	0.45(zg)	10.72(0.74)	0.04(0.02)
55	-1.99(0.14)	0.43(zg)	9.62(0.66)	0.04(0.01)
56	-1.14(0.08)	-0.66(zg)	6.99(0.48)	0.01(0.00)
57	-1.44(0.10)	-0.48(zg)	9.12(0.63)	0.02(0.01)
58	-1.21(0.08)	-0.90(zg)	7.33(0.50)	0.01(0.00)
59	-1.14(0.08)	-0.34(zg)	7.27(0.50)	0.02(0.01)
60	-1.32(0.09)	-0.79(zg)	8.08(0.56)	0.01(0.00)
61	-1.29(0.09)	-0.19(zg)	8.30(0.57)	0.02(0.01)
62	-1.00(0.07)	-0.73(zg)	6.05(0.42)	0.01(0.00)
63	-1.17(0.08)	-0.63(zg)	7.25(0.50)	0.01(0.00)
64	-1.08(0.07)	-0.64(zg)	6.63(0.46)	0.01(0.00)
65	-1.16(0.09)	-0.47(zg)	7.26(0.56)	0.01(0.01)
66	-1.38(0.11)	-0.56(zg)	8.63(0.67)	0.02(0.01)
67	-1.38(0.11)	-0.56(zg)	8.63(0.67)	0.02(0.01)
68	-1.11(0.08)	-0.59(zg)	6.85(0.47)	0.01(0.00)
69	-1.58(0.11)	-0.85(zg)	9.80(0.67)	0.02(0.01)
70	-1.58(0.11)	-0.85(zg)	9.80(0.67)	0.02(0.01)
71	-1.59(0.11)	0.21(zg)	8.44(0.58)	0.03(0.01)
72	-2.13(0.15)	0.39(zg)	10.57(0.73)	0.04(0.01)
73	-1.91(0.13)	0.37(zg)	9.47(0.65)	0.04(0.01)
74	-1.12(0.08)	-0.72(zg)	6.84(0.47)	0.01(0.00)
75	-1.43(0.10)	-0.54(zg)	8.97(0.62)	0.02(0.01)
76	-1.20(0.08)	-0.96(zg)	7.19(0.49)	0.00(0.00)
77	-1.13(0.08)	-0.40(zg)	7.12(0.49)	0.02(0.01)
78	-1.30(0.09)	-0.85(zg)	7.94(0.55)	0.01(0.00)
79	-1.27(0.09)	-0.25(zg)	8.15(0.56)	0.02(0.01)
80	-0.98(0.07)	-0.63(zg)	6.01(0.41)	0.01(0.00)
81	-1.16(0.08)	-0.53(zg)	7.21(0.50)	0.01(0.00)
82	-1.06(0.07)	-0.55(zg)	6.59(0.45)	0.01(0.00)
83	-1.14(0.09)	-0.53(zg)	7.11(0.55)	0.01(0.01)
84	-1.36(0.11)	-0.62(zg)	8.49(0.66)	0.02(0.01)
85	-1.36(0.11)	-0.62(zg)	8.49(0.66)	0.02(0.01)
86	-1.90(0.13)	-0.45(zg)	12.13(0.83)	0.03(0.01)
87	-1.90(0.13)	-0.45(zg)	12.13(0.83)	0.03(0.01)
88	-1.69(0.12)	-0.03(zg)	10.21(0.70)	0.03(0.01)
89	-1.75(0.12)	-1.38(zg)	10.53(0.72)	0.01(0.00)
90	-1.75(0.12)	-1.38(zg)	10.53(0.72)	0.01(0.00)
91	-1.35(0.09)	-1.35(zg)	7.94(0.55)	0.00(0.00)
92	-1.81(0.12)	-0.14(zg)	11.30(0.78)	0.03(0.01)
93	-1.65(0.11)	-0.40(zg)	10.54(0.73)	0.03(0.01)
94	-1.65(0.11)	-0.40(zg)	10.54(0.73)	0.03(0.01)
95	-1.47(0.10)	-1.37(zg)	8.67(0.60)	0.00(0.00)
96	-1.52(0.10)	-1.02(zg)	9.23(0.63)	0.01(0.00)
97	-1.52(0.10)	-1.02(zg)	9.23(0.63)	0.01(0.00)
98	-1.14(0.08)	-0.57(zg)	7.07(0.49)	0.01(0.00)
99	-1.14(0.08)	-0.57(zg)	7.07(0.49)	0.01(0.00)
100	-1.62(0.11)	-0.84(zg)	10.02(0.69)	0.02(0.01)
101	-1.62(0.11)	-0.84(zg)	10.02(0.69)	0.02(0.01)
102	-1.64(0.11)	0.23(zg)	8.66(0.60)	0.03(0.01)
103	-1.64(0.11)	0.23(zg)	8.66(0.60)	0.03(0.01)
104	-2.19(0.15)	0.41(zg)	10.80(0.74)	0.04(0.02)
105	-1.96(0.14)	0.39(zg)	9.69(0.67)	0.04(0.01)
106	-1.15(0.08)	-0.70(zg)	7.06(0.49)	0.01(0.00)
107	-1.15(0.08)	-0.70(zg)	7.06(0.49)	0.01(0.00)
108	-1.46(0.10)	-0.52(zg)	9.20(0.63)	0.02(0.01)
109	-1.23(0.08)	-0.94(zg)	7.41(0.51)	0.01(0.00)
110	-1.16(0.08)	-0.39(zg)	7.34(0.51)	0.02(0.01)
111	-1.16(0.08)	-0.39(zg)	7.34(0.51)	0.02(0.01)
112	-1.33(0.09)	-0.83(zg)	8.16(0.56)	0.01(0.00)
113	-1.30(0.09)	-0.23(zg)	8.37(0.58)	0.02(0.01)
114	-1.02(0.07)	-0.72(zg)	6.17(0.42)	0.01(0.00)
115	-1.02(0.07)	-0.72(zg)	6.17(0.42)	0.01(0.00)
116	-1.19(0.08)	-0.62(zg)	7.36(0.51)	0.01(0.00)
117	-1.09(0.08)	-0.63(zg)	6.74(0.46)	0.01(0.00)



Kombinations-SPANNUNGEN				
Kombi Nr.	Sigmat (MN/m <sup>2</sup> )	Sigmat (MN/m <sup>2</sup> )	Stabilität (MN/m <sup>2</sup> )	Tau (MN/m <sup>2</sup> )
118	-1.17(0.09)	-0.51(zg)	7.33(0.57)	0.01(0.01)
119	-1.17(0.09)	-0.51(zg)	7.33(0.57)	0.01(0.01)
120	-1.39(0.11)	-0.60(zg)	8.71(0.67)	0.02(0.01)
121	-1.39(0.11)	-0.60(zg)	8.71(0.67)	0.02(0.01)
122	-1.45(0.10)	-0.17(zg)	9.40(0.65)	0.03(0.01)
123	-1.93(0.13)	-0.43(zg)	12.35(0.85)	0.03(0.01)
124	-1.93(0.13)	-0.43(zg)	12.35(0.85)	0.03(0.01)
125	-1.75(0.12)	-0.01(zg)	10.43(0.72)	0.03(0.01)
126	-1.31(0.09)	-1.10(zg)	7.80(0.54)	0.00(0.00)
127	-1.78(0.12)	-1.36(zg)	10.75(0.74)	0.01(0.00)
128	-1.78(0.12)	-1.36(zg)	10.75(0.74)	0.01(0.00)
129	-1.39(0.10)	-1.34(zg)	8.15(0.56)	0.00(0.00)
130	-1.46(0.10)	-0.30(zg)	9.39(0.65)	0.02(0.01)
131	-1.87(0.13)	-0.12(zg)	11.53(0.79)	0.03(0.01)
132	-1.68(0.12)	-0.39(zg)	10.77(0.74)	0.03(0.01)
133	-1.68(0.12)	-0.39(zg)	10.77(0.74)	0.03(0.01)
134	-1.33(0.09)	-0.91(zg)	8.07(0.56)	0.01(0.00)
135	-1.50(0.10)	-1.36(zg)	8.89(0.61)	0.00(0.00)
136	-1.55(0.11)	-1.00(zg)	9.45(0.65)	0.01(0.00)
137	-1.55(0.11)	-1.00(zg)	9.45(0.65)	0.01(0.00)
138	-1.43(0.10)	-0.23(zg)	9.25(0.64)	0.03(0.01)
139	-1.91(0.13)	-0.49(zg)	12.20(0.84)	0.03(0.01)
140	-1.91(0.13)	-0.49(zg)	12.20(0.84)	0.03(0.01)
141	-1.67(0.12)	-0.07(zg)	10.28(0.71)	0.03(0.01)
142	-1.29(0.09)	-1.16(zg)	7.66(0.53)	0.00(0.00)
143	-1.77(0.12)	-1.42(zg)	10.60(0.73)	0.01(0.00)
144	-1.77(0.12)	-1.42(zg)	10.60(0.73)	0.01(0.00)
145	-1.37(0.09)	-1.34(zg)	8.05(0.55)	0.00(0.00)
146	-1.45(0.10)	-0.36(zg)	9.24(0.64)	0.02(0.01)
147	-1.79(0.12)	-0.18(zg)	11.38(0.78)	0.03(0.01)
148	-1.67(0.11)	-0.45(zg)	10.62(0.73)	0.03(0.01)
149	-1.67(0.11)	-0.45(zg)	10.62(0.73)	0.03(0.01)
150	-1.31(0.09)	-0.97(zg)	7.93(0.55)	0.01(0.00)
151	-1.48(0.10)	-1.42(zg)	8.74(0.60)	0.00(0.00)
152	-1.53(0.11)	-1.06(zg)	9.30(0.64)	0.01(0.00)
153	-1.53(0.11)	-1.06(zg)	9.30(0.64)	0.01(0.00)
154	-2.08(0.14)	-1.02(zg)	12.93(0.89)	0.02(0.01)
155	-2.08(0.14)	-1.02(zg)	12.93(0.89)	0.02(0.01)
156	-1.82(0.13)	-0.85(zg)	11.36(0.78)	0.02(0.01)
157	-1.82(0.13)	-0.85(zg)	11.36(0.78)	0.02(0.01)
158	-1.47(0.10)	-0.21(zg)	9.48(0.65)	0.03(0.01)
159	-1.47(0.10)	-0.21(zg)	9.48(0.65)	0.03(0.01)
160	-1.94(0.13)	-0.47(zg)	12.43(0.85)	0.03(0.01)
161	-1.94(0.13)	-0.47(zg)	12.43(0.85)	0.03(0.01)
162	-1.73(0.12)	-0.05(zg)	10.51(0.72)	0.03(0.01)
163	-1.32(0.09)	-1.14(zg)	7.88(0.54)	0.00(0.00)
164	-1.32(0.09)	-1.14(zg)	7.88(0.54)	0.00(0.00)
165	-1.80(0.12)	-1.41(zg)	10.83(0.74)	0.01(0.00)
166	-1.80(0.12)	-1.41(zg)	10.83(0.74)	0.01(0.00)
167	-1.40(0.10)	-1.38(zg)	8.22(0.57)	0.00(0.00)
168	-1.48(0.10)	-0.34(zg)	9.47(0.65)	0.02(0.01)
169	-1.48(0.10)	-0.34(zg)	9.47(0.65)	0.02(0.01)
170	-1.84(0.13)	-0.16(zg)	11.60(0.80)	0.03(0.01)
171	-1.70(0.12)	-0.43(zg)	10.85(0.75)	0.03(0.01)
172	-1.70(0.12)	-0.43(zg)	10.85(0.75)	0.03(0.01)
173	-1.34(0.09)	-0.96(zg)	8.15(0.56)	0.01(0.00)
174	-1.34(0.09)	-0.96(zg)	8.15(0.56)	0.01(0.00)
175	-1.52(0.10)	-1.40(zg)	8.97(0.62)	0.00(0.00)
176	-1.56(0.11)	-1.04(zg)	9.53(0.66)	0.01(0.00)
177	-1.56(0.11)	-1.04(zg)	9.53(0.66)	0.01(0.00)
178	-1.63(0.11)	-0.74(zg)	10.21(0.70)	0.02(0.01)
179	-2.11(0.15)	-1.00(zg)	13.16(0.90)	0.02(0.01)
180	-2.11(0.15)	-1.00(zg)	13.16(0.90)	0.02(0.01)
181	-1.85(0.13)	-0.83(zg)	11.58(0.80)	0.02(0.01)
182	-1.85(0.13)	-0.83(zg)	11.58(0.80)	0.02(0.01)
183	-1.62(0.11)	-0.80(zg)	10.06(0.69)	0.02(0.01)
184	-2.10(0.14)	-1.06(zg)	13.01(0.89)	0.02(0.01)
185	-2.10(0.14)	-1.06(zg)	13.01(0.89)	0.02(0.01)

Kombinations-SPANNUNGEN				
Kombi Nr.	Sigmat (MN/m <sup>2</sup> )	Sigmat (MN/m <sup>2</sup> )	Stabilität (MN/m <sup>2</sup> )	Tau (MN/m <sup>2</sup> )
186	-1.84(0.13)	-0.89(zg)	11.44(0.79)	0.02(0.01)
187	-1.84(0.13)	-0.89(zg)	11.44(0.79)	0.02(0.01)
188	-1.65(0.11)	-0.78(zg)	10.28(0.71)	0.02(0.01)
189	-1.65(0.11)	-0.78(zg)	10.28(0.71)	0.02(0.01)
190	-2.13(0.15)	-1.04(zg)	13.23(0.91)	0.02(0.01)
191	-2.13(0.15)	-1.04(zg)	13.23(0.91)	0.02(0.01)
192	-1.87(0.13)	-0.87(zg)	11.66(0.80)	0.02(0.01)
193	-1.87(0.13)	-0.87(zg)	11.66(0.80)	0.02(0.01)

SCHNITT-LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
g1	-2.9	0.18	550	0.03	0	0.03	0.03	
g2	-1.6	-0.10	550	-0.02	0	-0.02	-0.02	
q3	-0.6	0.04	550	0.01	0	0.01	0.01	
q4	-0.3	-0.02	550	0.00	0	0.00	0.00	
s5	-11.4	0.69	550	0.12	0	0.12	0.12	
s6	-6.4	-0.38	550	-0.07	0	-0.07	-0.07	
g7	-5.2	0.42	550	0.08	0	0.08	0.08	
g8	-2.9	-0.23	550	-0.04	0	-0.04	-0.04	
q9	-8.8	0.70	550	0.13	0	0.13	0.13	
q10	-4.9	-0.39	550	-0.07	0	-0.07	-0.07	
T1	-17.2	0.35	550	0.06	28	0.06	0.06	
T2	-18.1	0.41	550	0.07	28	0.07	0.07	
T3	-17.6	0.33	550	0.06	28	0.06	0.06	
T4	-34.3	1.38	550	0.25	28	0.25	0.25	
T5	-26.8	-0.22	550	-0.04	28	-0.04	-0.04	
T6	-30.3	1.40	550	0.26	28	0.26	0.26	
T7	-24.5	-0.24	550	-0.04	28	-0.04	-0.04	
T8	-18.5	0.38	550	0.07	28	0.07	0.07	
T9	-18.5	0.38	550	0.07	28	0.07	0.07	
T10	-26.6	0.92	550	0.17	28	0.17	0.17	
T11	-35.2	1.44	550	0.26	28	0.26	0.26	
T12	-22.9	0.12	550	0.02	28	0.02	0.02	
T13	-27.7	-0.17	550	-0.03	28	-0.03	-0.03	
T14	-27.2	1.14	550	0.21	28	0.21	0.21	
T15	-31.2	1.46	550	0.26	28	0.26	0.26	
T16	-23.2	0.00	550	0.00	28	0.00	0.00	
T17	-25.4	-0.18	550	-0.03	28	-0.03	-0.03	
T18	-26.2	0.84	550	0.15	28	0.15	0.15	
T19	-34.8	1.36	550	0.25	28	0.25	0.25	
T20	-22.4	0.04	550	0.01	28	0.01	0.01	
T21	-27.2	-0.25	550	-0.05	28	-0.05	-0.05	
T22	-26.8	1.06	550	0.19	28	0.19	0.19	
T23	-30.7	1.38	550	0.25	28	0.25	0.25	
T24	-22.8	-0.09	550	-0.02	28	-0.02	-0.02	
T25	-25.0	-0.26	550	-0.05	28	-0.05	-0.05	
T26	-43.9	0.81	550	0.15	28	0.15	0.15	
T27	-43.9	0.81	550	0.15	28	0.15	0.15	
T28	-43.5	2.12	550	0.38	28	0.38	0.38	
T29	-38.9	1.92	550	0.35	28	0.35	0.35	
T30	-39.5	0.97	550	0.18	28	0.18	0.18	
T31	-33.1	0.28	550	0.05	28	0.05	0.05	
T32	-35.9	0.51	550	0.09	28	0.09	0.09	
T33	-35.1	1.11	550	0.20	28	0.20	0.20	
T34	-31.9	-0.63	550	-0.12	28	-0.12	-0.12	
T35	-29.3	-0.52	550	-0.10	28	-0.10	-0.10	
T36	-37.6	0.81	550	0.15	28	0.15	0.15	
T37	-37.6	0.81	550	0.15	28	0.15	0.15	
T38	-27.1	0.89	550	0.16	28	0.16	0.16	
T39	-27.1	0.89	550	0.16	28	0.16	0.16	
T40	-35.7	1.41	550	0.26	28	0.26	0.26	
T41	-23.3	0.09	550	0.02	28	0.02	0.02	

SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
T42	-23.3	0.09	550	0.02	28	0.02	0.02	
T43	-28.1	-0.20	550	-0.04	28	-0.04	-0.04	
T44	-27.7	1.11	550	0.20	28	0.20	0.20	
T45	-27.7	1.11	550	0.20	28	0.20	0.20	
T46	-31.6	1.43	550	0.26	28	0.26	0.26	
T47	-23.7	-0.03	550	-0.01	28	-0.01	-0.01	
T48	-23.7	-0.03	550	-0.01	28	-0.01	-0.01	
T49	-25.9	-0.21	550	-0.04	28	-0.04	-0.04	
T50	-31.4	0.63	550	0.12	28	0.12	0.12	
T51	-44.8	0.86	550	0.16	28	0.16	0.16	
T52	-44.8	0.86	550	0.16	28	0.16	0.16	
T53	-35.8	1.66	550	0.30	28	0.30	0.30	
T54	-44.4	2.17	550	0.39	28	0.39	0.39	
T55	-39.8	1.97	550	0.36	28	0.36	0.36	
T56	-31.8	0.51	550	0.09	28	0.09	0.09	
T57	-40.4	1.02	550	0.19	28	0.19	0.19	
T58	-34.0	0.33	550	0.06	28	0.06	0.06	
T59	-32.0	0.85	550	0.16	28	0.16	0.16	
T60	-36.8	0.57	550	0.10	28	0.10	0.10	
T61	-36.0	1.17	550	0.21	28	0.21	0.21	
T62	-28.0	-0.29	550	-0.05	28	-0.05	-0.05	
T63	-32.8	-0.58	550	-0.11	28	-0.11	-0.11	
T64	-30.2	-0.47	550	-0.09	28	-0.09	-0.09	
T65	-32.4	0.73	550	0.13	28	0.13	0.13	
T66	-38.5	0.87	550	0.16	28	0.16	0.16	
T67	-38.5	0.87	550	0.16	28	0.16	0.16	
T68	-31.0	0.55	550	0.10	28	0.10	0.10	
T69	-44.4	0.78	550	0.14	28	0.14	0.14	
T70	-44.4	0.78	550	0.14	28	0.14	0.14	
T71	-35.4	1.58	550	0.29	28	0.29	0.29	
T72	-44.0	2.09	550	0.38	28	0.38	0.38	
T73	-39.3	1.89	550	0.34	28	0.34	0.34	
T74	-31.3	0.43	550	0.08	28	0.08	0.08	
T75	-39.9	0.94	550	0.17	28	0.17	0.17	
T76	-33.5	0.25	550	0.05	28	0.05	0.05	
T77	-31.6	0.77	550	0.14	28	0.14	0.14	
T78	-36.4	0.48	550	0.09	28	0.09	0.09	
T79	-35.5	1.09	550	0.20	28	0.20	0.20	
T80	-27.6	-0.37	550	-0.07	28	-0.07	-0.07	
T81	-32.4	-0.66	550	-0.12	28	-0.12	-0.12	
T82	-29.8	-0.55	550	-0.10	28	-0.10	-0.10	
T83	-31.9	0.65	550	0.12	28	0.12	0.12	
T84	-38.1	0.79	550	0.14	28	0.14	0.14	
T85	-38.1	0.79	550	0.14	28	0.14	0.14	
T86	-53.1	1.54	550	0.28	28	0.28	0.28	
T87	-53.1	1.54	550	0.28	28	0.28	0.28	
T88	-43.7	1.63	550	0.30	28	0.30	0.30	
T89	-49.1	0.39	550	0.07	28	0.07	0.07	
T90	-49.1	0.39	550	0.07	28	0.07	0.07	
T91	-37.9	-0.01	550	0.00	28	0.00	0.00	
T92	-48.7	1.71	550	0.31	28	0.31	0.31	
T93	-46.2	1.33	550	0.24	28	0.24	0.24	
T94	-46.2	1.33	550	0.24	28	0.24	0.24	
T95	-41.1	0.10	550	0.02	28	0.02	0.02	
T96	-42.4	0.53	550	0.10	28	0.10	0.10	
T97	-42.4	0.53	550	0.10	28	0.10	0.10	
T98	-31.9	0.61	550	0.11	28	0.11	0.11	
T99	-31.9	0.61	550	0.11	28	0.11	0.11	
T100	-45.3	0.83	550	0.15	28	0.15	0.15	
T101	-45.3	0.83	550	0.15	28	0.15	0.15	
T102	-36.3	1.63	550	0.30	28	0.30	0.30	
T103	-36.3	1.63	550	0.30	28	0.30	0.30	
T104	-44.9	2.14	550	0.39	28	0.39	0.39	
T105	-40.2	1.94	550	0.35	28	0.35	0.35	
T106	-32.2	0.48	550	0.09	28	0.09	0.09	
T107	-32.2	0.48	550	0.09	28	0.09	0.09	
T108	-40.8	1.00	550	0.18	28	0.18	0.18	
T109	-34.4	0.31	550	0.06	28	0.06	0.06	

SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
T110	-32.5	0.83	550	0.15	28	0.15	0.15	
T111	-32.5	0.83	550	0.15	28	0.15	0.15	
T112	-37.3	0.54	550	0.10	28	0.10	0.10	
T113	-36.4	1.14	550	0.21	28	0.21	0.21	
T114	-28.5	-0.32	550	-0.06	28	-0.06	-0.06	
T115	-28.5	-0.32	550	-0.06	28	-0.06	-0.06	
T116	-33.3	-0.61	550	-0.11	28	-0.11	-0.11	
T117	-30.7	-0.50	550	-0.09	28	-0.09	-0.09	
T118	-32.8	0.70	550	0.13	28	0.13	0.13	
T119	-32.8	0.70	550	0.13	28	0.13	0.13	
T120	-39.0	0.84	550	0.15	28	0.15	0.15	
T121	-39.0	0.84	550	0.15	28	0.15	0.15	
T122	-40.6	1.37	550	0.25	28	0.25	0.25	
T123	-54.0	1.60	550	0.29	28	0.29	0.29	
T124	-54.0	1.60	550	0.29	28	0.29	0.29	
T125	-44.6	1.68	550	0.31	28	0.31	0.31	
T126	-36.6	0.22	550	0.04	28	0.04	0.04	
T127	-50.0	0.45	550	0.08	28	0.08	0.08	
T128	-50.0	0.45	550	0.08	28	0.08	0.08	
T129	-38.8	0.05	550	0.01	28	0.01	0.01	
T130	-41.0	1.24	550	0.23	28	0.23	0.23	
T131	-49.6	1.76	550	0.32	28	0.32	0.32	
T132	-47.1	1.38	550	0.25	28	0.25	0.25	
T133	-47.1	1.38	550	0.25	28	0.25	0.25	
T134	-37.2	0.44	550	0.08	28	0.08	0.08	
T135	-42.0	0.15	550	0.03	28	0.03	0.03	
T136	-43.3	0.58	550	0.11	28	0.11	0.11	
T137	-43.3	0.58	550	0.11	28	0.11	0.11	
T138	-40.2	1.29	550	0.23	28	0.23	0.23	
T139	-53.6	1.51	550	0.28	28	0.28	0.28	
T140	-53.6	1.51	550	0.28	28	0.28	0.28	
T141	-44.1	1.60	550	0.29	28	0.29	0.29	
T142	-36.1	0.14	550	0.03	28	0.03	0.03	
T143	-49.5	0.37	550	0.07	28	0.07	0.07	
T144	-49.5	0.37	550	0.07	28	0.07	0.07	
T145	-38.3	-0.04	550	-0.01	28	-0.01	-0.01	
T146	-40.5	1.16	550	0.21	28	0.21	0.21	
T147	-49.1	1.68	550	0.31	28	0.31	0.31	
T148	-46.7	1.30	550	0.24	28	0.24	0.24	
T149	-46.7	1.30	550	0.24	28	0.24	0.24	
T150	-36.7	0.36	550	0.07	28	0.07	0.07	
T151	-41.5	0.07	550	0.01	28	0.01	0.01	
T152	-42.9	0.50	550	0.09	28	0.09	0.09	
T153	-42.9	0.50	550	0.09	28	0.09	0.09	
T154	-58.3	1.13	550	0.21	28	0.21	0.21	
T155	-58.3	1.13	550	0.21	28	0.21	0.21	
T156	-51.0	1.04	550	0.19	28	0.19	0.19	
T157	-51.0	1.04	550	0.19	28	0.19	0.19	
T158	-41.1	1.34	550	0.24	28	0.24	0.24	
T159	-41.1	1.34	550	0.24	28	0.24	0.24	
T160	-54.5	1.57	550	0.29	28	0.29	0.29	
T161	-54.5	1.57	550	0.29	28	0.29	0.29	
T162	-45.0	1.66	550	0.30	28	0.30	0.30	
T163	-37.0	0.19	550	0.04	28	0.04	0.04	
T164	-37.0	0.19	550	0.04	28	0.04	0.04	
T165	-50.4	0.42	550	0.08	28	0.08	0.08	
T166	-50.4	0.42	550	0.08	28	0.08	0.08	
T167	-39.2	0.02	550	0.00	28	0.00	0.00	
T168	-41.4	1.22	550	0.22	28	0.22	0.22	
T169	-41.4	1.22	550	0.22	28	0.22	0.22	
T170	-50.0	1.73	550	0.32	28	0.32	0.32	
T171	-47.6	1.36	550	0.25	28	0.25	0.25	
T172	-47.6	1.36	550	0.25	28	0.25	0.25	
T173	-37.6	0.42	550	0.08	28	0.08	0.08	
T174	-37.6	0.42	550	0.08	28	0.08	0.08	
T175	-42.4	0.13	550	0.02	28	0.02	0.02	
T176	-43.8	0.55	550	0.10	28	0.10	0.10	
T177	-43.8	0.55	550	0.10	28	0.10	0.10	

SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
T178	-45.8	0.96	550	0.17	28	0.17	0.17	0.17
T179	-59.2	1.18	550	0.22	28	0.22	0.22	0.22
T180	-59.2	1.18	550	0.22	28	0.22	0.22	0.22
T181	-51.9	1.10	550	0.20	28	0.20	0.20	0.20
T182	-51.9	1.10	550	0.20	28	0.20	0.20	0.20
T183	-45.3	0.88	550	0.16	28	0.16	0.16	0.16
T184	-58.7	1.10	550	0.20	28	0.20	0.20	0.20
T185	-58.7	1.10	550	0.20	28	0.20	0.20	0.20
T186	-51.5	1.01	550	0.18	28	0.18	0.18	0.18
T187	-51.5	1.01	550	0.18	28	0.18	0.18	0.18
T188	-46.2	0.93	550	0.17	28	0.17	0.17	0.17
T189	-46.2	0.93	550	0.17	28	0.17	0.17	0.17
T190	-59.6	1.16	550	0.21	28	0.21	0.21	0.21
T191	-59.6	1.16	550	0.21	28	0.21	0.21	0.21
T192	-52.4	1.07	550	0.19	28	0.19	0.19	0.19
T193	-52.4	1.07	550	0.19	28	0.19	0.19	0.19

SPANNUNGSNACHWEISE:		für Max.-Werte	
T54 Zugseite	SigmaZg=	0.45 MN/m2	gezogene Faserseite (mech.)
T54 Druck	Sigmac =	-2.21 MN/m2	< 14.54 MN/m2 (0.15)
T190Knicken	Sigmac =	13.23 MN/m2	< 14.54 MN/m2 (0.91)
T54 Schub	TauV =	0.04 MN/m2	< 2.77 MN/m2 (0.02)

DURCHBIEGUNGEN für Extremalwerte:			
infolge permanenter/quasi-ständiger Einwirkungen			
G118	wpq fin	= 0.39 cm	< H/200 (0.14)
infolge rarer/seltener Einwirkungen			
G190	wrq inst	= 0.36 cm	< H/300 (0.19)
G190	wrq fin	= 0.50 cm	< H/200 (0.18)

Lf Nr	Schwelle b/h cm	Aufstand lba/lia cm	Abstand li/re cm	Aef/kc90 cm2/-	Pressung MN/m2
T190	10/14.0	10/16	20/100	220/1.25	2.71 > 2.16( 1.25)

<b>INGENIEURBÜRO B I L D</b> Beratende Ingenieure VBI für Hoch-, Industrie- und Brückenbau 58093 Hagen Emster Straße 25 info@drbild.de Tel. 0 23 31 - 55 00 5 + 95 09 - 0 Fax 55 00 4	Projekt-Nr. : <b>070 - 14</b>
Bauwerk : +++ Haus	Seite : 60

### Stabilität:

Voraussetzungen:

- Die Dachfläche muss als Scheibe ausgebildet sein!
- Je Seite mindestens eine vertikale Scheibe pro Wand mit einer Breite  $\geq 2,1$  m (ca. 3 Felder!) bzw. auf der Terrassenseite ein Vertikalverband mit einer Breite von  $b = 1,75$  m  $\Rightarrow$  maßgebend

Wind:  $W \sim (0,8 + 0,5) \cdot 0,5 \cdot 8,7/2 = 2,83$  kN

$$M_w = 2,83 \cdot 5,5 = 15,57 \text{ kNm}$$

$$Z_{d,w} = M_w \cdot 1,5/1,75 = 13,35 \text{ kN}$$

abzüglich Wandlast (auf der sicheren Seite ohne Dachanteile)  $g_w \sim 0,30$  kN/m<sup>2</sup> ( $\gamma = 1$ -fach)

$$V = 0,9 \cdot 0,3 \cdot 5,5 = 1,49 \text{ kN}$$

**Anschluss mit HTT5:** 15 Nägel  $\Rightarrow R_{1,d} = 24,7 \cdot 0,9/1,3 = 17,1$  kN  $< 13,35 - 1,49 = 11,86$  kN

Haltende Konterlast durch Streifenfundam. ( $\gamma = 1$ -fach)

$b/h = 40/80$  cm  $l \gtrsim 1,5$  m

$G = 0,4 \cdot 0,8 \cdot 25 \cdot 1,5 = 12,0$  kN

### Wände

Für die Bemessung der Wände werden alternativ untersucht:

- a) KVH-Stützen in Verbindung mit einseitiger Beplankung mit OSB-Platten o. Kertoschichtholz (Pos. W1a)
- b) Finnjoist-Stützen in Verbindung mit einseitiger Beplankung mit OSB-Platten o. Kertoschichtholz (Pos. W1b)
- c) nur Kertoschichtholztafeln (Pos. W1c)

#### Pos. W1a Wandstiel KVH $b/h = 14/20$ cm

horizontale Lasten:

Wind auf Wand: Einflussbreite: Fenster  $b \sim 2,70/2 + 0,9/2 = 1,80$  m

$$w_d = 1,8 \cdot 0,8 \cdot 0,5 = 0,72 \text{ kN/m}$$

$$w_s = -1,8 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = -0,45 \text{ kN/m}$$

Bereich A:  $w_s = -1,2 \cdot 1,8 \cdot 0,5 = -0,54$  kN/m

vertikale Lasten:

aus Dach:  $G = 3,125 \cdot 0,7 \cdot 1,8 \cdot 0,5 = 1,97$  kN

$$S = 3,125 \cdot 3,0 \cdot 1,8 \cdot 0,5 = 8,44 \text{ kN}$$

bzw. aus D02:  $G = 2,93$  kN

$$S = 11,44 \text{ kN}$$

aus EG-Decke  $G = 3,125 \cdot 1,3 \cdot 1,8 \cdot 0,5 = 3,66$  kN

$$Q = 3,125 \cdot 2,0 \cdot 1,8 \cdot 0,5 = 5,63 \text{ kN}$$

bzw. aus E02  $G = 5,22$  kN

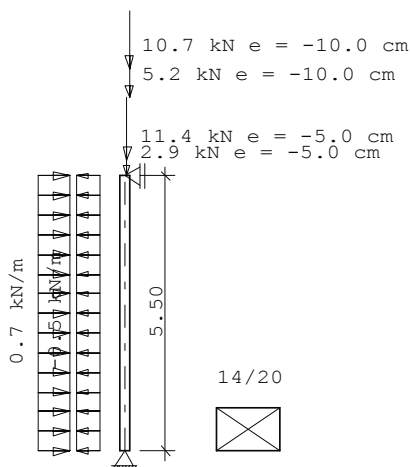
$$Q = 10,67 \text{ kN}$$

G auf der sicheren Seite als Nutzlast angesetzt!

**Position: 070-W1**

Holzstütze HO1 01/2014/A Win 8

Berechnungsgrundlagen: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12

 PENDELSTÜTZE: H = 5.50 m      14/20 cm      Nadelholz C24  
 Nutzungskl =                      1 (geschlossen, beheizt; LF<65%; GLWF<15%)

**MASSGEBENDE SYSTEMGRÖSSEN für die Nachweise:**

lefy =	550 cm	lefz =	550 cm
lefm =	550 cm	km =	1.00
Lambda =	136.1	kc =	0.17

Lastfälle/Einwirkungen:	Psi0	Psi1	Psi2	Gamma
s1: Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00	1.50
	; kmod = 0.50			kdef = 0.60
s2: Schnee bis NN +1000m	0.50	0.20	0.00	1.50
	; kmod = 0.50			kdef = 0.60
q3: Büros	0.70	0.50	0.30	1.50
	; kmod = 0.70			kdef = 0.60
q4: Büros	0.70	0.50	0.30	1.50
	; kmod = 0.70			kdef = 0.60
w5: Windlasten	0.60	0.20	0.00	1.50
	; kmod = 0.60			kdef = 0.60
w6: Windlasten	0.60	0.20	0.00	1.50
	; kmod = 0.60			kdef = 0.60

**charakteristische Einwirkungen:**

Lf Nr.	Vx (kN)	ez (cm)	Hx (kN)	xH (cm)	qx (kN/m)	kmod	LED
1	2.9	-5	0.00	0	0.00	0.90	kurz
2	11.4	-5	0.00	0	0.00	0.90	kurz
3	5.2	-10	0.00	0	0.00	0.80	mittel
4	10.7	-10	0.00	0	0.00	0.80	mittel
5	0.0	0	0.00	0	-0.54	0.90	kurz
6	0.0	0	0.00	0	0.72	0.90	kurz

**KOMBINATIONEN für Tragfähigkeit (ständig, vorübergehend)**

T16 : 1.50w6+0.75s1

T25 : 1.50q3+1.50q4

T157 : 1.50s1+1.50s2+1.05q3+1.05q4+0.90w5

T161 : 1.50w5+0.75s1+0.75s2+1.05q3+1.05q4

T166 : 1.50w6+0.75s1+0.75s2+1.05q3+1.05q4

Brandzustände/aussergew. Sit.

B25 : 0.50q3+0.50q4

Gebrauchsfähigkeit permanent

G25 : 0.30q3+0.30q4

Gebrauchsfähigkeit selten/rar

G191 : 1.00w5+0.50s1+0.50s2+0.70q3+0.70q4+1.00w6

**Kombinations-Auswirkungen:**

Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED
1	-4.4	-0.22	-0.04	0.0	0.0	0.0	SOA	kurz
2	-17.2	-0.86	-0.16	0.0	0.1	0.1	SOA	kurz
3	-7.8	-0.78	-0.14	0.0	0.1	0.1	NLB	mittel
4	-16.0	-1.60	-0.29	0.1	0.2	0.2	NLB	mittel
5	0.0	-3.06	-2.23	0.0	0.6	0.6	WI	kurz
6	0.0	4.08	2.97	0.0	0.8	0.8	WI	kurz
7	-21.6	-1.08	-0.20	0.0	0.1	0.1	SOA	kurz
8	-21.6	-1.08	-0.20	0.0	0.1	0.1	SOA	kurz
9	-9.9	-0.77	-0.14	0.0	0.1	0.1	SOA	kurz
10	-10.0	-0.89	-0.16	0.0	0.1	0.1	SOA	kurz
11	-15.6	-1.34	-0.24	0.1	0.2	0.2	SOA	kurz
12	-18.2	-1.71	-0.31	0.1	0.2	0.3	SOA	kurz
13	-4.4	-1.95	-1.38	0.0	0.4	0.4	SOA	kurz
14	-2.2	-3.12	-2.25	0.0	0.6	0.6	SOA	kurz
15	-4.4	2.34	1.74	0.0	0.5	0.5	SOA	kurz
16	-2.2	4.03	2.95	0.0	0.8	0.8	SOA	kurz
17	-22.6	-1.41	-0.26	0.0	0.2	0.2	SOA	kurz
18	-16.4	-1.21	-0.22	0.0	0.2	0.2	SOA	kurz
19	-28.4	-1.98	-0.36	0.1	0.2	0.3	SOA	kurz
20	-24.6	-2.03	-0.37	0.1	0.3	0.3	SOA	kurz
21	-17.2	-2.29	-1.49	0.0	0.5	0.5	SOA	kurz
22	-8.6	-3.28	-2.31	0.0	0.7	0.7	SOA	kurz
23	-17.2	2.04	1.63	0.0	0.6	0.6	SOA	kurz
24	-8.6	3.87	2.89	0.0	0.9	0.9	SOA	kurz
25	-23.8	-2.38	-0.43	0.1	0.3	0.4	NLB	mittel
26	-23.8	-2.38	-0.43	0.1	0.3	0.4	NLB	mittel
27	-7.8	-2.25	-1.48	0.0	0.5	0.5	WI	kurz
28	-5.5	-3.34	-2.33	0.0	0.7	0.7	WI	kurz
29	-7.8	2.07	1.64	0.0	0.6	0.6	WI	kurz
30	-5.5	3.81	2.87	0.0	0.9	0.9	WI	kurz
31	-16.0	-2.72	-1.63	0.1	0.6	0.6	WI	kurz
32	-11.2	-3.65	-2.43	0.1	0.8	0.8	WI	kurz
33	-16.0	1.71	1.49	0.1	0.7	0.7	WI	kurz
34	-11.2	3.54	2.77	0.1	1.0	1.0	WI	kurz
35	0.0	1.02	0.74	0.0	1.5	1.5	WI	kurz
36	0.0	1.02	0.74	0.0	1.5	1.5	WI	kurz
37	-27.0	-1.63	-0.30	0.0	0.2	0.2	SOA	kurz
38	-27.0	-1.63	-0.30	0.0	0.2	0.2	SOA	kurz
39	-18.6	-1.32	-0.24	0.0	0.2	0.2	SOA	kurz
40	-32.8	-2.20	-0.40	0.1	0.3	0.3	SOA	kurz
41	-32.8	-2.20	-0.40	0.1	0.3	0.3	SOA	kurz
42	-26.8	-2.14	-0.39	0.1	0.3	0.3	SOA	kurz
43	-21.6	-2.41	-1.53	0.0	0.5	0.5	SOA	kurz
44	-21.6	-2.41	-1.53	0.0	0.5	0.5	SOA	kurz
45	-10.8	-3.33	-2.33	0.0	0.7	0.7	SOA	kurz
46	-21.6	1.94	1.59	0.0	0.6	0.6	SOA	kurz
47	-21.6	1.94	1.59	0.0	0.6	0.6	SOA	kurz
48	-10.8	3.81	2.87	0.0	0.9	0.9	SOA	kurz
49	-21.1	-1.89	-0.34	0.1	0.2	0.3	SOA	kurz
50	-26.0	-2.49	-0.45	0.1	0.3	0.4	SOA	kurz
51	-26.0	-2.49	-0.45	0.1	0.3	0.4	SOA	kurz



Position: 070-W1

30.06.2014

Seite: 3

Kombinations-Auswirkungen:									
Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED	
52	-9.9	-2.24	-1.48	0.0	0.5	0.5	S0A	kurz	
53	-10.0	-2.31	-1.50	0.0	0.5	0.5	S0A	kurz	
54	-7.7	-3.39	-2.35	0.0	0.7	0.7	S0A	kurz	
55	-9.9	2.08	1.64	0.0	0.6	0.6	S0A	kurz	
56	-10.0	2.02	1.62	0.0	0.6	0.6	S0A	kurz	
57	-7.7	3.75	2.85	0.0	0.9	0.9	S0A	kurz	
58	-15.6	-2.57	-1.58	0.1	0.5	0.6	S0A	kurz	
59	-18.2	-2.79	-1.65	0.1	0.6	0.6	S0A	kurz	
60	-13.4	-3.71	-2.45	0.1	0.8	0.8	S0A	kurz	
61	-15.6	1.82	1.54	0.1	0.7	0.7	S0A	kurz	
62	-18.2	-1.71	1.47	0.1	0.7	0.7	S0A	kurz	
63	-13.4	3.49	2.75	0.1	1.0	1.0	S0A	kurz	
64	-4.4	0.51	0.41	0.0	0.9	0.9	S0A	kurz	
65	-2.2	0.97	0.72	0.0	1.5	1.5	S0A	kurz	
66	-2.2	0.97	0.72	0.0	1.5	1.5	S0A	kurz	
67	-33.8	-2.53	-0.46	0.1	0.3	0.4	S0A	kurz	
68	-32.4	-2.81	-0.51	0.1	0.4	0.4	S0A	kurz	
69	-32.4	-2.81	-0.51	0.1	0.4	0.4	S0A	kurz	
70	-22.6	-2.61	-1.59	0.0	0.5	0.6	S0A	kurz	
71	-16.4	-2.49	-1.56	0.0	0.5	0.5	S0A	kurz	
72	-14.1	-3.57	-2.41	0.0	0.7	0.8	S0A	kurz	
73	-22.6	1.79	1.53	0.0	0.7	0.7	S0A	kurz	
74	-16.4	1.88	1.56	0.0	0.7	0.7	S0A	kurz	
75	-14.1	3.60	2.79	0.0	1.0	1.0	S0A	kurz	
76	-28.4	-2.96	-1.70	0.1	0.6	0.7	S0A	kurz	
77	-24.6	-2.99	-1.71	0.1	0.6	0.7	S0A	kurz	
78	-19.8	-3.88	-2.51	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
79	-28.4	-1.98	1.42	0.1	0.7	0.8	S0A	kurz	
80	-24.6	-2.03	1.41	0.1	0.8	0.8	S0A	kurz	
81	-19.8	3.35	2.69	0.1	1.0	1.1	S0A	kurz	
82	-17.2	-0.86	0.29	0.0	1.0	1.0	S0A	kurz	
83	-8.6	0.82	0.66	0.0	1.5	1.5	S0A	kurz	
84	-8.6	0.82	0.66	0.0	1.5	1.5	S0A	kurz	
85	-23.8	-3.22	-1.77	0.1	0.7	0.7	WI	kurz	
86	-23.8	-3.22	-1.77	0.1	0.7	0.7	WI	kurz	
87	-16.7	-3.95	-2.53	0.1	0.8	0.9	WI	kurz	
88	-23.8	-2.38	1.35	0.1	0.8	0.8	WI	kurz	
89	-23.8	-2.38	1.35	0.1	0.8	0.8	WI	kurz	
90	-16.7	3.29	2.67	0.1	1.0	1.1	WI	kurz	
91	-7.8	-0.78	0.30	0.0	1.0	1.0	WI	kurz	
92	-5.5	0.76	0.64	0.0	1.5	1.5	WI	kurz	
93	-5.5	0.76	0.64	0.0	1.5	1.5	WI	kurz	
94	-16.0	-1.60	0.15	0.1	1.1	1.1	WI	kurz	
95	-11.2	-1.12	0.54	0.1	1.6	1.6	WI	kurz	
96	-11.2	-1.12	0.54	0.1	1.6	1.6	WI	kurz	
97	-38.2	-2.75	-0.50	0.1	0.3	0.4	S0A	kurz	
98	-38.2	-2.75	-0.50	0.1	0.3	0.4	S0A	kurz	
99	-34.6	-2.92	-0.53	0.1	0.4	0.4	S0A	kurz	
100	-34.6	-2.92	-0.53	0.1	0.4	0.4	S0A	kurz	
101	-27.0	-2.74	-1.63	0.0	0.6	0.6	S0A	kurz	
102	-27.0	-2.74	-1.63	0.0	0.6	0.6	S0A	kurz	
103	-18.6	-2.56	-1.58	0.0	0.5	0.6	S0A	kurz	
104	-16.3	-3.63	-2.43	0.0	0.8	0.8	S0A	kurz	
105	-27.0	1.70	1.49	0.0	0.7	0.7	S0A	kurz	
106	-27.0	1.70	1.49	0.0	0.7	0.7	S0A	kurz	
107	-18.6	1.83	1.54	0.0	0.7	0.7	S0A	kurz	
108	-16.3	3.55	2.77	0.0	1.0	1.0	S0A	kurz	
109	-32.8	-3.10	-1.74	0.1	0.6	0.7	S0A	kurz	
110	-32.8	-3.10	-1.74	0.1	0.6	0.7	S0A	kurz	
111	-26.8	-3.06	-1.73	0.1	0.6	0.7	S0A	kurz	
112	-22.0	-3.94	-2.53	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
113	-32.8	-2.20	1.38	0.1	0.8	0.8	S0A	kurz	
114	-32.8	-2.20	1.38	0.1	0.8	0.8	S0A	kurz	
115	-26.8	-2.14	1.39	0.1	0.8	0.8	S0A	kurz	
116	-22.0	3.30	2.67	0.1	1.0	1.1	S0A	kurz	
117	-21.6	-1.08	0.25	0.0	1.0	1.0	S0A	kurz	
118	-21.6	-1.08	0.25	0.0	1.0	1.0	S0A	kurz	
119	-10.8	0.77	0.64	0.0	1.5	1.5	S0A	kurz	

Position: 070-W1

30.06.2014

Seite: 4

Kombinations-Auswirkungen:									
Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED	
120	-10.8	0.77	0.64	0.0	1.5	1.5	S0A	kurz	
121	-21.1	-2.90	-1.68	0.1	0.6	0.7	S0A	kurz	
122	-26.0	-3.29	-1.79	0.1	0.7	0.7	S0A	kurz	
123	-26.0	-3.29	-1.79	0.1	0.7	0.7	S0A	kurz	
124	-18.9	-4.01	-2.55	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
125	-21.1	-1.89	1.44	0.1	0.7	0.8	S0A	kurz	
126	-26.0	-2.49	1.33	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
127	-26.0	-2.49	1.33	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
128	-18.9	3.24	2.65	0.1	1.1	1.1	S0A	kurz	
129	-9.9	-0.77	0.31	0.0	1.0	1.0	S0A	kurz	
130	-10.0	-0.89	0.28	0.0	1.0	1.0	S0A	kurz	
131	-7.7	0.72	0.62	0.0	1.5	1.6	S0A	kurz	
132	-7.7	0.72	0.62	0.0	1.5	1.6	S0A	kurz	
133	-15.6	-1.34	0.20	0.1	1.0	1.1	S0A	kurz	
134	-18.2	-1.71	0.13	0.1	1.1	1.1	S0A	kurz	
135	-13.4	-1.23	0.52	0.1	1.6	1.6	S0A	kurz	
136	-13.4	-1.23	0.52	0.1	1.6	1.6	S0A	kurz	
137	-33.8	-3.31	-1.80	0.1	0.7	0.7	S0A	kurz	
138	-32.4	-3.51	-1.85	0.1	0.7	0.8	S0A	kurz	
139	-32.4	-3.51	-1.85	0.1	0.7	0.8	S0A	kurz	
140	-25.3	-4.20	-2.61	0.1	0.9	0.9	S0A	kurz	
141	-33.8	-2.53	1.32	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
142	-32.4	-2.81	1.27	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
143	-32.4	-2.81	1.27	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
144	-25.3	3.10	2.59	0.1	1.1	1.1	S0A	kurz	
145	-22.6	-1.41	0.19	0.0	1.0	1.1	S0A	kurz	
146	-16.4	-1.21	0.23	0.0	1.0	1.0	S0A	kurz	
147	-14.1	-0.98	0.56	0.0	1.6	1.6	S0A	kurz	
148	-14.1	-0.98	0.56	0.0	1.6	1.6	S0A	kurz	
149	-28.4	-1.98	0.09	0.1	1.1	1.2	S0A	kurz	
150	-24.6	-2.03	0.08	0.1	1.1	1.2	S0A	kurz	
151	-19.8	-1.55	0.46	0.1	1.7	1.7	S0A	kurz	
152	-19.8	-1.55	0.46	0.1	1.7	1.7	S0A	kurz	
153	-23.8	-2.38	0.01	0.1	1.2	1.2	WI	kurz	
154	-23.8	-2.38	0.01	0.1	1.2	1.2	WI	kurz	
155	-16.7	-1.67	0.44	0.1	1.7	1.7	WI	kurz	
156	-16.7	-1.67	0.44	0.1	1.7	1.7	WI	kurz	
157	-38.2	-3.47	-1.84	0.1	0.7	0.8	S0A	kurz	
158	-38.2	-3.47	-1.84	0.1	0.7	0.8	S0A	kurz	
159	-34.6	-3.59	-1.87	0.1	0.7	0.8	S0A	kurz	
160	-34.6	-3.59	-1.87	0.1	0.7	0.8	S0A	kurz	
161	-27.5	-4.26	-2.63	0.1	0.9	1.0	S0A	kurz	
162	-38.2	-2.75	1.28	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
163	-38.2	-2.75	1.28	0.1	0.8	0.9	S0A	kurz	
164	-34.6	-2.92	1.25	0.1	0.9	0.9	S0A	kurz	
165	-34.6	-2.92	1.25	0.1	0.9	0.9	S0A	kurz	
166	-27.5	3.05	2.57	0.1	1.1	1.2	S0A	kurz	
167	-27.0	-1.63	0.15	0.0	1.1	1.1	S0A	kurz	
168	-27.0	-1.63	0.15	0.0	1.1	1.1	S0A	kurz	
169	-18.6	-1.32	0.21	0.0	1.0	1.1	S0A	kurz	
170	-16.3	-1.09	0.54	0.0	1.6	1.6	S0A	kurz	
171	-16.3	-1.09	0.54	0.0	1.6	1.6	S0A	kurz	
172	-32.8	-2.20	0.05	0.1	1.1	1.2	S0A	kurz	
173	-32.8	-2.20	0.05	0.1	1.1	1.2	S0A	kurz	
174	-26.8	-2.14	0.06	0.1	1.1	1.2	S0A	kurz	
175	-22.0	-1.66	0.44	0.1	1.7	1.7	S0A	kurz	
176	-22.0	-1.66	0.44	0.1	1.7	1.7	S0A	kurz	
177	-21.1	-1.89	0.10	0.1	1.1	1.2	S0A	kurz	
178	-26.0	-2.49	-0.01	0.1	1.2	1.2	S0A	kurz	
179	-26.0	-2.49	-0.01	0.1	1.2	1.2	S0A	kurz	
180	-18.9	-1.78	0.42	0.1	1.7	1.7	S0A	kurz	
181	-18.9	-1.78	0.42	0.1	1.7	1.7	S0A	kurz	
182	-33.8	-2.53	-0.01	0.1	1.2	1.2	S0A	kurz	
183	-32.4	-2.81	-0.07	0.1	1.2	1.3	S0A	kurz	
184	-32.4	-2.81	-0.07	0.1	1.2	1.3	S0A	kurz	
185	-25.3	-2.10	0.36	0.1	1.7	1.8	S0A	kurz	
186	-25.3	-2.10	0.36	0.1	1.7	1.8	S0A	kurz	
187	-38.2	-2.75	-0.05	0.1	1.2	1.3	S0A	kurz	

Position: 070-W1

30.06.2014

Seite: 5

Kombinations-Auswirkungen:									
Kombi Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	Vz (kN)	wpq (cm)	wr inst (cm)	wr fin (cm)	EWG	LED	
188	-38.2	-2.75	-0.05	0.1	1.2	1.3	S0A	kurz	
189	-34.6	-2.92	-0.09	0.1	1.2	1.3	S0A	kurz	
190	-34.6	-2.92	-0.09	0.1	1.2	1.3	S0A	kurz	
191	-27.5	-2.21	0.34	0.1	1.7	1.8	S0A	kurz	
192	-27.5	-2.21	0.34	0.1	1.7	1.8	S0A	kurz	

Kombinations-SPANNUNGEN					
Kombi Nr.	Sigmac (MN/m2)	Sigmat (MN/m2)	Stabilität (MN/m2)	Tau (MN/m2)	Brand (MN/m2)
1	-0.21(0.01)	0.05(zg)	1.06(0.07)	0.00(0.00)	0.49(0.03)
2	-0.83(0.06)	0.19(zg)	4.15(0.29)	0.02(0.01)	1.92(0.10)
3	-0.74(0.06)	0.45(zg)	2.15(0.17)	0.02(0.01)	2.38(0.13)
4	-1.53(0.12)	0.93(zg)	4.40(0.34)	0.03(0.01)	4.87(0.26)
5	0.00(zg)	3.28(0.20)	3.28(0.20)	0.21(0.08)	1.17(0.07)
6	0.00(zg)	4.38(0.26)	4.38(0.26)	0.29(0.10)	1.56(0.10)
7	-1.05(0.07)	0.24(zg)	5.22(0.36)	0.02(0.01)	2.41(0.13)
8	-1.05(0.07)	0.24(zg)	5.22(0.36)	0.02(0.01)	2.41(0.13)
9	-0.73(0.05)	0.37(zg)	2.57(0.18)	0.01(0.01)	1.92(0.10)
10	-0.85(0.06)	0.48(zg)	2.68(0.18)	0.02(0.01)	2.38(0.13)
11	-1.28(0.09)	0.70(zg)	4.14(0.29)	0.03(0.01)	3.42(0.18)
12	-1.63(0.11)	0.95(zg)	4.93(0.34)	0.03(0.01)	4.87(0.26)
13	-1.83(0.13)	1.67(zg)	2.30(0.16)	0.14(0.05)	0.49(0.05)
14	-2.92(0.20)	2.84(zg)	3.16(0.22)	0.24(0.09)	1.17(0.08)
15	-2.20(0.15)	2.04(zg)	2.67(0.18)	0.20(0.07)	0.49(0.07)
16	-3.78(0.26)	3.70(zg)	4.01(0.28)	0.32(0.12)	1.56(0.11)
17	-1.36(0.09)	0.51(zg)	5.66(0.39)	0.03(0.01)	3.35(0.18)
18	-1.16(0.08)	0.55(zg)	4.23(0.29)	0.02(0.01)	2.38(0.13)
19	-1.93(0.13)	0.84(zg)	7.23(0.50)	0.04(0.01)	4.84(0.26)
20	-1.96(0.13)	1.02(zg)	6.48(0.45)	0.04(0.01)	4.87(0.26)
21	-2.17(0.15)	1.54(zg)	5.10(0.35)	0.15(0.05)	1.92(0.10)
22	-3.08(0.21)	2.77(zg)	4.00(0.28)	0.23(0.08)	1.17(0.08)
23	-1.94(0.13)	1.30(zg)	4.93(0.34)	0.21(0.07)	1.92(0.10)
24	-3.63(0.25)	3.32(zg)	4.56(0.31)	0.33(0.12)	1.56(0.11)
25	-2.29(0.18)	1.38(zg)	6.55(0.51)	0.05(0.02)	7.26(0.38)
26	-2.29(0.18)	1.38(zg)	6.55(0.51)	0.05(0.02)	7.26(0.38)
27	-2.11(0.15)	1.83(zg)	3.12(0.21)	0.14(0.05)	2.38(0.13)
28	-3.13(0.22)	2.93(zg)	3.72(0.26)	0.23(0.08)	1.93(0.10)
29	-1.95(0.13)	1.66(zg)	3.00(0.21)	0.21(0.07)	2.38(0.13)
30	-3.57(0.25)	3.38(zg)	4.16(0.29)	0.33(0.12)	1.90(0.11)
31	-2.58(0.18)	1.98(zg)	5.14(0.35)	0.16(0.06)	4.87(0.26)
32	-3.43(0.24)	3.02(zg)	4.74(0.33)	0.24(0.09)	3.32(0.18)
33	-1.63(0.11)	1.03(zg)	4.47(0.31)	0.22(0.08)	4.87(0.26)
34	-3.33(0.23)	2.92(zg)	4.67(0.32)	0.34(0.12)	3.04(0.16)
35	0.00(zg)	1.09(0.07)	1.09(0.07)	0.07(0.03)	0.39(0.02)
36	0.00(zg)	1.09(0.07)	1.09(0.07)	0.07(0.03)	0.39(0.02)
37	-1.59(0.11)	0.56(zg)	6.73(0.46)	0.03(0.01)	3.84(0.20)
38	-1.59(0.11)	0.56(zg)	6.73(0.46)	0.03(0.01)	3.84(0.20)
39	-1.27(0.09)	0.57(zg)	4.76(0.33)	0.03(0.01)	2.38(0.13)
40	-2.15(0.15)	0.89(zg)	8.30(0.57)	0.04(0.02)	5.33(0.28)
41	-2.15(0.15)	0.89(zg)	8.30(0.57)	0.04(0.02)	5.33(0.28)
42	-2.07(0.14)	1.05(zg)	7.01(0.48)	0.04(0.02)	4.87(0.26)
43	-2.30(0.16)	1.49(zg)	6.09(0.42)	0.15(0.05)	2.41(0.13)
44	-2.30(0.16)	1.49(zg)	6.09(0.42)	0.15(0.05)	2.41(0.13)
45	-3.13(0.22)	2.74(zg)	4.44(0.31)	0.23(0.08)	1.17(0.08)
46	-1.86(0.13)	1.05(zg)	5.79(0.40)	0.21(0.08)	2.41(0.13)
47	-1.86(0.13)	1.05(zg)	5.79(0.40)	0.21(0.08)	2.41(0.13)
48	-3.59(0.25)	3.19(zg)	4.76(0.33)	0.33(0.12)	1.56(0.11)
49	-1.81(0.12)	1.02(zg)	5.65(0.39)	0.04(0.01)	4.85(0.26)
50	-2.40(0.16)	1.41(zg)	7.08(0.49)	0.05(0.02)	7.26(0.38)
51	-2.40(0.16)	1.41(zg)	7.08(0.49)	0.05(0.02)	7.26(0.38)
52	-2.11(0.15)	1.75(zg)	3.54(0.24)	0.14(0.05)	1.92(0.10)
53	-2.17(0.15)	1.81(zg)	3.61(0.25)	0.15(0.05)	2.38(0.13)
54	-3.19(0.22)	2.91(zg)	4.01(0.28)	0.23(0.08)	1.93(0.10)
55	-1.96(0.13)	1.60(zg)	3.43(0.24)	0.21(0.07)	1.92(0.10)

Position: 070-W1

30.06.2014

Seite: 6

Kombinations-SPANNUNGEN					
Kombi Nr.	Sigmat (MN/m2)	Sigmat (MN/m2)	Stabilität (MN/m2)	Tau (MN/m2)	Brand (MN/m2)
56	-1.91(0.13)	1.54(zg)	3.43(0.24)	0.21(0.08)	2.38(0.13)
57	-3.53(0.24)	3.25(zg)	4.35(0.30)	0.33(0.12)	1.90(0.11)
58	-2.43(0.17)	1.85(zg)	4.95(0.34)	0.15(0.06)	3.42(0.18)
59	-2.65(0.18)	1.97(zg)	5.64(0.39)	0.16(0.06)	4.87(0.26)
60	-3.49(0.24)	3.00(zg)	5.24(0.36)	0.24(0.09)	3.32(0.18)
61	-1.73(0.12)	1.15(zg)	4.46(0.31)	0.22(0.08)	3.42(0.18)
62	-1.63(0.11)	0.95(zg)	4.93(0.34)	0.22(0.08)	4.87(0.26)
63	-3.29(0.23)	2.79(zg)	5.09(0.35)	0.34(0.12)	3.04(0.16)
64	-0.48(0.03)	0.32(zg)	1.25(0.09)	0.05(0.02)	0.49(0.03)
65	-0.91(0.06)	0.83(zg)	1.14(0.08)	0.08(0.03)	0.39(0.03)
66	-0.91(0.06)	0.83(zg)	1.14(0.08)	0.08(0.03)	0.39(0.03)
67	-2.47(0.17)	1.16(zg)	8.74(0.60)	0.05(0.02)	6.27(0.33)
68	-2.73(0.19)	1.48(zg)	8.63(0.59)	0.05(0.02)	7.26(0.38)
69	-2.73(0.19)	1.48(zg)	8.63(0.59)	0.05(0.02)	7.26(0.38)
70	-2.49(0.17)	1.64(zg)	6.45(0.44)	0.16(0.06)	3.35(0.18)
71	-2.36(0.16)	1.75(zg)	5.07(0.35)	0.15(0.06)	2.38(0.13)
72	-3.36(0.23)	2.84(zg)	5.29(0.36)	0.23(0.08)	1.93(0.10)
73	-1.73(0.12)	0.87(zg)	5.92(0.41)	0.22(0.08)	3.35(0.18)
74	-1.79(0.12)	1.18(zg)	4.67(0.32)	0.21(0.08)	2.38(0.13)
75	-3.40(0.23)	2.88(zg)	5.31(0.37)	0.34(0.12)	1.90(0.11)
76	-2.84(0.20)	1.76(zg)	7.88(0.54)	0.17(0.06)	4.84(0.26)
77	-2.86(0.20)	1.93(zg)	7.11(0.49)	0.17(0.06)	4.87(0.26)
78	-3.68(0.25)	2.94(zg)	6.69(0.46)	0.24(0.09)	3.32(0.18)
79	-1.93(0.13)	0.84(zg)	7.23(0.50)	0.23(0.08)	4.84(0.26)
80	-1.96(0.13)	1.02(zg)	6.48(0.45)	0.23(0.08)	4.87(0.26)
81	-3.17(0.22)	2.43(zg)	6.34(0.44)	0.35(0.13)	3.04(0.16)
82	-0.83(0.06)	0.19(zg)	4.15(0.29)	0.06(0.02)	1.92(0.10)
83	-0.77(0.05)	0.46(zg)	2.33(0.16)	0.09(0.03)	0.39(0.03)
84	-0.77(0.05)	0.46(zg)	2.33(0.16)	0.09(0.03)	0.39(0.03)
85	-3.07(0.21)	2.17(zg)	7.10(0.49)	0.18(0.06)	7.26(0.38)
86	-3.07(0.21)	2.17(zg)	7.10(0.49)	0.18(0.06)	7.26(0.38)
87	-3.73(0.26)	3.11(zg)	6.08(0.42)	0.25(0.09)	4.66(0.25)
88	-2.28(0.16)	1.38(zg)	6.55(0.45)	0.24(0.09)	7.26(0.38)
89	-2.28(0.16)	1.38(zg)	6.55(0.45)	0.24(0.09)	7.26(0.38)
90	-3.11(0.21)	2.49(zg)	5.65(0.39)	0.35(0.13)	4.35(0.23)
91	-0.74(0.05)	0.45(zg)	2.15(0.15)	0.06(0.02)	2.38(0.13)
92	-0.72(0.05)	0.52(zg)	1.65(0.11)	0.09(0.03)	1.43(0.08)
93	-0.72(0.05)	0.52(zg)	1.65(0.11)	0.09(0.03)	1.43(0.08)
94	-1.52(0.10)	0.93(zg)	4.40(0.30)	0.08(0.03)	4.87(0.26)
95	-1.06(0.07)	0.65(zg)	3.08(0.21)	0.10(0.04)	2.92(0.15)
96	-1.06(0.07)	0.65(zg)	3.08(0.21)	0.10(0.04)	2.92(0.15)
97	-2.70(0.19)	1.21(zg)	9.81(0.67)	0.05(0.02)	6.76(0.36)
98	-2.70(0.19)	1.21(zg)	9.81(0.67)	0.05(0.02)	6.76(0.36)
99	-2.84(0.20)	1.50(zg)	9.16(0.63)	0.06(0.02)	7.26(0.38)
100	-2.84(0.20)	1.50(zg)	9.16(0.63)	0.06(0.02)	7.26(0.38)
101	-2.63(0.18)	1.60(zg)	7.46(0.51)	0.16(0.06)	3.84(0.20)
102	-2.63(0.18)	1.60(zg)	7.46(0.51)	0.16(0.06)	3.84(0.20)
103	-2.43(0.17)	1.73(zg)	5.57(0.38)	0.15(0.06)	2.38(0.13)
104	-3.43(0.24)	2.82(zg)	5.79(0.40)	0.24(0.09)	1.93(0.10)
105	-1.66(0.11)	0.63(zg)	6.78(0.47)	0.22(0.08)	3.84(0.20)
106	-1.66(0.11)	0.63(zg)	6.78(0.47)	0.22(0.08)	3.84(0.20)
107	-1.75(0.12)	1.05(zg)	5.10(0.35)	0.22(0.08)	2.38(0.13)
108	-3.35(0.23)	2.75(zg)	5.74(0.39)	0.34(0.12)	1.90(0.11)
109	-3.00(0.21)	1.74(zg)	8.89(0.61)	0.17(0.06)	5.33(0.28)
110	-3.00(0.21)	1.74(zg)	8.89(0.61)	0.17(0.06)	5.33(0.28)
111	-2.93(0.20)	1.91(zg)	7.62(0.52)	0.17(0.06)	4.87(0.26)
112	-3.74(0.26)	2.91(zg)	7.19(0.49)	0.25(0.09)	3.32(0.18)
113	-2.15(0.15)	0.89(zg)	8.30(0.57)	0.23(0.08)	5.33(0.28)
114	-2.15(0.15)	0.89(zg)	8.30(0.57)	0.23(0.08)	5.33(0.28)
115	-2.07(0.14)	1.05(zg)	7.01(0.48)	0.23(0.08)	4.87(0.26)
116	-3.13(0.22)	2.31(zg)	6.76(0.47)	0.35(0.13)	3.04(0.16)
117	-1.05(0.07)	0.24(zg)	5.22(0.36)	0.07(0.02)	2.41(0.13)
118	-1.05(0.07)	0.24(zg)	5.22(0.36)	0.07(0.02)	2.41(0.13)
119	-0.73(0.05)	0.34(zg)	2.76(0.19)	0.09(0.03)	0.39(0.03)
120	-0.73(0.05)	0.34(zg)	2.76(0.19)	0.09(0.03)	0.39(0.03)
121	-2.76(0.19)	1.97(zg)	6.31(0.43)	0.17(0.06)	4.85(0.26)
122	-3.15(0.22)	2.16(zg)	7.61(0.52)	0.18(0.06)	7.26(0.38)
123	-3.15(0.22)	2.16(zg)	7.61(0.52)	0.18(0.06)	7.26(0.38)

Kombinations-SPANNUNGEN					
Kombi Nr.	Sigmac (MN/m2)	Sigmat (MN/m2)	Stabilität (MN/m2)	Tau (MN/m2)	Brand (MN/m2)
124	-3.79(0.26)	3.09(zg)	6.58(0.45)	0.25(0.09)	4.66(0.25)
125	-1.81(0.12)	1.02(zg)	5.65(0.39)	0.23(0.08)	4.85(0.26)
126	-2.40(0.16)	1.41(zg)	7.08(0.49)	0.24(0.09)	7.26(0.38)
127	-2.40(0.16)	1.41(zg)	7.08(0.49)	0.24(0.09)	7.26(0.38)
128	-3.07(0.21)	2.37(zg)	6.08(0.42)	0.35(0.13)	4.35(0.23)
129	-0.73(0.05)	0.37(zg)	2.57(0.18)	0.06(0.02)	1.92(0.10)
130	-0.85(0.06)	0.48(zg)	2.68(0.18)	0.07(0.02)	2.38(0.13)
131	-0.68(0.05)	0.40(zg)	2.08(0.14)	0.09(0.03)	1.43(0.08)
132	-0.68(0.05)	0.40(zg)	2.08(0.14)	0.09(0.03)	1.43(0.08)
133	-1.28(0.09)	0.70(zg)	4.14(0.29)	0.07(0.03)	3.42(0.18)
134	-1.63(0.11)	0.95(zg)	4.93(0.34)	0.08(0.03)	4.87(0.26)
135	-1.17(0.08)	0.67(zg)	3.61(0.25)	0.10(0.04)	2.92(0.15)
136	-1.17(0.08)	0.67(zg)	3.61(0.25)	0.10(0.04)	2.92(0.15)
137	-3.21(0.22)	1.90(zg)	9.26(0.64)	0.18(0.06)	6.27(0.33)
138	-3.39(0.23)	2.14(zg)	9.09(0.63)	0.18(0.07)	7.26(0.38)
139	-3.39(0.23)	2.14(zg)	9.09(0.63)	0.18(0.07)	7.26(0.38)
140	-3.99(0.27)	3.03(zg)	8.04(0.55)	0.26(0.09)	4.66(0.25)
141	-2.47(0.17)	1.16(zg)	8.74(0.60)	0.24(0.09)	6.27(0.33)
142	-2.73(0.19)	1.48(zg)	8.63(0.59)	0.25(0.09)	7.26(0.38)
143	-2.73(0.19)	1.48(zg)	8.63(0.59)	0.25(0.09)	7.26(0.38)
144	-2.96(0.20)	2.00(zg)	7.32(0.50)	0.36(0.13)	4.35(0.23)
145	-1.36(0.09)	0.51(zg)	5.66(0.39)	0.08(0.03)	3.35(0.18)
146	-1.16(0.08)	0.55(zg)	4.23(0.29)	0.07(0.03)	2.38(0.13)
147	-0.93(0.06)	0.41(zg)	3.58(0.25)	0.10(0.04)	1.43(0.08)
148	-0.93(0.06)	0.41(zg)	3.58(0.25)	0.10(0.04)	1.43(0.08)
149	-1.93(0.13)	0.84(zg)	7.23(0.50)	0.09(0.03)	4.84(0.26)
150	-1.96(0.13)	1.02(zg)	6.48(0.45)	0.09(0.03)	4.87(0.26)
151	-1.49(0.10)	0.75(zg)	5.16(0.35)	0.11(0.04)	2.92(0.15)
152	-1.49(0.10)	0.75(zg)	5.16(0.35)	0.11(0.04)	2.92(0.15)
153	-2.28(0.16)	1.38(zg)	6.55(0.45)	0.09(0.03)	7.26(0.38)
154	-2.28(0.16)	1.38(zg)	6.55(0.45)	0.09(0.03)	7.26(0.38)
155	-1.59(0.11)	0.97(zg)	4.59(0.32)	0.11(0.04)	4.35(0.23)
156	-1.59(0.11)	0.97(zg)	4.59(0.32)	0.11(0.04)	4.35(0.23)
157	-3.38(0.23)	1.88(zg)	10.28(0.71)	0.18(0.07)	6.76(0.36)
158	-3.38(0.23)	1.88(zg)	10.28(0.71)	0.18(0.07)	6.76(0.36)
159	-3.47(0.24)	2.13(zg)	9.60(0.66)	0.19(0.07)	7.26(0.38)
160	-3.47(0.24)	2.13(zg)	9.60(0.66)	0.19(0.07)	7.26(0.38)
161	-4.06(0.28)	3.02(zg)	8.55(0.59)	0.26(0.09)	4.66(0.25)
162	-2.70(0.19)	1.21(zg)	9.81(0.67)	0.24(0.09)	6.76(0.36)
163	-2.70(0.19)	1.21(zg)	9.81(0.67)	0.24(0.09)	6.76(0.36)
164	-2.84(0.20)	1.50(zg)	9.16(0.63)	0.25(0.09)	7.26(0.38)
165	-2.84(0.20)	1.50(zg)	9.16(0.63)	0.25(0.09)	7.26(0.38)
166	-2.93(0.20)	1.88(zg)	7.75(0.53)	0.36(0.13)	4.35(0.23)
167	-1.59(0.11)	0.56(zg)	6.73(0.46)	0.08(0.03)	3.84(0.20)
168	-1.59(0.11)	0.56(zg)	6.73(0.46)	0.08(0.03)	3.84(0.20)
169	-1.27(0.09)	0.57(zg)	4.76(0.33)	0.07(0.03)	2.38(0.13)
170	-1.04(0.07)	0.44(zg)	4.12(0.28)	0.10(0.04)	1.43(0.08)
171	-1.04(0.07)	0.44(zg)	4.12(0.28)	0.10(0.04)	1.43(0.08)
172	-2.15(0.15)	0.89(zg)	8.30(0.57)	0.09(0.03)	5.33(0.28)
173	-2.15(0.15)	0.89(zg)	8.30(0.57)	0.09(0.03)	5.33(0.28)
174	-2.07(0.14)	1.05(zg)	7.01(0.48)	0.09(0.03)	4.87(0.26)
175	-1.60(0.11)	0.77(zg)	5.69(0.39)	0.11(0.04)	2.92(0.15)
176	-1.60(0.11)	0.77(zg)	5.69(0.39)	0.11(0.04)	2.92(0.15)
177	-1.81(0.12)	1.02(zg)	5.65(0.39)	0.08(0.03)	4.85(0.26)
178	-2.40(0.16)	1.41(zg)	7.08(0.49)	0.10(0.03)	7.26(0.38)
179	-2.40(0.16)	1.41(zg)	7.08(0.49)	0.10(0.03)	7.26(0.38)
180	-1.70(0.12)	0.99(zg)	5.12(0.35)	0.11(0.04)	4.35(0.23)
181	-1.70(0.12)	0.99(zg)	5.12(0.35)	0.11(0.04)	4.35(0.23)
182	-2.47(0.17)	1.16(zg)	8.74(0.60)	0.10(0.04)	6.27(0.33)
183	-2.73(0.19)	1.48(zg)	8.63(0.59)	0.10(0.04)	7.26(0.38)
184	-2.73(0.19)	1.48(zg)	8.63(0.59)	0.10(0.04)	7.26(0.38)
185	-2.02(0.14)	1.06(zg)	6.66(0.46)	0.12(0.04)	4.35(0.23)
186	-2.02(0.14)	1.06(zg)	6.66(0.46)	0.12(0.04)	4.35(0.23)
187	-2.70(0.19)	1.21(zg)	9.81(0.67)	0.10(0.04)	6.76(0.36)
188	-2.70(0.19)	1.21(zg)	9.81(0.67)	0.10(0.04)	6.76(0.36)
189	-2.84(0.20)	1.50(zg)	9.16(0.63)	0.10(0.04)	7.26(0.38)
190	-2.84(0.20)	1.50(zg)	9.16(0.63)	0.10(0.04)	7.26(0.38)
191	-2.14(0.15)	1.09(zg)	7.20(0.49)	0.12(0.04)	4.35(0.23)

Position: 070-W1

30.06.2014

Seite: 8

Kombinations-SPANNUNGEN					
Kombi Nr.	Sigmac (MN/m2)	Sigmat (MN/m2)	Stabilität (MN/m2)	Tau (MN/m2)	Brand (MN/m2)
192	-2.14(0.15)	1.09(zg)	7.20(0.49)	0.12(0.04)	4.35(0.23)

SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
s1	-2.9	-0.15	550	-0.03	0	-0.03	-0.03	
s2	-11.4	-0.57	550	-0.10	0	-0.10	-0.10	
q3	-5.2	-0.52	550	-0.09	0	-0.09	-0.09	
q4	-10.7	-1.07	550	-0.19	0	-0.19	-0.19	
w5	0.0	-2.04	275	-1.49	0	-1.49	1.49	
w6	0.0	2.72	275	1.98	0	1.98	-1.98	
T1	-4.4	-0.22	550	-0.04	28	-0.04	-0.04	
T2	-17.2	-0.86	550	-0.16	28	-0.16	-0.16	
T3	-7.8	-0.78	550	-0.14	28	-0.14	-0.14	
T4	-16.0	-1.60	550	-0.29	28	-0.29	-0.29	
T5	0.0	-3.06	275	-2.00	28	-2.23	2.23	
T6	0.0	4.08	275	2.67	28	2.97	-2.97	
T7	-21.6	-1.08	550	-0.20	28	-0.20	-0.20	
T8	-21.6	-1.08	550	-0.20	28	-0.20	-0.20	
T9	-9.9	-0.77	550	-0.14	28	-0.14	-0.14	
T10	-10.0	-0.89	550	-0.16	28	-0.16	-0.16	
T11	-15.6	-1.34	550	-0.24	28	-0.24	-0.24	
T12	-18.2	-1.71	550	-0.31	28	-0.31	-0.31	
T13	-4.4	-1.95	275	1.30	550	-1.38	1.30	
T14	-2.2	-3.12	275	2.21	550	-2.25	2.21	
T15	-4.4	2.34	275	-1.82	550	1.74	-1.82	
T16	-2.2	4.03	275	-2.99	550	2.95	-2.99	
T17	-22.6	-1.41	550	-0.26	28	-0.26	-0.26	
T18	-16.4	-1.21	550	-0.22	28	-0.22	-0.22	
T19	-28.4	-1.98	550	-0.36	28	-0.36	-0.36	
T20	-24.6	-2.03	550	-0.37	28	-0.37	-0.37	
T21	-17.2	-2.29	303	-1.36	28	-1.49	1.18	
T22	-8.6	-3.28	275	2.15	550	-2.31	2.15	
T23	-17.2	2.04	248	-1.94	550	1.63	-1.94	
T24	-8.6	3.87	275	-3.05	550	2.89	-3.05	
T25	-23.8	-2.38	550	-0.43	28	-0.43	-0.43	
T26	-23.8	-2.38	550	-0.43	28	-0.43	-0.43	
T27	-7.8	-2.25	303	-1.35	28	-1.48	1.19	
T28	-5.5	-3.34	275	2.13	550	-2.33	2.13	
T29	-7.8	2.07	248	-1.92	550	1.64	-1.92	
T30	-5.5	3.81	275	-3.07	550	2.87	-3.07	
T31	-16.0	-2.72	330	-1.49	28	-1.63	1.05	
T32	-11.2	-3.65	303	-2.21	28	-2.43	2.02	
T33	-16.0	1.71	220	-2.07	550	1.49	-2.07	
T34	-11.2	3.54	248	-3.17	550	2.77	-3.17	
T35	0.0	1.02	275	0.67	28	0.74	-0.74	
T36	0.0	1.02	275	0.67	28	0.74	-0.74	
T37	-27.0	-1.63	550	-0.30	28	-0.30	-0.30	
T38	-27.0	-1.63	550	-0.30	28	-0.30	-0.30	
T39	-18.6	-1.32	550	-0.24	28	-0.24	-0.24	
T40	-32.8	-2.20	550	-0.40	28	-0.40	-0.40	
T41	-32.8	-2.20	550	-0.40	28	-0.40	-0.40	
T42	-26.8	-2.14	550	-0.39	28	-0.39	-0.39	
T43	-21.6	-2.41	303	-1.40	28	-1.53	1.14	
T44	-21.6	-2.41	303	-1.40	28	-1.53	1.14	
T45	-10.8	-3.33	275	2.13	550	-2.33	2.13	
T46	-21.6	1.94	248	-1.98	550	1.59	-1.98	
T47	-21.6	1.94	248	-1.98	550	1.59	-1.98	
T48	-10.8	3.81	275	-3.07	550	2.87	-3.07	
T49	-21.1	-1.89	550	-0.34	28	-0.34	-0.34	
T50	-26.0	-2.49	550	-0.45	28	-0.45	-0.45	
T51	-26.0	-2.49	550	-0.45	28	-0.45	-0.45	
T52	-9.9	-2.24	303	-1.34	28	-1.48	1.20	

Position: 070-W1

30.06.2014

Seite: 9

SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
T53	-10.0	-2.31	303	-1.37	28	-1.50	1.17	
T54	-7.7	-3.39	303	-2.12	28	-2.35	2.11	
T55	-9.9	2.08	248	-1.92	550	1.64	-1.92	
T56	-10.0	2.02	248	-1.94	550	1.62	-1.94	
T57	-7.7	3.75	275	-3.09	550	2.85	-3.09	
T58	-15.6	-2.57	330	-1.45	28	-1.58	1.09	
T59	-18.2	-2.79	330	-1.51	28	-1.65	1.03	
T60	-13.4	-3.71	303	-2.23	28	-2.45	2.00	
T61	-15.6	1.82	248	-2.03	550	1.54	-2.03	
T62	-18.2	-1.71	550	-2.09	550	1.47	-2.09	
T63	-13.4	3.49	248	-3.19	550	2.75	-3.19	
T64	-4.4	0.51	248	-0.49	550	0.41	-0.49	
T65	-2.2	0.97	275	-0.76	550	0.72	-0.76	
T66	-2.2	0.97	275	-0.76	550	0.72	-0.76	
T67	-33.8	-2.53	550	-0.46	28	-0.46	-0.46	
T68	-32.4	-2.81	550	-0.51	28	-0.51	-0.51	
T69	-32.4	-2.81	550	-0.51	28	-0.51	-0.51	
T70	-22.6	-2.61	330	-1.46	28	-1.59	1.08	
T71	-16.4	-2.49	330	-1.42	28	-1.56	1.12	
T72	-14.1	-3.57	303	-2.18	28	-2.41	2.05	
T73	-22.6	1.79	248	-2.04	550	1.53	-2.04	
T74	-16.4	1.88	248	-2.00	550	1.56	-2.00	
T75	-14.1	3.60	248	-3.15	550	2.79	-3.15	
T76	-28.4	-2.96	358	-1.56	28	-1.70	0.98	
T77	-24.6	-2.99	358	-1.57	28	-1.71	0.97	
T78	-19.8	-3.88	303	-2.29	28	-2.51	1.95	
T79	-28.4	-1.98	550	-2.14	550	1.42	-2.14	
T80	-24.6	-2.03	550	-2.15	550	1.41	-2.15	
T81	-19.8	3.35	248	-3.25	550	2.69	-3.25	
T82	-17.2	-0.86	550	-0.60	550	0.29	-0.60	
T83	-8.6	0.82	248	-0.82	550	0.66	-0.82	
T84	-8.6	0.82	248	-0.82	550	0.66	-0.82	
T85	-23.8	-3.22	358	-1.64	28	-1.77	0.90	
T86	-23.8	-3.22	358	-1.64	28	-1.77	0.90	
T87	-16.7	-3.95	303	-2.31	28	-2.53	1.92	
T88	-23.8	-2.38	550	-2.22	550	1.35	-2.22	
T89	-23.8	-2.38	550	-2.22	550	1.35	-2.22	
T90	-16.7	3.29	248	-3.27	550	2.67	-3.27	
T91	-7.8	-0.78	550	-0.59	550	0.30	-0.59	
T92	-5.5	0.76	248	-0.84	550	0.64	-0.84	
T93	-5.5	0.76	248	-0.84	550	0.64	-0.84	
T94	-16.0	-1.60	550	-0.74	550	0.15	-0.74	
T95	-11.2	-1.12	550	-0.95	550	0.54	-0.95	
T96	-11.2	-1.12	550	-0.95	550	0.54	-0.95	
T97	-38.2	-2.75	550	-0.50	28	-0.50	-0.50	
T98	-38.2	-2.75	550	-0.50	28	-0.50	-0.50	
T99	-34.6	-2.92	550	-0.53	28	-0.53	-0.53	
T100	-34.6	-2.92	550	-0.53	28	-0.53	-0.53	
T101	-27.0	-2.74	330	-1.50	28	-1.63	1.04	
T102	-27.0	-2.74	330	-1.50	28	-1.63	1.04	
T103	-18.6	-2.56	330	-1.44	28	-1.58	1.10	
T104	-16.3	-3.63	303	-2.20	28	-2.43	2.03	
T105	-27.0	1.70	220	-2.08	550	1.49	-2.08	
T106	-27.0	1.70	220	-2.08	550	1.49	-2.08	
T107	-18.6	1.83	248	-2.02	550	1.54	-2.02	
T108	-16.3	3.55	248	-3.17	550	2.77	-3.17	
T109	-32.8	-3.10	358	-1.60	28	-1.74	0.94	
T110	-32.8	-3.10	358	-1.60	28	-1.74	0.94	
T111	-26.8	-3.06	358	-1.59	28	-1.73	0.95	
T112	-22.0	-3.94	303	-2.31	28	-2.53	1.93	
T113	-32.8	-2.20	550	-2.18	550	1.38	-2.18	
T114	-32.8	-2.20	550	-2.18	550	1.38	-2.18	
T115	-26.8	-2.14	550	-2.17	550	1.39	-2.17	
T116	-22.0	3.30	248	-3.27	550	2.67	-3.27	
T117	-21.6	-1.08	550	-0.64	550	0.25	-0.64	
T118	-21.6	-1.08	550	-0.64	550	0.25	-0.64	
T119	-10.8	0.77	248	-0.84	550	0.64	-0.84	
T120	-10.8	0.77	248	-0.84	550	0.64	-0.84	

Position: 070-W1

30.06.2014

Seite: 10

SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:								
Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
T121	-21.1	-2.90	358	-1.55	28	-1.68	0.99	
T122	-26.0	-3.29	358	-1.66	28	-1.79	0.88	
T123	-26.0	-3.29	358	-1.66	28	-1.79	0.88	
T124	-18.9	-4.01	303	-2.33	28	-2.55	1.90	
T125	-21.1	-1.89	550	-2.13	550	1.44	-2.13	
T126	-26.0	-2.49	550	-2.24	550	1.33	-2.24	
T127	-26.0	-2.49	550	-2.24	550	1.33	-2.24	
T128	-18.9	3.24	248	-3.29	550	2.65	-3.29	
T129	-9.9	-0.77	550	-0.59	550	0.31	-0.59	
T130	-10.0	-0.89	550	-0.61	550	0.28	-0.61	
T131	-7.7	0.72	220	-0.86	550	0.62	-0.86	
T132	-7.7	0.72	220	-0.86	550	0.62	-0.86	
T133	-15.6	-1.34	550	-0.69	550	0.20	-0.69	
T134	-18.2	-1.71	550	-0.76	550	0.13	-0.76	
T135	-13.4	-1.23	550	-0.97	550	0.52	-0.97	
T136	-13.4	-1.23	550	-0.97	550	0.52	-0.97	
T137	-33.8	-3.31	358	-1.66	28	-1.80	0.88	
T138	-32.4	-3.51	385	-1.71	28	-1.85	0.83	
T139	-32.4	-3.51	385	-1.71	28	-1.85	0.83	
T140	-25.3	-4.20	330	-2.39	28	-2.61	1.85	
T141	-33.8	-2.53	550	-2.24	550	1.32	-2.24	
T142	-32.4	-2.81	550	-2.29	550	1.27	-2.29	
T143	-32.4	-2.81	550	-2.29	550	1.27	-2.29	
T144	-25.3	3.10	248	-3.35	550	2.59	-3.35	
T145	-22.6	-1.41	550	-0.70	550	0.19	-0.70	
T146	-16.4	-1.21	550	-0.67	550	0.23	-0.67	
T147	-14.1	-0.98	550	-0.92	550	0.56	-0.92	
T148	-14.1	-0.98	550	-0.92	550	0.56	-0.92	
T149	-28.4	-1.98	550	-0.81	550	0.09	-0.81	
T150	-24.6	-2.03	550	-0.81	550	0.08	-0.81	
T151	-19.8	-1.55	550	-1.02	550	0.46	-1.02	
T152	-19.8	-1.55	550	-1.02	550	0.46	-1.02	
T153	-23.8	-2.38	550	-0.88	550	0.01	-0.88	
T154	-23.8	-2.38	550	-0.88	550	0.01	-0.88	
T155	-16.7	-1.67	550	-1.05	550	0.44	-1.05	
T156	-16.7	-1.67	550	-1.05	550	0.44	-1.05	
T157	-38.2	-3.47	385	-1.70	28	-1.84	0.84	
T158	-38.2	-3.47	385	-1.70	28	-1.84	0.84	
T159	-34.6	-3.59	385	-1.73	28	-1.87	0.81	
T160	-34.6	-3.59	385	-1.73	28	-1.87	0.81	
T161	-27.5	-4.26	330	-2.41	28	-2.63	1.83	
T162	-38.2	-2.75	550	-2.28	550	1.28	-2.28	
T163	-38.2	-2.75	550	-2.28	550	1.28	-2.28	
T164	-34.6	-2.92	550	-2.31	550	1.25	-2.31	
T165	-34.6	-2.92	550	-2.31	550	1.25	-2.31	
T166	-27.5	3.05	248	-3.37	550	2.57	-3.37	
T167	-27.0	-1.63	550	-0.74	550	0.15	-0.74	
T168	-27.0	-1.63	550	-0.74	550	0.15	-0.74	
T169	-18.6	-1.32	550	-0.69	550	0.21	-0.69	
T170	-16.3	-1.09	550	-0.94	550	0.54	-0.94	
T171	-16.3	-1.09	550	-0.94	550	0.54	-0.94	
T172	-32.8	-2.20	550	-0.85	550	0.05	-0.85	
T173	-32.8	-2.20	550	-0.85	550	0.05	-0.85	
T174	-26.8	-2.14	550	-0.83	550	0.06	-0.83	
T175	-22.0	-1.66	550	-1.04	550	0.44	-1.04	
T176	-22.0	-1.66	550	-1.04	550	0.44	-1.04	
T177	-21.1	-1.89	550	-0.79	550	0.10	-0.79	
T178	-26.0	-2.49	550	-0.90	550	-0.01	-0.90	
T179	-26.0	-2.49	550	-0.90	550	-0.01	-0.90	
T180	-18.9	-1.78	550	-1.07	550	0.42	-1.07	
T181	-18.9	-1.78	550	-1.07	550	0.42	-1.07	
T182	-33.8	-2.53	550	-0.90	550	-0.01	-0.90	
T183	-32.4	-2.81	550	-0.96	550	-0.07	-0.96	
T184	-32.4	-2.81	550	-0.96	550	-0.07	-0.96	
T185	-25.3	-2.10	550	-1.12	550	0.36	-1.12	
T186	-25.3	-2.10	550	-1.12	550	0.36	-1.12	
T187	-38.2	-2.75	550	-0.94	550	-0.05	-0.94	
T188	-38.2	-2.75	550	-0.94	550	-0.05	-0.94	



Position: 070-W1

30.06.2014

Seite: 11

**SCHNITT-/LAGERGRÖSSEN für Lastfälle und TRF-Kombinationen:**

Lf/K Nr.	Nx (kN)	My (kNm)	xm (cm)	V (kN)	xv (cm)	Vu (kN)	Vo (kN)	Mu (kNm)
T189	-34.6	-2.92	550	-0.98	550	-0.09	-0.98	
T190	-34.6	-2.92	550	-0.98	550	-0.09	-0.98	
T191	-27.5	-2.21	550	-1.14	550	0.34	-1.14	
T192	-27.5	-2.21	550	-1.14	550	0.34	-1.14	

**SPANNUNGSNACHWEISE: für Max.-Werte**

T16 Zugseite	SigmaZg=	3.70 MN/m2	gezogene Faserseite (mech.)
T161Druck	Sigmac =	-4.06 MN/m2	< 14.54 MN/m2 (0.28)
T157Stabilität	Sigmac =	10.28 MN/m2	< 14.54 MN/m2 (0.71)
T166Schub	TauV =	0.36 MN/m2	< 2.77 MN/m2 (0.13)

**DURCHBIEGUNGEN für Extremalwerte:**

infolge permanenter/quasi-ständiger Einwirkungen					
G25	wpq fin =	0.14 cm	<	H/200	(0.05)
infolge rarer/seltener Einwirkungen					
G191	wrq inst =	1.73 cm	<	H/300	(0.95)
G191	wrq fin =	1.79 cm	<	H/200	(0.65)

Lf Nr	Schwelle b/h cm	Aufstand lba/lla cm	Abstand li/re cm	Aef/kc90 cm2/-	Pressung MN/m2
T97	20.0/12.0	20/12	90/90	360/1.25	1.06 < 2.16( 0.49)

**BRANDSCHUTZ-Nachweis DIN EN 1995-1-2/NA:2010-12 4.2.2 für F30-B  
mit Abbrandgeschwindigkeit: v= 0.80 mm/min**

B25 Spannung	Sig fi =	7.26 MN/m2	<	18.92 MN/m2 (0.38)
B25 Schub	Tau fi =	0.08 MN/m2	<	5.00 MN/m2 (0.02)

**Pos. W1b Wandstiel Finnjoist b/h = 89x220 mm**

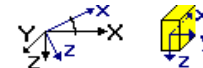
Lasten wie W1a

Finnwood 2.3 ( 2.3.035 )  
Ing.-Büro BILD  
M.P. Schmidt© Copyright 2010 Metsäliitto Cooperative, Finnforest  
+++ Haus, 070-W1b-FJ  
22.07.2014Die nachfolgende Bemessung gilt nur für die untenstehenden Konstruktionsdaten.  
Die tatsächliche Länge des Bauteils kann von der dargestellten Konstruktionslänge abweichen.

Finnwood 2.3 ( 2.3.035 )

## PROJEKTINFORMATION:

Bearbeiter: M.P. Schmidt  
 Firma: Ing.-Büro BILD  
 Projekt: +++ Haus  
 Kunde: ACMS  
 Name: 070-W1b-FJ  
 P:\...\070- W1b.s01



## SYSTEMINFORMATION:

Tragwerkstyp: Stütze  
 Profil: FJI 89x220 (B=89 mm, H=220 mm)  
 Stegverstärkungen: Nie  
 Nutzungsklasse: 1  
 Winkel: 90.0 Grad  
 Abstand: 1000 mm (Für Flächenlasten)

## Kragarmlänge/Spannweite:

Kragarm/Spannweite: Vertikal [mm]:  
 Spannweite 1: 5500.0  
 Gesamt: 5500.0

Auflager: Stelle x [mm]: Art:  
 1: 0 Gelenkiges Auflager (X,Z)  
 2: 5500 Gelenkiges Auflager (X)

My,k: 17.55 kNm  
 Mz,k: 1.98 kNm  
 Vz,k: 11.52 kN  
 Vy,k: 9.26 kN  
 Nt,k: 97.19 kN  
 Nc,k: 97.19 kN  
 Ely: 786.90 kNm<sup>2</sup>  
 Elz: 61.86 kNm<sup>2</sup>  
 GAz: 1809.00 kN  
 GAy: 3471.00 kN  
 EA: 93717.00 kN

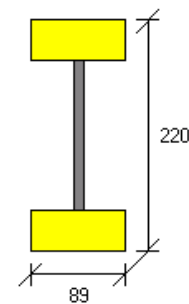
Sicherheitsfaktor, Gurt: 1.30

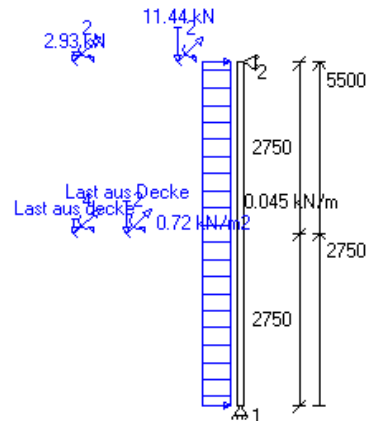
Sicherheitsfaktor, Steg: 1.30

Lastdauerklasse:	kmod, Gurt:	kmod, Steg:
ständig:	0.600	0.400
lang:	0.700	0.500
mittel:	0.800	0.700
kurz:	0.900	0.900
sehr kurz:	1.100	1.100

kdef, Gurt: 0.600

kdef, Steg: 1.500




**BELASTUNGSINFORMATION:**

## Eigenlasten (Eigenlasten, ständig):

Einzellast: 1:	FZ = 2.93 kN	x = 5500.0 mm	
Einzellast: 2:	My = -0.146 kNm	x = 5500.0 mm	
Einzellast: 3:	FZ = 5.22 kN	x = 2750.0 mm	(Last aus decke)
Einzellast: 4:	My = -0.522 kNm	x = 2750.0 mm	
Trägergewicht:	QZ = 0.045 kN/m	x = 0 - 5500 mm	

## Nutzlasten (Nutzlasten A, mittel, Beweglichkeit = 100.0 %):

Einzellast: 1:	FZ = 10.67 kN	x = 2750.0 mm	(Last aus Decke)
Einzellast: 2:	My = -1.070 kNm	x = 2750.0 mm	

## Schneelasten (Schneelasten h&lt;=1000 m, kurz):

Einzellast: 1:	FZ = 11.44 kN	x = 5500.0 mm
Einzellast: 2:	My = -0.572 kNm	x = 5500.0 mm

## Windlasten (Windlasten, kurz):

Flächenlast: 1:	Qz = 0.720 kN/m <sup>2</sup>	x = 0 - 5500 mm
-----------------	------------------------------	-----------------

**BEMESSUNGSERGEBNISSE:**

Bemessungsnorm:	DIN 1052:2008
Gesamtausnutzungsgrad:	83.9 %

## BEMESSUNGSKENNWERTE:

Empfohlene Grenzwerte w <sub>q,inst</sub> :	L/300	(Selten)
Empfohlene Grenzwerte w <sub>fin</sub> :	L/200	(Selten)
Linker Kragarm, Multiplikator für zulässig w:	2.00	
Rechter Kragarm, Multiplikator für zulässig w:	2.00	
Knicken in z-Richtung:	L <sub>c</sub> = 1.00*L	

Finnwood 2.3 ( 2.3.035)  
Ing.-Büro BILD  
M.P. Schmidt© Copyright 2010 Metsäliitto Cooperative, Finnforest  
+++ Haus, 070-W1b-FJ  
22.07.2014Knicken in y-Richtung behindert  
Kippen behindert

## BEMESSUNGSERGEBNISSE MAX./MIN.:

Bemessung:	Vorhanden:	Grenzwert:	%Ausnutzung:	Stelle x:	
Schub (z):	3.12 kN	7.97 kN	39.2 %	5230 mm	Komb. 13/1, kurz
Druck:	39.70 kN	54.85 kN	72.4 %	0 mm	Komb. 7/1, kurz
Biegung (My):	4.90 kNm	12.15 kNm	40.3 %	2750 mm	Komb. 9/1, kurz
Biegung+Druck:	0.84	1.00	83.9 %	2750 mm	Komb. 7/1, kurz
(My=1.44 kNm, Mz=0.00 kNm, Nx=39.53 kN)					
Nachweise, Auflager 1:	2.81 kN	15.37 kN	18.3 %	0 mm	Komb. 4/1, kurz
Nachweise, Auflager 2:	3.42 kN	15.37 kN	22.2 %	5500 mm	Komb. 13/1, kurz
Feld 1, wq,inst:	12.4 mm	18.3 mm	67.8 %	2888 mm	Komb. 22/1 (Selten)
Feld 1, wfin:	11.9 mm	27.5 mm	43.4 %	2888 mm	Komb. 22/1 (Selten)

## BEMESSUNGSERGEBNISSE KOMBINATIONEN:

Kombinationen 13/1 (kurz):

1.35\*Eigenlasten + 1.05\*Nutzlasten + 0.75\*Schneelasten + 1.50\*Windlasten

Kombinationen 7/1 (kurz):

1.35\*Eigenlasten + 1.05\*Nutzlasten + 1.50\*Schneelasten

Kombinationen 9/1 (kurz):

1.35\*Eigenlasten + 1.05\*Nutzlasten + 1.50\*Windlasten

Kombinationen 4/1 (kurz):

1.35\*Eigenlasten + 1.50\*Windlasten

Kombinationen 22/1 (Selten):

1.00\*Eigenlasten + 0.70\*Nutzlasten + 1.00\*Windlasten

## EXTREMWERTE SCHNITTKRÄFTE:

Ergebnisse:	Maximumwerte:	Stelle x:
Nx,max	39.70 kN	0 mm
Vz,max	3.42 kN	5500 mm
My,max	4.90 kNm	2750 mm

## AUFLAGERKRÄFTE:

FX:

Auflager:	TRAGF max:	TRAGF min:	GEBR max:	GEBR min:
1:	0.53 kN	-2.81 kN	0.37 kN	-1.86 kN
2:	-0.16 kN	-3.42 kN	-0.12 kN	-2.29 kN

FZ:

Auflager:	TRAGF max:	TRAGF min:	GEBR max:	GEBR min:	Rd/A:
1:	39.70 kN	11.34 kN	27.31 kN	8.40 kN	5.72 N/mm <sup>2</sup>
2:	0.00 kN	0.00 kN	0.00 kN	0.00 kN	--

- GEBR Die Auflagerreaktion sind nur als Vergleichswert zu verwenden

## AUFLAGERKRÄFTE, LASTGRUPPEN (Charakteristisch):

Lastgruppe:

Eigenlasten	
Auflager:	FX [kN]: FZ [kN]:
1:	0.12 8.40
2:	-0.12 0.00

Lastgruppe:

Nutzlasten	
Auflager:	FX [kN]: FZ [kN]:
1:	0.19 10.67
2:	-0.19 0.00

Finnwood 2.3 ( 2.3.035 )  
Ing.-Büro BILD  
M.P. Schmidt© Copyright 2010 Metsäliitto Cooperative, Finnforest  
+++ Haus, 070-W1b-FJ  
22.07.2014

Lastgruppe:	Schneelasten	
Auflager:	FX [kN]:	FZ [kN]:
1:	0.10	11.44
2:	-0.10	0.00

Lastgruppe:	Windlasten	
Auflager:	FX [kN]:	
1:	-1.98	
2:	-1.98	

**Anmerkungen:**

- Die Bemessung erfolgt nach DIN 1052:2008
- TRAGF = Grenzzustände der Tragfähigkeit , GEBR = Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit
- Theorie II. Ordnung ist nicht berücksichtigt
- Die Prozentangabe für kombinierte Axiale und Biegespannungen ist der Quotient des Bemessungswertes der Einwirkungen und des Bemessungswertes der Tragfähigkeit. Dieser Quotient entspricht nicht einer Querschnittsausnutzung
- Der Nachweis der auflagerbildenden Bauteile muß gesondert geführt werden
- Bei der Berechnung von Kragarmen wird eine Verformung bei einer Kragarmlänge < 200 mm nicht berücksichtigt
- Schubverformung wurde bei der Bemessung GEBR berücksichtigt
- Schubverformung wurde bei der Berechnung der Schnittkräfte TRAGF nicht berücksichtigt
- Abminderung der Querkraft ist im auflagnahen Bereich berücksichtigt, hierbei wird davon ausgegangen, dass Belastung und Auflager sich am Bauteil gegenüber liegen.
- Die Abminderung der Querkraft wird entsprechend dem Querkraftverlauf der Lastkombinationen im Abstand H vom Auflagerende durchgeführt
- Lage der axialen Lasten ist in der neutralen Achse des Trägers angenommen
- Mögliche Exzentrizität der axialen Lasten sollte separat betrachtet werden
- Finnjoist-Bemessung gemäß ETA-02/0026 (2007)

Bei diesen Berechnungen sind außergewöhnliche Einwirkungen durch z.B. Feuchtigkeit oder Montagelasten während des Aufbaus nicht berücksichtigt. Die Notwendigkeit für zusätzliche Aussteifungen während des Aufbaus ist gesondert zu prüfen.

Die gesamte Stabilität des Gebäudes und Horizontallasten sind nicht berücksichtigt.

Der Konstrukteur des Gebäudes, der leitende Ingenieur oder eine andere Person, die für das konstruktive Verhalten des gesamten Gebäudes verantwortlich ist, muss die Verwendbarkeit des Bauteils (Balken, Stütze) für das Gebäude gesondert prüfen.

Die mit Hilfe der Finnwood-Software erstellten Berechnungen und Ausdrücke sind nur gültig, wenn die Metsäliitto Cooperative, Finnforest-Produkte in der Finnwood-Software enthalten sind. Diese Produkte müssen auf Aufforderung auf der Baustelle gezeigt werden. Metsäliitto Cooperative, Finnforest oder deren Tochterunternehmen übernehmen Ihnen oder Dritten gegenüber keine Haftung für Produkte von Dritt-Herstellern, oder für die Verwendung derartiger Produkte in der Software, oder für unmittelbaren oder mittelbaren Schaden, oder Schaden anderer Art oder Verluste im Zusammenhang mit den Produkten der Dritt-Hersteller oder deren Verwendung in der Software. Diese Anmerkungen dürfen auf den Ausdrücken nicht entfernt werden.

<b>INGENIEURBÜRO B I L D</b> Beratende Ingenieure VBI für Hoch-, Industrie- und Brückenbau 58093 Hagen Emster Straße 25 info@drbild.de Tel. 0 23 31 - 55 00 5 + 95 09 - 0 Fax 55 00 4	Projekt-Nr. : <b>070 - 14</b>
Bauwerk : +++ Haus	Seite : 200

**Abschlussseite**  
**der statischen Berechnung**

**für den Neubau eines +++ Hauses**

Für die Statik :

Hagen, im ..... 2014

.....  
(Dipl.-Ing. Michael P.Schmidt)

.....  
(Dr.-Ing. Stefan Bild)



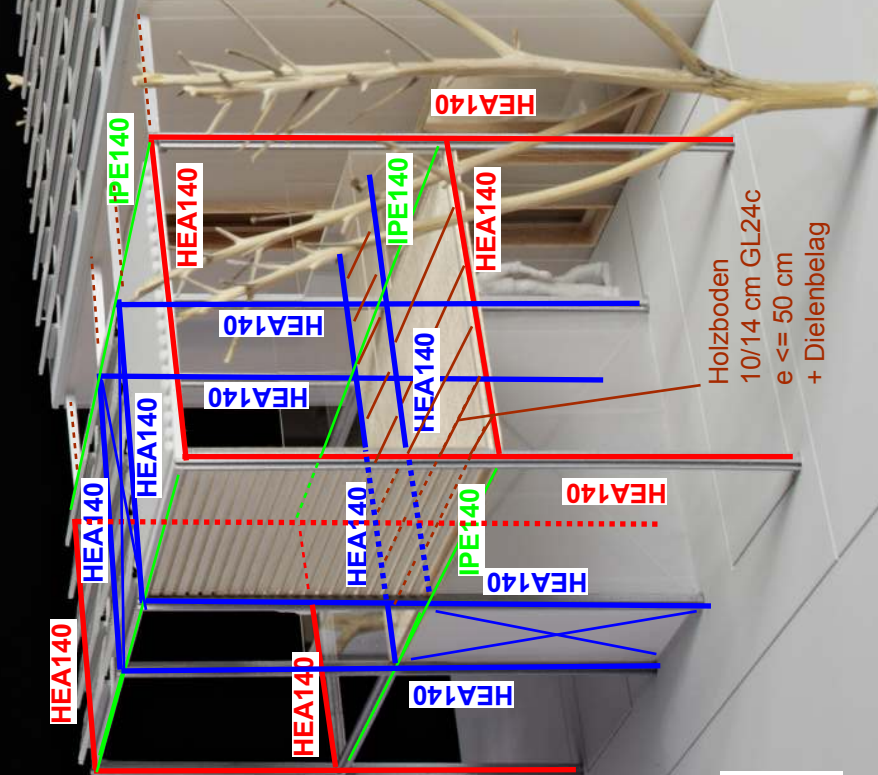
Projekt : 070-14  
 Bauvorhaben: +++Haus

**ing**

**Ingenieurbüro Bild**  
 Beratende Ingenieure VBI

95092 Ingertshausen  
 info@bild.de

Tel. 0333/35605  
 Fax 0333/35604



Holzbohlen  
 10/14 cm GL24c  
 e ≤ 50 cm  
 + Dielenbelag



Rahmenprofile:  
**HEA140**  
 Koppelprofile:  
**IPE140**