

ifeu-
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH



Verwertung des Abbruchmaterials von KlimaHäusern

**im Auftrag der
Autonomen Provinz Bozen - Südtirol
Abt. 29 – Landesagentur für Umwelt**

September 2012

Autoren:

IFEU-Institut Heidelberg:

Florian Knappe (Projektleitung)

Anton Diebel

Joachim Reinhardt

Stefanie Theis

Syneco:

Elisabeth Leiter

Rupert Rosanelli

Andreas Vieider

sowie

Martina Bonadio

Walter Feeß (Fa. Feeß Erdbau)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung / Aufgabenstellung	1
2	Die Bauweise von KlimaHäusern und die Auswirkungen auf Abbruch und Entsorgung ...	3
2.1.	Gebäude in Massivbauweise (monolithisch)	7
2.1.1	Bauweisen	7
2.1.2	Baumaterialien und Dämmstoffe.....	7
2.1.3	Rückbaumöglichkeiten.....	12
2.1.4	Auswirkungen auf Aufbereitung und Verwertung der Bauabfälle.....	12
2.2.	Gebäude in Massivbauweise mit Wärmedämm- verbundsystem	14
2.2.1	Bauweisen und Baustoffe	14
2.2.2	Verwendete Dämmstoffe	15
2.2.3	Rückbaumöglichkeiten.....	18
2.2.4	Auswirkungen auf Aufbereitung und Verwertung der Bauabfälle.....	20
2.3.	Gebäude in Massivholzbauweise.....	23
2.3.1	Bauweisen	23
2.3.2	Baustoffe und Dämmstoffe	24
2.3.3	Bewertung des Rückbaus und Aufbereitungsmöglichkeiten.....	25
2.4.	Gebäude in Holzrahmenbauweise / Leichte Bauweise.....	25
2.4.1	Bauweisen	25
2.4.2	Baumaterialien und Dämmstoffe.....	27
2.4.3	Rückbaumöglichkeiten.....	28
2.4.4	Auswirkungen auf Aufbereitung und Verwertung der Bauabfälle.....	29
2.5.	Schlussfolgerung	29
2.5.1	Aus Sicht der Bauschutt-aufbereiter.....	29
2.5.2	Aus ökologischer Sicht	34
3	Abbruch und Entsorgung von KlimaHäusern aus ökologischer Sicht.....	35
3.1.	Beschreibung der Alternativen	35
3.1.1	Massivbauweise mit WDVS	35
3.1.2	Leichtbauweise (Holzrahmenbauweise).....	39
3.2.	Ökologischer Vergleich für Abbruch und Entsorgung.....	42
3.2.1	Klimawandel (Treibhauseffekt).....	43
3.2.2	Versauerung, terrestrische Eutrophierung, Feinstaub (PM 10).....	45
3.2.3	Normierung der Ergebnisse	47
3.2.4	Sensitivitätsbetrachtung.....	49
3.2.5	Diskussion der Ergebnisse	50
3.3.	Die Bauweisen und ihre ökologischen Rucksäcke	51
3.3.1	Vorgehen, Datensätze, Quellen.....	51

3.3.1.1	Datensätze Außenwände (Bau- und Dämmstoffe)	52
3.3.1.2	Datensätze Bodenplatte (Bau- und Dämmstoffe)	58
3.3.2	Bilanzierung der ökologischen Rucksäcke	61
4	Fazit	71
5	Situationsaufnahme Solartechnik	73
5.1.	Hintergrund.....	73
5.2.	Strom aus Sonnenenergie	74
5.2.1	Entwicklung der installierten Leistung	74
5.2.2	Modul-Typen und ihre Bedeutung in Südtirol	76
5.3.	Wärme aus Sonnenenergie	78
5.3.1	Entwicklung der installierten Leistung	78
5.3.2	Kollektor-Typen und ihre Bedeutung in Südtirol.....	78
5.4.	Prognose der zeitlichen Entwicklung des Abfall-aufkommens.....	79
6	Entsorgungsmöglichkeit für Solartechnik.....	81
6.1.	Materialeinsatz bei PV-Modulen	81
6.2.	Materialeinsatz bei solarthermischen Kollektoren	84
6.3.	Umwelt- und abfallpolitische Ziele.....	85
6.4.	Status Aufbereitungstechnik	88
6.4.1	Optionen für Fotovoltaik-Module	88
6.4.2	Optionen für Solarthermie-Module	90
7	Erfassungskonzepte	91
7.1.	Erfassungskonzept für PV-Module.....	91
7.1.1	Das System PV-Cycle	91
7.1.2	Anforderungen an die Logistik in Südtirol.....	94
7.2.	Erfassungskonzept für thermische Solarkollektoren.....	96
8	Zusammenfassung.....	98
9	Empfehlungen	101
9.1.	Retrospektiv.....	101
9.2.	Prospektiv.....	104
Anhang A:	Erläuterung der Wirkungskategorien.....	106
A 1.	Klimawandel	106
A 2.	Terrestrische Eutrophierung	108
A 3.	Versauerung.....	108
A 4.	Toxische Schädigung von Menschen durch Feinstaub (PM10).....	109
A 5.	Quellenverzeichnis	111
Literaturliste.....		112

Glossar

Massivbau:	Der Massivbau bezeichnet eine Bauweise, bei der die raumabschließenden Elemente (Wände) zugleich die tragende Funktion der Bauwerkskonstruktion übernehmen
Ausfachung:	Eine Ausfachung ist der Raum zwischen den Holzbalken eines Fachwerkhäuses oder einer Wand in Holzrahmenbauweise
Holzrahmenbau:	Der Holzrahmenbau wird typischerweise bei Fertighäusern eingesetzt, vor allem für 1-2 stöckige Gebäude. Ein Holzgerüst mit senkrechten und waagrechten Stäben übernimmt die vertikale Tragfunktion einer Wand, während plattenförmige Wandbaustoffe die horizontale Aussteifung der Wand übernehmen.
Wärmeleitfähigkeit:	Die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes beschreibt die Fähigkeit, thermische Energie zu transportieren. Je kleiner die Wärmeleitfähigkeit, desto besser sind die Dämmeigenschaften des Materials.
Hochlochziegel	Der Hochlochziegel ist ein Mauerziegel mit einem hohen Anteil an Luftporen senkrecht zur Auflagenfläche, was die Wärmeleitfähigkeit deutlich reduziert, ohne seine Tragfähigkeit zu beeinträchtigen.
Haufwerk	Ein Haufwerk beschreibt die zu einem Haufen aufgeschütteten Steine
Porosität	Die Porosität stellt das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen eines Baustoffes dar
Vorsieb	Das Vorsieb ist bei der Bauschuttaufbereitung vor dem ersten Brecher angeordnet und dient dem Absieben von ungeeigneten Feinanteilen wie Bodenpartikel oder Putze
Thermohaut	Thermohaut ist die umgangssprachliche Bezeichnung für das Wärmedämmverbundsystem an Hausfassaden
Tragwerk	Als Tragwerk bezeichnet man die Summe aller tragenden Bauteile eines Gebäudes
Hinterlüftung	Bei mehrschichtigen Fassaden dient die äußere Schicht dem Schutz gegenüber Schlagregen, die durch eine Luftschicht von den dahinter liegenden Fassadenteilen getrennt ist
Mineralische Bauabfälle	Mineralische Bauabfälle bezeichnen den Teil der Bauabfälle, der sich aus Altbeton, Mauerwerksschutt, Steinen und Erden zusammensetzt
Frostschuttschicht	Die Frostschuttschicht bildet die unterste der ungebundenen Schichten im Oberbau eines Straßenkörpers und ist frostunempfindlich
Schottertragschicht	Die Schottertragschicht bildet die oberste der ungebundenen Schichten im Oberbau eines Straßenkörpers
Energiestandard	Der Energiestandard beschreibt den maximalen spezifischen Energiebedarf eines Gebäudes
Ökologischer Rucksack	Der ökologische Rucksack beschreibt den Rohstoffeinsatz und die Umweltlasten, die mit der Herstellung eines Produktes verbunden sind
Wärmedurchgangskoeffizient	Der Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteiles ergibt sich aus seiner Wärmeleitfähigkeit und der Dicke, ausgedrückt als U-Wert
Bodenplatte	Die Bodenplatte ist das plattenförmige Fundament eines Gebäudes

Primärgestein	Primärgestein ist Gestein, das unter Nutzung primärer Rohstoffe wie Naturstein oder Kies hergestellt wurde
Verfüllmaterial	Verfüllmaterial beschreibt mineralische Massen, die im Rahmen von Rekultivierungen zur Wiederverfüllungen von Abgrabungen eingesetzt werden
Sachbilanz	Eine Ökobilanz umfasst eine Sachbilanz und eine Wirkungsabschätzung. Die Sachbilanz ist eine Aufstellung der Inputs (Materialmassen, Energieströme) und Outputs (Emissionen) eines Produktlebensweges oder Abfallentsorgungsprozesses.
Sektoralanalyse	Die Sektoralanalyse stellt im Rahmen der Wirkungsabschätzung die Beiträge der einzelnen Abschnitte oder Sektoren eines Produktlebensweges oder Abfallentsorgungsprozesses gesondert dar
Treibhauseffekt	Der Treibhauseffekt beschreibt die Erhöhung der Oberflächentemperatur der Erde durch die Freisetzung von Treibhausgasen
Versauerungspotenzial	Das Versauerungspotenzial beschreibt die Summe aller als Emission freigesetzten Gase, die auf Gewässer und Böden potenziell versauernd wirken können
Substitutionseffekt	Substitutionseffekt beschreibt den Effekt der dadurch erreicht wird, dass ein insbesondere aus Abfall hergestelltes Produkt ein nutzgleiches auf Basis primärer Rohstoffe hergestelltes Produkt ersetzt
monolithisch	Monolithisch ist eine Gebäudewand dann, wenn sie nur aus einem mineralischen Baustoff errichtet wurde
Umweltproduktdeklarationen	Umweltproduktdeklarationen geben detaillierte Informationen über die mit der Herstellung und Nutzung von Bauprodukten verbundenen Umweltlasten
Sensitivitätsanalyse	Im Rahmen einer Ökobilanz wird über eine Sensitivitätsanalyse geprüft, wie empfindlich das Bilanzierungsergebnis auf Änderungen der getroffenen Annahmen reagiert
Solarthermie	Solarthermie beschreibt die Umwandlung der Sonnenenergie in nutzbare Wärme
Fotovoltaik	Fotovoltaik beschreibt die Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie
Absorbermaterial	Das Absorbermaterial dient dazu, die Sonnenenergie in Wärme zu transformieren
Verbindungshalbleiter	Verbindungshalbleiter sind Halbleiterwerkstoffe, die aus zwei oder mehr chemischen Elementen bestehen
Amorphes Silizium	Im Gegensatz zu kristallinem Silizium hat amorphes Silizium einen ungeordneten Aufbau
PV-Cycle	PV-Cycle ist ein freiwilliger Zusammenschluss von Modulherstellern zur Rücknahme und dem Recycling von Fotovoltaik-Altmodulen
Sputterverfahren	Das Verfahren beschreibt die Beschichtung von Oberflächen durch zerstäubtes Material
Belebtschlamm	Belebtschlamm besteht vor allem aus Bakterien und Pilzen, die in der Abwasserbehandlung über Nitrifikation organische Stoffe abbauen
Silizium-Wafer	Wafer sind etwa 1mm dicke Scheiben (hier aus Silizium) und dienen als

	Grundplatte für elektronische Bauelemente, hier Solarzellen
Fluorpolymere	Polymere mit einem hohen Fluoranteil und damit hoher Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Verbindungen
Kaskadennutzung	Die Kaskadennutzung bezeichnet die Mehrfachnutzung eines Rohstoffes, indem diese vor einer abschließenden meist thermischen Nutzung bis zu mehrfach stofflich genutzt werden
prospektiv	Vorausschauend
retrospektiv	Zurückblickend
anthropogen	Vom Menschen gemacht
Prallmühle	In einer Prallmühle wird Material gebrochen, indem es gegen ein härteres Material/Bauteil geschleudert wird
Backenbrecher	In einem Backenbrecher wird das Material gebrochen, indem es zerquetscht wird; der Backenbrecher dient der Vorzerkleinerung
Dampfsperre	Die Dampfsperre auf der warmen Seite einer Dämmung verhindert den Eintritt von Feuchtigkeit in das Dämmmaterial
Dünnschichtmodule	Die Fotovoltaikmodule werden nicht aus Silizium-Wafer hergestellt, sondern durch Abscheiden von amorphem Silizium direkt auf ein Trägermaterial
Cadmium-Tellurid	Cadmium-Tellurid ist ein Absorbermaterial, das in Dünnschichtzellen in Konkurrenz zu Silizium eingesetzt wird

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Kumulierte Anzahl der zertifizierten KlimaHäuser in Bozen	3
Abb. 2: Typischer Wandaufbau eines Gebäudes in Massivbauweise (Sommer 2011).....	4
Abb. 3: Zur Dämmung der Außenwände eingesetzte Dämmstoffe (Stichprobenerhebung)	7
Abb. 4: Wandaufbau eines Passivhaus-Gebäudes in monolithischer Bauweise (Sommer 2011).....	8
Abb. 5: Hochlochziegel im Einsatz (Amt für Luft und Lärm, Provinz Bozen 2012).....	8
Abb. 6: Beispiele für Leichtbetone – gefügedicht/haufwerkporig (BauNetz Media GmbH)	9
Abb. 7: Mauerziegel aus Porenbeton (Carl Schlenk AG 2012)	10
Abb. 8: Verbundbaustoff „Bisomark“ aus Leichtbeton mit Hartschaumkern (Bisotherm GmbH 2012)	11
Abb. 9: Verbundbausystem KALOPOR mit Mineralwolle-Dämmung (Klimaleichtblock GmbH 2012)	12
Abb. 10: Wandaufbau eines Passivhaus-Gebäudes in massiver Bauweise im WDVS (Sommer 2011) .	14
Abb. 11: Verklebtes und verdübeltes WDVS-System auf Ziegel-Mauer (Renovationprofis 2011)	15
Abb. 12: Dämmmaterialien im Wärmedämmverbundsystem	15
Abb. 13: Außenwanddämmung mit Polystyrol	17
Abb. 14: Außenwanddämmung mit Holzfaserdämmplatten (Amt für Luft und Lärm, Provinz Bozen)	17
Abb. 15: Beispiel eines Baggers mit Sortiergreifer (pixelio 2012).....	18
Abb. 16: Einsatz des Sortiergreifers beim Rückbau eines WDV-Systems.....	19
Abb. 17: Massive Ziegelmauerwand mit Resten von WDVS-Befestigung.....	19
Abb. 18: Schematischer Aufbau eines Schnecken-Strom-Sortierers (PETIT 1997)	21
Abb. 19: Beispiel eines Windsichters (Fa. City Equip, 2008).....	22
Abb. 20: Systematischer Aufbau einer Passivhaus-Außenwand in Holzmassivbauweise	24
Abb. 21: Systematischer Aufbau einer Passivhaus-Außenwand in Holzrahmenbauweise	26
Abb. 22: Vorfertigung in Holztafelbauweise (ScanHaus Marlow GmbH 2012)	26
Abb. 23: Zellulosedämmstoff (Ratgeberzentrale 2012)	28
Abb. 24: Frostschutzschicht (gütegesichert) aus RC-Material nach dem Einbau in der Straße.....	31
Abb. 25: Beispiel für einen eher unqualifizierten Abbruch eines Gebäudes (pixelio 2012)	32
Abb. 26: Beispiel eines Abbruchs nach Entfernung des WDVS	33
Abb. 27: Bauschuttzubereitung des Stoffstromes Bauschutt gemischt (Prozentzahlen-Bezug: Massanteil vom Gesamtinput).....	39
Abb. 28: Bauschuttzubereitung des Stoffstromes Altbeton (in M.-%, bezogen auf Gesamtinput)	39
Abb. 29: Ergebnisse für die Kategorie Klimawandel (Treibhauseffekt).....	45
Abb. 30: Ergebnisse für die Kategorie Versauerungspotenzial	46
Abb. 31: Ergebnisse für die Kategorie terrestrische Eutrophierung.....	46
Abb. 32: Ergebnisse für die Kategorie Feinstaub.....	47
Abb. 33: Darstellung der Umweltauswirkungen durch die jährliche Abrisstätigkeit in Südtirol in Einwohnerdurchschnittswerten.....	48

Abb. 34: Sensitivitätsanalysen für den Treibhauseffekt: Berücksichtigung der Klebermasse im WDVS des Massivbaus; Dämmung des Leichtbaus mit EPS anstatt Steinwolle.....	49
Abb. 35: Sensitivitätsanalysen für das Versauerungspotenzial: Berücksichtigung der Klebermasse im WDVS des Massivbaus; Dämmung des Leichtbaus mit EPS anstatt Steinwolle.....	50
Abb. 36: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Klimawandel“ für die Außenwände der beiden Bauweisen	62
Abb. 37: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Klimawandel“ für die Bodenplatten beider Bauweisen	63
Abb. 38: Kumulierte Ergebnisse der Wirkungskategorie „Klimawandel“ beider Bauweisen.....	63
Abb. 39: Netto-Ergebnisse für die Wirkungskategorie „Klimawandel“ beider Bauweisen	64
Abb. 40: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Versauerungspotential“ für die Außenwände der beiden Bauweisen.....	65
Abb. 41: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Versauerungspotential“ für die Bodenplatten beider Bauweisen.....	66
Abb. 42: Kumulierte Ergebnisse für die Wirkungskategorie „Versauerungspotential“ beider Bauweisen	66
Abb. 43: Netto-Ergebnisse für die Wirkungskategorie „Versauerungspotential“ beider Bauweisen	67
Abb. 44: Ergebnisse für Klimawandel der Außenwand bei verschiedenen Dämmstoffarten.....	69
Abb. 45: Ergebnisse für Versauerungspotential der Außenwand bei verschiedenen Dämmstoffarten ...	69
Abb. 46: Sonneneinstrahlung in Südtirol (Quelle: Hydrologis Bozen – www.hydrologis.eu)	73
Abb. 47: Fläche der installierten PV-Paneele (in m ²) nach Jahren (log-Skalierung)	75
Abb. 48: Installierte PV-Fläche in Südtirol nach Technologie und Jahr	76
Abb. 49: Kollektortypen in Südtirol.....	79
Abb. 50: Prognose der Entwicklung des Abfallaufkommens für Fotovoltaik-Module (in MW)	80
Abb. 51: In Südtirol installierte MW für Solarthermie-Anlagen (kumuliert)	80
Abb. 52: Sammel- und Verwertungssystem von PV Cycle.....	92
Abb. 53: Sammelstellen von PV Cycle in Italien	93
Abb. 54: Sammelstellen von PV Cycle in Südtirol.....	95
Abb. 55: Zur Aufbereitung und Verwertung ungeeignetes Material	102

Tabellenverzeichnis

Tab 1: Typische Bauweisen nach UNIEN ISO 13790:2008 12.3.1.2.....	5
Tab 2: Ergebnisse der Stichprobenuntersuchung und der Expertenbefragung	6
Tab 3: (Hinter-)Mauerziegel (Schlagmann 2012)	8
Tab 4: Eigenschaften von Betonsteinen (FH-Hildesheim 2012; BV Porenbetonindustrie e.V. 2011).....	9
Tab 5: Ziegel-Kompositbaustoffe nach verschiedenen Herstellerangaben.....	11
Tab 6: Plattendämmstoffe aus Kunststoffen (IpeG- Institut GmbH 2012).....	16
Tab 7: Typische Baustoffe für Holzbauweisen nach verschiedenen Herstellerangaben.....	24
Tab 8: Typische Mattendämmstoffe aus Kunststoff (IpeG- Institut GmbH 2012).....	27
Tab 9: Erfahrungswerte von aufbereiteten (annähernd sortenreinen) RC-Baustoffen	29
Tab 10: Zusammensetzung der Baumaterialien in der mittelschweren Bauweise (Ökobau.dat, Institut Bauen und Umwelt (IBU)).....	36
Tab 11: Häufigkeitsverteilung und Zusammensetzung der betrachteten Dämmstoffe (Ökobau dat, Institut Bauen und Umwelt (IBU))	37
Tab 12: Zusammensetzung der Baumaterialien in der Leichtbauweise (Ökobau.dat, Institut Bauen und Umwelt (IBU)).....	40
Tab 13: Zusammenfassung der Materialien und der vol. Anteile der Bauprodukte nach Bauweisen.....	61
Tab 14: Zeitliche Entwicklung von Leistung, Fläche der Solarmodule und erzeugter elektrischer Energie.....	75
Tab 15: Status Quo der Solarthermie in der Provinz Bozen.....	78
Tab 16: Zusammensetzung kristalliner Siliziumzellen (c-Si) (Quelle: Ökopol 2004; Hahne 2010).....	81
Tab 17: Abschätzung der Abfallstoffströme für kristalline Siliziumzellen in Südtirol (c-Si)	82
Tab 18: Zusammensetzung von Dünnschichtmodulen (Quelle: PV Cycle 2007).....	83
Tab 19: Abschätzung der Abfallstoffströme für Dünnschichtzellen (CdTe).....	83
Tab 20: Materialeinsatz für Kollektoren in kg/m ² Aperturfläche	84
Tab 21: Energetischer Aufwand zur Produktion von PV-Modulen (Ökopol 2004)	86
Tab 22: Aufbereitungsverfahren für PV-Module.....	88

Abkürzungsverzeichnis

EPS	Expandiertes Polystyrol
PS	Polystyrol
PU	Polyurethan
XPS	Extrudiertes Polystyrol
VBS	Verbundbaustoffe
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
GS	Gutschrift

1 **Einleitung / Aufgabenstellung**

Im Jahre 1992 wurde durch die Landesumweltagentur ein innovatives Energiesparkonzept entwickelt, das auf die Verbesserung der Energiestandards für Neubauten sowie den Gebäudebestand abzielt. Mit dem Modell „KlimaHaus“ sollen der Energiebedarf im Bedürfnisfeld Bauen und Wohnen und damit die Beanspruchung fossiler Ressourcen sowie negative Auswirkungen auf das Klima deutlich gemindert werden.

Die zweite Zielrichtung bestand in der Förderung der direkten Nutzung von Solarenergie. Damit war zunächst vor allem die Nutzung der Sonnenenergie zur Erzeugung von Wärme (Beheizung von Gebäuden; Warmwasser) gemeint. Später hat die Fotovoltaik zunehmend an Bedeutung gewonnen.

In einigen Jahren, wenn die ersten Solarpaneele ausgetauscht und die ersten Klima Häuser saniert oder abgebrochen werden müssen, wird sich die derzeitige Energiepolitik möglicherweise deutlich auf die Abfallwirtschaft auswirken. Schon heute werden die ersten alten Solarpaneele an Sammelstellen abgeliefert und es stehen bereits erste Klima Häuser zur Sanierung an. Die Abfallwirtschaft muss auf diese Entwicklung vorbereitet sein und eine Entsorgung der Abfallmassenströme nach den Leitlinien der EU-Abfallrahmenrichtlinie gewährleisten.

Mit der vorliegenden Studie wird zunächst die Situation in der Provinz Südtirol aufgenommen und überschlägig bilanziert, in welcher Bauweise und unter Verwendung welcher Baumaterialien Klima Häuser in der Vergangenheit errichtet wurden. Desgleichen wird in der Frage der Solarpaneele verfahren. Auf dieser Basis lässt sich im zweiten Schritt abschätzen, inwieweit sich die Abfallwirtschaft auf andere Abfallmassenströme und Abfallzusammensetzungen einrichten müssen.

Entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse lässt sich auch die Beratungspraxis anpassen. Ziel muss es sein, bei der Projektierung und Realisierung der Klima Häuser zukünftig nicht nur die Energiestandards, sondern auch die hochwertige und ökologische sinnvolle Wiederverwendbarkeit der beim Abriss anfallenden Baumaterialien zu gewährleisten.

Die vorliegende Studie wurde in Zusammenarbeit mit dem Büro Syneco aus Bozen durchgeführt. Durch diesen Partner wurde das Thema Solarpaneele aufgearbeitet sowie für das Thema Klima Häuser der Status Quo erhoben. Hierbei wurden sie von Frau Bonadio im Rahmen ihrer Bachelor-Arbeit unterstützt.

I KlimaHäuser

Die Problematik von Abbruch und Entsorgung

2 Die Bauweise von KlimaHäusern und die Auswirkungen auf Abbruch und Entsorgung

Die Marke „KlimaHaus“ als Zertifizierungssystem für nachhaltiges Bauen wurde im Jahre 2002 festgelegt und auf den Weg gebracht. KlimaHäuser definieren sich demnach zunächst selbstverständlich nach den unterschiedlichen Energiestandards bzw. der Energieeffizienz der Gebäude. So gibt es drei Kategorien, nach denen Gebäude mit KlimaHaus-Zertifizierung unterschieden werden können:

- KlimaHaus Gold (1-Liter-Haus): Heizenergiebedarf <10 kWh/(m²a)
- KlimaHaus A (3-Liter-Haus): Heizenergiebedarf < 30 kWh/(m²a)
- KlimaHaus B (5-Liter-Haus): Heizenergiebedarf <50 kWh/(m²a)

Der spezifische Energiebedarf des KlimaHauses der Kategorie B ist seit dem Jahre 2011 der Mindeststandard für Neubauten.

In Südtirol wurden bis zum Februar 2012 **5.862 KlimaHäuser** zertifiziert. Diese Zahl berücksichtigt Neubauten und Sanierungen sowie Häuser, die vor dem Jahr 2002 vom Amt für Luft und Lärm zertifiziert und anschließend in die Datenbank der KlimaHaus Agentur integriert wurden. Ab dem Jahr 2008 werden jährlich immer etwa 1200 Gebäude zertifiziert, was auf die Einführung des gesetzlichen Kubaturbonus bei der thermischen Gebäudesanierung zurückzuführen ist. Dies ist auch aus der Extrapolation der für Januar und Februar vorliegenden Daten für das Jahr 2012 zu erwarten. Von den derzeit 5.862 zertifizierten Gebäuden sind ca. 55% Neubauten und ca. 45% sanierte Gebäude.

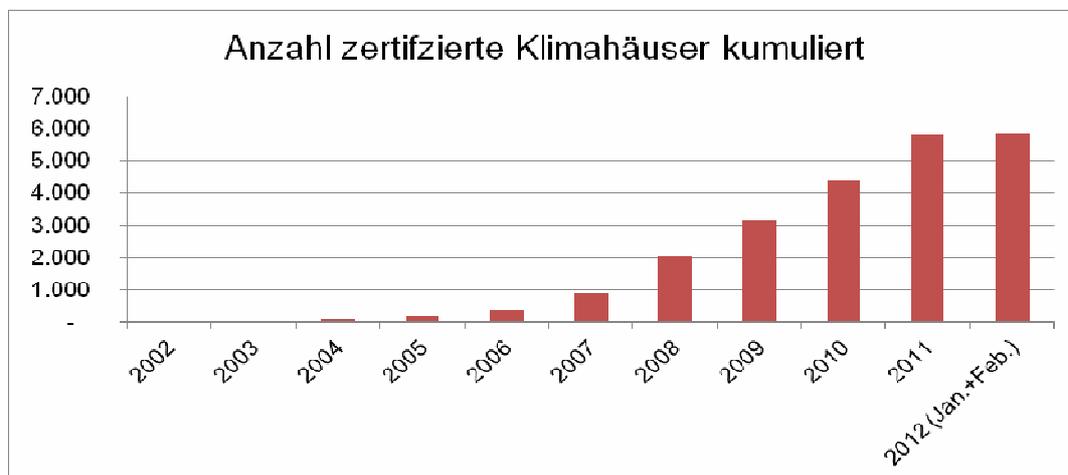


Abb. 1: Kumulierte Anzahl der zertifizierten KlimaHäuser in Bozen

Ein KlimaHaus beschreibt somit keinen bestimmten Architekturstil oder eine Bauweise eines Gebäudes. Um eine Diskussion über die Auswirkungen eines zukünftigen Rückbaus oder einer Sanierung der Gebäude auf die nachgeordneten Schritte der Aufbereitung und Verwertung führen zu können, muss jedoch nach Bauweisen und verwendeten Baumaterialien unterschieden werden.

Durch die Projektpartner vor Ort wurden hierfür Datensätze des Landesamtes für Luftreinhaltung der Autonomen Provinz Bozen sowie der KlimaHaus Agentur GmbH in Bozen ausgewertet. Dies stellt eine umfassende Datenbasis dar. Es ist jedoch unstrittig, dass eine nicht bekannte Anzahl von Gebäuden sowohl im Neubau als auch vor allem in der Bestandsanierung in der Vergangenheit keine Zertifizierungen beantragt haben und damit nicht in der Datenbank enthalten sind.

Dies schränkt die Aussagekraft der nachfolgenden Aussagen zu Bauweisen und verwendeten Baumaterialien ein, da davon auszugehen ist, dass sich gerade architektonisch aber auch in der Materialauswahl ambitioniertere Bauvorhaben der Zertifizierung unterworfen haben.

Bauweisen

Grundsätzlich kann eine typische Bauweise (Bautyp) nach der Konstruktion der Außenhülle definiert werden. Die Außenwandkonstruktionen, meist mehrschichtige Wandaufbauten, sind durch die folgenden Prinzipien gekennzeichnet:

- Die Lastabtragung erfolgt über Massivwände oder Ständerkonstruktionen
- Der erforderliche Wärmeschutz wird durch auf- bzw. eingebrachte Wärmedämmung gewährleistet
- Die Dämmstoffdicken sind abhängig von der Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe
- Der Witterungsschutz erfolgt durch eine außen liegende Zusatzschicht (z.B. Putz oder Holzverschalung)
- Die sichere Abdichtung im Wandaufbau bei drückendem Wasser muss gegeben sein

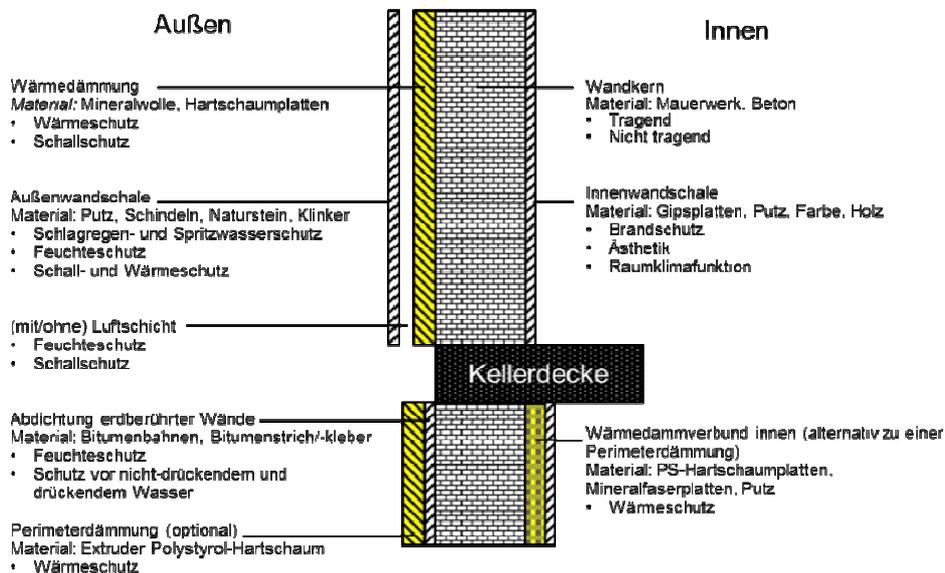


Abb. 2: Typischer Wandaufbau eines Gebäudes in Massivbauweise (Sommer 2011)

Der typische Wandaufbau eines konventionellen Gebäudes mit der Angabe der Funktionalität der unterschiedlichen Materialien ist in Abb. 2 ersichtlich.

Die typischen Bauweisen (Bautyp bzw. Konstruktionstyp) werden von der KlimaHaus Agentur gemäß der UNIEN ISO 13790:2008 12.3.1.2 definiert. Demzufolge ergeben sich die in folgender Tabelle angegebenen Konstruktionstypen.

Tab 1: Typische Bauweisen nach UNIEN ISO 13790:2008 12.3.1.2

Schwere Bauweise	Mittelschwere Bauweise			Leichte Bauweise
	Monolithisch	Im WDVS	aus Holz	
Steinkonstruktionen, Massivbau, Stahlbeton-Fertigteilwände ohne gedämmte Zwischenräume	Mauerwerk ohne zusätzliche Dämmschicht	Stahlbetonrahmenbau mit Mauerwerksausfachung, tragendes Mauerwerk, EPS, XPS, etc.	Massivholzkonstruktion: Blockhaus, Stämme; genageltes oder geklebtes Brett-schichtholz, Xlam etc.	Tragende Skelettkonstruktion (Holz, Metall) mit Ausfachung aus dämmenden Materialien; Konstruktion aus dampfgehärtetem Porenbeton

Alle in der Datenbank der KlimaHaus-Agentur enthaltenen Steckbriefe der einzelnen Gebäude kategorisieren diese nach dem in Tab 1 dargestellten Schema. Aufgeführt sind auch Konstruktionsmerkmale sowie Baumaterialien. Es gibt jedoch keine Auswertungen für die das Forschungsprojekt interessierende Fragestellungen. Aufgrund der unterschiedlichen Datensätze ist auch keine automatisierte Auswertung möglich.

Die Datenbank unterscheidet nur zwischen den Bautypen: Sanierung, Neubau-Fertigteilhaus, Neubau-Holzbauweise und Neubau, wobei letzterer weit überwiegt. Um dennoch eine näherungsweise Differenzierung nach Gebäudetypen zu erhalten, wurde eine Stichproben-Untersuchung durchgeführt und die Häuser der Kategorie „Neubau“ den in Tab 1 genannten Typen zugeordnet.

Hierzu wurden von Syneco Daten untersucht, die vom Amt für Luft und Lärm zur Verfügung gestellt wurden. Die Stichprobe beinhaltet Daten von 584 Gebäuden, was in etwa 10% der gesamten zertifizierten KlimaHäuser in Bozen entspricht. Die Stichprobe bezieht sich jedoch lediglich auf Daten der Jahre 2005 und 2006. Die in der Stichprobe ermittelten Gebäudetypen können jedoch als repräsentativ für den restlichen Zeitraum angesehen werden, da laut Auskunft der KlimaHaus-Agentur die Bauweisen für KlimaHäuser in Bozen kaum zeitlichen Veränderungen unterworfen waren. Zudem wurde diese Auswertung ergänzt durch eine Expertenbefragung.

Tab 2: Ergebnisse der Stichprobenuntersuchung und der Expertenbefragung

BAUTYP		Stichprobe	Expertenbefragung
Schwere Bauweise		5%	<5%
Leichte Bauweise		18%	5%
Mittelschwere Bauweise	Monolithisch	10%	
	Im WDVS (Ziegel)	61%	80-90%
	Mit Holz	5%	

45% der KlimaHäuser sind energetische Sanierungen. Nach Experteneinschätzung werden diese fast immer unter Verwendung eines WDVS (Wärmedämmverbundsystem) durchgeführt. Führt man Neubau und Sanierung zusammen, dürften in der Tat KlimaHäuser in der Provinz Bozen weit überwiegend ein WDVS-System aufweisen, möglicherweise im Sanierungsbestand auch verbreiteter in der schweren Bauweise.

Baumaterialien

Ausgehend von der thermischen Gebäudehülle der bestehenden KlimaHäuser wurden die Volumina der verschiedenen Baumaterialien berechnet, indem die durchschnittlichen Schichtdicken der Materialien angesetzt und mit der thermischen Gebäudehülle multipliziert wurden.

Die Verwendung von Verbundbaustoffen ist nach Einschätzung der Experten vor allem aufgrund der hohen Kosten (bislang) unüblich.

Auf die untersuchten Baumaterialien wird in der nachfolgenden Diskussion der verschiedenen Haustypen eingegangen.

Dämmmaterialien

Die Auswertung der Datenbank der KlimaHaus-Agentur erfolgte in dem Stichprobenumfang und nur für die mittelschwere Bauweise auch nach dem für die Dämmung der Außenwände eingesetzten Dämmmaterial. Da in einem Gebäude manchmal verschiedene Dämmmaterialien eingesetzt werden, erfolgte die Auswertung immer nur nach dem jeweils dominierenden Material.

Wie die Auswertung zeigt, besteht trotz der Auswertung auf das jeweils dominierende Material eine hohe Vielfalt an eingesetzten Dämmstoffen. Faktisch dürfte es sich dabei jedoch teilweise auch um Artefakte handeln. So sind bspw. die Bezeichnungen EPS, Styropor, Polystyrol aufgeführt, ohne im Zweifel auch tatsächlich unterschiedliche Produktarten zu meinen. Ähnlich dürfte dies bei Mineralschaum- und Mineraldämmplatte sein.

Die Ergebnisse zeigten aber auch, dass es durchaus unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen in Abhängigkeit der Bauweisen gibt, so dass bei der nachfolgenden Diskussion dieser Bauweisen jeweils auf die Problematik der Dämmmaterialien eingegangen wird.

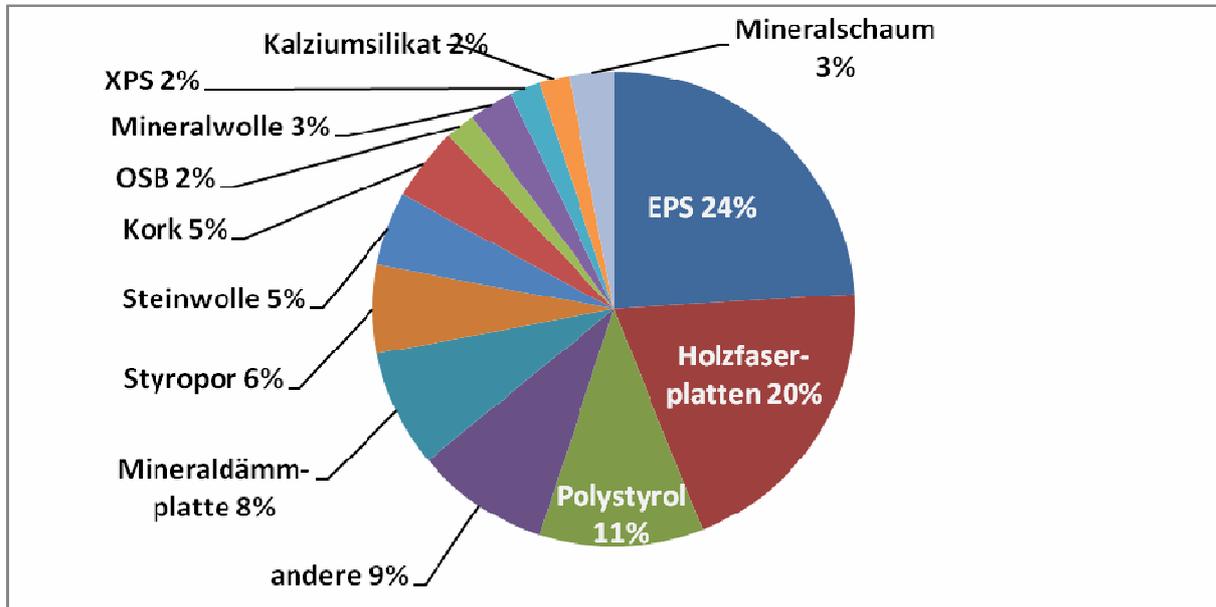


Abb. 3: Zur Dämmung der Außenwände eingesetzte Dämmstoffe (Stichprobenerhebung)

2.1. Gebäude in Massivbauweise (monolithisch)

2.1.1 Bauweisen

Die Massivbauweise ist eine Bauweise, bei der die senkrechte Tragkonstruktion hauptsächlich aus massiven Wänden besteht. Diese übernehmen im Gegensatz zu der sogenannten Skelettbauweise durchgehend eine statisch tragende Funktion. Es wird nicht zwischen tragender und raumabschließender Funktion unterschieden.

2.1.2 Baumaterialien und Dämmstoffe

Bei der monolithischen Bauweise im Massivbau werden lediglich Massivbausteine ohne zusätzliche Wärmedämmung verwendet. Durch die massivere Ausführung müssen die Massivbausteine neben einer tragenden auch eine wärmedämmende Aufgabe übernehmen. Im Vergleich zur Bauweise mit Wärmeverbundsystem weisen diese Baustoffe tendenziell schlechtere Wärmedämmeigenschaften auf. Mit einer geringeren Rohdichte der Baustoffe ist zudem die Tragfähigkeit eingeschränkt. In Konsequenz führt dies dazu, dass die Wandstärken (bis zu 40 cm) deutlich höher sind, als im Massivbau mit WDVS.

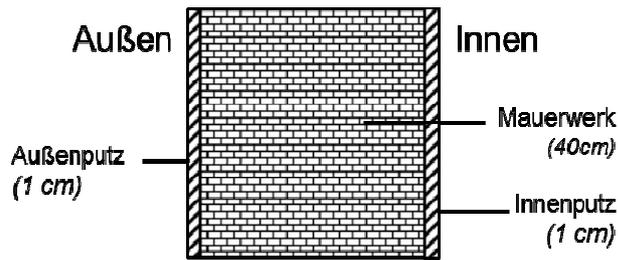


Abb. 4: Wandaufbau eines Passivhaus-Gebäudes in monolithischer Bauweise (Sommer 2011)

Im Folgenden werden in den Beispielen für Bau- und Dämmstoffe die Rohdichte und die Wärmeleitfähigkeit (λ R) angegeben. Die Rohdichte ist dabei vor allem für Baustoffe ein Richtwert für die Festigkeit des Materials. Je höher die Rohdichte, desto höher die Festigkeit. Die Rohdichte hat jedoch auch Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Je geringer die Rohdichte desto geringer ist meist die Wärmeleitfähigkeit.

Tab 3: (Hinter-)Mauerziegel (Schlagmann 2012)

Eigenschaften	Rohdichte [t/m ³]		λ R [W/mK]	
	min.	max.	min.	max.
Planziegel	0,71	0,80	0,18	0,39
	0,91	1,00		0,45
Block-Hochlochziegel (Innenwände)	0,71	0,80		0,39
	0,81	0,90		0,42
	0,91	1,00		0,45
	1,11	1,20		0,50
	1,31	1,40		0,58
Block-Hochlochziegel (Außenwände)		0,65		0,12
		0,70		0,14
		0,80	0,16	0,21



Abb. 5: Hochlochziegel im Einsatz (Amt für Luft und Lärm, Provinz Bozen 2012)

Die gängigsten Baustoffe sind aus Ton gebrannte **Ziegelsteine**. Voll- oder Vormauerziegel werden in der Regel nur im Außenbereich zur Verblendung der Fassade benutzt. (Hoch)Loch- oder auch Hintermauerziegel sind einer der am häufigsten verwendeten Baustoffe im Massivbau. Diese Ziegelsorte wird als tragender Baustoff für Innen- und Außenwände eingesetzt. Zur Gewichtsreduzierung und zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften werden diese mit möglichst großem Porenvolumen versehen.

Klassisch werden die Wände aus **Beton** entweder aus Ortbeton auf der Baustelle gegossen oder aus entsprechenden Fertigteilen zusammengesetzt. Sogenannter „Normalbeton“ hat unter allen Massivbaustoffen die höchste Rohdichte und auch die höchste Festigkeit, allerdings damit auch die schlechtesten Wärmedämmeigenschaften, so dass Normalbeton für Außenwände nur in Verbindung mit einem WDVS verwendet wird.

Tab 4: Eigenschaften von Betonsteinen (FH-Hildesheim 2012; BV Porenbetonindustrie e.V. 2011)

Eigenschaften	Rohdichte [t/m ³]		λ R [W/mK]	
	min.	max.	min.	max.
Normalbeton	2,000	2,800	2,00	2,10
Leichtbeton				
Gefügedichter Leichtbeton mit Kornporosität	0,600	2,000	0,10	0,16
Haufwerk poriger Leichtbeton mit porigen Zuschlägen	~0,400			
Porenbeton	0,330	0,840	0,10	0,29

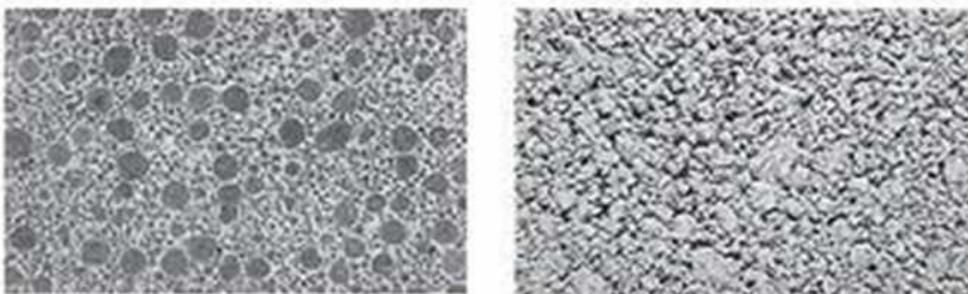


Abb. 6: Beispiele für Leichtbetone – gefügedicht/haufwerkporig (BauNetz Media GmbH)



Abb. 7: Mauerziegel aus Porenbeton (Carl Schlenk AG 2012)

Bei der Herstellung von „Leichtbeton“ werden zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften und zur Gewichtsreduzierung Zuschläge beigemischt. Man unterscheidet dabei zwischen „gefügedichtem“ und „haufwerksporigem“ Leichtbeton. Der gefügedichtete Leichtbeton wird aus „leichten“ Gesteinskörnungen hergestellt und weist eine geschlossene Oberfläche auf. Der haufwerksporige Leichtbeton wird mit einer speziell abgestuften Gesteinskörnungsmischung hergestellt, wodurch sich Lufthohlräume bilden.

„Porenbeton“ ist im eigentlichen Sinne kein Beton, da er keine Gesteinskörnungen wie Sand und Kies enthält. Er ist ein leichter, hochporöser Baustoff von geringer Festigkeit auf Grundlage von Kalk und quarzhaltigem Sandmehl sowie Zement und geringen Mengen Aluminiumpulver. In Deutschland wird mehr als die Hälfte dieser Steine unter dem Markennamen Ytong verkauft.

Eine weitere Variante der Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften von Mauersteinen im Massivbau sind die sogenannten Verbund- oder Kompositbaustoffe. **Verbundbaustoffe** (VBS) bestehen aus einer Kombination von „massiven“ Baustoffen mit (innen liegenden) Dämmstoffen. Anders als bei einem Massivbau im WDVS befinden sich die Dämmstoffe nicht auf der Außen- oder Innenseite des Gebäudes, sondern innerhalb der eigentlichen Baustoffe. Diese haben in ihrer Mitte unterschiedlich ausgebildete Hohlkammern, welche mit verschiedenen Dämmstoffen gefüllt werden.

Diese Baustoffe sind nach Auskunft von Experten und dem Ergebnis des im Rahmen des Projektes durchgeführten Fachgespräches in der Provinz Bozen noch kaum auf dem Markt vertreten. In Deutschland dagegen haben diese Baustoffe eine größere Verbreitung erfahren.

Die eingesetzten Materialien unterscheiden sich je nach Hersteller. So werden Tonziegel in unterschiedlicher Form angeboten, die mit Steinwolle, Perlit, Polystyrol oder Kork gefüllt sind. Außerdem gibt es Mauersteine aus Leichtbeton oder Porenbeton, die mit Mineralwolle oder einem Hartschaumkern gefüllt werden. Die Dämmfüllungen werden bei der Herstellung der VBS entweder (bei Wolldämmung) in die Ziegel „gesteckt“ oder (bei Kunststoffdämmung) gegossen.

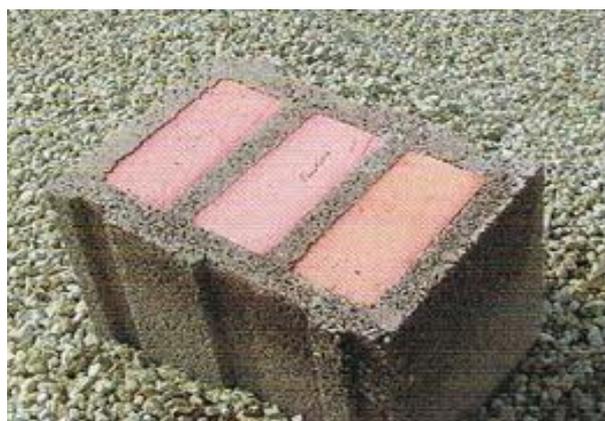


Abb. 8: Verbundbaustoff „Bisomark“ aus Leichtbeton mit Hartschaumkern (Bisootherm GmbH 2012)

Tab 5: Ziegel-Kompositbaustoffe nach verschiedenen Herstellerangaben

Eigenschaften	Rohdichte- klasse	λR [W/mK]	
		min.	max.
ThermoPlan (Tonziegel mit Steinwollefüllung)	0,60	0,07	0,10
POROTON (Tonziegel mit Perlitfüllung)	0,60	0,07	0,09
GISOTON (Tonziegel mit NEOPOR(Polystyrol)-Füllung)	0,80	0,10	0,13
KLIMANORM PLUS (Porenbeton mit Mineralwolle)	?	0,075	0,103
KL B KALOPOR (Leichtbeton mit Mineralwolle)	0,4 - 0,6	0,08	0,11
BISOMARK (Bimsstein mit PS-Hartschaumkern)	0,35 – 0,50	0,06	0,08



Abb. 9: Verbundbausystem KALOPOR mit Mineralwolle-Dämmung (Klimaleichtblock GmbH 2012)

2.1.3 Rückbaumöglichkeiten

Müssen diese Häuser grundlegend saniert oder vollständig abgerissen werden, so sind die klassischen Rückbaustrategien gültig. Da keine große Vielzahl unterschiedlicher Baustoffe eingesetzt wird, ist die übliche Selektivität im Rückbau zu beachten. Wie immer müssen Gebäude vor dem eigentlichen maschinellen Rückbau entkernt und von allen umwelttechnisch und bauphysikalisch problematischen Bauteilen und –stoffen befreit werden.

Nachdem die Innenausstattung der Gebäude entfernt und das Dach abgetragen worden ist, können die massiven Wände konventionell abgebrochen werden. Dabei können je nach Art der Massivbaustoffe entweder Bagger mit einfacher Schaufeln (bei Ziegelmauern) oder Hydraulikzangen (bei Beton) zum Einsatz kommen.

Da Betone als Normalbeton tendenziell nur in den Geschossdecken und in der Bodenplatte Verwendung finden, ist eine Auftrennung in Altbeton und Mauerwerksfraktion meist nicht sinnvoll. Problematisch zeigt sich die Situation, wenn Verbundbaustoffe verwendet wurden. Auf der Baustelle lässt sich bei dieser Bauweise keine Auftrennung in mineralisch und nicht-mineralisch vornehmen. Der gesamte Massenstrom inklusive dieser nicht mineralischen Fremdbestandteile muss den Bauschuttrecyclinganlagen zur weiteren Aufbereitung übergeben werden. Wie bei allen fremdstoffhaltigen Baumassenströmen ist dies für den Abbruchunternehmer mit höheren Entsorgungskosten verbunden.

2.1.4 Auswirkungen auf Aufbereitung und Verwertung der Bauabfälle

Wie aus Abbildung 8 zu ersehen ist, ist der Volumenanteil der Fremdstoffe bei **Verbundbaustoffen** relativ hoch. Angaben liegen nicht vor. Der Anteil dürfte augenscheinlich jedoch bei 50 Vol.% und mehr liegen. Ein derartiges Material ist ohne weitere Aufbereitung weder als Baustoff einsetzbar noch aufgrund der meist hohen Organikgehalte auf Deponien ablagerbar. Eine Aufbereitung ist damit zwingend notwendig.

Da Verbundbaustoffe erst seit kurzem vermarktet und damit auch verbaut werden, liegen noch keine Erfahrungen vor. Es können an dieser Stelle deshalb nur grobe Hinweise / Abschätzungen gegeben werden. Die Methode der Aufbereitung sollte immer auch auf die rückgebauten Bestandteile angepasst sein. Es ist dabei zwischen VBS mit Dämmstoff-Füllungen aus Mineralwolle, aus Kunststoffen (PS) und aus Perliten zu unterscheiden.

Das aus derartigen Abbruchbaustellen an den Aufbereitungsanlagen angelieferte Material muss bei Füllungen aus Mineralwolle und Kunststoffen zwingend von den übrigen Materialströmen getrennt aufgehaldet werden. Es bietet sich an, bereits am Haufwerk mit einer manuellen Auslese zu beginnen, da hier bei der über den Abbruch erfolgenden nur groben Zerkleinerung gerade „elastischere“ Materialien wie bspw. Mineralwolle noch in größeren Stücken und damit auslesbar anfallen.

Eventuell lässt sich die Abtrennung auch dadurch optimieren, dass bei einer separaten Aufgabe des Materials in die Aufbereitungsanlage der erste Brechvorgang „schonend“ durchgeführt wird, in der Hoffnung, den Materialstrom in der nachgeordneten Siebung vor allem im Überkorn aufkonzentrieren zu können. Dieses müsste dann zwingend im nächsten Schritt über einen Leichtstoffabscheider (s. Kap. 2.2.4) geführt werden.

Nasse Leichtstoffabscheider sind nur dann geeignet, wenn die mineralischen Anteile des Verbundbaustoffes eine deutlich höhere Dichte als Wasser haben. Bei leichteren Materialien wie bspw. Bims dürften diese mit den Dämmstoffen aufschwimmen, so dass keine Stoffstromtrennung erfolgt. Trockene Leichtstoffabscheider (Windsichter) sind bei leichteren Mineralstoffen eher geeignet, da sich der Trennschnitt besser auf die spezifischen Eigenschaften des Materialinputs abstellen lässt.

Eine qualifizierte Aufbereitung von VBS mit nicht-mineralischer Füllung sollte aufgrund der zusätzlich benötigten Anlagenteile nur mit einer technisch gut aufgestellten Anlage möglich sein.

Am unproblematischsten ist die Aufbereitung von VBS mit Füllung aus (Bläh-)Perlit. Da Perlit ein mineralisches Material ist, fällt er nicht unter die Kategorie „Fremdstoffe“. Perlit besteht aus vulkanischem Glas und wird unter Hitzeeinwirkung zu einem Vielfachen ihres ursprünglichen Durchmessers „aufgebläht“. Dadurch hat es nur noch eine sehr geringe Rohdichte (~0,05 – 0,1 t/m³) und weist sehr gute wärmedämmende Eigenschaften auf. Für die Aufbereitungstechnik können Blähperlite somit wie andere mineralische Leichtbaustoffe behandelt werden. Außer ihrer geringen Rohdichte und der damit verbundenen geringen Festigkeit weisen sie keine weiteren negativen Eigenschaften (Quellhebung, Frostsprengung, etc.) auf.

Werden in der Bauschutttaufbereitungsanlage hochwertige Baustoffe mit definierten Eigenschaften hergestellt, die auf höhere Kornrohden angewiesen sind, bietet sich eine Abtrennung der Perlite über das Vorsieb an. Möglicherweise können schon auf der Abbruchbaustelle durch das Arbeiten mit Separator-Schaukeln die Perlite als Bestandteil des Bodens bzw. der Feianteile vor Ort verbleiben. Eine qualifizierte Aufbereitung dieser Verbundbaustoffe sollte auch mit technisch einfach aufgestellten Anlagen möglich sein.

Bei allen **konventionellen Baustoffen** ergeben sich keine besonderen Auswirkungen auf die Konzeption und Technik der Bauschutttaufbereitungsanlagen.

2.2. Gebäude in Massivbauweise mit Wärmedämmverbundsystem

2.2.1 Bauweisen und Baustoffe

Unter einem Massivbau mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) versteht man eine massive Mauerwand, auf die zumeist von außen eine Wärmedämmung aufgebracht wird. Dabei übernimmt die Mauerwand lediglich tragende Eigenschaften. Die dämmenden Eigenschaften werden von den Dämmstoffen übernommen. Die Dicke des Mauerwerkes sowie die Dicke der Wärmedämmung variieren in Abhängigkeit der jeweils verwendeten Materialien und bei den Dämmstoffen der gewünschten Wärmedämmeigenschaften.

Für das eigentliche Mauerwerk können alle klassischen Baustoffe eingesetzt werden. Typisch sind Mauerziegel und hier gerade auch geringerer Porosität sowie vor allem auch Wände aus Normalbeton. Gerade bei größeren Gebäuden werden die (tragenden) Wände in Beton in Skelettbauweise über Betonfertigteile oder Stahlbetontafeln ausgeführt. Auch beim Einsatz von Mauerziegeln kann als Ziegelverbund eine Fertigbauweise verwendet werden.

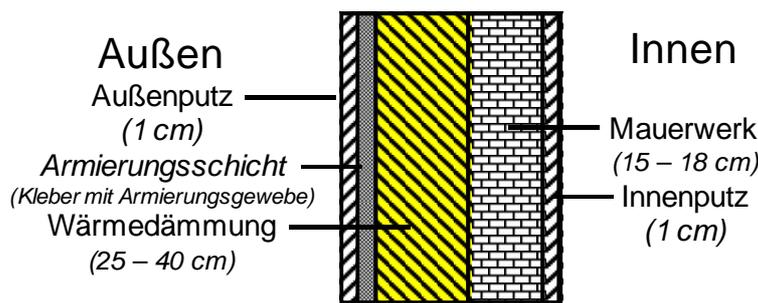


Abb. 10: Wandaufbau eines Passivhaus-Gebäudes in massiver Bauweise im WDVS (Sommer 2011)

Die Wärmedämmung wird auf das Mauerwerk verklebt, in der Regel in Kombination mit dem Einsatz von Dübeln. Die Art der Verankerung ist dabei abhängig von der Art der eingesetzten Dämmmaterialien sowie der Beschichtung. Typisch ist eine Verklebung mit zusätzlichem Verdübeln.

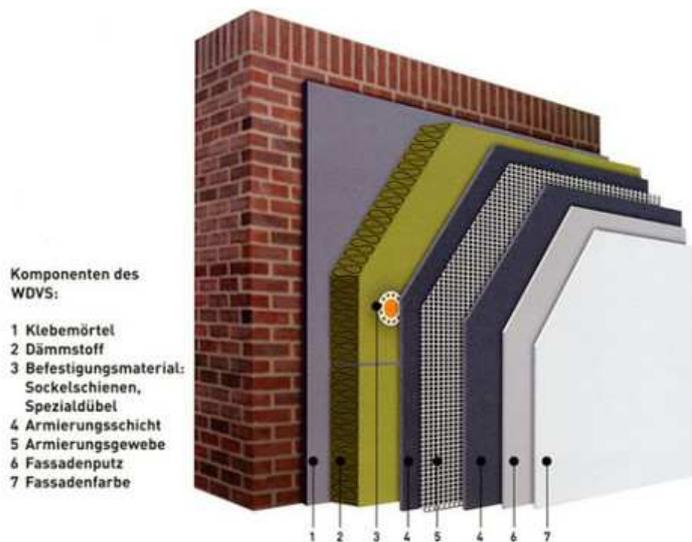


Abb. 11: Verklebtes und verdübeltes WDVS-System auf Ziegel-Mauer (Renovationprofis 2011)

2.2.2 Verwendete Dämmstoffe

Die Auswertung der KlimaHaus-Datenbank zeigt eine bevorzugte Verwendung von verschiedenen Arten von Kunststoffdämmstoffen, Mineralstoff- und Holzfaserplatten oder ähnliches. Der hohe Anteil „Sonstiges“ verdeutlicht die typische Vielfalt von möglichen Dämmmaterialien. Bei einer Verwendung im Massivbau im WDVS kommen zumeist Plattendämmstoffe zum Einsatz.

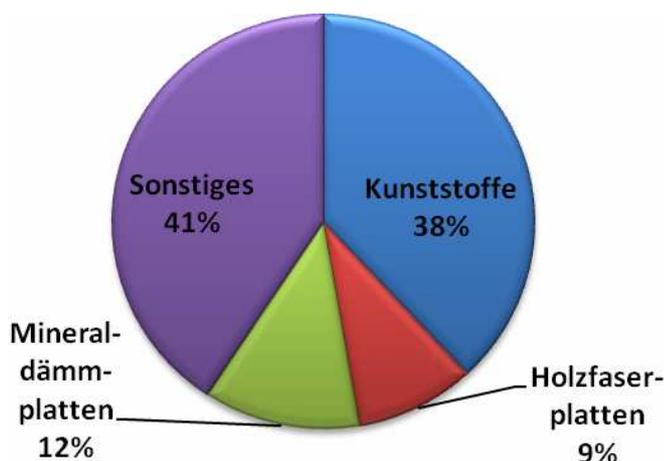


Abb. 12: Dämmmaterialien im Wärmedämmverbundsystem

Unter den Plattendämmstoffen aus Kunststoff dominiert die Verwendung von Polystyrol und hier insbesondere von expandiertem Polystyrol. Der Anteil liegt nach den vorliegenden Daten aus der Stichprobenauswertung bei dieser Bauweise bei etwa 95%.

Werden die Dämmplatten auf Basis von Holz hergestellt, gibt es auch hier gemäß der Auswertung der Stichproben bei diesen Bauweisen mit 90% ähnlich eindeutig eine Präferenz. In aller Regel werden demnach Holzfaserplatten eingesetzt.

Neben diesen organischen Materialien werden auch mineralische Plattendämmstoffe eingesetzt. Hierfür werden bspw. Porenbetone mit einer hohen Porosität verwendet.

Tab 6: Plattendämmstoffe aus Kunststoffen (IpeG- Institut GmbH 2012)

Produkt	Eigenschaften		λ R	
	Rohdichte [kg/m ³]		[W/mK]	
	min.	ax.	min.	max.
Vakuumdämmung (Amorphe/Pyrogene Kieselsäure)	150	210	0,007	0,016
Phenolharz Hartschaum „PF“ (Phenolformaldehydharz)	20	100	0,022	0,025
Polyurethan Hartschaum „PUR“ (Polyether-Polyole, Polyurethan)	30	45	0,024	0,031
Polystyrol (extrudiert/expandiert) „E-X-PS“ (Polystyrol)	20	300	-	0,032
Glaswolle-Platte (Altglas/Borsilikatglas)	10	200	0,032	0,033
Steinwolle-Platte (Naturstein/Formsteine/Formaldehydharze)	90	165	0,032	0,035
Polyurethan-Zement (Polyurethan/Zement)	200	700	0,036	0,10
Mineraldämmplatte „Porenbeton“ (Kalk, Sand, Zement, Wasser)	90	130	0,042	0,045
Blähperlitedämmplatte (vulk. Rohperlitgestein, Bindemittel)	90	105	-	0,045
Gipsschaum (recyclierter Gips, Flammschutzmittel)	-	-	-	0,045
Schaumglasplatte „Foamglas“ (Quarzsand/Calciumcarbonat)	-	165	-	0,050
Calciumsilikatplatte (poröse Kalksilikate/ Calciumoxid/Siliciumoxid)	200	240	0,060	0,067
Zementgeb. EPS-Recycling-Granulatplatte (EPS-Granulat)	-	200	-	0,060



Abb. 13: Außenwanddämmung mit Polystyrol



Abb. 14: Außenwanddämmung mit Holzfaserdämmplatten (Amt für Luft und Lärm, Provinz Bozen)

2.2.3 Rückbaumöglichkeiten

Mauerwerke mit Wärmedämmverbundsystem, die auf Polystyrole oder Holz zurückgreifen, weisen einen so hohen Anteil an Fremdstoffen im Stoffstrom mineralische Bauabfälle auf, dass eine erste Stoffstromtrennung zwingend bereits an der Abbruchbaustelle erfolgen muss. Dieses Wärmedämmverbundsystem muss demnach vor dem eigentlichen Abbruch der massiven Mauerwand selektiv abgetrennt werden.

Die Trennung kann bei ausreichend Platz um das Gebäude maschinell mittels eines Baggers mit sogenanntem Sortiergreifer geschehen. Ein Sortiergreifer ist ein speziell für den Abbruchvorgang entwickelter Zweischalengreifer. Dieser ist an das Hydrauliksystem des Baggers angeschlossen und lässt sich über ein Drehsystem in alle Richtungen bewegen. Mittels Sortiergreifer wird das WDVS quasi abgeschält, wobei darauf zu achten ist, dass beim Kontakt mit der Wand, diese nicht eingedrückt wird. Dies dürfte weniger bei Betonwänden, sondern vor allem bei Ziegelmauerwerken ein potenzielles Problem darstellen. Wie die Bilder aus der Praxis zeigen, ist diese Methode aber auch unter diesen Randbedingungen möglich (s. Abb. 15 und Abb. 16).



Abb. 15: Beispiel eines Baggers mit Sortiergreifer (pixelio 2012)

Am Fuße einer derartigen Wand wird in der Regel eine Kunststoffbahn ausgelegt, so dass das abgeschabte Polystyrol getrennt vom Bodenmaterial gehalten und nach dem Zusammenführen als „Bündel“ einer getrennten Entsorgung (thermische Behandlung) zugeführt werden kann. Bei einem fachgerechten selektiven Rückbau des Gebäudes werden möglicherweise auch Teppichböden vor dem Abbruch des Gebäudes entfernt, die anstatt der Kunststofffolien zum selben Zweck eingesetzt werden können.



Abb. 16: Einsatz des Sortiergreifers beim Rückbau eines WDV-Systems



Abb. 17: Massive Ziegelmauerwand mit Resten von WDVS-Befestigung

Der Einsatz eines Baggers ist nur möglich wenn ausreichend Platz auf dem Grundstück vorhanden ist. Ansonsten muss ein Gerüst oder eine Hebebühne eingesetzt werden. In diesem Fall wird mit Hilfe von Kleingeräten das WDVS händisch von der massiven Wand abgetrennt.

Dieser selektive Rückbau mit vorheriger Abtrennung des WDVS vom mineralischen Massenstrom ist zwingend notwendig, um eine fachgerechte Aufbereitung in den nachgeordneten Schritten zu ermöglichen. Da die Dämmplatten in der Regel nicht nur verdübelt, sondern auch

verklebt sind, ist eine saubere verlässliche Abtrennung in der Bauschuttzubereitung nicht mehr möglich. Da an dem gebrochenen mineralischen Material Kunststoffanteile kleben, kann eine Abtrennung nicht mehr verlässlich über Leichtstoffabscheider erfolgen, unabhängig davon ob trockene oder nasse Abscheideverfahren eingesetzt werden.

Nach dem Abtrennen des WDVS verbleiben je nach Befestigungsart noch geringe Mengen an Klebemitteln und Dämmstoffresten. Diese müssen anschließend bei der Zubereitung der Bauschuttmassen aus dem Massenstrom abgetrennt werden.

Werden Mineraldämmplatten eingesetzt, kann dieser zusätzliche Aufwand im Rückbau der Gebäude dann vermieden werden, wenn die nachgeordnete Bauschuttzubereitungsanlage entsprechend ausgelegt ist. Da es sich um mineralisches Material handelt, belastet dieses nicht als „Fremdstoff“ den Massenstrom. Porenbeton ist im Produktionsmassenstrom allerdings nicht gewünscht.

2.2.4 Auswirkungen auf Zubereitung und Verwertung der Bauabfälle

Wird wie oben beschrieben ein selektiver Rückbau des Wärmedämmverbundsystems durchgeführt, entsprechen die Anforderungen an die Zubereitung in etwa denen bei der Zubereitung klassischer mineralischer Bauabfälle. Es ist jedoch zumeist mit einem erhöhten Eintrag an Fremdstoffen durch Reste an WDVS zu rechnen und damit ein erhöhter Aufwand bei der Abtrennung von Fremdstoffen notwendig.

Die auch bei einem selektiven Rückbau im Stoffstrom verbleibenden Reste an WDVS oder Befestigungsmaterialien wie Kleber und Dübel müssen nach dem eigentlichen Brechvorgang abgeschieden werden. Hierzu gibt es verschiedene Herangehensweisen:

- Nasse Zubereitungsmöglichkeiten
- Trockene Zubereitungsmöglichkeiten
- Händische Zubereitungsmöglichkeiten

Unter einer **nassen Zubereitung** versteht man die automatische Abtrennung von „leichten“ Fremdstoffen (Kunststofffolien, Holz, Dämmstoffe, etc.) über eine sogenannte nassen Dichtentrennung. Da die Baustoffe eine wesentlich höhere Dichte als Fremdstoffe haben, lassen sich die beiden Fraktionen grundsätzlich über ein Wasserbad trennen. Dazu ist eine vorgeschaltete Abtrennung von Feinstoffen notwendig. Da Fremdstoffe nicht immer „lose“ vorliegen, sondern an mineralischen Bruchstücken anhaften, hat auch diese Zubereitungsform nur beschränkte Erfolgsquoten.

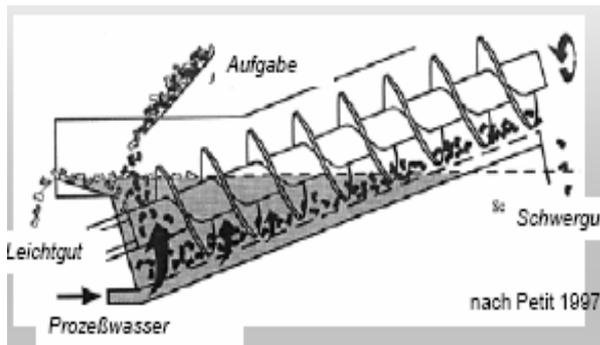


Abb. 18: Schematischer Aufbau eines Schnecken-Strom-Sortierers (PETIT 1997)

Ein Beispiel für eine nasse Aufbereitung ist ein sogenannter Schnecken-Strom-Sortierer. Der Sortierer besteht aus einem schräg aufsteigenden Wassertrough, in dem sich eine Schneckenwelle befindet, die mit Schwertern und Schnecken spiralen besetzt ist. Das zu reinigende Material wird am unteren Ende der Schneckenwelle in den Wassertrough aufgegeben und von der Schneckenwelle erfasst, so dass eine intensive Materialdurchmischung und Auflockerung stattfindet.

Das im Gegenstrom durch Aufstrom- und Wasserbeschleunigungsdüsen einströmende Washwasser trägt die Störstoffe über ein verstellbares Oberstromblech aus. Das gereinigte Material wird durch die Schnecken spirale aus dem Wasserbad gefördert und gleichzeitig entwässert.

Eine weitere technische Lösung sind Aufstromklassierer, d.h. Rüttelsiebe, die im Gegenstrom mit Wasser beaufschlagt werden. Ein Aquamator besteht aus einem Förderband, das von oben beschickt wird. Das Material wird über Düsen (Mindestdruck 3 bar) mit Wasser aufgeschwemmt. Das leichte, nichtmineralische Material wird gegen die Förderrichtung mit der Neigung des Förderers abgespült, während das schwere mineralische Material mit der Förderrichtung als Produkt ausgeworfen wird.

Unter einer **trockenen Aufbereitung** versteht man die automatische Abtrennung von „leichten“ Fremdstoffen (Kunststofffolien, Holz, Dämmstoffe, etc.) über einen Windsichter. Wie auch bei der nassen Aufbereitung wird hier die unterschiedliche Dichte bzw. das unterschiedliche spezifische Gewicht der Materialien ausgenutzt.



Abb. 19: Beispiel eines Windsichters (Fa. City Equip, 2008)

Das Material wird mit einem steuerbaren Luftstrom angeströmt und ausgeblasen. Es werden prinzipiell verschiedene Arten des Windsichtens unterschieden:

- **Steigrohrsichter**
Die Trennung findet in einem aufrecht stehenden Schacht statt. Das schwere Material fällt gegen den Luftstrom nach unten. Das leichtere Material wird mit dem Luftstrom nach oben ausgeblasen. (s. Abb. 19)
- **Zickzacksichter (Abwandlung Steigrohrsichter)**
Der rechteckige Kanal, in dem der Luftstrom aufsteigt, ist durch im Zickzack angeordnete Wände in mehrere kleinere Röhren unterteilt. Der Luftstrom mit den enthaltenen Partikeln wird an den Zickzackwänden abgelenkt, wodurch nochmals schwerere Teile ausgesondert werden.
- **Schwebesichter (Abwandlung Steigrohrsichter)**
Hier ist der luftdurchströmte Raum als Zylinder ausgebildet, der sich oben konisch verjüngt und in den das zu trennende Gemisch von oben gegeben wird.
- **Horizontalstrom-Windsichter**
Im Gegensatz zu den verschiedenen Formen des Steigrohrsichters verläuft der Luftstrom hier waagrecht. Die Feststoffpartikel fallen von oben in diesen Luftstrom. Je nach Gewicht und Luftwiderstand werden sie unterschiedlich stark ausgelenkt. Schwere bzw. kompakte Teile fallen direkt nach unten, andere werden weiter mit dem Luftstrom mitgerissen. Durch verschiedene Auffangvorrichtungen im unteren Bereich des Sichtkanals kann das Aufgabegut in mehrere Fraktionen unterteilt werden.

Prinzipiell können alle beschriebenen Aufbereitungsarten sowohl mit stationären als auch mit mobilen Anlagen durchgeführt werden. Der Aufbereitungserfolg ergibt sich aus einem System optimal aufeinander abgestimmter Anlagenteile und Aggregate, so dass dies in der Praxis nur von stationären Anlagen durchgeführt werden kann.

Werden als Dämmstoffe mineralische Dämmplatten eingesetzt und diese vorab auf der Abbruchbaustelle getrennt rückgewonnen, werden diese sinnvollerweise einer Deponie übergeben. Die Dämmstoffe aus Mineralfasern, Schaumglas, Calciumsilikat oder Gipsschaum haben keine bautechnischen Eigenschaften, die als Teil eines Produktes für den Straßen- und Wegebau positiv unterstützend eingesetzt werden könnten. Gerade gipshaltige Baustoffe würden im Gegenteil deutlich die Stoffeigenschaften negativ beeinflussen.

Werden die Dämmplatten als Teil des Gemisches an mineralischen Bauabfällen einer Ausschutttaufbereitungsanlage zugeführt, reichern sich diese Bestandteile wohl vor allem in der Feinfraktion zumindest in den Anteilen an, die bereits beim Abbruch und beim Transport zermahlen wurden. Ist der Anlage ein Vorsieb vorgeschaltet, sind diese Bestandteile weniger stark im Produkt Brechsand enthalten, sondern im Vorsiebmaterial und damit in einem Massenstrom, der in aller Regel auf Deponien verwertet oder entsorgt wird. Große Stücke lassen sich auch hier eventuell auf der Inputhalde im Betrieb händisch aussortieren.

2.3. Gebäude in Massivholzbauweise

2.3.1 Bauweisen

Der Massivholzbau bezeichnet eine Bauweise im Holzbau und unterscheidet sich von anderen Holzbauweisen wie dem Skelettbau oder dem Holzrahmenbau durch seinen durchgehend massiven Elementaufbau.

Beim Massivholzbau handelt es sich um eine Brettschichtholz wand oder einem Brettstapелеlement. Dieser bildet mit der außen liegenden Wärmedämmung (Thermohaut mit 25 bis 40 cm Stärke) sowie einem Witterungsschutz (meist einer Holzverschalung) ein WDVS. Die Wandscheibe kann auch als kreuzverleimten bzw. kreuzverdübelten Wänden aufgebaut sein. Bei einer Holztafelwand wirkt die gesamte Wand aus Massivholz als statische Scheibe.

Der Wandaufbau in Massivholzwand bietet im Vergleich zur Holzrahmenbauweise eine bessere Wärmespeicherkapazität. Nachteilig sind der höhere Holzverbrauch sowie der dickere Wandaufbau bei gleicher Dämmeigenschaft. Der typische Wandaufbau einer Massivholzbauweise ist in

Abb. 20 Abb. 22 abgebildet.

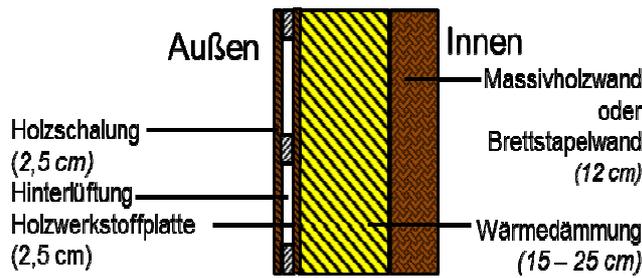


Abb. 20: Systematischer Aufbau einer Passivhaus-Außenwand in Holzmassivbauweise (Sommer 2011)

2.3.2 Baustoffe und Dämmstoffe

Im Gegensatz zur Massivbauweise werden in der Holzbauweise keine mineralischen Baustoffe verwendet. Die tragende Funktion der Bauwerkskonstruktion übernehmen Vollholz- oder auch verklebte Holzwerkstoffe. Bei der Massivholzbauweise können (anders als der Name vermuten lässt) sowohl Vollholzbaustoffe als auch Holzbaustoffe aus sogenannten Brett-schichthölzern verwendet werden.

Tab 7: Typische Baustoffe für Holzbauweisen nach verschiedenen Herstellerangaben

Eigenschaften	Rohdichte [kg/m ³]		λ R [W/mK]		
	min.	max.	min.	max.	
Vollholz	Eiche	0,650	0,900	0,13	0,21
	Buche	0,700	0,900	0,16	0,20
	Fichte	0,410	0,600	0,10	0,14
Brettschichtholz	Nadelholz	0,380	0,410	0,13	0,15
	Laubholz	~0,650			
OSB-Platten (Grobspanplatten)	0,550	0,700	0,13	0,17	
Holzfasерplatte	Hart	-	1,000	-	0,17
	Weich	0,200	0,300	0,05	0,06

Brettschichtholz (abgekürzt auch BS-Holz oder BSH) ist ein industriell gefertigtes Produkt für tragende Konstruktionen. BS-Holz besteht aus mindestens drei faserparallel miteinander verklebten getrockneten Brettern oder Brett lamellen aus Nadel- oder Laubholz. Es ist infolge der Festigkeitssortierung des Ausgangsmaterials und der Homogenisierung durch schichtweisen Aufbau vergütet und hat bis zu 50% höhere Tragfähigkeiten als übliches Bauholz. BS-Holz ist herstellungsbedingt ein sehr formstabiler und weitgehend rissminimierter Baustoff.

Nach der Auswertung der Stichprobe werden in dieser Bauweise vor allem Holzfaserverplatten als Dämmmaterialien verwendet, die sich zwischen einer außen liegenden Holzschalung und der Massivholzwand angebracht werden.

2.3.3 Bewertung des Rückbaus und Aufbereitungsmöglichkeiten

Der Rückbau von Bauwerken in Holzbauweisen kann prinzipiell genauso (un-)selektiv wie bei Bauwerken in Massivbauweise stattfinden. Sowohl die tragenden Außenwandbaustoffe als auch die Dämmstoffe sind aus Holz.

Sollten sich Verwertungsmöglichkeiten außerhalb einer ausschließlichen Nutzung als Brennstoff ergeben, kann eine Abtrennung der Holzfaserverplatten von dem übrigen Holzmassenstrom sinnvoll sein.

Mineralisch sind bei dieser Bauweise die Bodenplatte bzw. das eventuell vorhandene Kellergeschoss sowie ggf. Geschossdecken. Beim Rückbau dieser Gebäude sind diese Materialien getrennt vom Holzmassenstrom zu halten. Dies ist über einen selektiven Rückbau mittels Sortiergreifer (Ausbau der Geschossdecken) möglich. Ansonsten kann die Abbruchbaustelle zunächst vom Baumaterial der aufgehenden Wände (Holz) bereinigt werden, bevor mit dem Rückbau des Kellergeschosses oder der Bodenplatte begonnen wird.

Die Bauschutttaufbereitungsanlage erhält bei dieser Herangehensweise reinen Betonbruch (ggf. mit Bewehrung) zur weiteren Verwertung.

2.4. Gebäude in Holzrahmenbauweise / Leichte Bauweise

Ein weiterer Gebäudetyp ist die Skelettbauweise (Gerippebau). Bei dieser Bauweise übernehmen Stütz- und Trägerelemente eine primär tragende Funktion. Die vertikale Lastabtragung erfolgt dabei im Gegensatz zur Massivbauweise nicht über die Wände. Die raumabschließende Funktion wird durch Wände in unterschiedlichen Ausführungen übernommen. Diese können aus Mauerwerk oder auch vorgefertigten Sandwichplatten bestehen.

Die Trägerelemente werden bei größeren Büro-/ Wohn- und Industriegebäuden häufig aus Beton- oder Stahl hergestellt. Bei mittleren und kleineren Wohngebäuden kommt auch häufig Holz als Baustoff für die tragenden Elemente zum Einsatz.

Die Holzrahmenbauweise ist eine typische Bauweise für Fertighäuser.

2.4.1 Bauweisen

Eine Unterkategorie der Skelettbauweise ist die Holzrahmenbauweise. Bei der Holzrahmenbauweise besteht das Tragwerk aus vorgefertigten Holzrahmen, die bei der Anlieferung meist nur einseitig beplankt sind. Fenster, Türen, Dämmung und die weitere Beplankung werden auf

der Baustelle eingebaut. Eine Variante des Holzrahmenbaus ist der sogenannte Holztafelbau. Der generelle Aufbau des Holztafelbaus entspricht dem des Holzrahmenbaus. Beim Holztafelbau werden die Wände des Gesamtbauwerkes einschließlich aller wesentlichen Einbauten jedoch in einem Werk vorgefertigt und anschließend auf der Baustelle nur noch zusammengesetzt.

Beim Holzrahmenbau wird ein Holzgerüst mit senkrechten und waagerechten Stäben hergestellt. Dieses Gerüst übernimmt die vertikale Tragfunktion. Die horizontale Aussteifung wird durch plattenförmige Wandbaustoffe oder diagonal aufgebrachte Bretter erreicht.

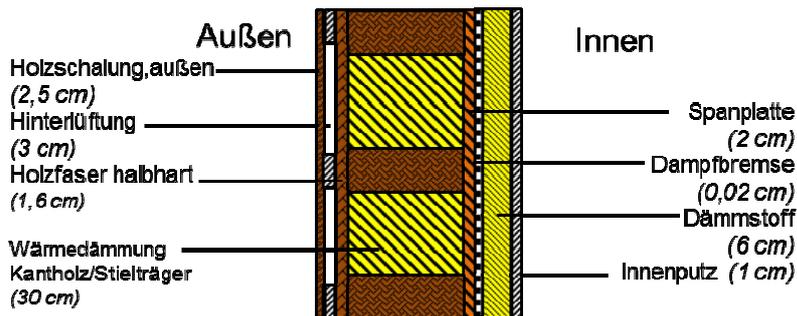


Abb. 21: Systematischer Aufbau einer Passivhaus-Außenwand in Holzrahmenbauweise (Sommer 2011)

Es handelt sich meist um eine beidseitige Verkleidung mit Holzbau und dazwischen liegender Wärmedämmung. Die konstruktive Gesamtstärke ergibt sich dabei aus der erforderlichen Dämmstoffdicke und meistens sind eine Hinterlüftung und ein Witterungsschutz (meist Holzverschalung) enthalten.



Abb. 22: Vorfertigung in Holztafelbauweise (ScanHaus Marlow GmbH 2012)

2.4.2 Baumaterialien und Dämmstoffe

Bei der Holzrahmenbauweise können zusätzlich zu den auch in der Massivbauweise eingesetzten Plattendämmstoffen noch Mattendämmstoffe verwendet werden. Bei der Holzrahmenbauweise entstehen konstruktionsbedingt sogenannte „Gefache“. Unter Gefachen versteht man Hohlräume zwischen den Holzträgern. Diese werden mit Dämmstoffen in Mattenform ausgefüllt. Nach dem Schließen der Gefache mit Holz(-span)platten wird noch eine zusätzliche Wärmedämmung auf die Konstruktion in Form von Dämmplatten aufgebracht.

Es werden demnach fast immer Dämmplatten verwendet, ergänzt um unterschiedliche Möglichkeiten von Mattendämmstoffen oder losen Dämmstoffen, die in die Gefache gelegt oder eingeblasen werden.

Tab 8: Typische Mattendämmstoffe aus Kunststoff (IpeG- Institut GmbH 2012)

Eigenschaften	Rohdichte [kg/m ³]		λ R [W/mK]	
	min.	max.	min.	max.
Nanogelmatte (Kieselsäure)	130	180	0,014	0,021
Keramikfasermatte (Aluminium-/Siliciumoxid)	100	560	0,030	0,070
Melaminharzschaummatte (M-H-Schaumrecyclingprodukt)	-	35	-	0,031
Glaswolle (Borsilikatglas/Altglas/Sand/Kalkstein,Soda/Bindemittel)	10	200	0,032	0,035
Luftpolsterfolien (Polyethylen, Polypropylen, Polyesterfaservlies)	20	22	-	0,033
Polyester „Dämmwatte“ (Mineralöl)	10	40	-	0,035
Steinwolle (Naturstein/ Formsteine/ Phenolformaldehydharze)	10	200	-	0,035



Abb. 23: Zellulosedämmstoff (Ratgeberzentrale 2012)

2.4.3 Rückbaumöglichkeiten

Nach den Erkenntnissen aus dem im Projektablauf durchgeführten Expertengespräch mit Vertretern aus den Branchen Abbruch und Bauschuttrecycling werden derartige Fertighäuser in Deutschland aufwendig zurückgebaut. Die einzelnen Wände werden aufgemacht und die Dämmmaterialien händisch entsorgt. Wurden Mineralfasermatten unbekannter Herkunft und Zusammensetzung verwendet und handelt es sich um ältere Gebäude (vor 1995), werden Abbruchgenehmigungen nur unter entsprechenden Auflagen aus dem Arbeitsschutz erteilt.

Gesundheitliche Aspekte beim Rückbau von Mineralfaserdämmstoffen können sein:

- Die groben Fasern der Mineralwolle ($> 3 \mu\text{m}$) führen bei Hautkontakt zu Hautreizungen und bei den meisten Menschen zu Juckreiz. Bei Menschen mit empfindlicher Haut können auch stärkere Reizreaktionen (Rötung, Schwellungen u.ä.) auftreten.
- Stäube ehemals verwendeter Mineralwolle (KMF) sind als potentiell krebserregend eingestuft.

Die Abfälle sind am Entstehungsort möglichst staubdicht zu verpacken, ggf. zu befeuchten und zu kennzeichnen. Für den Transport sind geschlossene Behältnisse (z.B. Tonnen, reißfeste Säcke, Big-Bags) zu verwenden.

Unabhängig von Auflagen des Arbeitsschutzes, ist die Öffnung der Wände beim Rückbau wahrscheinlich immer dann sinnvoll, wenn zur Dämmung mineralische Stoffe eingesetzt wurden. Auf den Innenseiten der Wände werden gerne Gipskartonplatten verwendet. Diese Materialien sind weder im Massenstrom Holz noch im mineralischen Massenstrom erwünscht und sollten zunächst händisch entfernt werden.

Beim Rückbau eines derartigen Bauwerkes entstehen auf diese Weise drei Massenabfälle:

- Holzige Materialien als Holzrahmen und –dämmplatten,
- (mineralische) Mattendämmstoffe sowie bspw. Gipskartonplatten,
- Mineralische Bauabfälle aus dem Rückbau der Bodenplatte und der Geschossdecken.

2.4.4 Auswirkungen auf Aufbereitung und Verwertung der Bauabfälle

Von den Bauschuttrecyclinganlagen können die anfallenden Baustoffe aus Holzbauweisen nicht weiter verwertet werden. Sowohl die Holzbaustoffe als auch die Dämmstoffe mit hohem Heizwert werden jeweils in einer MVA energetisch verwertet. Ggf. kann hieraus auch in einer Baustellenabfallsortieranlage ein definierter Brennstoff erzeugt werden.

Die restlichen Baustoffe (Gipsplatten) und inerten Dämmstoffe sollten auf einer Deponie entsorgt werden.

Die verbleibenden mineralischen Bauabfälle sind vor allem Altbetone, die in einer Bauschutt-aufbereitungsanlage zu RC-Baustoffen aufbereitet werden können.

2.5. Schlussfolgerung

2.5.1 Aus Sicht der Bauschutt-aufbereiter

Rahmenbedingungen aus den Anforderungen an die Produktqualität

Eine selektive Trennung der verschiedenen Ausgangsmaterialien nach ihren unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften sollte im optimalen Fall zumindest grob bereits beim Rückbau auf der Baustelle erfolgen. Hochwertige Recyclingbaustoffe insbesondere für den Straßenbau oder als Zuschlag für die Betonherstellung lassen sich nur dann umsetzen, wenn auf entsprechend hochwertiges Ausgangsmaterial zurückgegriffen werden kann, das diese bauphysikalischen Eigenschaften mitbringt. Diese Qualität oder Eignung als Recyclingbaustoff hängt vornehmlich von der Rohdichte und damit der Festigkeit der Stoffe ab.

In der Tab 9 sind Erfahrungswerte für die Festigkeiten von aufbereiteten (nahezu sortenreinen) RC-Baustoffen dargestellt. Die höchsten Festigkeiten weisen erwartungsgemäß Natursteine auf. Die RC-Baustoffe Beton- und Ziegelbruch haben noch ausreichende Festigkeiten um sie auf dem Baustoffmarkt als Produkt für qualifizierte Anwendungen abzusetzen. Reine rezyklierte Kalksandsteine und Porenbetone sind jedoch nicht geeignet um daraus hochwertige Produkte herzustellen.

Tab 9: Erfahrungswerte von aufbereiteten (annähernd sortenreinen) RC-Baustoffen

Zuschlagsstoffe	Naturstein (Kies)	Betonbruch	Ziegel	Kalksandstein	Porenbeton
Kornfestigkeit [kN]	> 100	50	25	13	3

Die Anforderungen der einschlägigen Regelwerke an die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Baustoffe für einen Einsatz im Straßenbau können erfahrungsgemäß lediglich von reinem Betonbruch bzw. von Betonbruch-/Ziegelgemischen eingehalten werden. Nach der europäischen Norm (EN) 13242:2008 dürfen Gesteinskörnungen maximal 10 M.-% weniger festes Material wie z.B. Mauerziegel, Kalksandsteine und Porenbeton enthalten.

Schon heute ist der Absatz von Baustoffen problematisch, die vollständig oder in Anteilen auf Mauerwerksschutt zurückgreifen. In der Regel stehen hierfür nur einfache Anwendungen bspw. im Erdbau zur Verfügung, die mit vergleichsweise geringen Erlösen verbunden sind.

Verschieben sich die Anteile der mineralischen Baustoffe durch die Anforderungen an Wärmedämmeigenschaften noch weiter in Richtung von insbesondere Porenbetonen, Leichtbetonen oder auch Schaumglas, wirkt sich dies für die Herstellung von RC-Produkten zumindest nicht positiv aus.

Um weiterhin einen möglichst hohen Anteil an mineralischen Bauabfällen zu hochwertigen RC-Baustoffen aufbereiten zu können, sollten auch weiterhin vor allem Betone und Mauerwerksziegel in Baumaßnahmen verwendet werden.

Dabei kann es sich durchaus auch um Hochlochziegel mit hohem Anteil an Poren handeln, da die Kornrohddichte für das gebrochene Material davon nicht beeinflusst wird.

Rahmenbedingungen aus Sicht Akzeptanz für RC-Produkte

Der Anteil an Fremdstoffen wie z.B. bindige Materialien, Metalle, Holz, Gipse und Kunststoffe (u.a. Dämmstoffe) ist auf einen maximalen Anteil von <1 Masse-% beschränkt (DIN EN 13242:2008).

In der Praxis wird diese Vorgabe in aller Regel nicht ausgeschöpft. Dies gilt zumindest dann, wenn es sich um hochwertige RC-Baustoffe wie Frostschutz- oder Schottertragschichten im Straßenbau handelt. Sichtbare Fremdstoffe im Produkt sind für Bauherren und bauausführende Firmen ein Indiz für mangelnde Produktionsstandards im Recyclingbetrieb und damit ein Hinweis auf mangelnde Produkteignung. Dies gilt insbesondere für organisches Material wie Holz und Kunststoffe.

Dies führt dazu, dass Recyclingbetriebe in aller Regel Produkte herstellen, die einen Gehalt an Fremdbestandteilen aufweisen, der deutlich unter den maximal zulässigen 1 Masse-% liegt.

Ansonsten ist der Absatz der Produkte durch fehlende Akzeptanz auf Seiten der Kunden gefährdet und dies unabhängig von den tatsächlichen Produkteigenschaften und den entsprechenden Eignungsnachweisen.



Abb. 24: Frostschuttschicht (gütesichert) aus RC-Material nach dem Einbau in der Straße

Diese Anforderungen sicher einzuhalten, ist schon heute nur schwer zu erreichen. Dies gilt auch für technisch sehr gut ausgestattete Recyclinganlagen. Es gilt umso mehr für (mobile) Aufbereitungsanlagen, die über keine Leichtstoffabscheider verfügen.

Wie die Diskussion der unterschiedlichen Typen an KlimaHäusern zeigte, werden bei diesen Bauweisen gegenüber den herkömmlichen traditionellen Bauweisen deutlich mehr Stoffe eingesetzt, die nicht mineralisch sind.

Sobald vermehrt KlimaHäuser zur Sanierung oder zum Rückbau anstehen, sind in allen Bauschuttrecyclinganlagen entweder Investitionen in Leichtstoffabscheider notwendig, oder Fremdstoffe müssen vermehrt mit der Hand aus dem Massenstrom entfernt werden, was mit entsprechend hohen Betriebskosten verbunden ist.

Aus einem Gemisch aus mineralischen und nicht-mineralischen Bauabfällen wird jedoch auch die technisch hochwertigste Bauschuttaufbereitungsanlage keine hochwertigen Baustoffe herstellen können. Es ist unabdingbar, dass die an den Anlagen angelieferten mineralischen Bauabfälle bereits eine möglichst hohe Reinheit aufweisen müssen. Bereits in diesem Ausgangsmaterial muss der Anteil Fremdstoffe auf ein unvermeidliches Minimum reduziert sein.

Rückwirkungen auf Rückbau und Abriss

Um aus bestehenden Bauwerken in Massivbauweise durch Rückbau und Aufbereitung hochwertige Baustoff-Recyclingprodukte herzustellen, müssen Bauabfälle soweit möglich bereits beim Abbruch in die einzelnen Typen aufgetrennt werden. Dies kann auch innerhalb der einzelnen mineralischen Bauabfälle sinnvoll sein bspw. mit einer Abtrennung der Altbetone vom übrigen Massenstrom mineralischer Bauabfälle. Es ist zwingend für die Abtrennung nicht-mineralischer Bauabfälle erforderlich. Holz oder Kunststoffe dürfen nicht in den mineralischen Baustoffstrom gelangen. Diese sind nach einer Durchmischung und eventuellen Zerkleinerung

nur mit sehr hohem Aufwand bzw. nicht ausreichend sicher wieder aus dem Stoffstrom zu entfernen (s.o.).

Über die Gestaltung des Rückbaus und Abbruchs von Gebäuden werden wesentlich die Verwertungsmöglichkeiten und die erreichbaren Produktqualitäten in den einzelnen Stoffströmen bestimmt.

Dies ist bei den folgenden Bauweisen möglich durch:

- Monolithisch:
kein Eintrag von Fremdbestandteilen aus der Wärmedämmung, sofern keine Verbundbaustoffe eingesetzt werden.
- Verwendung von WDVS:
EPS lässt sich mit Einschränkungen recht gut selektiv entfernen, sofern tragende Wände mineralisch.
- Leichtbauweise:
Auftrennung in mineralische und nicht-mineralische Fraktion ist dann gut möglich, wenn aufgehende Wände möglichst vollständig aus nicht-mineralischen Materialien bestehen. Es ist eine händische Abtrennung von Holz und Dämmstoffen notwendig.



Abb. 25: Beispiel für einen eher unqualifizierten Abbruch eines Gebäudes (pixelio 2012)

Ein selektiver Abbruch ist dann nicht möglich, wenn es sich um Verbundbaustoffe handelt, da hier auf der Abbruchbaustelle kein Einfluss auf die Stoffstromtrennung genommen werden kann. Dies ist vor allem dann problematisch, wenn es sich nicht um bspw. Perlite handelt, sondern die wärmedämmenden Materialien aus Kunststoffen (oder auch Mineralwolle) bestehen.

Ein selektiver Abbruch erfordert mehr Maschinenstunden und in der Regel auch einen höheren Personaleinsatz, insbesondere für die Entkernung der Gebäude. Dies ist zwangsläufig mit höheren Kosten verbunden. Dies ist jedoch nicht die einzige Kostenposition, die bei der Kalkulation eines Angebotes zum Rückbau eines Gebäudes berücksichtigt werden muss.

Neben den Demontagekosten für den eigentlichen Abbruch sind die Entsorgungskosten für das abgebrochene Material sowie Transportkosten zu berechnen.

Bei einem *konventionellen Abbruch* wird das gesamte Gebäude nach lediglich minimalen Entkernungsarbeiten abgebrochen. Es fallen kaum Demontagekosten an. Dem stehen jedoch dann hohe Entsorgungskosten gegenüber, wenn die vermischten Abbruchabfälle nur an Bauschuttrecyclinganlagen angeliefert werden können und „graue“ Entsorgungswege für gemischtes, unaufbereitetes und mit hohen Fremdanteilen versehenes Material unterbunden sind. Die Annahmepreise für gemischtes Abbruchmaterial bei Bauschuttrecyclinganlagen müssen hoch sein, da aufwändiger sortiert und ein größerer Anteil des Massenstroms auf Deponien oder über Müllverbrennungsanlagen beseitigt werden muss (Beseitigungskosten liegen in der Regel deutlich über den Verwertungskosten). Die infolge eines größeren Demontageaufwandes höheren Abbruchkosten beim *selektiven Abbruch* können aufgrund der somit ermöglichten sortenreinen Verwertung zumeist durch erhebliche Einsparungen bei den Entsorgungskosten ausgeglichen werden. Sortenreinheit der Materialien wird in der Regel durch die Bauschuttrecyclinganlagen durch deutlich niedrigere Annahmepreise honoriert.



Abb. 26: Beispiel eines Abbruchs nach Entfernung des WDVS

Wie aus den obigen Überlegungen gezeigt werden konnte, könnte ein ambitionierter selektiver Rückbau von Gebäuden dann zum Standard werden, wenn die Rahmenbedingungen dies unterstützen.

Der selektive ambitionierte Rückbau von KlimaHäusern mit einer weitgehenden Auftrennung der Stoffströme bereits an der Abbruchbaustelle wird dann „automatisch“ zum Standard, wenn es keine „grauen“ Entsorgungswege alternativ zu Bauschutt aufbereitungsanlagen gibt, über die auch gemischte Bauabfälle kostengünstig entsorgt werden können.

Ist dies gewährleistet, regelt zumindest theoretisch alles Weitere der Markt.

Es ist jedoch immer hilfreich, wenn dies durch weitere Maßnahmen flankierend begleitet wird. Diese sind:

- Unterbinden „billiger“ auf Kosten der Umwelt praktizierter Entsorgungslösungen
- Festsetzen von Genehmigungsaufgaben für den Abbruch von Gebäuden bspw. in Bauordnungen oder Bausatzungen, die Mindeststandards an die Selektivität des Rückbaus vorgeben
- Vorbildliches Handeln der öffentlichen Hand durch entsprechenden Ausschreibungen und Vergaben bei eigenen Baumaßnahmen

2.5.2 Aus ökologischer Sicht

Die Sicht der Bauschutt aufbereiter oder der Verwerter der beim Rückbau eines Gebäudes anfallenden mineralischen Bauabfälle ist wichtig und muss beachtet werden. Vor allem aus dieser Perspektive heraus erfolgte die obige Analyse und Ableitung von Empfehlungen. Inwieweit diese damit verbundene gewünschte Optimierung auch aus gesamtökologischer Sicht sinnvoll ist, lässt sich ohne weitere Untersuchung nicht feststellen.

Waren früher die Energieverbräuche in der Nutzungszeit eines Gebäudes in gesamtökologischen Betrachtungen besonders relevant, bekommen mit den mittlerweile geltenden Energiestandards für Neubauten andere Aspekte ein immer größeres Gewicht. Gerade auch bei KlimaHäusern dürften die Herstellung der Bauprodukte oder die Entsorgung der beim Rückbau der Gebäude anfallenden Bauabfälle einen mittlerweile hohen Stellenwert in einer Gesamtbilanz haben.

Es ist deshalb sinnvoll, die Frage der je nach Bauweise unterschiedlichen Materialströme und ihre Möglichkeiten der Entsorgung aus ökologischer Sicht genauer zu untersuchen. Dazu dient die vergleichende Bewertung der Entsorgung von Abfallmassenströmen zweier Bauweisen mit gleichen Energiestandards und gleicher Gebäudegröße im nachfolgenden Kapitel. Um zu prüfen, inwieweit die aus Entsorgungssicht günstigere Alternative dies möglicherweise jedoch durch hohe Umweltlasten erkauft, die für die Herstellung der verwendeten Bauprodukte anfallen, werden diesen Ergebnissen die jeweiligen ökologischen „Rucksäcke“ gegenübergestellt.

3 Abbruch und Entsorgung von KlimaHäusern aus ökologischer Sicht

3.1. Beschreibung der Alternativen

KlimaHäuser in Bozen sind zum größten Teil in herkömmlicher mittelschwerer Bauweise mit Mauerwerk zuzüglich des davor angebrachten Wärmedämmverbundsystems (WDVS) ausgeführt. Die leichte Bauweise im Holzrahmenbau mit in der Konstruktion integriertem Dämmstoff findet aber in zunehmendem Maßstab Anwendung. Daher werden im Folgenden sowohl der Abbruch und die Entsorgung der Materialien aus

- a. Massivbauweise mit WDVS und
- b. der leichten Holzrahmenbauweise

aus ökologischer Sicht beleuchtet. Da die Materialien aus Entkernung und Innenbau sowie des Daches nicht von der Bauweise abhängen und sich auch zwischen KlimaHäusern und konventionellen Häusern nicht zwingend unterscheiden, werden sie in der ökologischen Betrachtung nicht berücksichtigt.

Die Bewertung beschränkt sich auf die Außenhülle ohne Dach.

Beide betrachteten Häusertypen sollen den Standard KlimaHaus B (5-Liter-Haus) mit einem Heizenergiebedarf von $<50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bezogen auf das Bozner Klima erfüllen. Dafür ist ein Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwand von 0,15 bis 0,25 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ als Richtwert anzusehen (Consumer 2012).

Nach einer überschlägigen Berechnung ist dies mit einer Dicke des Dämmmaterials von ca. 20 cm gegeben (Energiesparhaus 2012).

3.1.1 Massivbauweise mit WDVS

Die Massivbauweise mit WDVS setzt sich aus den unten aufgeführten Bestandteilen in der jeweiligen Baudickenausführung zusammen (Königstein 2007, Sommer 2011). Betrachtet wird hierbei nur die Gebäudehülle, bestehend aus Außenwänden und Bodenplatte. In der Bodenplatte werden Estrich, Bodenbelag und Trittschalldämmung vernachlässigt, weil diese Komponenten sich zwischen den verschiedenen Bauweisen nicht unterscheiden. Daraus ergibt sich der in Tab 10 aufgeführte Volumenanteil der verschiedenen Baumaterialien in den Außenwänden bzw. der Bodenplatte.

Tab 10: Zusammensetzung der Baumaterialien in der mittelschweren Bauweise (Ökobau.dat, Institut Bauen und Umwelt (IBU))

	Dicke (m)	Vol.-%	Dichte (kg/m ³)	M.-%	Entsorgung
Außenfläche					
Außenputz	0,01	2,5	1550	8,8	wie WDVS
WDVS	0,20	50,0	s. Tab 11	6,7	MVA / Deponie
tragendes Material (Hochlochziegel)	0,18	45,0	740	75,7	Bauschuttzubereitung
Innenputz	0,01	2,5	1550	8,8	Deponie
Bodenplatte					
Bodenbelag, Estrich, Trittschalldämmung	0,02 0,06 0,02	25,0	nicht betrachtet		
Stahlbeton	0,25	62,5; (mit 3 M.-% Stahl)	Stahl 7850, Beton 2365 (C25/30)	99,7	Bauschuttzubereitung
Wärmedämmung XPS	0,05	12,5	32	0,3	MVA

Unter der Annahme, dass die Gebäudehülle eines durchschnittlichen Hauses eine Außenfläche von 315 m² und eine Bodenplatte von 168 m² aufweist, können die absoluten Bauschuttvolumina der einzelnen Baumaterialien, die bei der Entsorgung der Außenhülle eines durchschnittlichen Hauses anfallen, errechnet werden.

Ein Haus mit der Außenhülle in diesen Proportionen bietet im Durchschnitt 1693 m³ umbauten Raum (Datenbank KlimaHaus Agentur). Mit dieser Angabe lassen sich die Bauschuttstromvolumina auf 1000 m³ umbauten Raum skalieren und normieren (Außenwände 74,4 m², Bodenplatte 39,6 m² incl. vernachlässigte Bestandteile). Mit den in Tab 10 aufgeführten Dichten der Baumaterialien können dann die absoluten Bauschuttmassenströme bezüglich 1000 m³ umbautem Raum errechnet werden (32,7 t Außenwände, 60,0 t Bodenplatte excl. vernachlässigte Bestandteile) und die Massenanteile der einzelnen Baustoffe bestimmt werden. Die Dämmstoffe werden auf MVA/Deponie verbracht, wohingegen Mauerwerk und Stahlbeton einer Bauschuttzubereitung unterzogen werden.

Zur Wärmedämmung der Außenwand kommen verschiedene WDVS in Frage, die je nach Art hauptsächlich in der MVA oder auf der Deponie entsorgt werden. Die Stichprobe an KlimaHäusern aus Kap. 2 wird für die Häufigkeitsverteilung der WDVS in den Außenwänden herangezogen, wobei der Anteil „Sonstiges“ auf die anderen WDVS-Elemente umgelegt wird. Die Dicke des WDVS wird unabhängig vom Dämmmaterial einheitlich angenommen, da die Wärmeleitfähigkeit λ für die betrachteten Dämmmaterialien ähnlich ist. Daher ist die skalierte Stichprobenverteilung gleichzeitig die volumetrische Verteilung der Dämmplatten. Aufgrund der unterschiedlichen Dichten der Dämmstoffe unterscheidet sich die Aufteilung der Dämmstoffe nach Massen von der nach Volumen.

Tab 11: Häufigkeitsverteilung und Zusammensetzung der betrachteten Dämmstoffe (Ökobau dat, Institut Bauen und Umwelt (IBU))

Dämmmaterialien	WDVS Stichprobe	WDVS skaliert	Dichte (kg/m ³)	M.-%	Zusammensetzung (M.-%) Dämmmaterial in MVA ¹	Entsorgungsort
EPS	38,1%	64,2%	17,5	18,9	94,75% EPS, 5,25%; Treibmittel Pentan	MVA
Holzfaserdämmplatten	9,16%	15,5%	160	41,7	MVA (95,5% Holz, 3,5% PUR-Harz, 1% Paraffine)	MVA
Minerale Dämmplatten	12,1%	20,3%	115	39,4		Deponie
Sonstiges	40,7%					

Der Aufwand für den Entkernungsprozess wird in beiden Systemen nicht berücksichtigt.

Der Rückbau des WDVS ist mit einem Maschineneinsatz von acht Stunden bei einem Dieselverbrauch von 15,5 L/h (Mitteilung Fa. Feeß) veranschlagt. Das abgetrennte WDVS wird in die Bozener MVA verbracht und dort verbrannt. Nur Minerale Dämmplatten werden über die Deponie entsorgt. Die Zusammensetzung der Dämmmaterialien bestimmt die Emissionen in der MVA und über den Heizwert die durch den Verbrennungsprozess erzeugte Energiemenge, welche herkömmlich erzeugte Energie ersetzen kann (s. nächstes Kapitel). Das WDVS wird in dieser Studie ausschließlich über den Außenputz und das eigentliche Dämmmaterial abgebildet. Damit sind mineralischer Kleber, Dübel und Armierungsgitter des WDVS im Dämmmaterial eingerechnet. Aufgrund des geringen Klebervolumens ist diese Vereinfachung vertretbar. Die Zusammensetzung des Dämmmaterials ist Tab 11 zu entnehmen.

Der Abriss des tragenden Materials und des Stahlbetons schlägt mit einem weiteren Maschineneinsatz von 3,5 Tagen je acht Stunden zu Buche, wobei der Dieselverbrauch wiederum mit 17,5 L/h angesetzt wird (Mitteilung Fa. Feeß). Das Mauerwerk der Außenwände und der Stahlbeton der Bodenplatte werden in einer Südtiroler Bauschuttzubereitungsanlage zu Bauschutt bzw. Altbeton verschiedener Korngröße aufbereitet, so dass das Material teilweise zur Verfüllung und im Straßenbau stofflich verwertet werden kann. Die Aufbereitungsschritte und Fraktionen erfolgen in Anlehnung an persönliche Mitteilungen.

Sowohl im Bauschutt- als auch im Altbetonrecycling wird das Material zum Teil mit Hilfe eines Baggers vorzerkleinert und über Radlader in die Aufbereitungsanlage eingebracht. Der Anteil >60 mm bzw. >70 mm wird ausgesiebt und über eine Prallmühle bzw. einen Backenbrecher weiter zerkleinert. Vom anderen Anteil wird über ein Vorsieb der Anteil <5 bzw. <10 mm entfernt, welcher der Deponie zugeführt bzw. als Sandmaterial abgebauten Primärsand ersetzt. Aus den so behandelten Stoffströmen wird dann über einen Magneten der Eisenanteil abgetrennt sowie in einer anschließenden Sortierung der Holz- und Kunststoffanteil. Das so gewonnene Sekundäreisen ersetzt zu 100% Primär-Roheisen. Daraufhin erfolgt ein weiterer

¹ Quelle: ökobau.dat; Institut Bauen und Umwelt (IBU)

Siebvorgang, in welchem der Anteil >100 mm abgetrennt und bspw. auf Baustellenausfahrten als Verfüllungsmaterial verwendet wird bzw. der Anteil > 60 mm abgetrennt und über eine Prallmühle geführt wird, um wieder dem Gesamtstrom zugeführt zu werden. Mit einem Magneten wird dann erneut der Eisenanteil abgetrennt.

Ab hier unterscheiden sich die Wege des Bauschutt- und Altbetonrecyclings deutlich. Der Altbetonstrom wird über zwei weitere Siebe in Fraktionen von >60 mm, 30-60 mm und <30 mm aufgetrennt. Jede dieser Fraktionen kommt im Straßenbau zum Einsatz und ersetzt die entsprechenden Primärgesteine. Der verbleibende Bauschuttstrom wird über einen Leichtstoffabscheider geführt und dann über drei Siebe in die Fraktionen 40-100, 20-40, 4-20 und <4 mm getrennt. Die letzteren drei Fraktionen finden jeweils als Verfüllmaterial Anwendung, wohingegen erstere Fraktion einer nassen Aufbereitung mit Wäsche und anschließender Entwässerung zugeführt wird. Bei der Entwässerung wird ein Sandanteil von <2 mm abgeschieden und deponiert. Die gewaschene Fraktion 40-100 mm kann als Straßenbaumaterial verwendet werden.

Der Energieeinsatz für die einzelnen Schritte der Aufbereitung und die Aufteilung der Fraktionen finden sich in Abb. 27 und Abb. 28.

Das Altbeton- und Bauschuttmaterial, das im Straßenbau eingesetzt wird, ersetzt dort Primärgesteine, die sonst abgebaut werden müssten. Der Einsatz als Verfüllmaterial ersetzt Material, das ausgehoben werden müsste. Ein Antransport wird in allen Fällen nicht berücksichtigt, weil nicht davon auszugehen ist, dass sich die Transporte des Altbeton- und Bauschuttmaterials wesentlich von denen der Primärgesteine und des primären Verfüllmaterials unterscheiden.

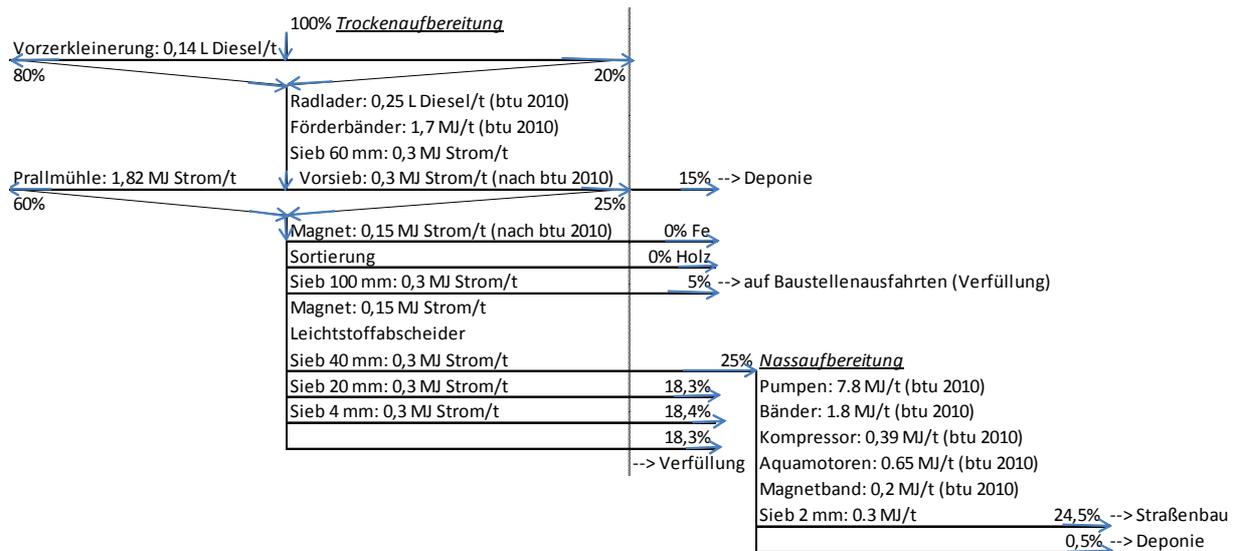


Abb. 27: Bauschutttaufbereitung des Stoffstromes Bauschutt gemischt (Prozentzahlen-Bezug: Massanteil vom Gesamtinput)

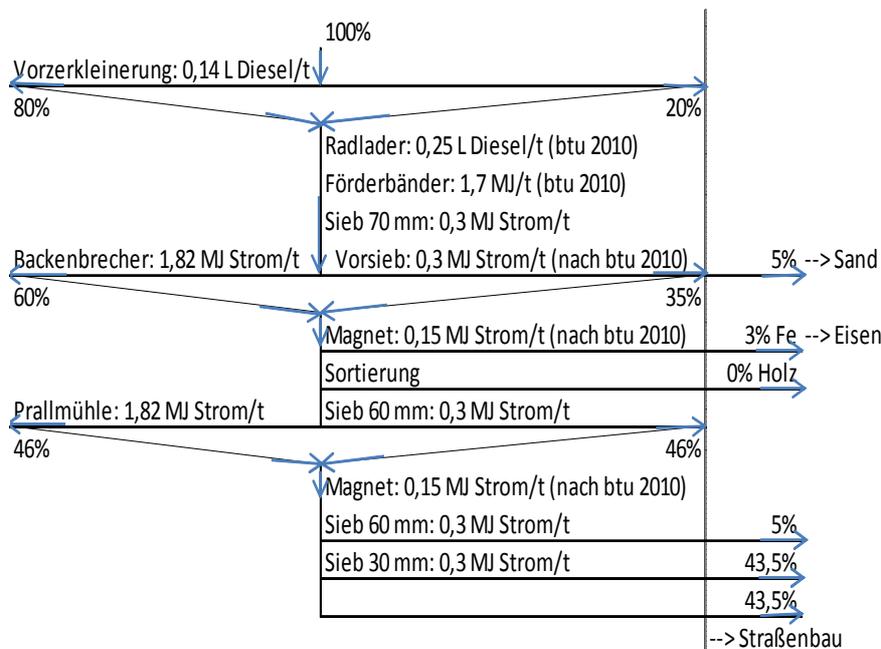


Abb. 28: Bauschutttaufbereitung des Stoffstromes Altbeton (in M.-%, bezogen auf Gesamtinput)

3.1.2 Leichtbauweise (Holzrahmenbauweise)

Die Außenhülle von Gebäuden in der leichten Holzrahmenbauweise setzt sich aus den unten aufgeführten Materialien in der jeweiligen Baudickenausführung zusammen (Königstein 2007, Sommer 2011). Aus den gleichen Gründen wie bei der Massivbauweise mit WDVS wird dabei in der Bodenplatte Estrich, Bodenbelag und Trittschalldämmung vernachlässigt. Ebenso wird in der Außenwand die Dampfsperre aufgrund des geringen Volumens vernachlässigt. Daraus ergibt sich der in Tab 12 aufgeführte Volumenanteil der verschiedenen Baumaterialien in der Außenwand bzw. Bodenplatte.

Tab 12: Zusammensetzung der Baumaterialien in der Leichtbauweise
(Ökobau.dat, Institut Bauen und Umwelt (IBU))

	Dicke (m)	Vol.-%	Dichte (kg/m ³)	M.-%	Entsorgung
Außenfläche					
Holzschalung außen	0,025	7,0	565*	13,2	MVA (90% Holz, 6% Wasser, 3,5% PMDI-Leim, 0,5% Paraffinwachsemulsion)
Spanplatte außen und innen	0,016 + 0,02	10,1	681,5*	22,9	MVA (85% Holz trocken, 5,5% Wasser, 9% Harnstoffharz, 0,5% Paraffinwachsemulsion)
Holzträger: tragendes Material	0,3 (25% Fläche)	20,9	430	30,2	MVA (Holz)
Dämmmaterial Steinwolle im Gefach	0,02 (75% Fläche)	41,9	121,67*	17,1	Deponie
Dampfbremse	0,002	0,5	nicht betrachtet		
Holzfaserdämmplatte	0,06	16,8	160*	9,0	MVA (95,5% Holz, 3,5% PUR-Harz, 1% Paraffine)*
Gipskartonplatte	0,01	2,8	800	7,5	Deponie
Bodenplatte					
Bodenbelag, Estrich, Trittschalldämmung	0,02; 0,06; 0,02	33,4	nicht betrachtet		
Stahlbeton	0,15	50,0 (mit 3 M.-% Stahl)	Stahl 7850, Beton 2365	99,6	Bauschuttzubereitung
Wärmedämmung XPS	0,05	16,7	32	0,4	MVA (94,75% EPS, 5,25% Treibmittel Pentan)*

Die Bauschuttvolumina und Bauschuttmassenströme der einzelnen Baumaterialien für 1000 m³ umbauten Raum lassen sich analog zum Massivbau errechnen (s. Kap. 3.1.1). Das gesamte Bauschuttvolumen beträgt 66,6 m³ oder 19,8 t für die Außenwand und 29,7 m³ (incl. vernachlässigte Teile) oder 36,12 t (excl. vernachlässigte Teile) für die Bodenplatte. Die Bauschuttvolumina unterscheiden sich vom Massivbau aufgrund der anderen Baumaterialien, die mit anderen Dicken ausgeführt werden. Steinwolle und Gipskartonplatte werden auf die Deponie gebracht, wohingegen alle Holzwerkstoffe und das EPS in der MVA verbrannt werden.

Für den Abriss des Holzrahmenbaus wird ein Maschineneinsatz von drei Tagen je acht Stunden bei einem Dieserverbrauch von 17,5 L/h veranschlagt. Die Steinwolle wird aus dem Gefach entfernt und deponiert. Der Rest der Außenwände wird in der Bozener MVA verbrannt. Der Stahlbeton der Bodenplatte wird wie in Kap. 3.1.1 beschrieben in einer Bozener Aufbereitungsanlage behandelt und kann dann als Straßenbaumaterial wiederverwendet werden.

Für die Errechnung der zukünftigen energetischen Wirkungsgrade wird im Folgenden das künftige Potenzial der neuen MVA in Bozen abgeschätzt (persönliche Mitteilung). Die neue MVA in Bozen wird bei Ausnutzung der vollen Kapazität einen Abfallstrom von 16,3 t/h mit einem Heizwert von 13 MJ/kg aufnehmen, entsprechend 58,86 MW thermischer Leistung. Die Kapazität für Fernwärme soll bei 30 MW liegen. Bei einer derartigen Betriebsführung würde 10,9 MW Bruttostrom anfallen, von dem noch 9,03 MW ins Netz eingespeist werden könnte. Der entsprechende thermische Wirkungsgrad beträgt 51% und der elektrische Nettowirkungsgrad 15%.

Die Holzwerkstoffe und das EPS der Bodenplatte, die in die MVA verbracht werden, erzeugen ihrem Heizwert und den errechneten energetischen Wirkungspotenzialen entsprechend eine gewisse Menge Strom und Wärme. Durch den eingespeisten Strom wird die Produktion italienischen Netzstromes eingespart. Die ins Fernwärmenetz eingespeiste Wärme gelangt vor allem zu neuen Abnehmern (ein Krankenhaus, eine neue Siedlung), die ansonsten über Einzelfeuerung konventionell oder über das Blockheizkraftwerk der SEL in Bozen, das mit Erdgas betrieben wird, mit Fernwärme versorgt würden. In dieser Studie werden die folgenden Varianten unterschieden:

- a. Die Wärme aus der MVA ersetzt konventionelle Heizwärme aus 50% Heizöl und 50% Erdgas
- b. Die Wärme aus der MVA ersetzt 100% Wärme aus einem Gaskraftwerk

Die inputabhängigen Verbrennungsemissionen der MVA sind an der Zusammensetzung der Baustoffe ausgerichtet (Tab 12).

Ein Teil der Holzwerkstoffe, insbesondere der tragenden Holzträger, kann ggf. stofflich verwertet werden. Bei einer stofflichen Verwertung ersetzt das Altholz Primärholz ab Wald, so dass die entsprechenden Lasten der Holzproduktion und des Fällens eingespart werden. Gleichzeitig wird der substituierte Rohstoff Primärholz im Wald einer anderweitigen energetischen Nutzung zugänglich gemacht, so dass die Substitution von Strom und Wärme zusätzlich erhalten bleibt. In dieser Studie wird aber davon ausgegangen, dass die Holzwerkstoffe verbrannt werden, da dies momentan wirtschaftlich am sinnvollsten ist (mündliche Mitteilung).

3.2. *Ökologischer Vergleich für Abbruch und Entsorgung*

Der Bilanzrahmen umfasst den Abriss der Außenhülle und die Entsorgung bzw. Aufbereitung der Baustoffe. Der Nutzen aus stofflicher und energetischer Verwertung wird in Form von Gut-schriften berücksichtigt.

Die funktionelle Einheit ist die Entsorgung der Außenhülle von KlimaHäusern gleichen Klima-standards. Der Referenzfluss resultiert aus einer Außenhülle für 1000 m³ umbautem Raum (s. Kap. 3.1).

Für die beiden Systeme „Massivbauweise“ und „Leichtbauweise“ werden zunächst Sachbilan-zen erstellt. Es wird eine so genannte Sektoralanalyse erstellt. Dadurch sind Umweltwirkungen dezidiert zuordenbar; Hauptursachen lassen sich deutlich herausarbeiten. Die in der Sachbi-lanz bilanzierten Stoffparameter (z.B. CO₂, NO_x, Erdölverbrauch etc.) werden dann in der Wir-kungsabschätzung auf die wesentlichen negativen Umweltwirkungen aggregiert. Betrachtet werden hier Treibhauseffekt, Versauerungspotenzial, terrestrische Eutrophierung und Feinstaub (PM 10). Eine nähere Erläuterung der betrachteten Wirkungskategorien befindet sich im Anhang.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse für die zwei untersuchten Vergleichs-systeme dargestellt.

Zur Erläuterung der Abbildungen:

Der Abriss der Außenhülle und die Baustoffentsorgung sind mit Ressourcenverbrauch und Umweltbelastungen verbunden. Sie werden durch die **Balken nach oben** repräsentiert. Die farblich hervorgehobenen Abschnitte stellen die Beiträge der einzelnen Teilsysteme und Pro-zeesse zur Verwertung und Behandlung dar.

Die stoffliche und energetische Verwertung der erzeugten Sekundärprodukte (Energie, Mate-rial für Straßenbau und Verfüllung) führt zu Ressourceneinsparungen und Umweltentlastun-gen durch Substitution von Primärprozessen. Dieser Einspareffekt wird mit **Balken nach un-ten** abgebildet. Die farbliche Unterscheidung zeigt, welcher Beitrag aus welcher Material- bzw. Energiegutschrift stammt.

Die Ressourcen- und Umweltbelastungen durch die Hausentsorgung (nach oben) und die Ressourcen- und Umweltentlastungen durch dadurch eingesparte Primäraktivitäten (nach unten) können miteinander verrechnet werden. Die Summe ergibt ein Netto-Ergebnis (einfar-bige Säule neben Umweltbe- und -entlastungen). Zeigt der Netto-Balken nach oben, sind durch die Abfallbehandlung netto Umweltbelastungen bedingt, bei nach unten zeigendem Net-to-Balken Umweltentlastungen. Aufgrund seines Zustandekommens als Differenz lässt sich der Netto-Balken nicht sinnvoll in Sektoren auflösen.

Die Ergebnisse beziehen sich immer auf 1000 m³ umbauten Raum.

Die dargestellten Sektoren beinhalten folgende Aspekte:

Lasten:

- Entfernung WDVS: Dieserverbrauch inkl. Vorketten durch Baumaschinen zum Entfernen des WDVS
- Abriss: Dieserverbrauch inkl. Vorketten durch Baumaschinen
- Aufbereitung Bauschutt: Energieverbrauch inkl. Vorketten für das Aufbereiten des tragenden Mauerwerks aus der Außenwand des Massivbaus durch Siebe, Brecher, Mühlen, Transportbänder etc.
- Aufbereitung Beton: Energieverbrauch inkl. Vorketten für das Aufbereiten des Betons aus der Grundfläche von Massiv- und Leichtbau durch Siebe, Brecher, Mühlen, Transportbänder etc.
- Entsorgung Dämmung: Verbrennung von kunststoff- und holzhaltigem WDVS und Dämmstoffen in MVA bzw. Deponierung von mineralhaltigem WDVS und Dämmstoff
- Entsorgung Abriss: Entsorgung des Innenputzes aus dem Massivbau auf der Deponie bzw. Verbrennung der holzhaltigen Werkstoffe aus dem Leichtbau in der MVA und Deponierung der mineralhaltigen Werkstoffe auf der Deponie
- Entsorgung Aufbereitung: Deponierung der Fraktion <5 mm aus dem tragenden Mauerwerk der Außenwand des Massivbaus

Gutschriften:

- Gutschrift energ. Verw. Dämmmaterial: Gutschrift für die beim Verbrennen der nicht mineralischen Dämmstoffe in der MVA erzeugte Energie
- Gutschrift energ. Verw. leichte Baustoffe: Gutschrift für die beim Verbrennen der holzhaltigen Werkstoffe in der MVA erzeugten Energie
- Gutschrift Sekundärmaterial: Gutschrift für Sekundärmaterialien, die aus dem Bauschutt gewonnen werden und Primärmaterialien ersetzen; in dieser Studie handelt es sich überwiegend um Eisen aus dem Stahlbeton der Bodenplatte

3.2.1 Klimawandel (Treibhauseffekt)

Die Ergebnisse der Sektoranalyse für den Klimawandel sind in Abb. 29 dargestellt. Links ist die Entsorgung für Massivbau mit WDVS, daneben die für die Holzrahmenbauweise mit jeweils einer Substitution von Wärme aus 50% Erdöl und 50% Erdgas (Leichtbau 50/50 Öl/Gas) dargestellt. Rechts werden dieselben Systeme bei einer Substitution von Wärme aus 100% Erdgas betrachtet. Da es sich um ein Entsorgungssystem handelt, wird das Ergebnis maßgeblich von den Substitutionseffekten beeinflusst.

Die Hauptlast beim Leichtbau resultieren aus dem Treibstoffverbrauch beim Abriss und aus der Entsorgung der Dämmstoffe und Baumaterialien. Die Last beim Abrissprozess ist aufgrund des geringeren Maschineneinsatzes von drei Tagen anstatt 3,5 Tagen etwas geringer als beim

Massivbau. Beim Massivbau ist das Verbrennen des WDVS (Sektor „Entsorgung Dämmung“), welches hauptsächlich aus fossilen Kunststoffen (EPS und XPS) besteht, mit den größten Lasten verbunden. Die Gutschrift für die beim Verbrennen des WDVS erzeugte Energie (Sektor „GS energ. Verw. Dämmmaterial“) kann beim Massivbau die Lasten dieser Verbrennung aber kompensieren. Beim Leichtbau sind ebenso die Lasten aus der Verbrennung des XPS aus der Bodenplatte im Sektor „Entsorgung Dämmung“ zu erkennen. Da aber in der Außenwand des Leichtbaus kaum zu verbrennendes Dämmmaterial aus Kunststoffen, sondern Steinwolle und Holzfaserdämmplatten zum Einsatz kommen, fallen die Lasten für die Entsorgung des Dämmmaterials geringer aus.

Steinwolle wird deponiert. Bei der Verbrennung der Holzfaserdämmplatten wird nur aus den fossilen Kleberanteilen der Dämmplatte fossiles Kohlendioxid emittiert. Aufgrund der Deponierung der Steinwolle sind aber auch die Gutschriften für Energie aus der Entsorgung des Dämmmaterials etwas geringer („GS energ. Verw. Dämmmaterial“). Die Lasten aus der Verbrennung der Holzwerkstoffe im Leichtbau zeigen sich im Sektor „Entsorgung Abriss“. Sie hängen mit den Kleber- und Paraffinanteilen in den Platten zusammen. Da Holz ein erneuerbarer Energieträger ist, wird bei der Verbrennung der Holzanteile kein fossiles Kohlendioxid emittiert. Die dabei erzeugte Energie ersetzt aber konventionell erzeugte Energie (Sektor „GS energ. Verw. leichte Baustoffe“), so dass eine Nettoeinsparung von fossilem Kohlendioxid zu verzeichnen ist. Die Gutschriften übersteigen dementsprechend die Lasten. Weil beim Leichtbau nahezu alle Bestandteile verbrannt werden, ist die Gutschrift für Energie größer als die beim Massivbau.

Die Gutschriften für thermische Energie aus der Verbrennung in der MVA (Sektoren zu „GS energ. Verw. ...“) variieren, je nachdem, ob dadurch Wärme aus anteilig Erdöl und Erdgas oder ausschließlich Erdgas ersetzt wird, wie aus dem Vergleich der linken und rechten Balken ersichtlich ist. Mit der Verbrennung von Erdgas sind geringere Lasten als mit der Erdölverbrennung verbunden, so dass die Gutschrift im Falle der Substitution von Wärme aus ausschließlich Erdgas geringer ausfällt. Weil diese Gutschriften im System Leichtbau dominieren, ist dieses System sensitiv auf die angenommene Energiequelle für die substituierte Wärme. Das System Leichtbau schneidet im Vergleich mit dem Massivbau umso besser ab, je mehr Wärme aus Erdöl anstatt aus Erdgas ersetzt wird.

Die Gutschrift für Sekundärmaterial resultiert vor allem aus dem im Stahlbeton rückgewonnenem Eisenanteil, das in dieser Studie zu 100% rückgewonnen wird. Da im Massivbau der Stahlbeton mit 25 cm eine größere Dicke aufweist als im Leichtbau mit 15 cm, ist die rückgewonnene Eisenmenge und damit die Gutschrift im Falle des Massivbaus größer. Das aufbereitete Bauschutt- und Altbetonmaterial hingegen kann maximal Primärgesteine ersetzen. Die Gewinnung von Primärgesteinen ist aber bei den in diesem Fall geringen Transportentfernungen zum Primärlager mit keinen großen Umweltlasten verbunden. Der Gedanke der Ressourceneinsparung drückt sich im Falle von Primärsteinen nicht in entsprechenden Umweltlasten aus und ist somit unabhängig davon zu betrachten.

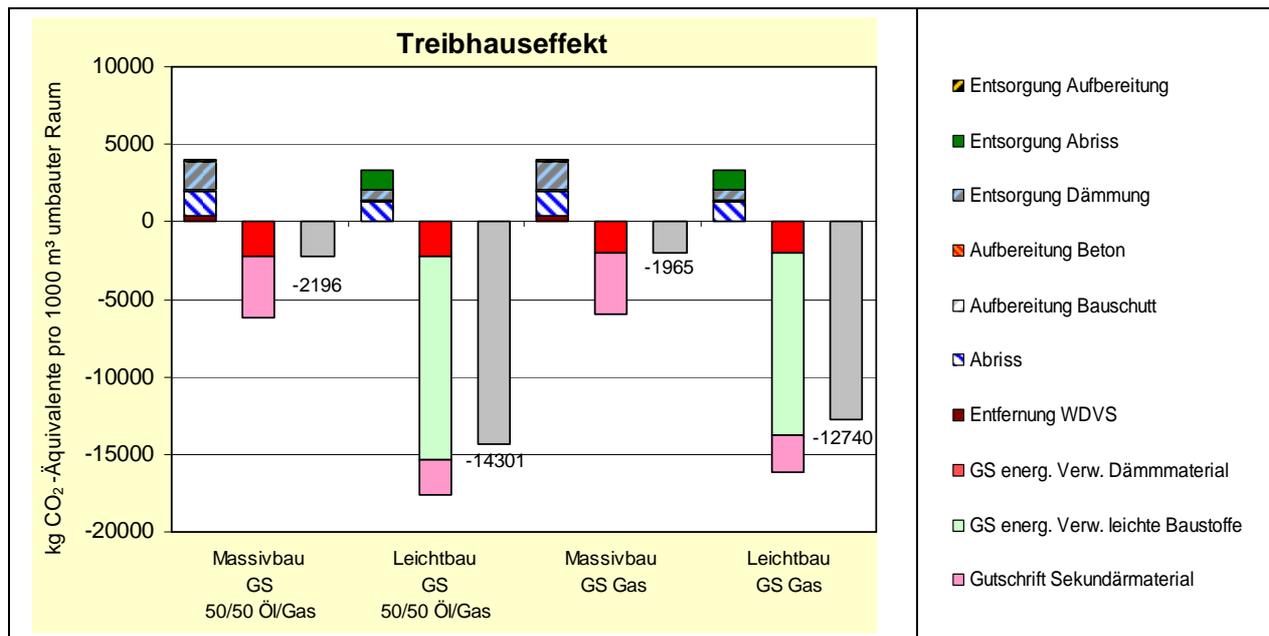


Abb. 29: Ergebnisse für die Kategorie Klimawandel (Treibhauseffekt)

3.2.2 Versauerung, terrestrische Eutrophierung, Feinstaub (PM 10)

Bezüglich des Versauerungspotenzials (s. Abb. 30) ist die Verbrennung der Holzwerkstoffe aus dem Leichtbau mit größeren Lasten verbunden (Sektor „Entsorgung Abriss“) als die Verbrennung des kunststoffhaltigen WDVS vom Massivbau (Sektor „Entsorgung WDVS“). Die Emission von Stickoxiden ist der Hauptverursacher für Versauerung. Stickoxide entstehen im Verbrennungsprozess abgasvolumenabhängig. Das Verbrennen der Holzwerkstoffe und Holzträger aus dem Leichtbau führt aufgrund der größeren Masse zu einem größeren Abgasstrom als das Verbrennen des WDVS aus dem Massivbau, während das Mauerwerk aus dem Massivbau nicht zu versauerungsverursachenden Emissionen beiträgt. Die Emissionen von Stickoxiden erklären den im Vergleich zum Treibhauseffekt größeren Beitrag des Maschineneinsatzes in Folge von Abriss und Abkratzen der Dämmung (Sektor „Abriss“) zum Gesamtsystem. Die Gutschrift für Energie, die beim Leichtbau, wie bereits beim Treibhauseffekt erläutert, größer ist, fällt hier nicht so stark ins Gewicht, weil die Emissionen von NO_x und SO_x im Zuge der Energieerzeugung dank Rauchgasreinigung geringer ausfallen, wohingegen der Substitutionseffekt durch die größere Menge Sekundäreisen im Massivbau gleich bleibt. Der Massivbau schneidet dadurch bezüglich Versauerung nicht viel schlechter ab als der Leichtbau. Dies gilt insbesondere dann, wenn mit der thermischen Energie aus der MVA Wärme aus ausschließlich Erdgas ersetzt wird.

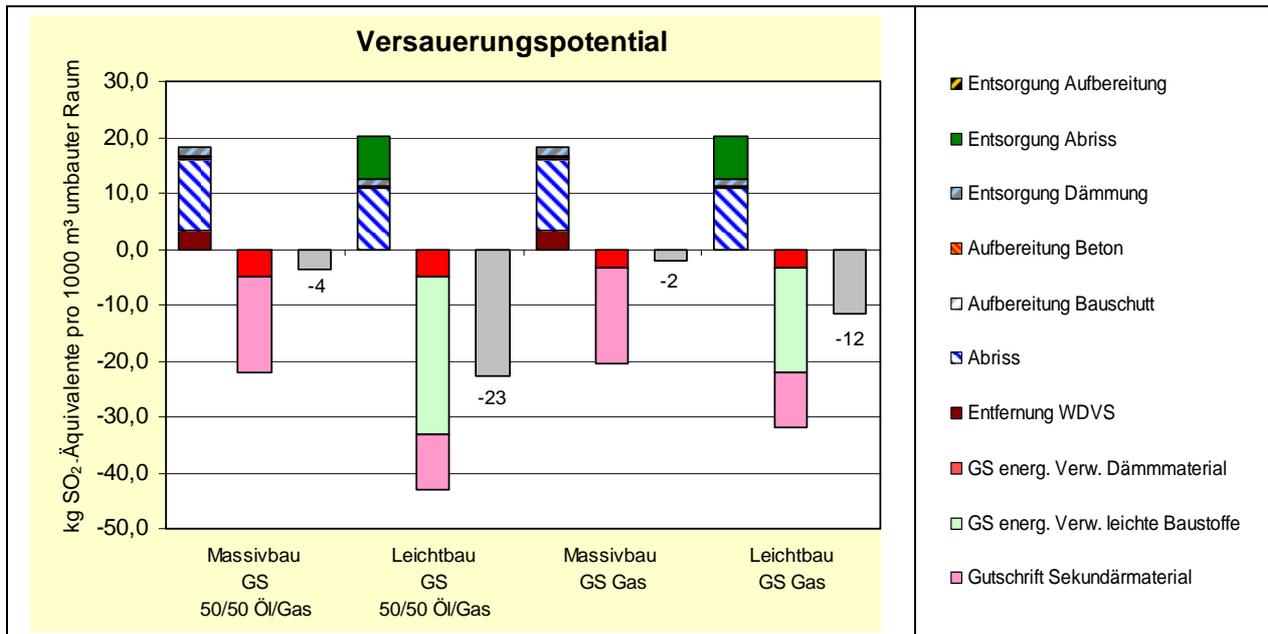


Abb. 30: Ergebnisse für die Kategorie Versauerungspotenzial

Da terrestrische Eutrophierung (s. Abb. 31) ebenso von NO_x gesteuert wird, gelten die Aussagen für Versauerung für diese Kategorie entsprechend.

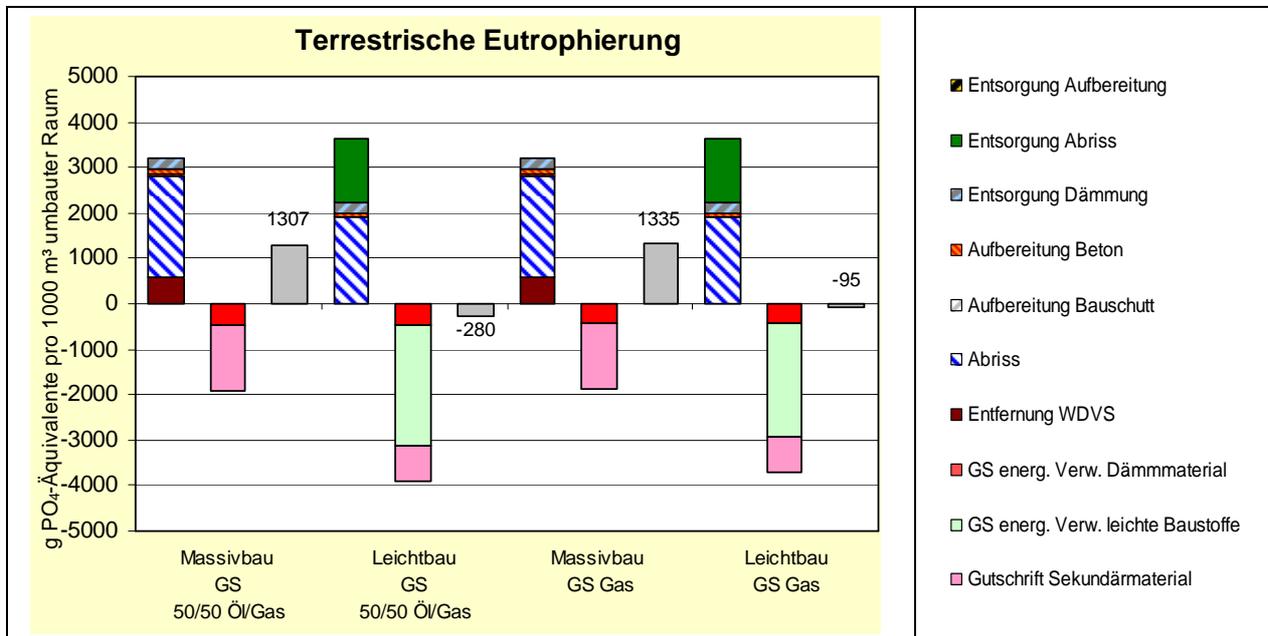


Abb. 31: Ergebnisse für die Kategorie terrestrische Eutrophierung

Feinstaub bewertet Partikelemissionen von $\leq 10 \mu\text{m}$ (Abb. 32) in der Luft. Auch hier zeigen sowohl der Maschineneinsatz für den Abriss und das Entfernen des WDVS als auch der Verbrennungsprozess in der MVA den Hauptbeitrag.

Der Staubaustrag aus der MVA ist ebenso abgasvolumenabhängig und fällt daher für die Entsorgung der Baumaterialien aus dem Leichtbau größer aus als für die Entsorgung des WDVS aus dem Massivbau. Ecoinvent (Version 2.2) gibt für die Abbruch- und Aufbereitungsarbeiten im Falle von Zement und Mauerwerk in Summe $8 \text{ e-5 kg PM 10/kg Mineralabfall}$ an. Dieser Wert wird von dieser Studie übernommen und findet sich im Sektor Abriss wieder. Es wird unterstellt, dass bei den Abbruch- und Aufbereitungsarbeiten der Außenwand des Leichtbaus keine Staubemissionen auftreten, was zu hinterfragen ist.

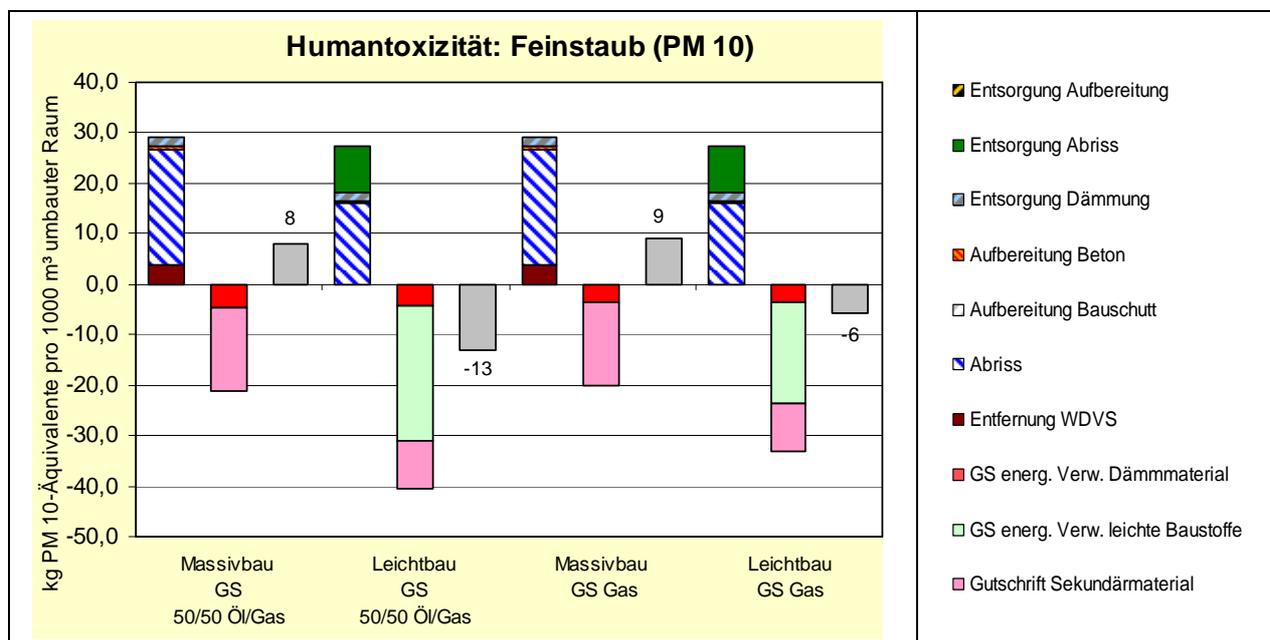


Abb. 32: Ergebnisse für die Kategorie Feinstaub

3.2.3 Normierung der Ergebnisse

Um die Bedeutung der Unterschiede in den Umweltlasten zwischen der Entsorgung eines Massivbaus und eines Leichtbaus zu verstehen, ist eine Normierung der Ergebnisse sinnvoll. Dazu werden die jährlichen pro-Kopf-Emissionen eines EU-Durchschnittsbürgers zugrunde gelegt und die Ergebnisse damit normiert, so dass die Ergebnisse dann als Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) ausweisbar sind. Da es sich um jährliche EDWs handelt, ist es sinnvoll, die Ergebnisse von der betrachteten funktionellen Einheit 1000 m^3 auf die jährliche Bautätigkeit in Südtirol hochzuskalieren.

Von 2002 bis 2012 sind in Südtirol 3214 KlimaHäuser neu gebaut worden. Im Durchschnitt wird von 1693 m^3 umbautem Raum pro Haus ausgegangen, so dass der Wohnraumzuwachs an KlimaHäusern in den letzten 11 Jahren ca. 5 Mio m^3 betragen hat, also jährlich ca.

500.000 m³. Es wird vereinfachend angenommen, dass der Zubau an KlimaHäusern mit einer äquivalenten Zahl an Abrissen der KlimaHäuser einhergeht. Für eine solche jährliche Abrisstätigkeit ergeben sich die in Abb. 33 normierten Umweltlasten für Massivbau bzw. Leichtbau.

Auch normiert zeigen sich die größten Unterschiede zwischen beiden Systemen in der Kategorie Klimawandel (Treibhauseffekt). Der Unterschied in den anderen Kategorien ist dagegen um mehr als die Hälfte geringer, aber nicht so drastisch geringer, wie nach den nicht normierten Ergebnissen angenommen werden könnte.

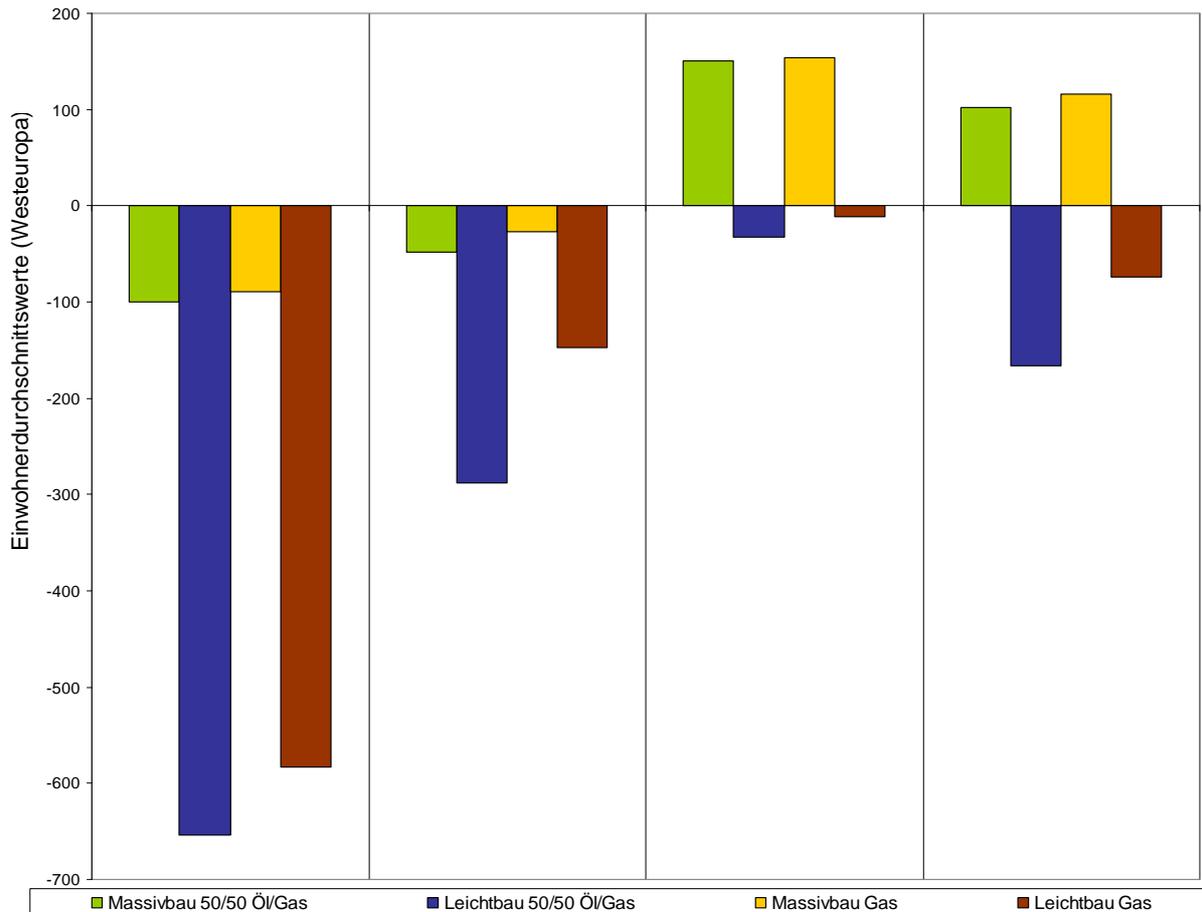


Abb. 33: Darstellung der Umweltauswirkungen durch die jährliche Abrisstätigkeit in Südtirol in Einwohnerdurchschnittswerten (EU-Bürger)

3.2.4 Sensitivitätsbetrachtung

In der Standardberechnung wird beim Massivbau der Kleber im WDVS-System vernachlässigt. Daneben ist in Abb. 34 und Abb. 35 dargestellt, wie sich das Ergebnis verändert, wenn eine Klebermasse von 5 kg/m² im WDVS angenommen wird.

Der Kleber im WDVS wird als mineralischer Kleber angesetzt. Dadurch erhöht sich nur der Anteil der Inertmasse, der mit dem WDVS in die MVA gelangt. Das Ergebnis für das System Massivbau verschlechtert sich hierdurch aber nur leicht.

Beim Leichtbau wird in der Standardberechnung von einer Dämmung mit Steinwolle ausgegangen. Abb. 34 und Abb. 35 zeigen, wie die Ergebnisse für den Leichtbau mit einer EPS-Dämmung ausfallen.

Die Dämmung mit EPS verschlechtert das Ergebnis des Systems Leichtbau im Treibhauseffekt leicht. Die Gutschrift für die durch die Verbrennung des EPS in der MVA gewonnene Energie (GS energ. Verw. Dämmmaterial) kann die mit der Verbrennung des Kunststoffes verbundenen Kohlendioxidemissionen (Entsorgung Dämmung) nicht kompensieren. Genau umgekehrt verhält es sich in der Kategorie Versauerungspotenzial, da hier der Zugewinn in der Gutschrift größer ist als der Anstieg der Emissionen.

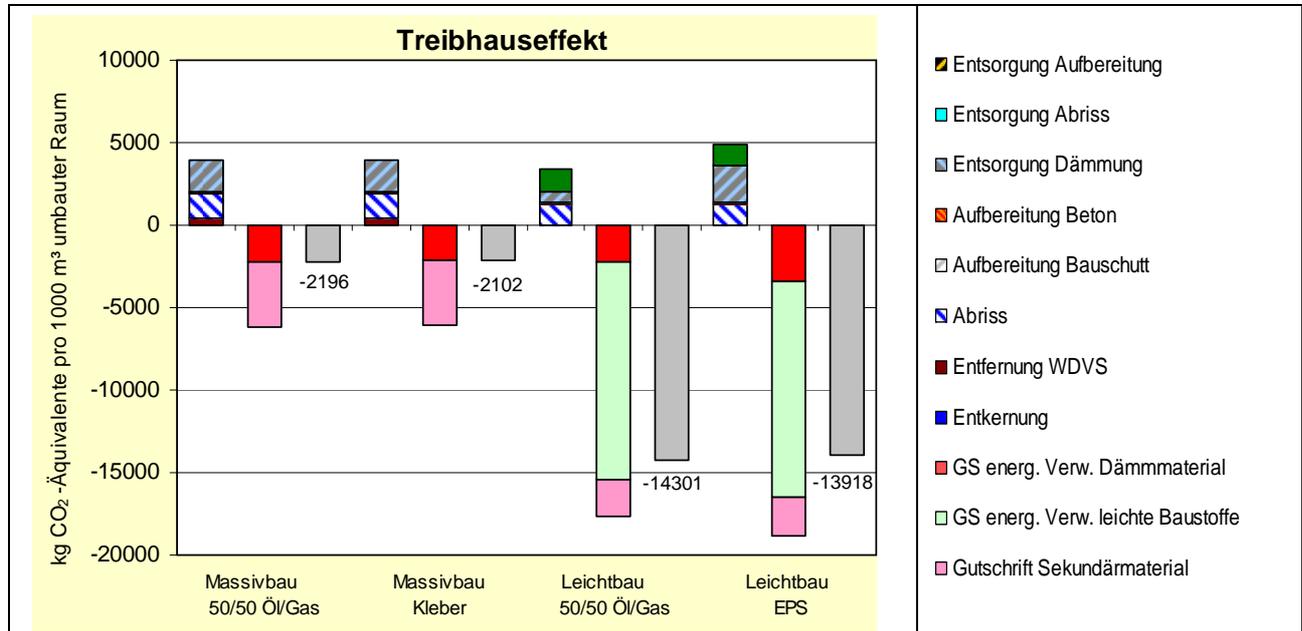


Abb. 33: Sensitivitätsanalysen für den Treibhauseffekt: Berücksichtigung der Klebermasse im WDVS des Massivbaus; Dämmung des Leichtbaus mit EPS anstatt Steinwolle

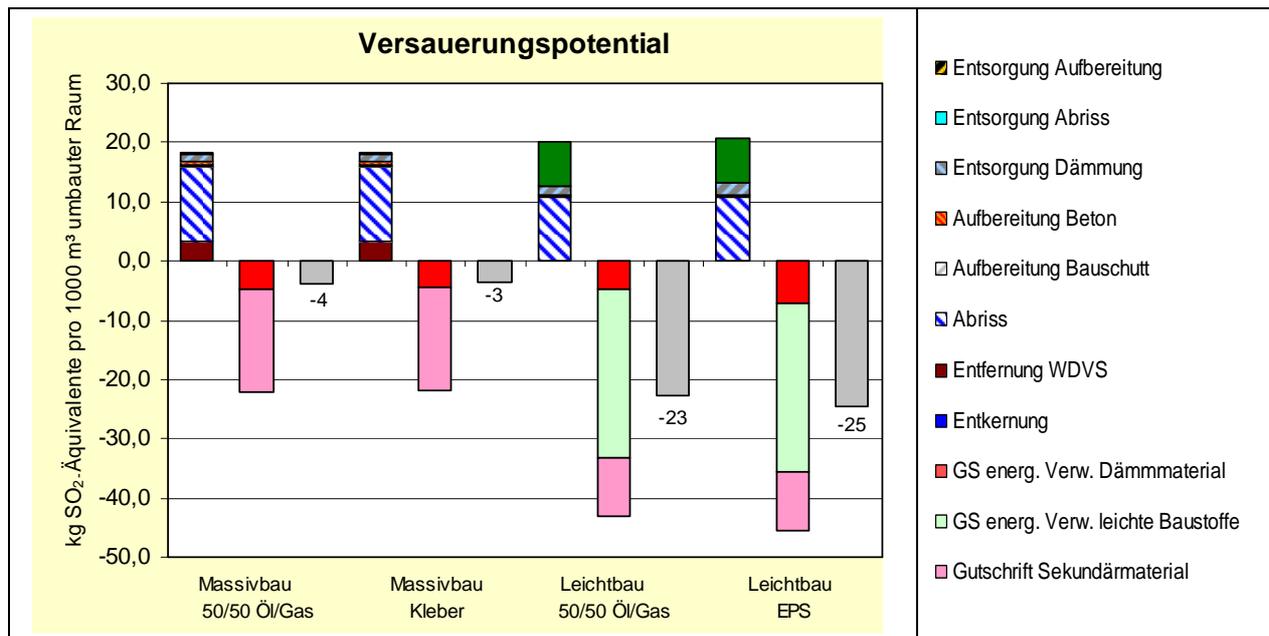


Abb. 34: Sensitivitätsanalysen für das Versauerungspotenzial: Berücksichtigung der Klebermasse im WDVS des Massivbaus; Dämmung des Leichtbaus mit EPS anstatt Steinwolle

3.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Der Abrissprozess des Massivbaus ist aufgrund des größeren Maschineneinsatzes mit etwas höheren Umweltlasten verbunden als der Abriss des Leichtbaus. Die Lasten der Bauschuttaufbereitung sind im Vergleich dazu so gering, dass sie grafisch kaum erfassbar sind. Dementsprechend fällt auch nicht ins Gewicht, dass im Falle der Massivbauweise größere Masseströme durch die Bauschuttaufbereitung geschleust werden müssen. Einen bedeutenden Einfluss auf das Ergebnis hat der aus dem Altbeton rückgewonnene Eisenschrott, insbesondere im Massivbau, so dass ein Recycling zu 100% gefordert sein sollte.

Entscheidend für das bezüglich des Klimawandels (Treibhauseffekt) deutlich bessere Abschneiden und bezüglich der anderen Kategorien etwas bessere Abschneiden des Leichtbaus ist die Energiegutschrift für das Verbrennen der dort verwendeten Holzbaustoffe. Solange mit der gewonnenen Energie vollständig herkömmlich erzeugte Energie ersetzt wird und herkömmlich erzeugte Energie hauptsächlich auf fossilen Brennstoffen basiert, dominiert die Gutschrift für Energie aus der Verbrennung von Holz die Ökobilanz.

In dieser Studie wird angenommen, dass der Stromanteil in der Energiegutschrift italienischen Netzstrom und der Wärmeanteil Wärme aus Heizwerken auf Basis von 50% Erdöl und 50% bzw. 100% Erdgas ersetzt. Am Stärksten ist der Substitutionseffekt beim Klimawandel (Treibhauseffekt) ausgeprägt, weil in dieser Kategorie mit der Holzverbrennung keine Lasten verbunden sind, wohingegen in den anderen Kategorien die Lasten aus der Holzverbrennung als Verbrennungsprozess ersichtlich sind und den Vorteil aus der Gutschrift schmälern. Zusätzlich verschlechtert die Verbrennung von WDVS mit Dämmstoffen auf fossiler Basis das Ergebnis für den Massivbau bezüglich Klimawandel (Treibhauseffekt). Die Berücksichtigung von mineralischem Kleber im WDVS wirkt sich kaum auf das System Massivbau aus. Ein Umstieg von

Steinwolle auf EPS als Dämmstoff im Leichtbau führt zu einer leichten Verschlechterung im Treibhauseffekt und zu einer leichten Verbesserung in den anderen Kategorien.

Wenn die Energiegutschrift für die Holzverbrennung geringer ausfallen würde (bspw. wenn herkömmliche Energie auf Basis erneuerbarer Energieträger produziert wird), dann wäre das Ergebnis mehr von der Lastenseite und der Eisengutschrift dominiert. Im Klimawandel (Treibhauseffekt) würde der Massivbau auch unter dieser Annahme kaum besser abschneiden, wenn WDVS mit Dämmstoffen auf fossiler Basis genutzt werden. Bei den anderen Kategorien könnte hingegen das Ergebnis zugunsten des Massivbaus kippen.

3.3. Die Bauweisen und ihre ökologischen Rucksäcke

Im vorigen Kapitel werden der Abbruch und die Entsorgung von KlimaHäusern aus ökologischer Sicht in einer vergleichenden Ökobilanz beschrieben. Es wird darin die Entsorgung von Abfallmassenströmen zweier Bauweisen mit gleichen Energiestandards und gleicher Gebäudgröße aus ökologischer Sicht vergleichend bewertet. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die aus Entsorgungssicht ökologisch günstigere Alternative (Leichtbauweise) bei einer Bewertung der Herstellung der verwendeten Bauprodukte anders abschneidet. Um dies zu überprüfen sollen den beiden alternativen Bauweisen die jeweiligen ökologischen „Rucksäcke“ gegenübergestellt werden.

Hierzu werden im Folgenden die bei der Herstellung der Bauprodukte anfallenden ökologischen Rucksäcke für die beiden Bauweisen beschrieben und bewertet.

Die bei der Herstellung der Gebäude anfallenden Transporte der Bauprodukte zur Baustelle und die Aufwendungen bei der eigentlichen Errichtung der Gebäude werden nachfolgend nicht betrachtet. Es wird angenommen, dass die Transportentfernungen der jeweiligen Bauprodukte vom Hersteller zur Baustelle bei beiden Bauweisen gleich sind. Weiterhin wird angenommen, dass der Aufwand bei der Herstellung der Gebäude im Gegensatz zur Herstellung der Bauprodukte ungleich niedriger und damit für die Gesamtbetrachtung nicht relevant ist.

Analog zum Kapitel „vergleichende Ökobilanz“ ist die funktionelle Einheit für den ökologischen Rucksack die Außenhülle von KlimaHäusern gleichen Klimastandards für 1000 m³ umbautem Raum.

3.3.1 Vorgehen, Datensätze, Quellen

Für die Beschreibung und Bewertung der ökologischen Rucksäcke der bei den Bauweisen anfallenden Bauprodukte werden dieselben Materialien und Mengen wie im letzten Kapitel angenommen. Um eine Einschätzung treffen zu können, werden unterschiedliche Datensätze zu den Bauprodukten mit den entsprechenden Umweltwirkungskategorien herangezogen. Diese Datensätze beinhalten allgemeine Angaben zu den:

- Technischen Eigenschaften
- Technischen Beschreibungen inklusive der Hintergrundsysteme
- Datenquellen
- Umweltwirkungskategorien

Bei allen Datensätzen ist die Systemgrenze das versandfertige Produkt am Werkstor (cradle to gate). In allen Datensätzen werden für die Umweltwirkungskategorien „Klimawandel (Treibhauseffekt)“ (kg CO₂-Äquivalente) und „Versauerungspotential“ (kg SO₂-Äquivalente) die Werte für **1 m³** des Bauproduktes angegeben. Wenn bei einem Bauprodukt mehrere Datensätze aus einer oder mehreren Quellen vorlagen, werden die Ergebnisse als Einzelwert oder als Bandbreite angegeben.

Die Datensätze stammen aus zwei verschiedenen Quellen. Zum einen werden Datensätze aus der Ökobaumat-Datenbank verwendet. Zum anderen werden sogenannte „Umwelt-Produktdeklarationen“ (UPD) herangezogen, die vom „Institut Bauen und Umwelt e.V.“ nach ISO 14025 erstellt wurden.

Nachfolgend sind für die beiden alternativen Bauweisen die Datensätze der Baustoffe sowie Dämmstoffe dargestellt. Es wird dabei zwischen Bauprodukten für die Außenwände sowie die Bodenplatte unterschieden. Da manche Bauprodukte in beiden Bauweisen verwendet werden (u.a. Stahlbeton), wird in diesem Fall auf eine erneute Darstellung desselben Datensatzes verzichtet.

3.3.1.1 Datensätze Außenwände (Bau- und Dämmstoffe)

Mauerziegel porosiert (Durchschnitt)

Technische Eigenschaften:

Dichte (rechnerischer Durchschnitt): 740 kg/m³ (620 - 820 kg/m³)

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Die Lebenszyklusanalyse der Ziegel umfasst die Lebenswegabschnitte cradle to gate, d.h. die Herstellung von Roh- und Hilfsstoffen sind ebenso berücksichtigt wie die Ziegel-Produktion inkl. Werksbetrieb und Verpackung (Holzpaletten, PE-Folie) sowie der Verwertung der Verpackung. Als Rohstoffe dienen vorrangig Sand und Kalksteinmehl. Nach der Rohstoffgewinnung erfolgt die Formung, Trocknung und das Brennen.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: Ökobaumat

Technische Daten:

- Ziegel-Lexikon, 1997
- D.A.CH Bericht Österreich: Ökobilanz Ziegel - Ökologische Bewertung von Mauerziegeln, Akt. 2004
- Ökobilanz Mauerziegel - Ökobilanz und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung Außenwandkonstruktionen

Umweltwirkungskategorien:

Treibhauspotential (GWP 100):	93,24	kg CO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff
Versauerungspotential (AP):	0,1687	kg SO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff

Konstruktionsvollholz

Für den vorliegenden Datensatz wurden eine UPD (erstellt nach ISO 14025) für Vollholzprodukte der Fa. EGGGER GmbH verwendet. Die UPD wurden vom Institut Bauen und Umwelt e.V. im Jahr 2011 erstellt.

Technische Eigenschaften:

Dichte 430 kg/m³ (atro)

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Die gewählte Systemgrenze umfasst die Herstellung der Produkte von der Bereitstellung der Rohstoffe bis zum fertig verpackten Produkt am Werkstor („cradle to gate“). Als Teil der Herstellung wird auch die energetische Verwertung der Verpackung bilanziert. Die eingesetzten Mengen an Rohstoffen, Energien, Hilfs- und Betriebsstoffen wurden als Jahresmittelwerte von Egger am Sägewerksstandort Brilon erhoben. Die verwendeten Daten beziehen sich auf die tatsächlichen Produktionsprozesse des Jahres 2009. Die Datenbasis für die Produktion wurde durch das an der Datenerhebung beteiligte EGGGER Sägewerk Brilon zur Verfügung gestellt. Die gesamte Forst-Holz-Kette wurde aus den Studien (Rüter 2007, Frühwald 2000, Schweinle & Thoro 2001) entnommen.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: IBU Umweltproduktdeklaration

Technische Daten:

- GaBi4 Software und Datenbank 2006
- NetLZ-Projektbericht "Grundsätze für Holz und Holzwerkstoffe", 2007
- Vergleichende Oekobilanzierung der Rundholzproduktion in verschiedenen Forstbetrieben BFH Report 204
- Ökologische Bilanzierung von Bauschnittholz und veredelten Vollholzprodukten, 2000

Umweltwirkungskategorien:

Treibhauspotential (GWP 100):	50,0	kg CO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff
Versauerungspotential (AP):	0,183	kg SO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff

Spanplatte (Durchschnitt)

Für den vorliegenden Datensatz wurden UPDs (erstellt nach ISO 14025) für Holzspanplatten der Fa. EGGGER GmbH sowie der Fa. Pfeleiderer GmbH verwendet. Die UPD wurden vom Institut Bauen und Umwelt e.V. im Jahr 2011 bzw. 2012 erstellt. Für den vorliegenden Datensatz wurden für die Umweltwirkungskategorien Durchschnittswerte von den Produkten aus den beiden UPD gebildet.

Technische Eigenschaften:

Dichte 678 kg/m³ (670 - 685 kg/m³) (Feuchte 5,5 %)

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Zur Modellierung des Lebenszyklus für die Herstellung und Entsorgung von rohen und beschichteten Spanplatten wurde das Software-System zur Ganzheitlichen Bilanzierung "GaBi 4" eingesetzt (GaBi 2006). Alle für die Herstellung und Entsorgung relevanten Hintergrund-Datensätze wurden der Datenbank der Software GaBi 4 entnommen. Die Vorkette für den

Forst wurde nach /Schweinle & Thoroer/ 2001 bzw. /Hasch 2002/ in der Aktualisierung von Rüter und Albrecht (2007) bilanziert.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: IBU Umweltproduktdeklaration

Technische Daten:

- GaBi4 Software und Datenbank 2006
- IBU-Deklaration Egger: Egger EUROSPAN (EPD-EHW-2008511-D), 2012
- IBU-Deklaration Pfeleiderer: Living Board Spanplatte (EPD-PFL-2009111-D), 2011

Umweltwirkungskategorien:

	Bandbreite	Durchschnitt
Treibhauspotential (GWP 100):	(235 - 274)	254,5 kg CO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff
Versauerungspotential (AP):	(1,18 – 1,23)	1,205 kg SO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff

Mittelharte Holzfaserplatte für Außenwand

Für den vorliegenden Datensatz wurden eine UPD (erstellt nach ISO 14025) für Vollholzprodukte der Glunz AG verwendet. Die UPD wurden vom Institut Bauen und Umwelt e.V. im Jahr 2011 erstellt.

Technische Eigenschaften:

Dichte 565 kg/m³

Systemgrenzen

Die gewählten Systemgrenzen umfassen die Herstellungen der MDF-Platte einschließlich der Rohstoffgewinnung bis zum fertig verpackten Produkt am Werkstor (cradle to gate).

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: IBU Umweltproduktdeklaration

Technische Daten:

- GaBi4 Software und Datenbank 2006
- IBU-Deklaration Glunz AG, (EPD-GLU-2010111-D) Holzfaserplatten
- Vergleichende Ökobilanzierung der Rundholzproduktion in verschiedenen Forstbetrieben BFH Report 204

Umweltwirkungskategorien:

Treibhauspotential (GWP 100):	484	kg CO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff
Versauerungspotential (AP):	0,917	kg SO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff

Gipskartonplatte als Innenputz

Technische Eigenschaften:

Handelsübliche Ware: 10 kg/m², Stärke 12,5 mm

Dichte 800 kg/m³

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Der vorliegende Datensatz ist bereits mit einem Sicherheitszuschlag von 10% auf die Ergebnisse versehen, da kein unabhängiges Review vorliegt. Das Umweltprofil beinhaltet die Aufwendungen für die Lebenszyklus-Stadien "Cradle to Gate". Es basiert hauptsächlich auf direkten Datenerhebungen der Industrie.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: Ökobaudat

Technische Daten:

- Datenerhebung in Gipswerken, 2007
- Gips-Datenbuch, 2006
- GaBi4 Software und Datenbank 2006

Umweltwirkungskategorien:

Treibhauspotential (GWP 100):	172,8	kg CO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff
Versauerungspotential (AP):	2,260	kg SO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff

Mineralische Werkmörtel Putzmörtel – Normalputze (Durchschnitt)

Für den Datensatz wurde eine UPD erstellt nach ISO 14025 für sogenannten Normalputz der Quick-Mix Gruppe GmbH verwendet. Die UPD wurde vom Institut Bauen und Umwelt e.V. im Jahr 2009 erstellt. Es wurde für die Umweltwirkungskategorien Durchschnittswerte von mehreren Produkten aus der UPD gebildet.

Technische Eigenschaften:

Dichte: (rechnerischer Durchschnitt): 1550 kg/m³ (1300 - 1800 kg/m³)

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Die Lebenszyklusanalyse der untersuchten Produkte umfasst die Produktion des Mörtels einschließlich der Rohstoffgewinnung und Energieträgerbereitstellung bis zum fertig verpackten Produkt, den Transport des Produktes zur Baustelle, die Nutzungsphase sowie die Entsorgung des Mörtels. Für Siloware werden die anteiligen Aufwendungen für den Transport und die Herstellung des Silos berücksichtigt. Die Verbrennung der Verpackung einschließlich Energierückgewinnung geht ebenfalls in die Ökobilanz ein. Die Datenbasis GaBi 4 /GaBi 2007/ wurde zur Berechnung der Energieerzeugung und der Transporte verwendet.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: IBU Umweltproduktdeklaration

Technische Daten:

- GaBi databases 2007
- IBU-Deklaration Mineralische Werkmörtel Putzmörtel - Normalputze (EPD-QMX-2009211-D), 2009

Umweltwirkungskategorien:

	Bandbreite	Durchschnitt
Treibhauspotential (GWP 100):	(233 - 283)	258,0 kg CO ₂ -Äqv. /m ³ Baustoff
Versauerungspotential (AP):	(0,365 – 0,443)	0,404 kg SO ₂ -Äqv. /m ³ Baustoff

Expandierter Polystyrol-Dämmstoff (EPS) (Durchschnitt)

Für den vorliegenden Datensatz wurden für die Umweltwirkungskategorien Durchschnittswerte aus mehreren Datensätzen gebildet. Diese Datensätze stammen aus der Ökobaudat-Datenbank von Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) für eine Verwendung als Wanddämmung bzw. in einem WDVS.

Technische Eigenschaften:

Dichte (rechnerischer Durchschnitt): 17,5 kg/m³ (15 - 25 kg/m³)

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Der vorliegende Datensatz ist bereits mit einem Sicherheitszuschlag von 10% auf die Ergebnisse versehen, da kein unabhängiges Review vorliegt. Das Umweltprofil basiert hauptsächlich auf Literaturrecherchen und direkten Datenerhebungen der Industrie.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: Ökobaudat

Technische Daten:

- GaBi databases 2006
- IBU-Deklaration IVH; EPS Hartschaum (Styropor) für Wände und Dächer (EPD-IVH-2009311-D), 2009

Umweltwirkungskategorien:

	Bandbreite	Durchschnitt	
Treibhauspotential (GWP 100):	(45,6 – 81,8)	52,5	kg CO ₂ -Äqv./m ³ Dämmstoff
Versauerungspotential (AP):	(0,097 – 0,171)	0,111	kg SO ₂ -Äqv./m ³ Dämmstoff

Mineralschaumdämmstoff (Porenbeton)

Für diesen Datensatz wurde eine Umwelt-Produktdeklaration (UPD) nach ISO 14025 für das Produkt „Multipor Mineraldämmplatte“ der Xella Dämmsysteme GmbH verwendet. Die UPD wurde vom Institut Bauen und Umwelt e.V. im Jahr 2009 erstellt. Die genannten Produkte sind mineralische Dämmelemente unterschiedlicher Formate aus Porenbeton mit sehr hohem Luftporenanteil. Multipor Mineraldämmplatten gehören zur Gruppe der porierten, dampfgehärteten Leichtbetone.

Technische Eigenschaften:

Dichte: 115 kg/m³

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Die Ökobilanz wurde nach DIN ISO 14040 ff durchgeführt. Als Datenbasis wurde das Jahr 2004 herangezogen. Die Ökobilanz wurde für die Herstellungsphase der Produkte unter Berücksichtigung sämtlicher Vorketten wie Rohstoffgewinnung und Transporte durchgeführt („cradle to gate“). Sie basiert hauptsächlich auf direkten Datenerhebungen der Industrie.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: Institut Bauen und Umwelt e.V.

Technische Daten:

- GaBi databases 2006
- IBU-Deklaration Xella – Multipor Minerale Dämmplatte (EPD- XEL-2009212-D), 2009
- PCR-Dokument „Porenbeton: 2004-11“

Umweltwirkungskategorien:

Treibhauspotential (GWP 100):	127,6	kg CO ₂ -Äqv. /m ³ Dämmstoff
Versauerungspotential (AP):	0,230	kg SO ₂ -Äqv. /m ³ Dämmstoff

Holzfaserdämmplatte (Durchschnitt)

Für den Datensatz wurde eine UPD erstellt nach ISO 14025 für im Trockenverfahren hergestellte Holzfaserdämmplatten der GUTEX GmbH verwendet. Die UPD wurde vom Institut Bauen und Umwelt e.V. im Jahr 2011 erstellt. Es wurde für die Umweltwirkungskategorien Durchschnittswerte von mehreren Produkten aus der UPD gebildet.

Technische Eigenschaften:

Dichte (rechnerischer Durchschnitt): 160 kg/m³ (110 - 190 kg/m³)

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Die Ökobilanz wurde nach DIN ISO 14040 ff durchgeführt. Als Datenbasis wurden die Produktionsjahre 2009 und 2010 herangezogen. Die Ökobilanz wurde für die Herstellungsphase der Produkte unter Berücksichtigung sämtlicher Vorketten wie Rohstoffgewinnung und Transporte durchgeführt („cradle to gate“). Sie basiert hauptsächlich auf direkten Datenerhebungen der Industrie.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: IBU Umweltproduktdeklaration

Technische Daten:

- GaBi databases 2006
- IBU-Deklaration Gutex Holzfaserdämmplatte (EPD-GTX-2011111-D), 2009
- PCR Dokument „Holzwerkstoffe“, 2009-11

Umweltwirkungskategorien:

	Bandbreite	Durchschnitt
Treibhauspotential (GWP 100):	(59,0 – 116,3)	91,775 kg CO ₂ -Äqv. /m ³ Dämmstoff
Versauerungspotential (AP):	(0,091 – 0,181)	0,1433 kg SO ₂ -Äqv. /m ³ Dämmstoff

Steinwollendämmung (Durchschnitt)

Für den vorliegenden Datensatz wurden für die Umweltwirkungskategorien Durchschnittswerte aus mehreren Datensätzen gebildet. Diese Datensätze stammen aus der Ökobaudat-Datenbank von Steinwolle-Dämmstoffen. Im Folgenden sind die Bandbreiten für die Umweltwirkungskategorien der Dämmstoffe mit angegeben.

Technische Eigenschaften:

Dichte 121,6 kg/m³ (102,5 - 150 kg/m³)

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Das vorliegende Umweltprofil beinhaltet die Aufwendungen für die Lebenszyklus-Stadien "Cradle to Gate". Es basiert hauptsächlich auf direkten Datenerhebungen der Industrie. Steinwolle ist ein Mineralwollendämmstoff, dessen wesentlicher Bestandteil monofile künstliche Mineralfasern nicht kristalliner Struktur sind, die aus einer silikatischen Schmelze gewonnen werden.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: Ökobaudat

Technische Daten:

- GaBi4 Software und Datenbank 2006
- AUB-Deklaration Rockwool: Unkaschierte bzw. unbeschichtete kunstharzgebundene Steinwolle-Dämmstoffe
- IBU-Deklaration Saint-Gobain ISOVER G+H: Unkaschierte Steinwolle-Platten und -Filze, 2008

Umweltwirkungskategorien:

	Bandbreite	Durchschnitt
Treibhauspotential (GWP 100):	(120 – 202,5)	167,47 kg CO ₂ -Äqv./m ³ Dämmstoff
Versauerungspotential (AP):	(0,5512 – 1,0875)	0,1433 kg SO ₂ -Äqv./m ³ Dämmstoff

3.3.1.2 Datensätze Bodenplatte (Bau- und Dämmstoffe)**Stahlbeton (Beton armiert)**

In den Datenbanken liegen keine Daten der Umweltwirkungskategorien für den Baustoff Stahlbeton vor. Um dennoch eine Bewertung des Baustoffes abgeben zu können, wurden die Umweltwirkungskategorien der Baustoffe „Transportbeton C25/30“ und „Bewehrungsstahl“ kombiniert.

Der Baustoff Stahlbeton wird in den beiden betrachteten Bauweisen „Massivbau“ und „Holzrahmenbau“ nur in den Bodenplatten verwendet. Der Anteil an Bewehrungsstahl wird mit 3 Masse-% angenommen (ecoinvent.org 2011).

Umweltwirkungskategorien:

Menge:	Treibhauspotential (GWP 100):	Versauerungspotential (AP):
1m ³ Beton:	237,78 kg CO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff	0,422 kg SO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff
1m ³ Stahl:	45,58 kg CO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff	0,117 kg SO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff
1m³ Stahlbeton:	283,37 kg CO₂-Äqv./m³ Baustoff	0,539 kg SO₂-Äqv./m³ Baustoff

a. Transport-Beton C25/30

Technische Eigenschaften:

Dichte: 2365 kg/m³

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Die Lebenszyklusanalyse des betrachteten Betons umfasst die Lebenswegabschnitte "Cradle to gate", d. h. die Herstellung von Roh- und Hilfsstoffen sind ebenso berücksichtigt, wie die Transportbetonherstellung. Die Systemgrenze bildet also das versandfertige Produkt am Werkstor.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: Ökobaudat

Technische Daten:

- GaBi4 Software und Datenbank 2006

Umweltwirkungskategorien:

Treibhauspotential (GWP 100):	240,0	kg CO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff
Versauerungspotential (AP):	0,426	kg SO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff

b. Bewehrungsstahl (Betonstabstahl, BSt 500)

Technische Eigenschaften:

Dichte: 7850 kg/m³

Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme

Der Datensatz repräsentiert die Stahlproduktion in Deutschland. Er basiert auf den wesentlichen Prozessen innerhalb eines Elektrostahlwerks. Hauptprozess hierbei ist das Schmelzen von Schrott in einem Elektroofen (EAF) unter Energiezufuhr (Stromverbrauch). Wesentlichstes Rohmaterial des EAF ist Eisenschrott, welcher sowohl innerhalb der Produktion im Werk anfällt (Verschnitt) aber auch aus Verschnitten von Stahlherstellern stammt (z. B. aus dem Fahrzeugbau) oder Schrott von Endnutzern (End-of-Life Produkte) darstellt. Wie im gemischten Stahlwerk mit Hochofen und Konverter dient Kalkstein zur Aufnahme von unerwünschten Stahlkomponenten. Kalkstein dient als ein Zusatzstoff zur Schlackebildung, ebenso wird Kohle (Kohlenstoff) als Reduktionsmittel verwendet. Transporte jeglicher Materialfraktionen sind im Datensatz berücksichtigt. Zur Herstellung von Kohlenstoffstahl und niedrig legiertem Stahl werden die folgenden Prozessschritte durchlaufen: Rohmaterialhandhabung und Lagerung, Ofenbeschickung mit und ohne Schrottvorheizung, EAF Schrottschmelzen, Stahl- und Schlackenabstich, Pfannenofenbehandlung zur Qualitätssicherung, Ascheverwertung/Entsorgung und schließlich das Stranggießen. Output des Stranggießens ist Bramme aus Stahl. Diese wird anschließend weiterverarbeitet zu Stahlstäben mit Hilfe eines Ziehvorgangs. Der Verbund des Bewehrungsstahls mit dem umgebenden Beton bestimmt maßgeblich die Qualität von Stahlbeton. Zur Verbesserung des Verbundes ist der Bewehrungsstahl gerippt.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: Ökobaudat

Technische Daten:

- GaBi4 Software und Datenbank 2006

Umweltwirkungskategorien:

Treibhauspotential (GWP 100):	4937,65	kg CO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff
Versauerungspotential (AP):	12,717	kg SO ₂ -Äqv./m ³ Baustoff

Extrudierter Polystyrolämmstoff (XPS)**Technische Eigenschaften:**Dichte 32 kg/m³**Technische Beschreibung inklusive der Hintergrundsysteme**

Der vorliegende Datensatz ist bereits mit einem Sicherheitszuschlag von 10% auf die Ergebnisse versehen, da kein unabhängiges Review vorliegt. Das Umweltprofil beinhaltet die Aufwendungen für die Lebenszyklus-Stadien "Cradle to Gate". Es basiert hauptsächlich auf Literaturrecherchen. Polystyrol-Extruderschaum (extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff XPS) wird in einem kontinuierlichen Extrusionsprozess hergestellt: Treibmittelfreies Polystyrol-Granulat wird in einem Extruder aufgeschmolzen und unter Zugabe von Treibmittel über eine Breitschlitzdüse kontinuierlich ausgetragen. Der entstehende Schaumstoff ist homogen und geschlossenzellig und wird in Form von Platten angeboten.

Datenquellen:

Umweltwirkungskategorien: Ökobaudat

Umweltwirkungskategorien:

Treibhauspotential (GWP 100):	101,12	kg CO ₂ -Äqv./m ³ Dämmstoff
Versauerungspotential (AP):	0,2234	kg SO ₂ -Äqv./m ³ Dämmstoff

3.3.2 Bilanzierung der ökologischen Rucksäcke

Nachfolgend sind Ergebnisse der Vergleichenden Bewertung für die Herstellung der Bauprodukte der beiden Bauweisen „Massivbau“ und „Leichtbau“ dargestellt. Die daraus resultierenden Ergebnisse für die Wirkungskategorien „**Klimawandel (Treibhauseffekt)**“ sowie „**Versauerungspotential**“ werden beschrieben und bewertet.

Die folgenden Diagramme zeigen das Treibhauspotential der hergestellten Bauprodukte für ein Gebäude mit einer Außenhülle für 1000 m³ umbautem Raum. Für einen besseren Vergleich der Ergebnisse wurden die Diagramme einheitlich skaliert.

Für die anfallenden Systemlasten der Bauprodukte und damit auch der eigentlichen Bauweisen sind entscheidend:

- Die **Materialart** der hergestellten und verbauten Bau- und Dämmstoffe
- Die **Menge** an hergestellten und verbauten Bau- und Dämmstoffe

Die Baumaterialien sowie die damit zusammenhängenden Wirkungspotentiale für die beiden Wirkungskategorien werden in den vorangegangenen Datensätzen ausführlich beschrieben. Für einen Überblick der Mengen bzw. der Anteile der Baumaterialien ist nachfolgend eine Zusammenfassung der Tabellen aus dem Kapitel „Vergleichende Ökobilanz“ dargestellt.

Tab 13: Zusammenfassung der Materialien und der vol. Anteile der Bauprodukte nach Bauweisen

Massivbauweise mit WDVS		Leichtbauweise	
Außenwand			
Material	Vol. Anteil (%)	Material	Vol. Anteil (%)
Außenputz	2,5	Holzschalung außen	7,0
Mauerziegel	45	Spanplatte außen und innen	10,1
Innenputz	2,5	Holzträger: tragendes Material	20,9
WDVS ohne Außenputz	50	Dämmmaterial Steinwolle im Gefach	41,9
Materialien WDVS	Anteile WDVS	Dampfbremse	0,5
EPS, XPS, PS, Styropor	64,2	Holzfaserdämmplatte	16,8
Holzfaserdämmplatten	15,5	Gipskartonplatte	2,8
Mineralewolleplatten	20,3		
Bodenplatte			
Material	Vol. Anteil (%)	Material	Vol. Anteil (%)
Bodenbelag, Estrich, Trittschalldämmung	25	Bodenbelag, Estrich, Trittschalldämmung	33,4
Stahlbeton	62,5 (3 M.-% Stahl)	Stahlbeton	50,0; (3 M.-% Stahl)
Wärmedämmung EPS	12,5	Wärmedämmung EPS	16,7

Die in der Tabelle heller gehaltenen Materialien wie z.B. Dampfbremse sind nicht mit in die Berechnung einbezogen. Wie bereits im vorigen Kapitel beschrieben werden in der Bodenplatte Estrich, Bodenbelag und Trittschalldämmung vernachlässigt, weil diese Komponenten sich zwischen den verschiedenen Bauweisen nicht unterscheiden.

Klimawandel (Treibhauseffekt)

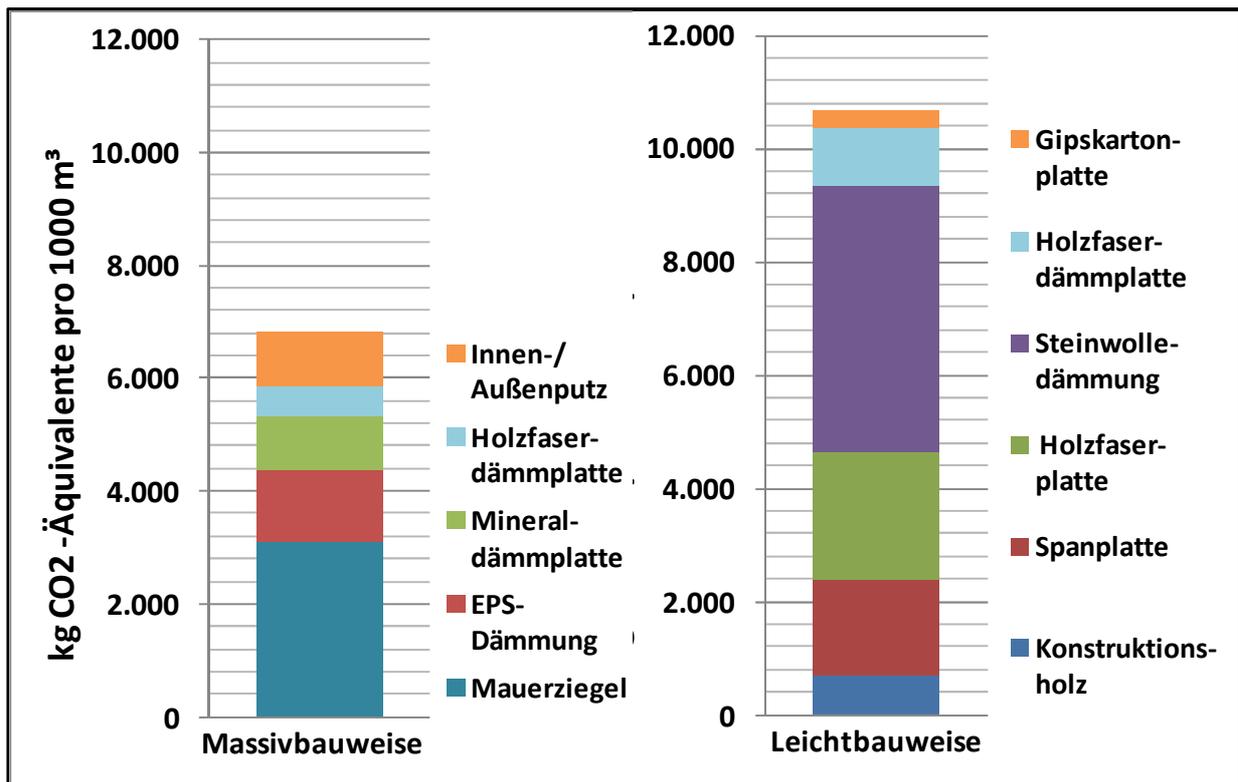


Abb. 35: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Klimawandel“ für die Außenwände der beiden Bauweisen

Bei der Massivbauweise werden die Systemlasten der Baustoffe Mauerziegel und Beton dominiert. Die energieintensive Herstellung der Mauerziegel macht fast die Hälfte der gesamten Lasten für die Außenwand der Massivbauweise aus. Der Beton ca. 75% für die Bodenplatte. Die Dämmstoffe aus dem WDVS der Massivbauweise haben zusammen ebenfalls einen großen Anteil an den Systemlasten. Von allen Dämmstoffen des WDVS hat derjenige aus EPS die größten Anteile an den Systemlasten.

Die größten Systemlasten bei der Leichtbauweise hat die energieintensive Herstellung des Dämmstoffs „Steinwolle“ mit ca. 45 % der Gesamtlasten aller Bauprodukte bei der Außenwand. Auch bei einer reinen Betrachtung der Dämmstoffe weist Steinwolle den höchsten Anteil (80 %) der Systemlasten auf. Der eigentliche tragende Baustoff Konstruktionsholz macht nur einen sehr geringen Anteil an den Systemlasten aus.

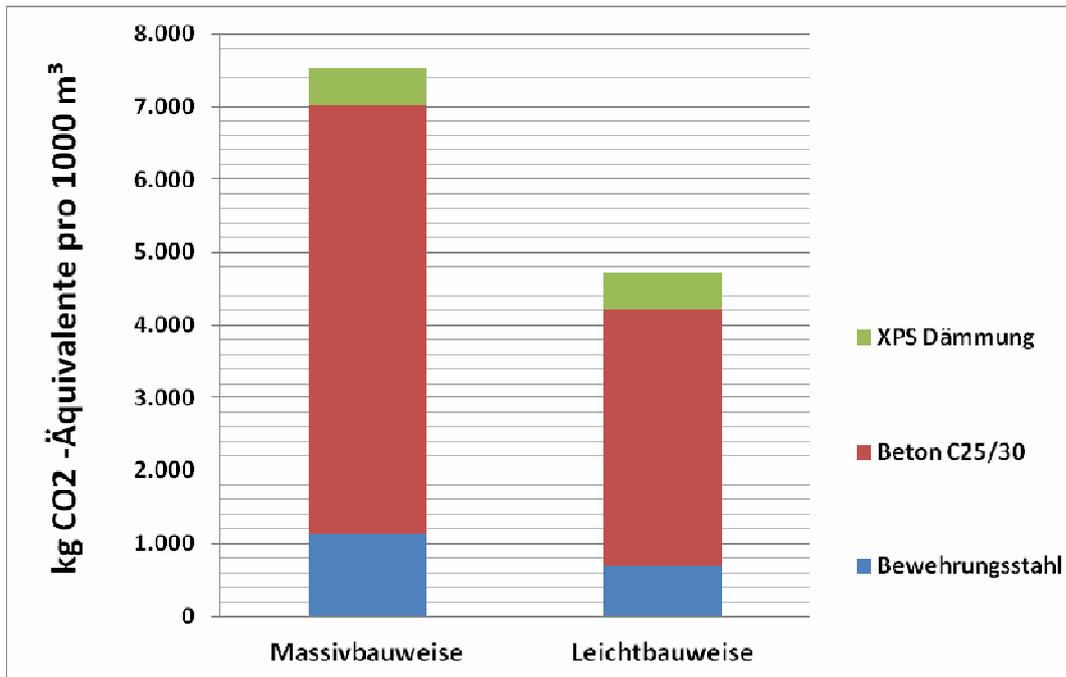


Abb. 36: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Klimawandel“ für die Bodenplatten beider Bauweisen

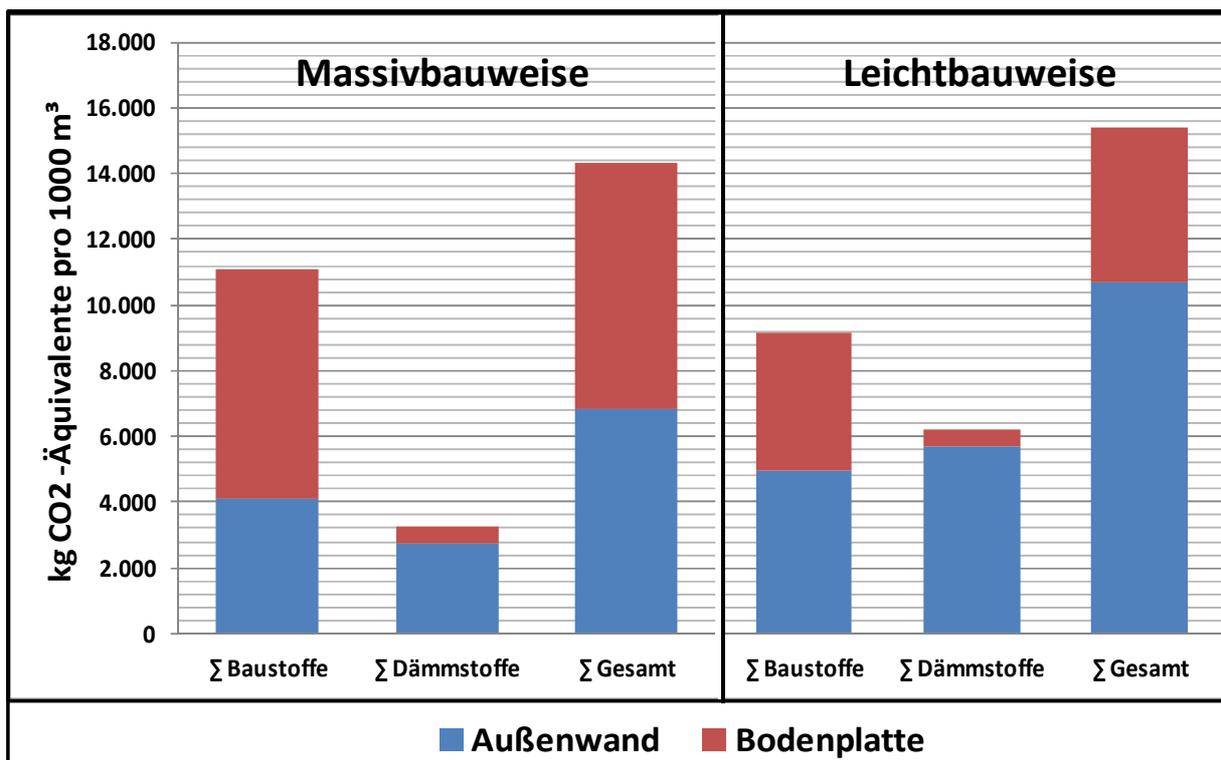


Abb. 37: Kumulierte Ergebnisse der Wirkungskategorie „Klimawandel“ beider Bauweisen

In der Wirkungskategorie Klimawandel (Treibhauseffekt) schneidet die Leichtbauweise leicht schlechter ab als die Massivbauweise. Dies kann verschiedene Gründe haben.

Die Wirkungskategorie Klimawandel hängt von den -bei der Herstellung der Bauprodukte – freigesetzten klimaschädlichen Gasen ab. Diese sogenannten Treibhausgase entstehen vornehmlich bei der Bereitstellung von fossiler Primärenergie, welche bei den Herstellungsprozessen für die Bauprodukte benötigt wird. In den meisten europäischen Ländern erfolgt z.Z. die Bereitstellung von Primärenergie immer noch zum allergrößten Anteil aus fossilen Energieträgern. Deshalb ist der Energieverbrauch bei der Herstellung der Bauprodukte einer der dominanten Faktoren für das Wirkungspotential der Kategorie Klimawandel (Treibhauseffekt).

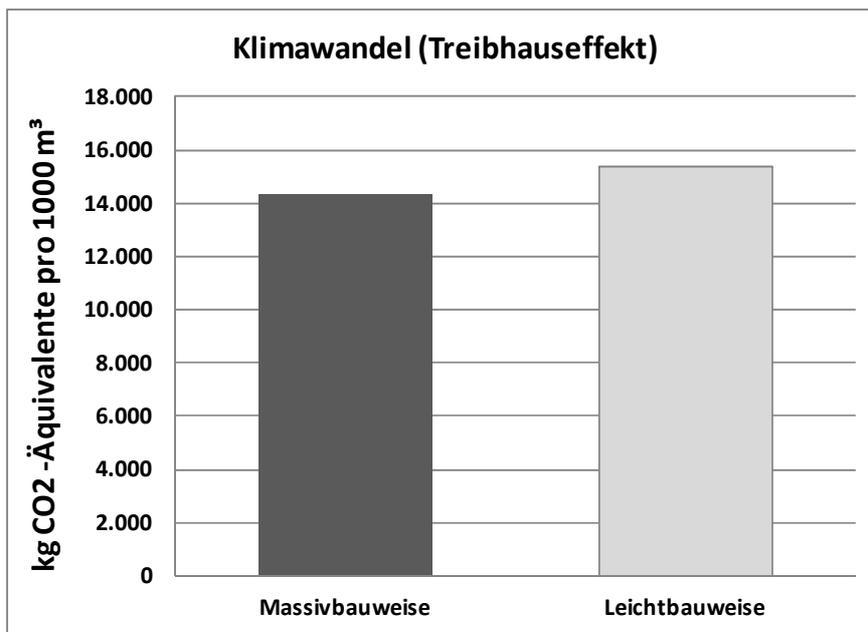


Abb. 38: Netto-Ergebnisse für die Wirkungskategorie „Klimawandel“ beider Bauweisen

In den Außenwänden der beiden Bauweisen werden unterschiedliche Bauprodukte eingesetzt, die zu unterschiedlich hohen Systemlasten führen.

Bei der Massivbauweise haben die Mauerziegel als tragende Materialien den größten Einzel-Anteil an den Systemlasten. Dies liegt sowohl an dem großen Anteil an der insgesamt verbauten Menge als auch an dem hohen Energieverbrauch bei der Herstellung der Mauerziegel. Die im WDVS verbauten Dämmstoffe haben zusammen einen vergleichbaren Anteil an den Systemlasten in der Außenwand der Massivbauweise.

Bei der Leichtbauweise werden (baulich bedingt) etwas weniger Baustoffe verbaut als in der Massivbauweise. Die gesamten Systemlast für die Außenwände in der Leichtbauweise sind jedoch ca. 1,5-mal so hoch wie die Systemlasten der Massivbauweise. Da die Mengen der Bau- und Dämmstoffe für die Außenwände der beiden Bauweisen annähernd gleich hoch sind, muss dies an den verwendeten Materialien liegen. Die Dämmstoffe in der Außenwand der Leichtbauweise benötigen für ihre Herstellung – im Vergleich – relativ hohe Energiemengen. Am deutlichsten wird dies am Beispiel des Dämmmaterials Steinwolle sichtbar. Die Herstellung des Dämmstoffes Steinwolle hat einen Bedarf an (fossiler) Primärenergie für einen m³ Material der ca. 1,4-mal so hoch ist wie für den Baustoff Mauerziegel.

In der Bodenplatte der beiden Bauweisen werden dieselben Bauprodukte mit denselben Systemlasten verwendet. Die Unterschiede in den Systemlasten müssen sich also aus den unter-

schiedlichen Mengen der eingesetzten Baustoffe ergeben. Wie bereits im Kapitel 3.1 beschrieben werden für die Bauweisen für die Funktionale Einheit von 1000 m³ umbauten Raum unterschiedliche Mengen an Bauprodukten angenommen. Die Unterschiede bei den Systemlasten für die Bodenplatten stimmen annähernd mit den Unterschieden bei den Mengen der beiden Bauweisen überein.

Bei einer Betrachtung der gesamten Systemlasten aller Bauteile der beiden Bauweisen fällt auf, dass die Systemlasten der Bodenplatte für die Massivbauweise wesentlich höher sind als die der Leichtbauweise (s. Abb. 37). Bei der Leichtbauweise dominieren dagegen die Systemlasten der Außenwände. Wie bereits beschrieben liegt dies an den unterschiedlich hohen Systemlasten aller Bau- und Dämmstoffe der beiden Bauweisen.

Bei der Massivbauweise machen die Baustoffe in Summe 75% und die Dämmstoffe in Summe 25% aller Systemlasten aus. Bei der Leichtbauweise ist das Verhältnis jedoch anders. Hier machen die Bau- und Dämmstoffe in Summe jeweils ca. 50% aus.

Versauerungspotential

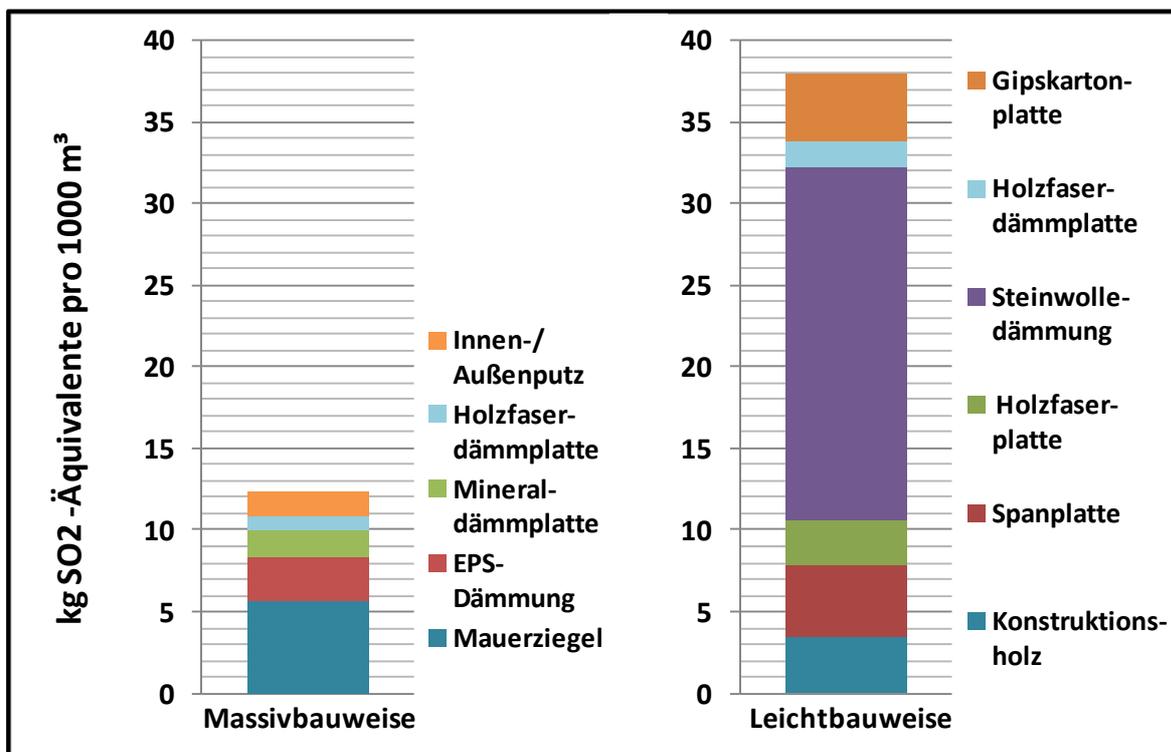


Abb. 39: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Versauerungspotential“ für die Außenwände der beiden Bauweisen

Bei der Massivbauweise hat der Baustoff Mauerziegel mit ca. 50% die höchsten Anteile an den Systemlasten für die Außenwand, die Dämmstoffe aus dem WDVS in Summe etwa 40 %. Die größten Systemlasten bei der Leichtbauweise hat die energieintensive Herstellung des Dämmstoffs „Steinwolle“ mit ca. 55 % der Gesamtlasten aller Bauprodukte bei der Außenwand. Bei einer reinen Betrachtung aller Dämmstoffe weist Steinwolle fast die gesamten (ca. 95 %) Systemlasten auf.

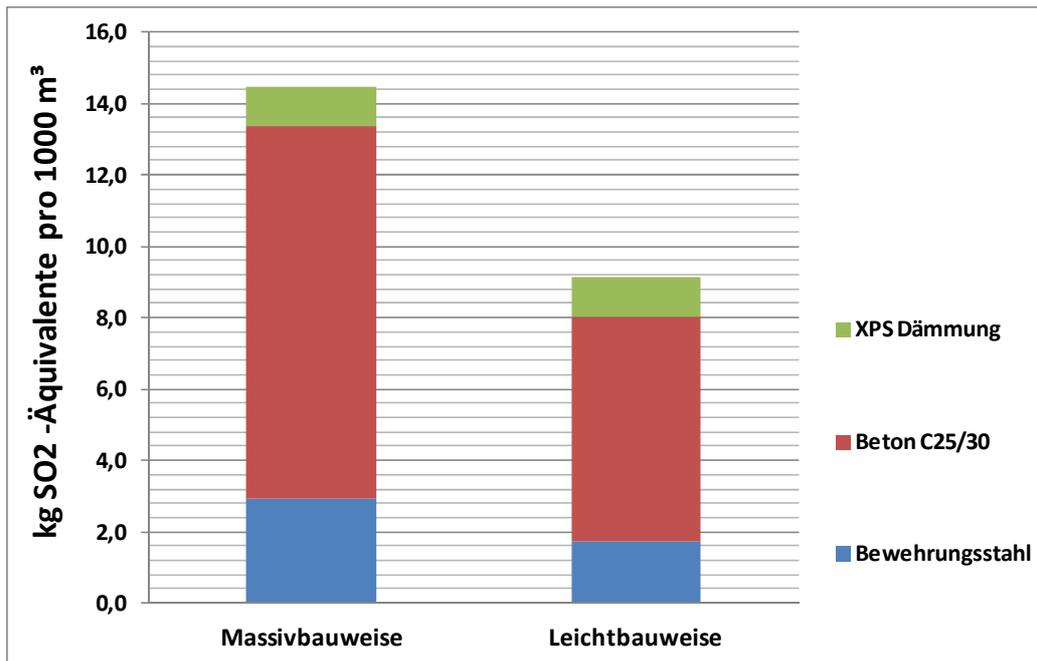


Abb. 40: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Versauerungspotential“ für die Bodenplatten beider Bauweisen

Bei beiden Bauweisen hat der Baustoff Beton die höchsten Systemlasten für die Errichtung der Bodenplatte mit ca. 70 %. Die restlichen Bauprodukte Bewehrungsstahl (ca. 20 %) sowie die Dämmung aus XPS (ca. 10 %) haben jeweils nur geringe Anteile.

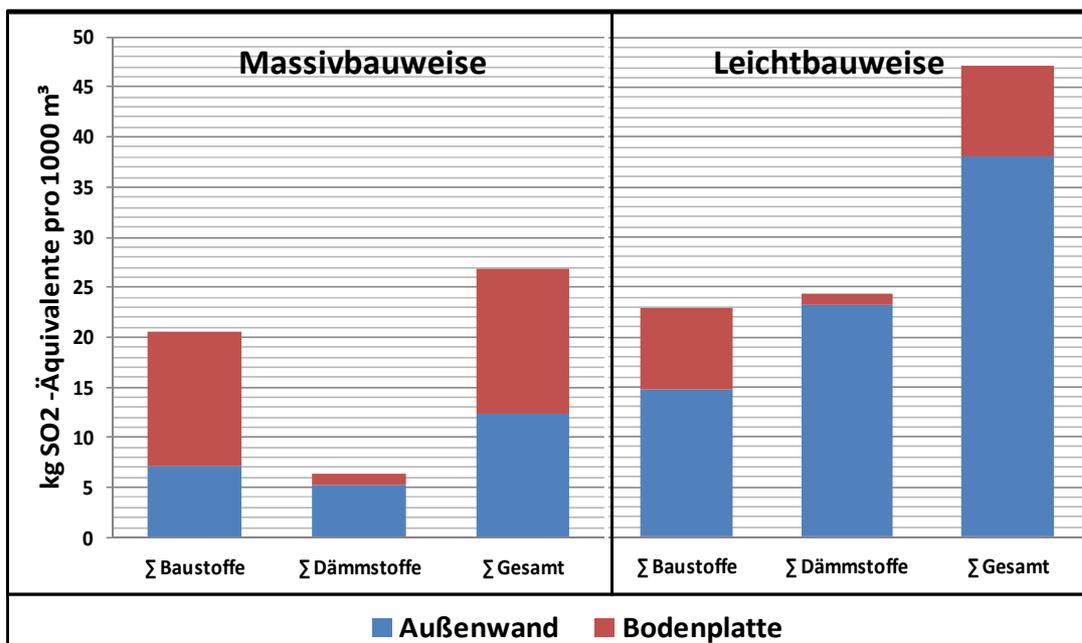


Abb. 41: Kumulierte Ergebnisse für die Wirkungskategorie „Versauerungspotential“ beider Bauweisen

In der Wirkungskategorie Versauerungspotential schneidet die Leichtbauweise deutlich schlechter ab als die Massivbauweise.

Analog zur Wirkungskategorie Klimawandel (Treibhauspotential) sind die Gründe für die unterschiedlichen Systemlasten in ähnlichen Bereichen zu finden. Die Höhe der Unterschiede in den Systemlasten von Massiv- zu Leichtbauweise ist jedoch z.T. noch wesentlich ausgeprägter als bei der Wirkungskategorie Klimawandel.

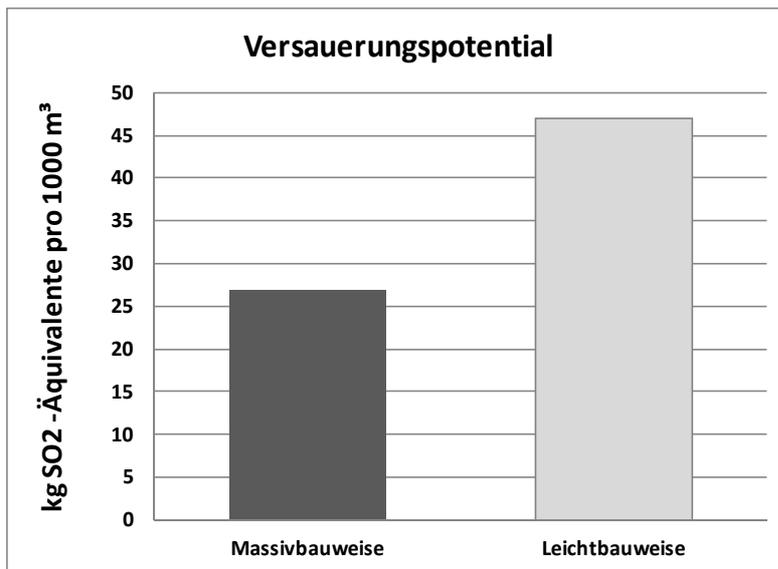


Abb. 42: Netto-Ergebnisse für die Wirkungskategorie „Versauerungspotential“ beider Bauweisen

Bei den Außenwänden der Massivbauweise haben die Mauerziegel als tragende Materialien den größten Einzel-Anteil an den Systemlasten. Wie auch bei der Wirkungskategorie Klimawandel haben die im WDVS verbauten Dämmstoffe zusammen einen vergleichbaren Anteil an den Systemlasten in der Außenwand der Massivbauweise.

Die gesamten Systemlasten für die Außenwände in der Leichtbauweise sind ca. 4,5-mal so hoch wie die Systemlasten der Massivbauweise. Die Systemlasten für die in der Leichtbauweise verwendeten Dämmstoffe haben mit über 50 % einen signifikanten Anteil an den gesamten Systemlasten der Außenwände.

In der Betrachtung der Systemlasten für Versauerungspotential kann von denselben Voraussetzungen (Art und Menge) ausgegangen werden wie bei der Wirkungskategorie Klimawandel. Deshalb muss davon ausgegangen werden, dass die Herstellung der Dämmstoffe allgemein und vor allem von Steinwolle noch größere Auswirkungen auf die Systemlasten für das Versauerungspotential haben, als dies schon beim Klimawandel der Fall ist.

Das schlechte Abschneiden der Leichtbauweise bei den Außenwänden ist vermutlich über die Art der Prozessenergiegewinnung zu erklären. Bei der Herstellung von Steinwolle wird die Prozessenergie im Unterschied zur Herstellung der anderen Dämmmaterialien zu einem großen Teil aus Steinkohle gewonnen. Mit der Verbrennung von Kohle sind versauernde Emissionen verbunden. Ebenso wird bei der Herstellung von Holzwerkstoffen oftmals Holz für die Prozessenergiebereitstellung verfeuert, womit ebenso höhere versauernde Emissionen ver-

bunden sind als mit der Erdgasverbrennung. Holzwerkstoffe kommen wiederum vor allem als Baumaterialien im Leichtbau zum Einsatz.

Wie auch bei der Betrachtung der Systemlasten des Klimawandels für die Bodenplatte ergeben sich die Unterschiede für die Systemlasten aus den unterschiedlichen Mengen der Bauprodukte. Die Verhältnisse der Systemlasten zwischen Massiv- und Leichtbau sind bei der Bodenplatte annähernd analog zum Klimawandel.

Eine Prüfung der kumulierten Ergebnisse für die Wirkungskategorie Versauerungspotential zeigt ein ähnliches Bild wie beim Klimawandel. Beim Massivbau sind die Systemlasten der Bodenplatte und der Außenwände annähernd ausgeglichen. Es dominieren jedoch in Summe die Baustoffe die gesamten Systemlasten. Beim Leichtbau sind dagegen die Außenwände der Hauptgrund für die gesamten Systemlasten. Die Systemlasten aller Dämmstoffe und aller Baustoffe sind hier annähernd ausgeglichen.

Da in beiden Wirkungskategorien die Dämmstoffe (u.v.a. die Steinwolle) bei der Leichtbauweise einen so großen Anteil an den gesamten Systemlasten haben, lohnt sich hier eine genauere Betrachtung.

Nachfolgend soll durch eine Sensitivitätsanalyse bei der Leichtbauweise die Höhe der Auswirkungen des Dämmstoffes Steinwolle auf die gesamten Systemlasten untersucht werden.

Sensitivitätsanalyse „Dämmstoff Steinwolle“

Bei der Sensitivitätsanalyse wird angenommen, dass der Dämmstoff Steinwolle durch expandiertes Polystyrol (EPS) ausgetauscht wird. EPS hat im Gegensatz zu Steinwolle eine wesentlich geringere Dichte. Zur Vereinfachung des Vergleichs wurde angenommen, dass dieselbe Menge an EPS-Dämmstoffen wie für Steinwolle verwendet wird. Für den Dämmstoff EPS wurde derselbe Datensatz wie bei der Massivbauweise verwendet.

Der Vergleich der Ergebnisse der Außenwand der Leichtbauweise zeigt eine deutliche Verminderung der Systemlasten. Die Systemlasten des Dämmstoffes in den Gefachen des (Leicht-)Holzrahmenbaus ändern sich durch den Wechsel von Steinwolle auf EPS bei beiden Umweltwirkungskategorien.

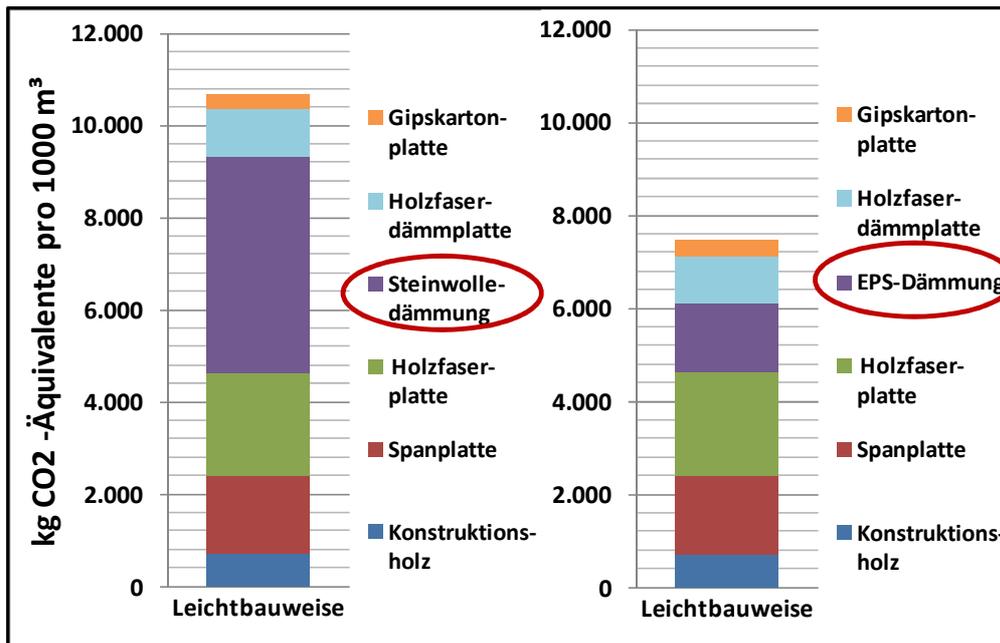


Abb. 43: Ergebnisse für Klimawandel der Außenwand bei verschiedenen Dämmstoffarten

Das gesamte Ergebnis für die Bewertung der Bauweisen in der Wirkungskategorie Klimawandel verändert sich. Die gesamten Systemlasten für alle Bauteile der Leichtbauweise reduzieren sich um ca. 20%. Damit hat die Leichtbauweise – anders als in der ursprünglichen Betrachtung - in der Sensitivität geringere Systemlasten als die Massivbauweise.

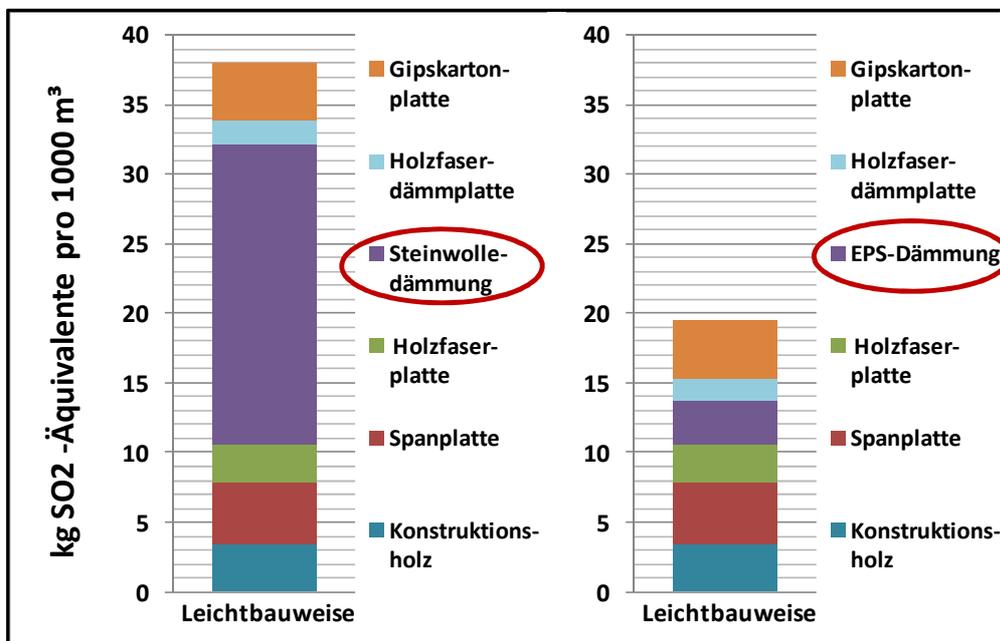


Abb. 44: Ergebnisse für Versauerungspotential der Außenwand bei verschiedenen Dämmstoffarten

Wie auch bei der Wirkungskategorie Klimawandel reduzieren sich für das Versauerungspotential die Systemlasten durch einen Wechsel der Dämmstoffart in den Außenwänden deutlich. Die gesamten Systemlasten für alle Bauteile der Leichtbauweise reduzieren sich um ca. 40%.

Im Gegensatz zum Klimawandel verändert sich jedoch in der Sensitivität nicht das gesamte Ergebnis für die Bewertung in der Wirkungskategorie Versauerungskategorie. Die Leichtbauweise weist – wie auch in der ursprünglichen Betrachtung – in der Wirkungskategorie Versauerungspotential (leicht) höhere Systemlasten als die Massivbauweise auf.

Zusammenfassung

Der „ökologische Rucksack“ für die beiden Bauweisen (mit gleichen Energiestandards und gleicher Gebäudegröße) ist unterschiedlich hoch ausgeprägt.

Die berechneten und bewerteten Ergebnisse der beiden Bauweisen für die Wirkungskategorien hängen dabei u.a. von zwei wesentlichen Faktoren ab:

- An erster Stelle den angenommenen Bau- und Dämmstoffe der beiden Bauweisen und
- an zweiter Stelle den aus den unterschiedlichen Bauweisen resultierenden Mengen.

Die Auswahl der berechneten und bewerteten Bau- und Dämmstoffmaterialien erfolgte aufgrund der Recherche der Projektpartner zum Status Quo der KlimaHäuser in Bozen. Diese Auswahl ist zwar nur eine von vielen Möglichkeiten einer Zusammensetzung der Materialien, bildet jedoch aufgrund der vorhandenen Datenlage eine möglichst gute Näherung an die Realität in Bozen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der durchgeführten Sensitivitätsanalyse zum Dämmstoff Steinwolle wichtig.

Die Leichtbauweise hat in beiden Wirkungskategorien zumindest gleiche oder höhere Systemlasten als die Massivbauweise und hat somit insgesamt ein schlechteres Ergebnis.

In der Wirkungskategorie Versauerungspotential sind die Systemlasten der Leichtbauweise jedoch deutlich höher als die der Massivbauweise (s.Abb. 43). Dies gilt weniger für die Wirkungskategorie Klimawandel (Treibhauseffekt).

Es wären immer auch andere Szenarien mit Materialzusammensetzungen denkbar, welche dann andere Ergebnisse für den ökologischen Rucksack der Bauweisen zeigen würden. Um eventuelle Unstimmigkeiten bei der Datenerhebung auszuschließen, wurden zum Abgleich der Materialzusammensetzungen Anfragen an Verbände bzw. Hersteller durchgeführt. Bei diesen wurde u.a. auch der hohe Marktanteil von Mineralfaserdämmstoffen (Stein- /Glaswolle) bestätigt. Zudem wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Die Auswertung der Sensitivitätsanalyse (EPS anstatt Steinwolle) kommt insgesamt zu einem anderen Ergebnis. Die Systemlasten in der Wirkungskategorie Klimawandel sind hier für die Massivbauweise höher als für die Leichtbauweise. Die Systemlasten der Wirkungskategorie Versauerungspotential sind in etwa gleich hoch.

4 *Fazit*

Der selektive Rückbau von Gebäuden hat eine zentrale Bedeutung. Nur eine Auftrennung der Materialströme bereits ab der Baustelle und hier vor allem eine Auftrennung in mineralische und nicht-mineralische Baustoffe sind für die weitere Verwertung unabdingbar. Verbundbaustoffe, die dies nicht ermöglichen, sollten daher auch in Zukunft möglichst nicht verwendet werden.

Am unproblematischsten für die Verwertung zeigt sich die konventionelle Bauweise, ergänzt um ein WDVS. Dieses lässt sich beim Rückbau des Gebäudes entfernen, so dass auch weiterhin ein weitgehend sauberer Materialstrom in Bauschuttzubereitungsanlagen verwertet werden kann. Trotzdem sollten generell Leichtstoffabscheider eingeführt werden.

Nicht weniger problematisch könnte auch der Rückbau eines Gebäudes in Leichtbauweise erfolgen, sofern die aufgehenden Wände inklusive der Wärmedämmung möglichst nicht aus einem Materialmix hergestellt wurden, sondern ins besonders aus Holz bzw. Holzbaustoffen.

Sollte für die Wärmedämmung auf andere Stoffe zurückgegriffen werden, sind diese vor dem eigentlichen Rückbau aus den Gefachen des Gebäudes zu entnehmen, wobei wegen der höheren Umweltlasten aus der Herstellung eher auf nicht-mineralische Dämmstoffe (bspw. EPS) anstatt Steinwolle zurückgegriffen werden sollte.

Werden diese Randbedingungen beachtet, kann die Leichtbauweise aus gesamtökologischer Sicht vorteilhaft sein.

Werden mineralische Dämmmaterialien in einem Materialkreislauf gehalten und damit Ressourcen geschont, gelingt dies für die Leichtbaustoffe und hierbei auch für das Holz nicht. Eine stoffliche Verwertung ist zumindest heute noch nicht ungleich, es handelt sich um ein offenes Verwertungssystem. Angesichts der langen Lebenszeit eines Gebäudes, ist dies jedoch weit weniger gravierend als die direkte energetische Nutzung von Holz.

Eine wichtige Randbedingung für den ökologischen Vergleich der beiden Gebäudetypen war die für beide angenommene gleiche Lebenszeit, über die üblichen Garantie- und Abschreibzeiten hinaus. Inwieweit dies für Fertighäuser zutrifft, wird erst die Zukunft zeigen.

II Solartechnik

Die Problematik der Entsorgung

5 *Situationsaufnahme Solartechnik*

5.1. *Hintergrund*

In Südtirol variiert die von der Sonne eingestrahlte Energiemenge je nach Lage zwischen 1.100 und 1.900 kWh pro Jahr und Quadratmeter; im Vergleich dazu beträgt die durchschnittliche Sonneneinstrahlung in Deutschland 900 – 1.200 kWh. Die folgende Abbildung zeigt die Sonneneinstrahlungswerte in Südtirol.

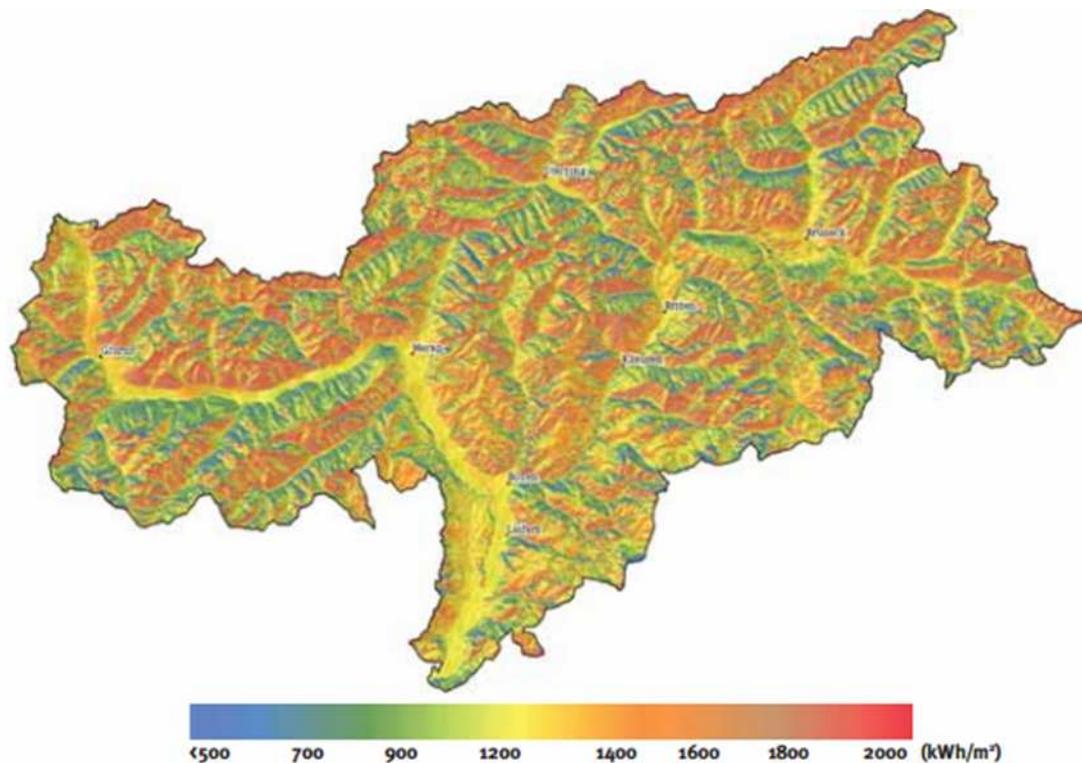


Abb. 45: Sonneneinstrahlung in Südtirol (Quelle: Hydrologis Bozen – www.hydrologis.eu)

Vor diesem Hintergrund des hohen solaren Potenzials gab es in Südtirol bereits seit dem Jahre 1990 von Seiten der Provinz eine Investitionsförderung beim Ankauf von PV-Modulen. Diese wurde mit dem Jahre 2005 auf Förderung von Inselösungen ohne Netzanschluss beschränkt. Die Förderungen wurden vom Amt für Energieeinsparung der Landesumweltagentur ausbezahlt und verwaltet.

Ab dem Jahr 2005 gibt es von staatlicher Seite eine Vergütung bei der Einspeisung von elektrischer Energie durch PV-Paneele in das öffentliche Stromnetz. Diese Vergütung wird für den Zeitraum von 20 Jahren garantiert. Die Höhe der Vergütung reduziert sich derzeit halbjährlich.

Solarthermie-Anlagen haben aufgrund des vergleichsweise einfachen technischen Prinzips in Südtirol schon seit längerer Zeit eine größere Verbreitung gefunden. Die Sonnenstrahlen, die die Kollektorflächen treffen, geben ihre Wärme an eine Wärmeträger-Flüssigkeit ab, die mittels Umwälzpumpe in den Wärmespeicher der Heizanlage eines Gebäudes geführt wird. Die Wärmeübertragung im Speicher erfolgt über einen Wärmetauscher. Die Solaranlage kann neben der Warmwassererzeugung auch zur Unterstützung der Heizungsanlage dienen.

5.2. Strom aus Sonnenenergie

5.2.1 Entwicklung der installierten Leistung

Als Photovoltaik bezeichnet man die direkte Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Die Umwandlung geschieht in Solarzellen, den wichtigsten Elementen einer PV-Anlage. Der Umwandlungsvorgang beruht auf dem Photoeffekt. Unter dem Photoeffekt versteht man die Freisetzung von positiven und negativen Ladungsträgern in einem Festkörper durch Lichteinstrahlung. Solarzellen bestehen aus Halbleitermaterialien. Halbleiter sind Stoffe, die unter Zufuhr von Licht oder Wärme elektrisch leitfähig werden.

Zur Herstellung einer Solarzelle wird das Halbleitermaterial "dotiert". Damit ist das definierte Einbringen von chemischen Elementen gemeint, mit denen man entweder einen positiven (p-leitende Halbleiterschicht) oder einen negativen Ladungsträgerüberschuss (n-leitende Halbleiterschicht) im Halbleitermaterial erzielen kann.

Werden zwei unterschiedlich dotierte Halbleiterschichten gebildet, entsteht an der Grenzschicht ein sogenannter p-n-Übergang. An diesem Übergang baut sich ein inneres elektrisches Feld auf, das zu einer Ladungstrennung der bei Lichteinfall freigesetzten Ladungsträger führt. Über Metallkontakte kann eine elektrische Spannung abgegriffen werden. Wird der äußere Kreis geschlossen, das heißt ein elektrischer Verbraucher angeschlossen, fließt ein Gleichstrom.

Die PV-Industrie hat in den letzten Jahren weltweit ein enormes Wachstum erfahren. Während im Jahr 2000 noch 1.000 MW installiert waren, so waren es im Jahr 2008 16.000 MW und 67.000 MW im Jahr 2011 (Quaschnig 2012). In Südtirol gibt es PV-Paneele mit einer installierten elektrischen Leistung von rund 180.000 kWp respektive 180 MW. Insgesamt bedecken die PV-Module eine Fläche von etwa 1,6 km² und liefern jährlich elektrische Energie in der Höhe von ca. 170 Mio. kWh.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung der installierten PV-Module in Südtirol in Hinsicht auf die Kollektorfläche. Die Tabelle zeigt auch die produzierte Energie in kWh pro Jahr, wobei davon ausgegangen wurde, dass 1 kWp installierte Module 950 kWh Strom pro Jahr produziert.

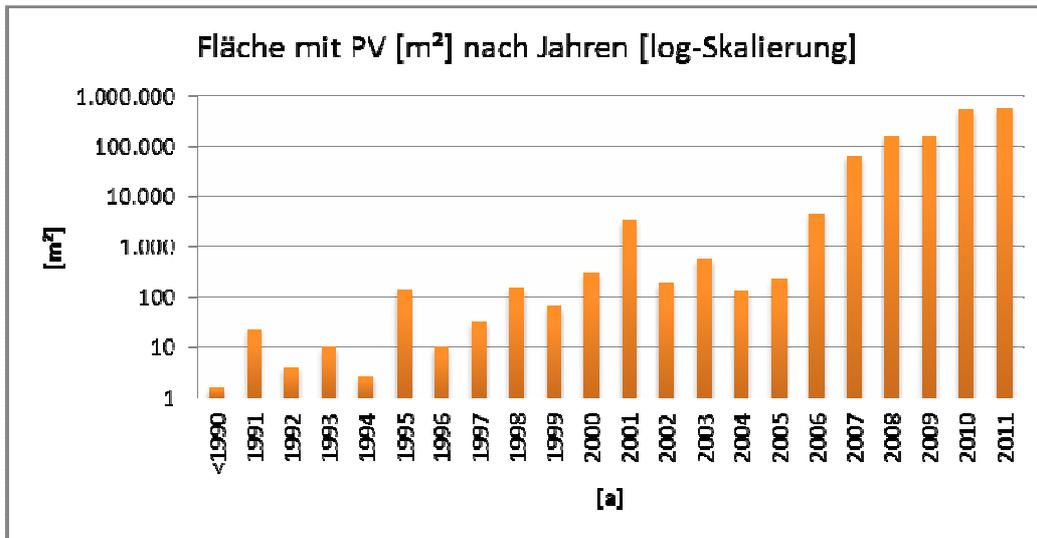


Abb. 46: Fläche der installierten PV-Paneele (in m²) nach Jahren (log-Skalierung)

Tab 14: Zeitliche Entwicklung von Leistung, Fläche der Solarmodule und erzeugter elektrischer Energie

Jahr	Leistung [kW _p]	Fläche [m²]	Energie [kWh/a]
<1990	0,2	1,6	190
1991	3	23	2.755
1992	0,6	4	570
1993	1,5	10	1.425
1994	0,4	2,7	380
1995	20	148	18.525
1996	1,5	10	1.398
1997	5	33	4.556
1998	20	157	19.159
1999	8	65	7.454
2000	36	301	33.783
2001	402	3.355	381.983
2002	21	187	19.701
2003	70	589	66.159
2004	18	138	17.214
2005	28	221	26.324
2006	525	4.724	498.669
2007	7.166	64.491	6.807.396
2008	17.655	158.893	16.772.050
2009	18.687	158.836	17.752.287
2010	65.145	553.730	61.887.463
2011	9.537	591.064	66.060.046
SUMME	179.347	1.536.984	170.379.486

5.2.2 Modul-Typen und ihre Bedeutung in Südtirol

Die Materialzusammensetzung von PV-Modulen hat sich im Laufe des letzten Jahrzehnts nicht sonderlich stark geändert. Aufgrund des anhaltenden starken Marktwachstums und dem hohem Druck, die Preise der Module zu senken, kann man jedoch davon ausgehen, dass sich jene Technologien durchsetzen werden, welche eine Massenfertigung bei sparsamen Materialeinsatz erlauben. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen kristallinen Modulen und Dünnschichtmodulen.

Bei kristallinen PV-Modulen kommen Silizium-Zellen als Halbleiter zum Einsatz. Bei Dünnschichtmodulen hingegen werden amorphes Silizium, Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) als Halbleiter eingesetzt. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Modultechnologien besteht darin, dass bei Dünnschichtmodulen keine Zellen die kleinste stromproduzierende Einheit bilden, sondern eine dünne Schicht des Halbleitermaterials, welches flächig auf ein Trägermaterial aufgetragen wird (Sander, 2007).

In Südtirol verzeichnete die Dünnschichtzellen-Technik in den Jahren 2008 und 2009 einen leichten Aufschwung (7-8% Marktanteil), doch konnte sich dieser Trend seit 2010 nicht mehr bestätigen (4%). Der prozentuelle Anteil an installierten Dünnschichtmodulen liegt somit bei ca. 6,5% aller PV-Module (entspricht ca. 11.120 kWp), wie folgende Abbildung zeigt.

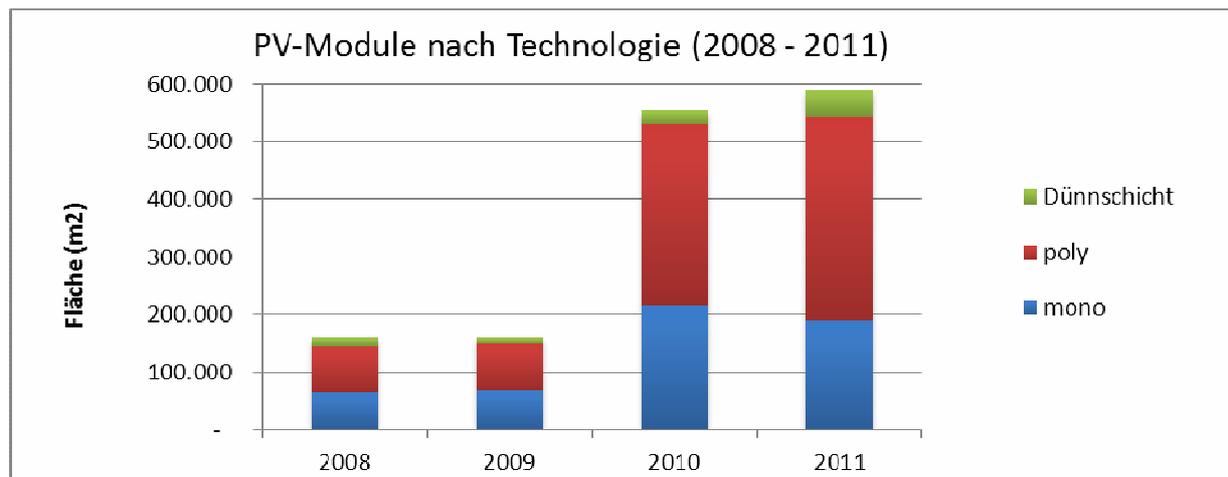


Abb. 47: Installierte PV-Fläche in Südtirol nach Technologie und Jahr

Von den insgesamt installierten 180 MW Photovoltaikmodulen sind 93,5% kristalline Siliziumzellen (168.300 kW) und 6,5% (11.700 kW) sind Dünnschichtmodule. Die in Südtirol installierten Dünnschichtmodule bestehen, Aussagen lokaler Händler von PV-Anlagen zufolge, zum Großteil aus der CdTe-Technologie (s.u.) von First Solar.

Kristalline Siliziumsolarzellen

Kristalline Siliziumsolarzellen haben derzeit in Südtirol einen Marktanteil von über 90% - weltweit ist der Anteil im Verhältnis zu den Dünnschichtmodulen etwas geringer. Es kann unterschieden werden zwischen monokristallinen und polykristallinen Solarzellen. Die monokristal-

linen Siliziumzellen bestehen aus einem durchgehenden Kristall, während die polykristallinen aus vielen kleinen Kristallen mit unterschiedlicher Orientierung bestehen. Die Herstellung polykristalliner Zellen ist günstiger, allerdings ist auch der Wirkungsgrad mit 13% im Vergleich zu 15% bei den monokristallinen etwas geringer (Sander, 2007).

In Südtirol halten sich monokristalline und polykristalline Solarzellen in etwa in Waage, wobei in den letzten Jahren mehr polykristalline Zellen installiert wurden und somit der Gesamtanteil polykristalliner Zellen ca. bei 60% liegt und jener monokristalliner Zellen ca. bei 40%.

Dünnschichtzellen

Dünnschichtzellen besitzen entweder amorphes Silizium oder andere Verbindungshalbleiter. Der schematische Aufbau von Dünnschichtzellen unterscheidet sich von Typ zu Typ nur im Detail. Es werden zwei Elektroden (meist Indium, Zinn Oxid und Aluminium), eine Lochleiterschicht und eine Lockblockerschicht (Puffer), das Absorbermaterial bzw. der Verbindungshalbleiter und ein Trägermaterial (meistens Glas) verwendet.

Da bei der Produktion von Dünnschichtmodulen bedeutend weniger Energie verbraucht wird, sind sie bedeutend kosteneffizienter. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Flexibilität der Zellen, so dass sie oft als Designelement oder als Sonnenschutz etc. eingesetzt werden. Möglicherweise werden Dünnschichtzellen trotz des geringeren Wirkungsgrades aufgrund der v.a. Kostenvorteile zukünftig einen größeren Marktanteil einnehmen.

Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium (a-Si)

Das amorphe Silizium besteht aus einer Mischphase aus Wasserstoff und Silizium und ist in der Herstellung sehr günstig. Allerdings weisen amorphe Siliziumzellen auch einen sehr niedrigen Wirkungsgrad von maximal 9% auf und eine im Vergleich zu kristallinen Zellen geringe Lebensdauer. Der Vorteil von Dünnschichtzellen aus amorphen Silizium liegt darin, dass sie aus ökologisch unbedenklichem Material bestehen. Im Vergleich zu kristallinem Silizium hat amorphes Silizium eine relativ ungeordnete Struktur, wodurch sich der geringere Herstellungsaufwand erklärt.

Dünnschichtzellen mit anderen Verbindungshalbleitern

Als Verbindungshalbleiter werden entweder Kupfer-Indium-Diselenid (CIS), Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) oder Cadmium-Tellurid (CdTe) eingesetzt. Als Trägermaterial, auf welches die Dünnschicht aufgetragen wird, wird Glas verwendet.

Die Funktionsweise von CIS-Zellen (bzw. CIGS-Zellen, wobei das „G“ für Gallium steht), ist zwar noch nicht vollkommen geklärt, werden aber dennoch als vielversprechend eingeschätzt. Im Labor erreichen sie einen Wirkungsgrad von 20%, in der Praxis ca. 10 – 12 %.

CdTe-Zellen werden hauptsächlich von der US-amerikanischen Firma First Solar produziert, und zwar zu verhältnismäßig für die westliche Welt geringen Produktionskosten. Der große Nachteil besteht in der Verwendung der stark umweltbelastenden Substanz Cadmium. Der Wirkungsgrad beträgt ca. 9 %.

5.3. Wärme aus Sonnenenergie

5.3.1 Entwicklung der installierten Leistung

Nach Auswertung der Datensätze des Amtes für Energieeinsparung der Provinz wurden bis Ende 2011 in Summe 18.716 Solarthermie-Anlagen in Südtirol errichtet, für die eine Förderung beantragt wurde. Die Förderung begann bereits im Jahre 1983, so dass bis 1990 knapp 850 Anlagen mit einer Kollektorfläche von etwa 8.000 m² errichtet wurden. Das Amt für Energieeinsparung berücksichtigt diese Anlagen nicht mehr bei der Berechnung der Energieeinsparung und unterstellt, dass einige dieser Anlagen nicht mehr funktionsfähig sind. Möglicherweise sind bereits einige dieser Anlagen abgebaut oder ausgetauscht worden.

Tab 15: Status Quo der Solarthermie in der Provinz Bozen

Anzahl der Anlagen	Kollektorfläche	Energieeinsparung
18.716	206.860 m ²	119.400 MWh/a

Wurden danach bis Mitte der 90er Jahre etwa 6.000 m² Kollektorfläche pro Jahr errichtet, veränderte sich die Situation danach deutlich. Die Jahre 1997, 1998 und 1999 zeigten Zuwächse von etwa 15.000 m² pro Jahr und mit dem Jahr 2000 einen Spitzenwert von 23.000 m². Danach reduzierten sich diese Flächenzuwächse von knapp 10.000 m² bis aktuell etwa 4.000 m². Die Jahre 2007 und 2008 waren mit etwa 15.000 m² bzw. 16.000 m² wiederum Ausnahmehahre.

Diese Schwankungen sind aus unterschiedlichen Fördersätzen zu erklären. Mit dem Jahre 2010 wurden die Kriterien zur Energieförderung (Amt für Energieeinsparung Provinz Bozen 2010) sowie die Fördersätze neu geregelt, so dass sich für die Bauherren ein Vorziehen der Investitionen anbot.

5.3.2 Kollektor-Typen und ihre Bedeutung in Südtirol

Zur Wärmeerzeugung werden für kleine im Hausbau typische Anlage zwei Kollektor-Typen unterschieden, Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren.

Flachkollektoren

Bei Flachkollektoren erwärmt die Sonne direkt eine flache wärmeabsorbierende Fläche, die mit Röhren durchzogen ist, in denen sich das Wärmeträgermedium befindet. Heute werden Absorber aus Kupfer aber auch Aluminium verwendet. Dem Wasser wird zu 40% Propylenglykol beigemischt, um einen ausreichenden Frostschutz sowie Siedetemperaturen von 150°C und mehr gewährleisten zu können. Nach der Marktanalyse von IZT (IZT 2009) wird gelegentlich auch das giftigere Ethylenglykol verwendet.

Vakuurröhrenkollektoren

Vakuurröhrenkollektoren bestehen aus zwei konzentrisch ineinander gebauten Glasröhren, die sich in einem Vakuum befinden, so dass eine Übertragung der Strahlungsenergie der Sonne auf den Absorber weitgehend ohne Wärmeverlust zulässt. In der Regel wird hier ebenfalls ein Wasser-Glykol-Gemisch als Wärmeträger verwendet. Es gibt auch sogenannte „offene Systeme“, die Wasser direkt erhitzen. Diese Kollektoren werden von manchen Anbietern mit Reflektoren ausgestattet, die die Strahlung der Sonne auf das Rohr konzentrieren. Die Reflektoren müssen jedoch hierfür regelmäßig gereinigt werden.

Vakuurröhrenkollektoren sind zwar effizienter, aber in der Anschaffung teurer. Entsprechend haben sie in Europa nur einen Marktanteil von etwa 10%. Dies konnte auch für die Provinz Bozen festgestellt werden, auch wenn hierfür keine statistischen Angaben vorliegen.

Im Rahmen des Projektes wurden knapp 20 Installationsfirmen bzw. Händler der Kollektoren nach den Verkaufsanteilen in ihrem Betrieb befragt. Vakuurröhrenkollektoren erreichen nur in wenigen Betrieben Marktanteile von 20 oder mehr Prozent. In aller Regel liegen die Marktanteile bei 10% und deutlich darunter. Einige Firmen benennen ausschließlich Flachkollektoren. Auch wenn keine Gewichtung nach den unterschiedlichen Absatzzahlen vorgenommen werden konnte, erscheint der durchschnittliche Anteil von 11% angesichts der Zahlen für Europa plausibel.

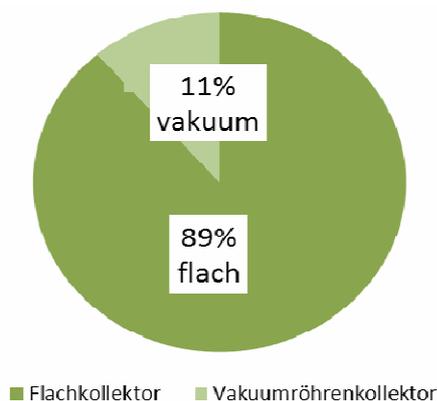


Abb. 48: Kollektortypen in Südtirol

5.4. Prognose der zeitlichen Entwicklung des Abfallaufkommens

Die Lebensdauer von PV-Modulen wird ca. auf 25 Jahre geschätzt, wobei angenommen wird, dass die Leistungsfähigkeit abnimmt und am Ende der Lebensdauer 80% der zu Beginn produzierten Energie erzeugt werden. Das Abfallaufkommen aus PV-Modulen hängt mit der Menge der installierten Module zusammen. Unter der Annahme einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 Jahren ergibt sich somit das in folgender Abbildung ersichtliche Abfallaufkommen (in MW).

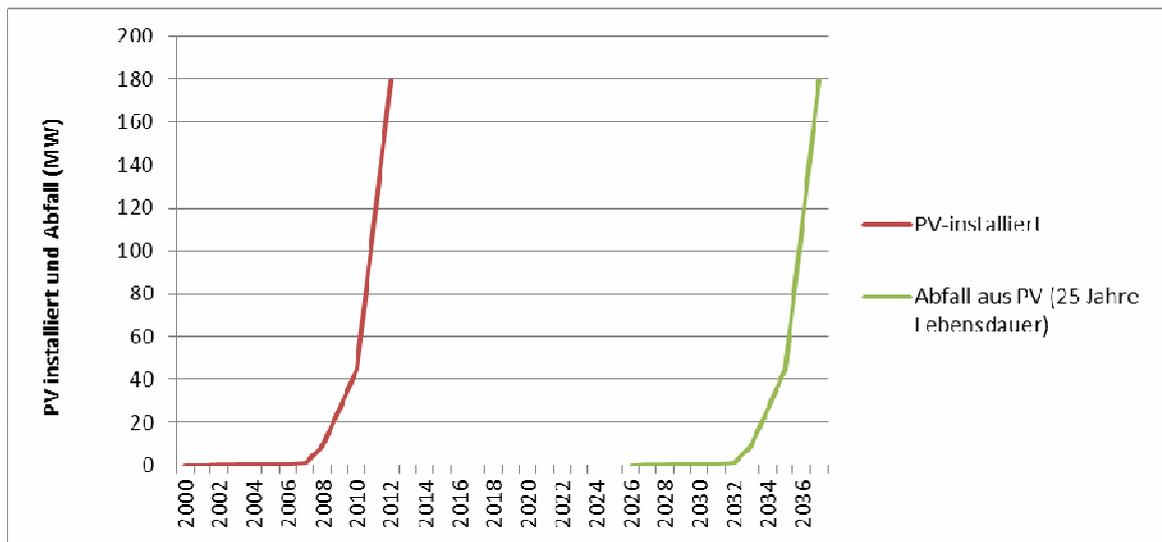


Abb. 49: Prognose der Entwicklung des Abfallaufkommens für Fotovoltaik-Module (in MW)

Die Abbildung zeigt deutlich, dass große Abfallmengen von PV-Altmodulen erst in ca. 20 Jahren zu entsorgen sein werden – dann jedoch sehr viele auf einmal. Bereits heute werden erste Anlagen rückgebaut und über das Aufbereitungssystem PV Cycle entsorgt, wobei es sich um Kleinstmengen handelt und auch in naher Zukunft handeln wird.

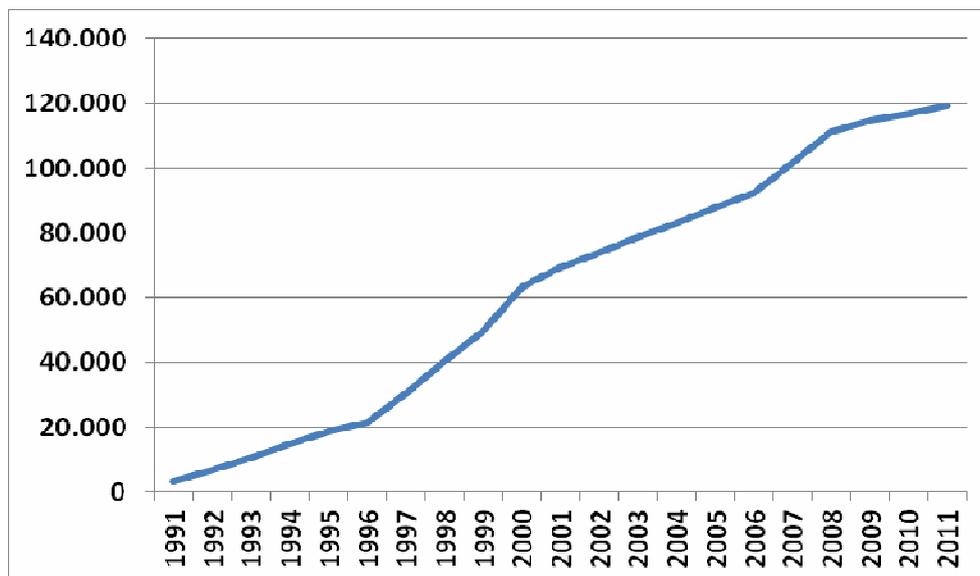


Abb. 50: In Südtirol installierte MW für Solarthermie-Anlagen (kumuliert)

Wie man aus der Entwicklung der installierten Solarthermie-Anlagen über die letzten Jahre erkennen kann, verlief diese deutlich gleichmäßiger als die der PV-Anlagen und dürfte, nimmt man auch hier eine Lebenszeit von 20 bis 25 Jahren an, schon in den nächsten Jahren zu einem spürbaren Abfallaufkommen führen. Entsprechend wichtig ist es gerade für diese Anlagen, sich frühzeitig um Entsorgungsmöglichkeiten zu bemühen, die dem Potenzial der Altmodule angemessen sind.

6 Entsorgungsmöglichkeit für Solartechnik

6.1. Materialeinsatz bei PV-Modulen

Die genaue Zusammensetzung der Modul- und Paneeltypen hängt vom jeweiligen Hersteller ab. Nachfolgend können deshalb nur Durchschnittswerte oder Abschätzungen angegeben werden.

Kristalline Siliziumsolarzellen

Kristalline Siliziumzellen setzen sich aus den folgenden wesentlichen Bestandteilen zusammen:

- 3 - 4 mm dicke Solarglasscheibe (meist gehärtet, besonders lichtdurchlässiges Weißglas)
- EVA (Ethylenvinylacetat): Folie als Verbundmaterial zum Einbetten der Solarzellen
- Solarzellen aus mono-oder polykristallinem Silizium, durch Leiterbahnen miteinander verbunden und verschaltet
- Rückseitenfolie „TEDLAR“ (Polyvinyl fluoride film, registrierter Handelsname von DuPont): besonders strapazierfähige Folie, die einen Verbund aus Tedlar und Polyester darstellt
- Kontaktdose: Elektrische Anschlussdose aus Kunststoff und Metallen, von der aus der erzeugte Strom weiter geleitet werden kann
- Rahmen (meist aus Aluminium)

Tab 16: Zusammensetzung kristalliner Siliziumzellen (c-Si) (Quelle: Ökopol 2004; Hahne 2010)

Stoffe	Anteil in %	kg/kW _p
Glas	74	77,3
Aluminium	10	10,7
Silizium	3	3,6
Rückseitenfolie (TEDLAR*)	3,6	3,8
Polymer (EVA*)	6,5	6,8
Kleber, Vergussmasse	1,2	1,2
Zink	0,12	
Blei	<0,1	
Kupfer	0,6	
Silber	<0,01	
SUMME		103,40

Tab 17: Abschätzung der Abfallstoffströme für kristalline Siliziumzellen in Südtirol (c-Si)

Zusammensetzung c-Si			Installierte Leistung	anfallende Abfallströme
Stoffe	Anteil in %	kg/kW _p	kW _p	kg Abfall
Glas	74	77,3	168.300	13.009.590
Alluminium	10	10,7	168.300	1.800.810
Silizium	3	3,6	168.300	605.880
Rückseitenfolie (TEDLAR*)	3,6	3,8	168.300	639.540
Polymer (EVA*)	6,5	6,8	168.300	1.144.440
Kleber, Vergussmasse	1,2	1,2	168.300	201.960
Zink	0,12	-	168.300	-
Blei	<0,1	-	168.300	-
Kupfer	0,6	-	168.300	-
Silber	<0,01	-	168.300	-
SUMME		103,40	168.300	17.402.220

Aus der prozentuellen Materialzusammensetzung und dem Gewicht/kW kann in Verbindung mit den installierten Leistungen (168.300 kW_p) auf die Aufkommen der Abfallmaterialien geschlossen werden. Inwieweit die Abfallmassen getrennt nach den einzelnen Stoffströmen in dieser Form tatsächlich zur Entsorgung anfallen, ergibt sich aus dem zukünftigen Sammel- und Verwertungssystem.

Dünnschichtzellen

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der Materialzusammensetzung in Prozent von Dünnschichtmodulen mit amorphen Silizium, CIS und CdTe als Halbleitermaterialien. Wie bereits ausgeführt, sind Dünnschichtmodule relativ wenig verbreitet, wobei weit überwiegend CdTe-Zellen verwendet werden.

Im Vergleich zu den kristallinen Siliziumzellen ist das leistungsspezifische Gewicht der Dünnschichtmodule auf Glasbasis mit 285 kg/kW_p fast dreimal so hoch. Das Gewicht von Dünnschichtzellen könnte in Zukunft jedoch zurückgehen, wenn Module auf Folienbasis hergestellt werden.

Tab 18: Zusammensetzung von Dünnschichtmodulen (Quelle: PV Cycle 2007)

	a-Si (amorphe Siliziumzellen)	CIS (Kupfer-Indium-Diselenid-Zellen)	CdTe (Cadmium-Tellurid-Zellen)
Anteil %			
Glas	90	85	95
Aluminium	10	12	<0,01
Silizium	<0,1		
Polymere	10	6	3,5
Zink	<0,1	0,12	0,01
Blei	<0,1	<0,1	<0,01
Kupfer (Kabel)		0,85	1
Indium		0,02	
Selen		0,03	
Tellur			0,07
Cadmium			0,07
Silber			<0,01

Aus der prozentuellen Materialzusammensetzung und dem Gewicht/kW kann in Verbindung mit den installierten Leistungen (11.700 kW_p) auf die Aufkommen der Abfallmaterialien geschlossen werden. Inwieweit die Abfallmassen getrennt nach den einzelnen Stoffströmen in dieser Form tatsächlich zur Entsorgung anfallen, ergibt sich aus dem zukünftigen Sammel- und Verwertungssystem.

Tab 19: Abschätzung der Abfallstoffströme für Dünnschichtzellen (CdTe)

Zusammensetzung CdTe			Installierte Leistung	anfallende Abfallströme
Stoffe	Anteil in %	kg/kW _p	kW _p	kg Abfall
Glas	95	271,90	11.700	3.181.347
Aluminium	<0,01	0,01	11.700	117
Polymere	3,5	10,00	11.700	116.789
Zink	0,01	0,03	11.700	334
Blei	<0,01	0,01	11.700	117
Kupfer (Kabel)	1	2,85	11.700	33.368
Tellur	0,07	0,20	11.700	2.336
Cadmium	0,07	0,20	11.700	2.336
Silber	<0,01	0,01	11.700	117
SUMME		285,20	11.700	3.336.861

6.2. Materialeinsatz bei solarthermischen Kollektoren

Wie auch bei den PV-Modulen unterscheidet sich der Materialeinsatz der verschiedenen solarthermischen Kollektoren nach Hersteller und Kollektortyp. Nach [Jungbluth 2007] ist mit folgendem Materialeinsatz zu rechnen.

Generell bestehen Sonnenkollektoren aus Absorber, Abdeckung, Wärmedämmung, Rahmen und Dichtungen. Absorbermaterialien können Kupfer, Aluminium, Edelstahl oder auch Stahl sein. Glas oder Polycarbonat wird zur Abdeckung verwendet. Übliche Wärmedämmmaterialien sind Mineralfasern, Schäume oder Vakuum-Paneelen. Die Rahmen bestehen meist aus Holz oder Aluminium, die Dichtungen sind größtenteils aus EPDM-Gummi.

Zur Steigerung des Wirkungsgrades erhalten die Absorber selektive Beschichtungen. Diese haben ein gutes Absorptionsvermögen für elektromagnetische Wellen im Bereich der Solarstrahlung und einen tiefen Emissionskoeffizienten im Bereich der Wärmestrahlung. Für die Qualität der Beschichtung ist neben den oben erwähnten optischen Eigenschaften das Alterungsverhalten entscheidend. Bei den heute gebräuchlichen Kollektoren gibt es verschiedene technische Lösungen für die Beschichtung. Und zwar nasse Beschichtungsverfahren wie das Schwarzchrom Bandverfahren, das Schwarzchrom Badverfahren und Black Crystal sowie trockene Beschichtungsverfahren wie PVD (Physical Vapour Deposition), Sputtern, CVD (Chemical Vapour Deposition) und PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition). Bei Vakuumröhrenkollektoren liegen die Absorber und das Rohr für das Trägermedium in einer evakuierten Glasröhre.

Tab 20: Materialeinsatz für Kollektoren in kg/m² Aperturfläche

Einsatzart	Material	Flachkollektor		Vakuumröhrenkollektor ¹	
		Galvanik	Sputter	Galvanik	TiNOX
Absorber	Kupfer	2,83	2,1	6	5,91
Verschraubung	Messing	-	-	k.A.	0,48
Abstandshalter	Edelstahl	-	-	k.A.	0,13
Abdeckung	Glas	9,9	7,5	22	13,14
Rahmen	Aluminium	3,57	2	4	4 ²
Wärmedämmung	Mineralwolle	2,35	2	2	2
	Polystyrol	-	2	-	0,32
Dichtung der Abdeckung	EPDMA	0,83	0,3	1	k.A.
Lötmaterial	Cd-freies Hartlot	0,022	0,01	0,1	k.A.

¹ 0,03 kg Barium pro m² Absorberfläche zur Vakuumunterstützung sind nicht berücksichtigt worden.

² Datum ist übernommen worden von Vakuumröhrenkollektor mit Kupferlamellen mit Schwarzchrombeschichtung

(ETH 1997, Klöckner 2002; IZT Bericht)

Bei den vier beispielhaft aufgeführten Kollektoren handelt es sich um zwei Flachkollektoren und zwei Vakuumröhrenkollektoren, jeweils mit Lamellenabsorbern aus Kupfer. Die selektiven Absorberoberflächen sind für beide Kollektortypen jeweils einmal galvanisch per Schwarzchromverfahren und einmal per Sputterverfahren bzw. TiNOX (Sputter) beschichtet.

In der obigen Zusammenstellung der Materialien sind die Beschichtungssysteme nicht aufgeführt. Aufgrund der Schichtdicken im µm-Bereich sind sie als Masse vernachlässigbar.

Der Aufbau der Kollektoren hat sich in den letzten Jahren nicht stark verändert. Neuerungen gab es hauptsächlich bezüglich der selektiven Beschichtung der Absorberoberflächen und bezüglich der Verbindungstechnik.

Mit den Neuerungen in der selektiven Beschichtung wurde versucht, eine bessere Langlebigkeit in Verbindung mit einer Steigerung des Wirkungsgrades zu erreichen. Zugleich wurden auch potentiell gefährdende Stoffe (v.a. Chrom VI bei der galvanischen Beschichtung) in den Produktionsketten substituiert.

In der Verbindungstechnik ist ein Trend von der Löttechnologie hin zu Ultraschall-, Plasma- und Laserschweißen zu beobachten. Löt Nähte sind vergleichsweise weniger temperaturbeständig. Des Weiteren handelt es sich bei den Lötverbindungen, die zwischen Absorberblech und Absorberrohr eingesetzt werden um bleihaltige Weichlote. Blei unterliegt als toxisches Schwermetall einem grundsätzlichen Vermeidungsverbot. Auch hier wurde mit Umstellung der Verbindungstechnik ein potentiell gefährdender Stoff substituiert.

6.3. Umwelt- und abfallpolitische Ziele

Fotovoltaik-Module

Am Anfang des Jahres 2012 beschloss das EU-Parlament die Novellierung der Elektroschrott-Richtlinie (Directive 2002/96/EC on waste electrical and electronic equipment - WEEE). Seit heuer fallen demnach auch PV-Anlagen und Solarmodule unter die EU-weiten Richtlinien des WEEE. Bis 2014 sind die nationalen Staaten verpflichtet, diese Verordnung in nationales Recht umzuwandeln. In Hinsicht auf die Sammel- und Verwertungsquoten für PV-Paneele wird innerhalb des Jahres 2012 auf EU-Ebene eine Entscheidung getroffen. Die WEEE-Richtlinie gründet ihre Anforderungen an die Erfassung, Behandlung und Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten und wendet dabei das Prinzip der Herstellerverantwortung an, welches den Hersteller zur Verantwortung und Finanzierung einer sachgerechten Entsorgung verpflichtet.

Die RoHS-Richtlinie hingegen schreibt vor, dass Blei, Quecksilber, Cadmium und bromhaltige Flammschutzmittel ab dem Jahr 2006 in neuen elektronischen Geräten nicht mehr enthalten sein dürfen. Davon sind auch Cd-Te-Solarmodule betroffen, sowie andere Solarmodule, die zur Verschaltung der einzelnen Zellen Blei benutzen. Allerdings wird im Anhang derselben Richtlinie darauf hingewiesen, dass Ausnahmen von diesem Verbot möglich sind, falls „...aus technischer und wissenschaftlicher Sicht ein Ersatz nicht möglich ist, oder wenn die durch die Substitution verursachten negativen Umwelt- und Gesundheitseinwirkungen die aus der Substitution für Mensch und Umwelt resultierenden Vorteile überwiegen könnten“ (Ökopol, 2004). Somit ist nicht völlig geklärt, ob und inwiefern PV-Module unter die RoHS-Richtlinie fallen.

Derzeit steht eine Revision der EU-Richtlinie RoHS zur Beschränkung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten an bzw. die Bestimmung über den Geltungsbereich der Verbote von gefährlichen Stoffen. Es muss geklärt werden, ob die Richtlinie, die vor allem Konsumgüter wie Handys, Toaster oder CD-Player betrifft, auf alle elektronischen Geräte, inklusive Solarmodule ausgeweitet werden soll. Von der Richtlinie wären primär CdTe-Module betroffen, aber auch andere Typen, bei denen zur Verschaltung der einzelnen Zellen Blei benutzt wird.

Laut der REACH-Verordnung, die die Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien vorsieht, gibt es Cd-Beschränkungen für Kunststoffe, Farben und andere Beschichtungen, die mit 0,01% Masseanteil (100 ppm) festgelegt werden. Die Cadmierung von Oberflächen oder Metallerzeugnissen ist komplett verboten (Ausnahmen gelten bspw. für die elektrischen Kontakte in allen Erzeugnissen). Derzeit ist schwer einzuschätzen, wie die EU-Kommission bzw. die ECHA (Europäische Chemikalienagentur) die Gefahren von PV-Modulen einschätzt und ggf. die Stoffbeschränkungen von 100 ppm auch auf PV-Module anwendet (Kummer, 2012).

In Hinsicht auf die Energieaspekte der Verwertung kristalliner Module ist eindeutig, dass der Einsatz von recycelten Zellen im Vergleich zu Zellen aus Primärrohstoffen in einem Modul zu einem deutlich reduzierten Energieverbrauch führt. Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich des Energieaufwandes bei der Produktion von Primär- und Recyclingmodulen.

Tab 21: Energetischer Aufwand zur Produktion von PV-Modulen (Ökopol 2004)

	Energetischer Aufwand zur Produktion von PV-Modulen	
	Primärmodule (kWh/Wafer)	Recyclingmodule (kWh/Wafer)
Siliziumproduktion	7,55	-
Solarzellenproduktion	0,65	0,65
Modulproduktion	1,12	1,12
Recycling nach der Nutzungsphase	-	0,4
SUMME	9,32	2,17
Energieverbrauch je generierte kWh	0,129 kWh/kWh _{gen}	0,030 kWh/kWh _{gen}

PV-Module enthalten viele verschiedene Stoffe, darunter weisen einige ein human- oder ökotoxisches Potential auf, wie z.B. Blei, Cadmium, Selen und Silber. Blei gehört zu den starken Umweltgiften, die sich in Lebewesen und Sedimenten akkumulieren und bei Aufnahme kleiner Mengen über einen längeren Zeitraum zu chronischen Vergiftungen führen kann. Bei Cadmium handelt es sich um ein Schwermetall, das bei Dünnschichtmodulen als Verbindung (CdTe und CdS) eingesetzt wird und nicht ohne weiteres aus dem Modul austreten kann, außer bei starker Beschädigung und Trennung des Verbundes. Cadmium gilt als toxisch, umweltgefährdend und gesundheitsschädlich.

Thermische Solarkollektoren

Nach derzeitigem Kenntnisstand werden Solarthermie-Anlagen nicht durch die geplante Neuregelung der WEEE-Richtlinie der EU erfasst.

Aufgrund ihrer werthaltigen Bestandteile sollten die Kollektoren bspw. über Wertstoffhöfe getrennt gesammelt und anschließend verwertet werden. Die Gehäuse lassen sich problemlos mit Metallscheren öffnen, so dass die Einzelbestandteile entnommen werden können. Hohes Potenzial haben insbesondere die Buntmetalle und Fe-Metalle, während die Dämmstoffe wohl in der Regel (thermisch) entsorgt werden. Absorberschichten wie bspw. aus Titanoxid lassen sich mit den Rohren (bspw. Kupfer) gemeinsam verwerten.

Nach Diskussion mit verschiedenen Herstellern stellt sich die Frage, inwieweit Kollektoren komplett einem Recycling zugeführt werden müssen oder nicht ein Austausch einiger Komponenten oder gar nur bspw. Dichtungen zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit ausreichend ist. Demontage- und Verwertungshinweise, die den Kollektoren beigegeben werden, können dies unterstützen.

Dies wird durch eine recyclinggerechte Konstruktion der Kollektoren unterstützt. Dazu gehört insbesondere eine einfache Demontierbarkeit der Baugruppen, gerade auch zum Zweck einer einfacheren Demontierbarkeit.

Die Wärmeträgermedien bestehen in der Regel aus Wasser-Glykol-Gemischen. Diese müssen vor Abbau der Module aus diesen entfernt werden, wobei nach Einschätzung der LfU Bayern verdünnte Wasser-Glykol-Gemische, die in biologische Kläranlagen eingeleitet werden, keine Abbauaktivitäten des Belebtschlammes erwarten lassen (LfU 2003).

6.4. Status Aufbereitungstechnik

Aufgrund der speziellen und komplexen Materialzusammensetzung von Fotovoltaik- und Solarthermie-Modulen ist es notwendig, bereits jetzt eine Sammel- und Recycling- bzw. Entsorgungsstrategie zu erarbeiten und entsprechende Maßnahmen zur Umsetzung einzuleiten. Gerade Solarthermie-Module dürften auch heute schon zur Entsorgung anfallen.

6.4.1 Optionen für Fotovoltaik-Module

Das Ziel von spezifischen Behandlungstechnologien für PV-Paneele besteht in der Rückgewinnung der wertvollen Bestandteile, wie Silizium und Halbleiter der Dünnschichtzellen durch die Trennung der Module in ihre Bestandteile. Die folgende Tabelle (Ökopol 2004) gibt einen Überblick über die Verfahren zur Trennung von Solarmodulen.

Tab 22: Aufbereitungsverfahren für PV-Module

Verfahren	Fraktionen Output	Stärken	Schwächen	Status
Chemisch	Silizium-Wafer; Glas; gebrauchte Chemikalien; Halbleiter (Metallrahmen wird vor der Behandlung separiert)	Gewinnung von Silizium für Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung Rückgewinnung von Halbleitern	Menge verbrauchter Chemikalien zur Beseitigung	Für die Auflösung des Verbunds „kristallines Si-EVA-Glas“ als nicht durchführbar erachtet. Für cadmiumhaltige Dünnschichtmodule z. Zt. in USA im Pilotbetrieb (First Solar GmbH)
Thermisch	Silizium-Wafer; Glas (Metallrahmen wird vor der Behandlung separiert)	Gewinnung von Silizium für Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung	Energiebedarf; Emissionspotential im Abgaspfad; Abgasbehandlung; Abfälle aus der Abgasbehandlung	Zur Zeit eine Pilot-Anlage in Freiberg (Sachsen) im Versuchsbetrieb für Trennung kristalline Module (Deutsche Solar AG)
Mechanisch (für Dünnschicht-Module)	Halbleiter; Glas; Kunststoffe (Metallrahmen wird vor der Behandlung separiert)	Rückgewinnung von Halbleitern; kein Einsatz von Chemikalien	Kontaminierter Sand; gefährliche Stäube während des Prozesses	Pilotverfahren der BAM
Trennung mit anschließendem Einsatz des Glases im Verbundglasrecycling	Glas (einschließlich Si); (Metallrahmen wird vor der Behandlung separiert)	Mechanische Trenntechnik ohne Nebenprodukte, die zusätzlich entsorgt werden müssen	Downcycling; Si-Einschluss führt zu Glasfehler; Gehalte an Si, Cu, Pb + Kunststoff problematisch für Recyclateinsatz in Glasproduktion	abgeschlossene Versuche mit kristallinen Modulen in einer Verbundglas-Recyclinganlage; für große Mengen nicht geeignet

Chemische Verfahren

Bei chemischen Verfahren wird mithilfe von Lösemitteln und Säuren die Trennung von Glas, EVA und Zellschicht herbeigeführt. Die Fraktionen, welche man aus dem chemischen Prozess erhält, sind hauptsächlich Silizium-Wafer und Glas. Problematisch ist allerdings die Entsorgung der Chemikalien. Die US-amerikanische Firma First Solar betreibt in Frankfurt/Oder in Deutschland eine Aufbereitungsanlage von CdTe-Modulen auf Basis eines mechanisch-chemischen Verfahrens. Dabei werden die Module zunächst in einer Hammermühle zerkleinert (5 – 15 mm). Die Kunststoffe werden anschließend abgetrennt und die verbliebenen Fraktionen werden in ein Schwefelsäurebad gegeben. Dabei werden der Halbleiter (CdTe) und der metallische Rückkontakt gelöst. Der CdTe-angereicherte Metallschlamm, welcher ausgefällt und abgefiltert wird, wird an die Metallverhüttung geliefert. Das ebenso erhaltene Glas kann verkauft werden (Ökopol, 2004).

Laut Presseinformationen vom April 2012 schließt der US-Konzern First Solar allerdings mit Herbst 2012 sein Werk in Frankfurt/Oder, aufgrund der sich verschlechternden Marktbedingungen, die mit der starken Konkurrenz aus China zusammenhängen (Spiegel 2012). Damit würde ein großes Aufbereitungswerk von CdTe-Modulen in Europa ausfallen.

Thermische Trennung

In einer ersten thermischen Stufe oxidieren die organischen Materialien während die anorganischen Bestandteile (Glas, Wafer) sowie die Asche von Kunststoffen und Laminaten übrig bleiben. Die Wafer können nach einer Säurebehandlung zu neuen Solarzellen weiterverarbeitet werden. Beim thermischen Prozess ist eine erweiterte Abgasbehandlung erforderlich, da in der Rückseitenabdeckung Fluorpolymere eingesetzt sind. Recycelte Siliziumzellen weisen eine vergleichbare Qualität und Effizienz zu Originalzellen auf.

In Bitterfeld/Wolfen in Deutschland wird eine Aufbereitungsanlage für kristalline Siliziumzellen sowie Dünnschichtmodule im thermischen Verfahren ab Herbst 2012 betrieben, und zwar von der Firma Solar Cycle GmbH (Tochterfirma von SolarWorld AG). Die Solarmodule werden samt Rahmen aber ohne Verkabelung und Anschlussdosen in einem Recyclingofen für ca. eine Stunde bei 550°C erhitzt um den Stoffverbund zu trennen. Die entstehenden Pyrolysegasen werden nachverbrannt und gereinigt, wobei die Rückstände der Rauchgasreinigung sowie Füllstoffrückstände deponiert werden müssen (Wambach 2003). Nach den namhaften Herstellern Solon und Q-Cells ist auch SolarWorld von einer Insolvenz bedroht, was möglicherweise auch Auswirkungen für die Aufbereitungsfirma haben könnte.

Das nach der Erhitzung vorliegende Glas kann zu etwa 95% ohne weitere Aufbereitung als Sekundär-Rohstoff in der Hohlglasproduktion eingesetzt werden. Die Siliziumzellen, die je nach Zustand der angelieferten Module als ganze Zellen oder als Bruchstücke vorliegen, werden in Tauchbädern gereinigt. Durch die eingesetzten Chemikalien werden Metallisierungs-, Antireflex- und Dotierungsschichten durch Ätzung entfernt. Als Ergebnis erhält man bei intakten Zellen ganze Wafer (Substratsilizium), die – laut Aussage der Deutschen Solar AG - wieder in den Verkauf gehen können. Die Bruchstücke werden wieder zu Solarsilizium eingeschmolzen, welches ebenfalls nach einer Qualitätsprüfung in den Verkauf gehen kann.

Mechanische Trennung

Bisher wurde das Verfahren bei Dünnschichtmodulen im Zuge einer Studie von der Bundesanstalt für Materialforschung (BAM) in Deutschland getestet. Von Vorteil ist bei diesem Verfahren, dass keine Chemikalien eingesetzt werden müssen; allerdings ist die Entwicklung gefährlicher Stäube problematisch.

Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Schlussfolgerungen der Verwertungstechnologien

Zusammenfassend kann behauptet werden, dass die thermische Trennung aus Umweltgesichtspunkten unproblematischer ist als die chemische Trennung, da beim thermischen Verfahren keine Prozesschemikalien zur Entsorgung anfallen. Allerdings muss die Schadstoffaustragung über den Abgaspfad (vor allem Fluorwasserstoff) und die Bildung halogenorganischer Verbindungen unterbunden werden. Positiv ist beim thermischen Verfahren, dass eine weitgehend zerstörungsfreie Rückgewinnung der Silizium-Wafer möglich ist. Selbst zerstörte Wafer (Bruch-Silizium) können als Solarsilizium wiederverwertet werden. Der energetische Aufwand ist im Vergleich zum chemischen Verfahren zwar höher, aufgrund der gänzlichen Rückführung der recycelten Stoffe in den Stoffkreislauf wird das thermische Verfahren allerdings den Zielen der Ressourcenschonung gerecht. Die ökologischen Vorteile decken sich mit den ökonomischen Anforderungen, da die Verfügbarkeit von preiswertem Silizium aus der Elektroindustrie (im Vergleich zu teurem Silizium aus anderen Quellen) für den zukünftig steigenden Bedarf an Solarsilizium nicht ausreichen wird. Dadurch gewinnt das Recycling von Altmodulen an Bedeutung.

Bei der Behandlung der CdTe-Dünnschichtzellen von First Solar wird ein geschlossener Stoffkreislauf gewährleistet, indem das ausgeschleuste Cadmium in den Metallkreislauf zurückgeführt wird. Allerdings ist eine getrennte Erfassung und anschließende Rückführung der CdTe-Altmodule nur bedingt umsetzbar, da Cadmium bei der Metallgewinnung (z.B. Zink) ohnedies anfällt und somit in Zukunft nicht verknappen wird. Aus diesem Grund wird die Zuführung des Cadmiums zu Senken im Vergleich zur Kreislaufschließung weiter in den Vordergrund rücken.

6.4.2 Optionen für Solarthermie-Module

Nach Entnehmen des Wärmeträgermediums lassen sich Solarthermie-Module problemlos in die Einzelbestandteile zerlegen, so dass diese einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden können. Besonders werthaltig sind die Buntmetalle wie insbesondere Aluminium und Kupfer.

Nach Herstellerangaben werden die Kollektoren geöffnet, in Einzelteile zerlegt, gewogen und einer entsprechenden Entsorgung zugeführt. Aus Sicht der stofflichen Verwertung zeichnen sich Solarkollektoren durch eine überschaubare Anzahl von separierbaren Stofffraktionen aus, die zudem noch relativ leicht identifizierbar sind. Zu diesen Stofffraktionen zählen

- Metalle (überwiegend Kupfer, Kupferlegierungen, Aluminium und Stahl).
- Mineralische Stoffe (Mineral- oder Glaswolle, Glas)
- Kunststoffe (PU-Schaum ABS, Gummi, u.a.).

Bezüglich der Entsorgung der Absorber gibt es bisher keine gesonderten Empfehlungen der Verbände, d.h. es wurde bisher in diesem Kontext der Materialzusammensetzung der Beschichtung der Absorberoberflächen wenig Bedeutung zugemessen. In einer Studie des IZT [IZT 2009] wird erwähnt, dass die galvanische Herstellung der selektiven Beschichtung abnimmt und von vielen Unternehmen aufgrund des Vermeidungsgebotes von Chrom VI in der Produktion nicht mehr verwendet wird. In welchem Umfang derartige Absorberbeschichtungen

in der Vergangenheit eingesetzt wurden, ist nicht klar. Da es sich bei den Herstellern von Solarthermie-Kollektoren meist um eher kleine Firmen handelt, sind derartige Kollektoren in einer größeren Vielfalt auf dem Markt. Dies gilt mit Sicherheit auch für Italien und die Provinz Bozen. Es kann sinnvoll sein, die zur Verwertung vorgesehenen alten Module mit entsprechenden Hinweisen zu versehen und hierzu die für die Provinz Bozen wichtigsten Hersteller zum Aborbereinsatz in der Vergangenheit zu befragen.

7 Erfassungskonzepte

7.1. Erfassungskonzept für PV-Module

Um den ökologischen Zielen sowie rechtlichen Rahmenbedingungen des PV-Recyclings gerecht zu werden, ist ein vernetztes und klar organisiertes Rücknahmesystem notwendig. Da Alt-Module seit Beginn 2012 in die Elektroschrott-Richtlinie (WEEE) aufgenommen wurden, gilt für PV-Abfall das Prinzip der Herstellerverantwortlichkeit. Hersteller von PV-Modulen sind also verpflichtet für eine dem Gesetz entsprechende Verwertung und umweltgerechte Entsorgung aufzukommen, indem sie einem organisierten Rücknahmesystem beitreten oder selbst eines implementieren.

Das größte derzeit existierende System ist mit PV-Cycle ein System, das von einem Großteil der PV-Hersteller aufgebaut wurde. Es wird deshalb nachfolgend etwas ausführlicher beschrieben. Es ist aber schon jetzt zu erkennen, dass es einen Wettbewerb um diese Aufgabenstellung geben wird. Im Prinzip stehen zwei Lösungsmodelle in Konkurrenz. Denkbar ist eine branchenspezifische Lösung wie bspw. über PV-Cycle aufgezeigt. Naheliegender ist aber mit der Einbeziehung von Solarmodulen in die Produktgruppe 4 der Elektrik- und Elektronikgeräte eine Einbindung der Organisationen und Firmen, die bereits in diesem Segment tätig sind.

7.1.1 Das System PV-Cycle

Bereits im Jahr 2007 haben sich PV-Hersteller und PV-Importeure zum PV Cycle-Verband zusammengeschlossen um auf freiwilliger Basis ein europaweites Rücknahmesystem für Alt-PV-Module zu organisieren. PV Cycle ist für ein Funktionieren der gesamten Kette von der Rücknahme bis zur Verwertung und sicheren Restentsorgung zuständig.

Zu den Aufgaben der Verwaltungsstelle von PV Cycle zählen:

- Registrierung der PV Cycle Mitglieder
- Registrierung, Sammlung und Verwaltung der Daten aller in den Verkehr gebrachten PV Module, aufgeschlüsselt nach Modul-Art und Hersteller
- Registrierung, Sammlung und Verwaltung der Daten hinsichtlich der gesammelten und verwerteten PV-Module
- Überwachung der Finanzierung des Systems

Als Bemessungsgrundlage für die Kostenaufteilung wird die durch den einzelnen Hersteller bzw. Importeur in Verkehr gebrachte Modulmenge sowie die tatsächlich eingesammelte Menge verwendet. PV Cycle hat bis 2015 eine Sammelquote von 80% und eine Verwertungsquote von 90% ab 2013 definiert.

Das Rücknahmesystem besteht aus einem strategischen Netzwerk – zuständig für Planung, Management und Controlling – und einem regionalen Netzwerk – die operativen Prozesse betreffend (Anfallstellen, Sammelstellen, Transport, Behandlung und Verwertung).

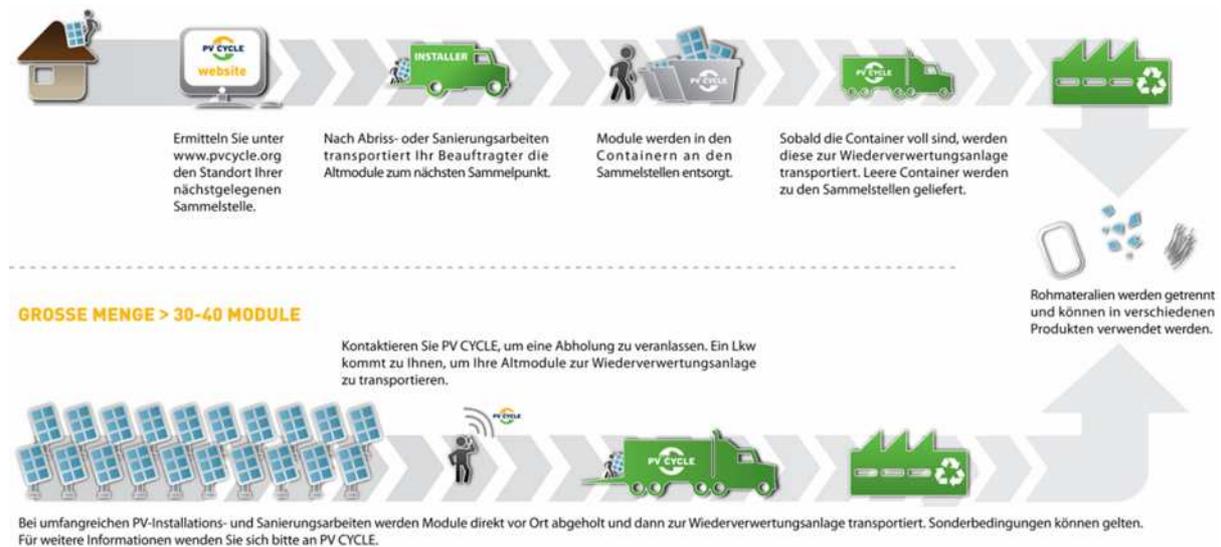


Abb. 51: Sammel- und Verwertungssystem von PV Cycle

Im Falle gewerblicher Anlagen mit mehr als 30 – 40 Modulen kann PV Cycle direkt kontaktiert werden und eine Partner-Transportfirma holt die ausgedienten Anlagen ab und führt sie im besten Fall direkt an eine Behandlungsanlage.

Für private Haushalte mit geringen Mengen an PV-Modulen wurden Sammelstellen eingerichtet. Die Privathaushalte können die Alt-Module kostenlos an die Sammelstellen liefern, sofern die Sammelstelle Partner von PV Cycle ist. Bei der Sammelstelle werden die Alt-Module nach Technologie gestapelt und sobald ein Container zur Gänze aufgefüllt ist, holt ein von PV Cycle beauftragtes Transportunternehmen den vollen Container ab. In Italien gibt es derzeit 74 zertifizierte Sammelstellen, die Partner von PV Cycle sind; 2 davon in Südtirol.

Die in Produktionsstätten anfallenden oder beim Transport durch Havarien beschädigten Module, werden ebenfalls turnusmäßig abgeholt.



Abb. 52: Sammelstellen von PV Cycle in Italien

Neben Sammelstellen und Transportunternehmen gehören Aufbereitungsanlagen in das Netzwerk von PV Cycle. Hierzu zählen beispielsweise:

- Firma Loser Chemie in Zwickau - Behandlung von Dünnschichtmodulen (CdTe, CIS/CIGS)
- Firma Saperatec in Bielefeld - Behandlung von Dünnschichtmodulen (CdTe, CIS/CIGS)
- Verschiedene Flachgas-Recycling-Anlagen für kristalline Siliziumzellen in Belgien, Luxemburg und Deutschland
- Die Firma First Solar ist zwar Partner von PV Cycle und deren Module werden von PV Cycle registriert, die Sammlung und Verwertung der von PV Cycle produzierten Dünnschichtzellen wird von First Solar direkt durchgeführt. Die Anlage in Frankfurt/Oder verwertet die firmeneigenen Module mit einer eigens entwickelten Technologie.
- In Italien gibt es derzeit keine zertifizierten Recyclingpartner

Im Jahr 2011 wurden von PV Cycle 1.400 Tonnen gesammelt und im ersten Trimester des Jahres 2012 wurden bereits 70% der Sammelmenge von 2011 erreicht. Davon stammen 90% von großen PV-Anlagen, die auf Abruf von PV Cycle eingesammelt werden. 10% der Sammelmenge wurde auf den Sammelstellen von Privaten abgegeben. Die Sammelquote erreichte im Jahr 2011 bereits 70%; PV Cycle ist bestrebt eine Sammelquote von 85% zu erreichen (energoclub 2012).

Abgesehen von den auf der vorhergehenden Seite angeführten Behandlungsanlagen, welche Partner von PV Cycle sind, sind derzeit in Europa folgende Anlagen in Betrieb oder in Planung, welche nicht zu PV Cycle gehören:

- Solar Cycle GmbH (Tochter von Solarworld AG) in Bitterfeld/Wolfen: Behandlung von kristallinen Siliziumzellen; das technische Konzept stammt von Sunicon mit der in Freiberg betriebenen Pilotanlage (in Betrieb)
- Firma Lobbe plant eine Anlage in Espenhain/Leipzig für das Recycling von Dünnschichtzellen, kristallinen Solarzellen sowie LCD-Bildschirmen

Laut PV Cycle können die in Deutschland anfallenden PV-Altmodule im nächsten Jahrzehnt in den bestehenden und geplanten PV-Recyclinganlagen in Deutschland behandelt werden.

7.1.2 Anforderungen an die Logistik in Südtirol

Sowohl bei kristallinen Zellen als auch bei CdTe-Dünnschichtzellen ist eine möglichst zerstörungsfreie Anlieferung der Module erforderlich, um einen möglichst hohen Output bzw. Erlöse zu erzielen. Unter Berücksichtigung der Transportkosten zur Behandlungsanlage erscheint es schwierig, eine Erlössituation zu erzielen. Mit den sich aus der Einbeziehung in die WEEE-Zuständigkeit ergebenden Verpflichtungen an ein flächendeckendes Rücknahmesystem mit entsprechenden Sammel- und Recyclingquoten sind Kosten verbunden, die von Herstellern und Importeuren auf die Verkaufspreise umgelegt werden.

PV Cycle repräsentiert rund 90% der europäischen PV-Industrie. Dieser Prozentsatz dürfte laut einer Internetrecherche und der Kontaktaufnahme mit den führenden PV-Firmen Südtirols auch auf den PV-Markt Südtirols zutreffen. Für 90% der PV-Module bestünde somit bereits ein etabliertes Rücknahmesystem im Sinne einer kostenlosen Abgabe für Privathaushalte bei den ausgewiesenen Sammelstellen bzw. einer Direkt-Abholung bei PV-Anlagen größer 30 – 40 Module, dem Transport zu einer Behandlungsanlage und der Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung der aussortierten Bestandteile und somit einer Schließung des Stoffkreislaufes.

In Südtirol existieren im Rahmen von PV Cycle die folgenden 3 Sammelstellen:

- Bruneck (Leitner Solar)
- Vahrn (Leitner Solar)
- Feldthurns (Obrist GmbH)

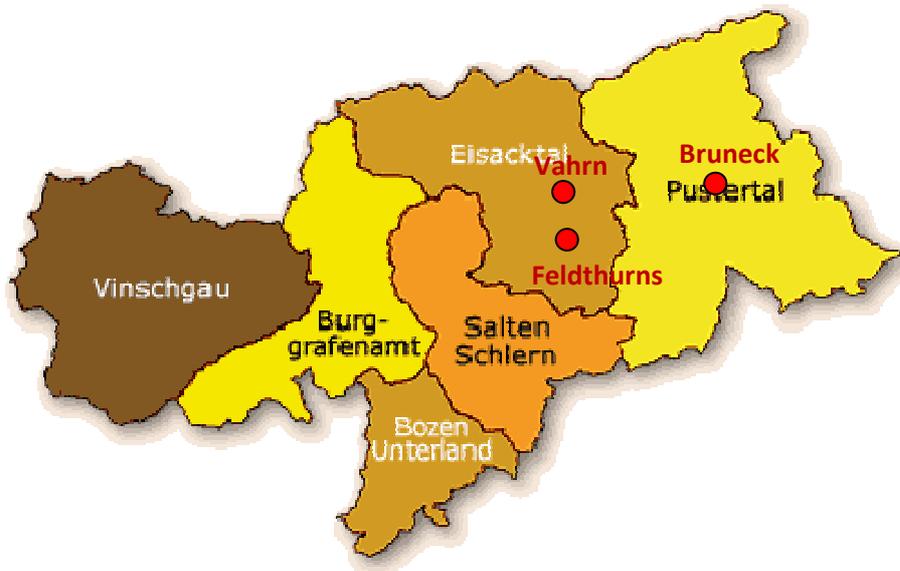


Abb. 53: Sammelstellen von PV Cycle in Südtirol

Es fällt auf, dass die verfügbaren Sammelstellen relativ eng beieinander liegen und nur das Pustertal sowie ein Teil des Eisacktals (Brixen und Klausen mit umliegenden Fraktionen), über Sammelstellen verfügen.

Zudem ist der Großraum Bozen 35 km von der nächstgelegenen Sammelstelle Feldthurns entfernt, Meran liegt in einer Entfernung von 70 km und Mals im Vinschgau in einer Entfernung von 120 km.

Aufgrund des auf die östliche Landeshälfte mit Sammelstellen beschränkten Raums wird empfohlen, mindestens drei weitere Sammelstellen einzurichten, um eine möglichst hohe Sammelquote in Südtirol zu erreichen, und zwar im:

- Raum Bozen (Unterland, Eggental, Sarntal, Ritten, Jenesien)
- Raum Meran (Burggrafenamt)
- Raum Schlanders (Vinschgau)

Andernfalls soll die Möglichkeit geschaffen werden, die Alt-Module auch in den Recyclinghöfen Südtirols abgeben zu können. Da PV-Altmodule seit Beginn 2012 in die Elektroaltgeräte-Verordnung aufgenommen wurden, ist davon auszugehen, dass PV-Module auf ähnliche Weise wie Elektroaltgeräte gelagert, transportiert und verwertet werden und dadurch die Rücknahme der PV-Module an die Rückführung der Elektro-Altgeräte über kommunale Sammelstellen gekoppelt werden kann.

Informationen der Firma Leitner Solar (Partner von PV Cycle) zufolge wurden in der firmeneigenen Sammelstelle auch bereits PV-Module von Herstellern, welche nicht Mitglied von PV Cycle sind, abgegeben. Leitner Solar kann diese nicht annehmen, da sie von PV Cycle nicht abgeholt werden.

In diesen Fällen wurde nach einer alternativen Lösung gesucht, indem der Hersteller direkt kontaktiert wurde und die Alt-Module von diesem wieder zurückgenommen wurden.

In Zukunft wird die Anzahl von Alt-Modulen, die nicht über PV Cycle zurückgenommen werden können, jedoch steigen; somit soll möglichst schnell die Annahme von PV-Modulen in Recyclinghöfen ermöglicht werden. Wesentlich ist allenfalls eine umfassende Informationspolitik über die Möglichkeiten der Abgabe von PV-Altmodulen sowie eine Kommunikation der von PV Cycle eingerichteten Sammelstellen über Gemeinden und relevante Entsorgungsunternehmen (Hellmann, 2010).

7.2. Erfassungskonzept für thermische Solarkollektoren

Nach derzeitigem Kenntnisstand sind Erfassung und Verwertung von Altkollektoren nicht über die vorgesehene Novellierung der WEEE-Richtlinie geregelt. Deshalb gilt hier nicht das Prinzip der Herstellerverantwortung, wie dies für die PV-Module der Fall ist. Eine grundsätzliche Produktverantwortung der Hersteller ist jedoch auch für solarthermische Anlagen einzufordern.

In Deutschland verpflichten sich Hersteller, die dem Umweltkennzeichnungssystem „Blauer Engel“ (RAL UZ 73) angehören, zur Rücknahme der Altkollektoren. Das Umweltzeichen Blauer Engel wird in Zusammenarbeit von Bundesministerium für Umwelt, Umweltbundesamt sowie einer Jury vergeben. Eine freiwillige Verpflichtung zur Rücknahme, der sich Hersteller und Händler unterwerfen, würde sich auch für die Provinz Bozen anbieten, falls sich dies nicht schon auch für Italien etabliert hat. Der zu erwartende starke Anstieg an Altkollektoren bedarf erheblicher konzeptioneller Bemühungen zur Integration in bestehende stoffliche Verwertungsstrategien.

Angesichts der wertgebenden Bestandteile und des hohen Potenzials zur Wiederverwendung oder zur Verwertung sollte ein System aufgebaut werden, das eine möglichst hohe Sammelquote verspricht. In Südtirol gibt es 76 Wertstoffhöfe und 4 Wertstoffzentren (Klimaland 2012) für die getrennte Anlieferung von Wertstoffen, was in Ergänzung zur Rücknahme durch Händler und Hersteller eine ausreichend flächendeckende Erfassung darstellen müsste.

An den Sammelpunkten sollten diese möglichst getrennt bereitgestellt werden können. Nach Telefonat mit Herrn Metz, deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V., nimmt eine Reparatur der Kollektoren zu. Da meist lediglich die Dichtungen ausgetauscht werden müssen, kann man hier mit wenig Aufwand die Lebenszeit der Anlage (deutlich) verlängern. Dieser Hinweis kann jedoch auch ein Indiz dafür sein, dass über einen Austausch von Komponenten eine Wieder- oder Weiterverwendung der Kollektoren möglich sein kann. Diese Vorbehandlung zur Wiederverwendung als Verwertungsverfahren ist jedoch nur möglich, wenn die Sammlung der Kollektoren bspw. an den Wertstoffhöfen zerstörungsfrei erfolgt.

Bei der Entsorgung gerade älterer Kollektoren sollte darauf geachtet werden, dass dies mit einem Hinweis verbunden wird, inwieweit Chrom VI oder Blei (als bleihaltiges Lot) zum Einsatz gekommen ist, so dass bei der Verwertung selbst auf entsprechend belastete Stäube geachtet werden kann. Ansonsten können die wertgebenden Komponenten der Kollektoren den Fraktionen Metall, Holz, Kunststoff und Glas zugeordnet werden, bspw. nach einer Aufbereitung bei einem
Abfallverwerter.

III Empfehlungen

8 Zusammenfassung

Mit dem Bau von Gebäuden im KlimaHaus-Standard nimmt die Vielfalt an Baumaterialien und Bauweisen zu. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf Planung und Bauausführung. Werden diese Häuser nach einiger Zeit grundlegend saniert oder gar rückgebaut, kommt diese Vielfalt an Materialien und Stoffen auch auf die Entsorgungswirtschaft zu. Darauf gilt es sich einzustellen.

Im Rahmen dieses Projektes war nur eine grobe Gliederung in die einzelnen Bauweisen möglich. In der Praxis sind die Übergänge zwischen diesen fließend, was zu einer noch deutlich höheren Vielfalt führt.

In einer monolithischen Bauweise werden die üblichen Baustoffe eingesetzt, allerdings in entsprechend höherer Wandstärke. Die Alternative hierzu besteht im Einsatz von Verbundbaustoffen, die einen Kern aus Dämmstoffen aufweisen. Im ersten Fall ist damit keine Veränderung in der bestehenden und bewährten Aufbereitungs- und Verwertungspraxis verbunden. Die Verwendung von Verbundbaustoffen wird nach Rückmeldung aus dem Fachgespräch unter anderem mit Abbruch- und Bauschuttrecyclingunternehmen zu deutlichen Problemen führen. Eine saubere Auftrennung ist weder im Rückbau noch in der Aufbereitung möglich, was die Verwertbarkeit des gesamten anfallenden Massenstroms deutlich mindert.

Die klassische Lösung in der energetischen Sanierung von Gebäuden aber auch im Neubau ist die Kombination aus mineralischer Wand und einer Außendämmung in der Regel aus Styropor. Dieses Wärmedämmverbundsystem ist auch in der Provinz Bozen die klassische Lösung. Wie die Praxis in Deutschland zeigt, ist eine Abtrennung dieser Materialien bereits im Rückbau vergleichsweise gut möglich und dies auch maschinell. Die Erfahrung zeigt, dass der verbleibende mineralische Bauschutt nur noch so wenige Fremdanteile aufweist, dass eine klassische Bauschuttaufbereitung bei gewohnten Produkteigenschaften weiterhin möglich ist. Eine Leichtstoffabscheidung sollte jedoch zum Standard werden.

Holzrahmenbau / Holztafelbau ist die typische Bauweise für Fertighäuser. Der Anteil mineralischer Baumaterialien ist bei dieser Bauweise sehr gering. Es überwiegen andere Baustoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften. Zu dem Holzrahmen kommen auch Kunststoffe und andere Leichtbau- und Dämmstoffe. Ein selektiver Rückbau müsste relativ einfach möglich sein, so dass die mineralischen Baustoffe relativ sauber bei Bauschuttrecyclinganlagen angedient werden können, während die übrigen Baustoffe nach einer Auftrennung in heizwertreich und heizwertarm (energetisch) entsorgt werden können.

Die Frage der Verwertung der je nach Bauweise unterschiedlich anfallenden Baumaterialien wird stark durch die jeweiligen Verwertungserfolge bzw. Substitutionseffekte bestimmt. Um dies genauer abbilden zu können, wurde eine Ökobilanz für zwei Gebäudetypen durchgeführt. Die mittelschwere Bauweise mit Wärmeverbundsystem stellt die auch für Bozen klassische Lösung dar, ein Gebäude in Holzrahmenbauweise ist noch wenig verbreitet, wird aber immer mehr gebaut. In die Ökobilanz wurden nur die Materialien der Außenwände sowie der Bodenplatte einbezogen.

Für alle nicht-mineralischen Komponenten in den Gebäuden wurde eine Verbrennung über die MVA Bozen angenommen. Diese Anlage ist so eingebunden, dass mit hohen Netto-Wirkungsgraden Strom ins Netz sowie Wärme ins Fernwärmenetz abgegeben werden können. Die Wärmebereitstellung ersetzt eine Wärmeerzeugung über Erdgas, die Strombereitstellung einen für Italien typischen Kraftwerksmix, wobei auch hier Erdgas einen bedeutenden Anteil an den eingesetzten Energieträgern hat.

Die über die Aufbereitung von mineralischen Baustoffen gewonnenen Materialien lassen sich zu einem großen Anteil zu mineralischen RC-Bauprodukten vor allem für den Straßen- und Wegebau aufbereiten. Diese Baustoffe ersetzen massenäquivalent Baustoffe, die aus Primär-gestein erzeugt werden müssten. Die dortigen Prozesse sind vergleichsweise wenig aufwändig, so dass sich aus der Substitution Erfolge erzielen lassen, die in etwa auch den Lasten der Bauschutttaufbereitung entsprechen.

Über alle betrachteten Umweltwirkungen hinweg zeigt sich die Option Leichtbauweise im Sinne einer Holzrahmenbauweise unter dem Aspekt Entsorgung als vorteilhaft. Da im Leichtbau ein erheblicher Anteil Holz energetisch genutzt werden kann, gilt dies vor allem unter Klimaschutzgesichtspunkten. Entscheidend ist die Substitution von fossilen Energieträgern. Werden die KlimaHäuser zu einem Zeitpunkt zurückgebaut, zu dem Strom und Wärme in Italien vor allem aus regenerativen Energieträgern erzeugt werden, entfällt dieser spezifische Vorteil.

Für eine abschließende Einschätzung der beiden Bauweisen aus ökologischer Sicht bedarf es noch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den ökologischen Lasten, die mit der Herstellung der unterschiedlichen Baumaterialien verbunden sind. Die Herstellung einiger Baumaterialien wie bspw. Beton ist mit erheblichen Umweltlasten verbunden. Für eine grobe Abschätzung dieser spezifischen Lasten, die sich aus der Herstellung der in den Bauweisen benötigten Baumaterialien ergibt, wurden Datensätze aus verschiedenen Datenbanken ausgewertet.

Aus der Bewertung der beiden Umweltwirkungskategorien ergeben sich tendenzielle Vorteile für die Massivbauweise mit WDVS. Für die Bewertung der Leichtbauweise sind die spezifischen Beiträge der Herstellung von Steinwolle von größerer Bedeutung, resultierend aus dem für die Herstellung notwendigen hohen Energieeinsatz. Steinwolle ist der klassische Dämmstoff für die Ausfüllung der Holzrahmenwände, möglich ist aber auch die Verwendung von expandiertem Polystyrol (Styropor). Bezieht man diesen Dämmstoff in die Bilanz mit ein, ergibt sich ein tendenzieller Vorteil für die Leichtbauweise.

In einer abschließenden Bewertung muss neben den klassischen Umweltwirkungskategorien auch der Ressourcenschutz beachtet werden. Bei der diskutierten Leichtbauweise handelt es sich zumindest heute um ein offenes System. Alle organischen Leichtbaustoffe lassen sich nicht stofflich, sondern nur energetisch verwerten. Eine Kaskadennutzung, d.h. eine mehrfache Nutzung der Stoffe ist nicht möglich, wohl aber im Falle der mineralischen Materialien.

Zur Optimierung des Bedürfnisfeldes Bauen und Wohnen trägt aus Klimasicht auch die Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien bei. Auf den Gebäuden werden hierfür klassisch Solaranlagen zur Wärmeerzeugung und Fotovoltaikmodule zur Stromerzeugung montiert. Mit welchen ökologischen Auswirkungen deren Entsorgung verbunden ist, wurde ebenfalls im Rahmen der Studie problematisiert.

Die Anlagen zur Stromerzeugung werden erst seit wenigen Jahren in größerem Umfang auf den Hausdächern installiert. Bei einer Nutzungszeit von mindestens 25 Jahren werden demnach relevante Mengen an Altmodulen erst in vielen Jahren zur Entsorgung anfallen. In aller Regel handelt es sich um kristalline Solarzellen und nur zu etwa 10% um Dünnschichtzellen.

Schon heute gibt es für diese Modultypen technische Möglichkeiten der Aufbereitung und Verwertung, weitere sind in der Konzeption und in der technischen Entwicklung. Schon jetzt versprechen diese Verwertungsoptionen eine hochwertige Verwertung und eine hohe Recyclingquote. Noch konzentrieren sich diese Aufbereitungsanlagen jedoch auf die Nachbarschaft von großen PV-Anlagenherstellern und damit auf Deutschland.

Mit PV Cycle wurde seitens der Hersteller über die letzten Jahre ein System aufgebaut, das eine Rücknahme und Verwertung auf freiwilliger Basis ermöglichen sollte. Mit der Novelle der WEEE-Richtlinie zielt die EU-Kommission auf die Eingliederung der Fotovoltaikmodule in das System für Elektro- und Elektronikgeräte, die Umsetzung in nationales Recht muss noch erfolgen. Damit wird sich auch für Solarmodule ein flächendeckendes System der Sammlung und Verwertung/Entsorgung in Herstellerverantwortung der Solarindustrie entwickeln müssen unabhängig davon, ob PV-Cycle oder andere mit dieser Aufgabe betraut werden.

Solaranlagen zur Wärmeerzeugung werden schon seit deutlich längerer Zeit und in größerem Umfang eingesetzt. Schon heute dürften deshalb die ersten Solaranlagen das Ende ihrer Nutzungszeit erreicht haben und zur Entsorgung anfallen. Zumindest ist dies für die nahe Zukunft zu erwarten.

Solaranlagen haben einen relativ einfachen Aufbau verbunden mit einem hohen Verwertungspotenzial. Sie lassen sich relativ einfach in die einzelnen Bestandteile zerlegen und den verschiedenen Wertstoffströmen zuordnen. Möglicherweise bietet die Bauweise die Möglichkeit, Bauteile rückzugewinnen oder durch ihren Austausch Solaranlagen in größerem Umfang weiterzuverwenden.

Da es sich um eine Vielzahl von durchweg kleineren Herstellern handelt, ist die Datenlage zur stofflichen Zusammensetzung dieser Anlagen nicht gut. Dies gilt vor allem für die Solaranlagen, die schon vor vielen Jahren installiert wurden und demnach als erste demnächst zur Entsorgung anfallen werden. Da diese ersten Anlagen teilweise bereits zu einem Zeitpunkt gebaut und installiert wurden zu dem die Umweltstandards noch nicht das heutige Niveau erreicht hatten, muss bei diesen auf Schadstoffproblematik geachtet werden. Dies gilt vor allem für die verwendeten Wärmeträger bzw. Kühlmittel sowie für die Absorber.

Ein System der Rücknahme und Verwertung muss sich hier erst entwickeln, wobei dies durchaus auch auf regionaler Ebene möglich ist.

9 *Empfehlungen*

Auf Basis dieser im Rahmen der Studie gewonnen Erkenntnisse stellt sich die Frage der Schlussfolgerungen.

Die bewerteten Systeme der KlimaHäuser sowie der Solarenergiegewinnung sind seit vielen Jahren Praxis. Zu prüfen ist, inwieweit die Entsorgungswirtschaft auf die daraus resultierenden Stoffströme vorbereitet ist bzw. das Stoffstrommanagement/die Kreislaufwirtschaft angepasst werden muss.

Auch zukünftig werden Bauwerke mit hohen energetischen Standards errichtet werden müssen, auch zukünftig gibt es die Notwendigkeit der Erzeugung von Strom und Wärme aus Solarenergie. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit auf Basis der Erkenntnisse Empfehlungen zur Bevorzugung verschiedenen Handlungsoptionen oder technischer Lösungen ausgesprochen werden können.

9.1. *Retrospektiv*

KlimaHaus: Schlussfolgerungen für Abbruchunternehmen / Entsorgungswirtschaft

Mit der Optimierung von Gebäuden aus energetischer Sicht wird in den meisten Fällen ein Materialmix aus Leichtbaustoffen und Dämmmaterialien sowie mineralischen Baustoffen verbunden sein. Dies gilt nahezu immer bei der Sanierung des Gebäudebestandes, aber auch bei den klassischen Lösungen im Neubau.

Dies bedeutet, dass beim Abbruch von Gebäuden zukünftig nicht nur Hochbauschutt aus verschiedenen mineralischen Baustoffen anfallen wird, sondern ein Materialmix. Überschreitet der Anteil an Fehlbestandteilen (Holz, Kunststoffe etc.) im Inputmaterial ein gewisses Maß, ist auch mit einer stationären Bauschuttzubereitungsanlage mit Leichtstoffabscheidern eine Herstellung von RC-Baustoffen nicht mehr möglich. Die Produktspezifikationen, die den Absatz der Materialien bestimmen, lassen sich nicht mehr einhalten. Der hohe Anteil an Fremdstoffen im Material bestimmt zudem den optischen Eindruck so stark, dass ein Absatz wegen fehlender Akzeptanz beim Kunden unmöglich gemacht wird, unabhängig von der tatsächlichen Produkteigenschaft.

Wenn auch weiterhin sichergestellt sein soll, dass der Abfallmassenstrom aus dem Abbruch von Gebäuden in hohem Maße recycelt und als Bauprodukt verwendet werden soll, ist eine hohe Selektivität im Abbruch/Rückbau des Gebäudes unabdingbar. Auch die Leichtstoffe selbst lassen sich nur dann zur Herstellung von Brennstoffen vermarkten, wenn der Anteil mineralischer Stoffe im Massenstrom entsprechend klein ist. Beim Rückbau eines Gebäudes ist auf eine weitgehende Aufteilung in mineralisch und nicht-mineralisch zu achten.



Abb. 54: Zur Aufbereitung und Verwertung ungeeignetes Material

Ein selektiver Rückbau wird dann zur allgemeinen Praxis, wenn folgende Rahmenbedingungen gegeben sind:

- Die Entsorgung eines Baustoffgemischs mit hohen Anteilen an Fremdstoffen muss mit hohen Kosten verbunden sein; der auch ökonomische Mehraufwand für einen selektiven Rückbau muss sich in der Gesamtkalkulation des Rückbauvorhabens finanziell lohnen.
- Dies bedeutet, dass für diese Materialien nur eine Entsorgung über Deponien oder Bauschuttzubereiter ermöglicht werden darf; „billige“ meist nur bedingt legale Entsorgungsmöglichkeiten müssen auch weiterhin unterbunden werden.
- Ein selektiver Rückbau kann aber auch zur Genehmigungsvoraussetzung von Bau- bzw. Abbruchgenehmigungen gemacht werden; es bedarf einer juristischen Prüfung, inwieweit dies einer materiellen Begründung bspw. aus EU-AbfRRL und den Zielen der Ressourcenproduktivität oder ähnlichem bedarf; möglicherweise reicht aber auch eine Änderung der örtlichen Bausatzungen.
- Alle Maßnahmen werden sinnvollerweise durch entsprechende Öffentlichkeitsarbeit begleitet.
Es ist immer hilfreich, wenn Baumaßnahmen der öffentlichen Hand als Referenz und Vorbild dienen können; Eigene Rückbaumaßnahme vorbildlich durchführen und dies zur Grundlage von Öffentlichkeitsarbeit zu nehmen, kann die oben genannten Maßnahmen sinnvoll unterstützen.

Davon unabhängig wird die Ausstattung der Bauschuttzubereitungsanlage mit Leichtstoffabscheidern immer notwendiger werden. In Zusammenarbeit mit regionalen Verbänden und Institutionen der Bauwirtschaft und Abfallwirtschaft sollte hierfür geworben werden. In gewissem Umfang ist dies auch bei kleineren mobilen Anlagen mit Einsatz einfacherer Technik möglich.

Die Kosten für den Rückbau und Aufbereitung eines KlimaHauses und für die Verwertung/Entsorgung der anfallenden Materialien liegen gegenüber konventionellen Gebäuden tendenziell höher.

Gebäude müssen immer und unabhängig von der Bauweise oder den KlimaHaus-Standards in einem ersten Schritt besichtigt werden, um eine Angebotskalkulation durchführen zu können. Im Zuge der Besichtigung wird geprüft, inwieweit mit Schadstoffen und/oder problematischen Baustoffen zu rechnen ist.

Im nächsten Schritt erfolgt die Entkernung der Gebäude, d.h. Holz- oder Teppichböden, Asbest festgelegt in Gauben, Giebel oder Traufen sowie Rigipsplatten oder auch Fenster werden entfernt. Bei einer Leichtbauweise müssen an dieser Stelle (zusammen mit dem Entfernen von Gipskartonplatten) möglicherweise die Wände aufgemacht werden, um das Dämmmaterial zu entfernen. Dies ist möglicherweise aus Arbeitsschutzgründen notwendig, ansonsten um eine die Verwertung störende Materialien zu entfernen. Auch hier ist der Rückbau eines KlimaHauses deshalb nicht zwangsläufig mit höheren Kosten verbunden.

Für ein Gebäude von 1000 m³ Bruttorauminhalt (BRI) sind etwa 4 bis 5 Tage Abbruchzeit zu kalkulieren. Diese setzen sich zusammen aus 1 Tag für die Entkernung des Gebäudes sowie 3,5 Tagen Rückbau bei Massivbauweise und 3 Tagen bei anderen Bauweisen. Wird zunächst maschinell das WDVS entfernt, erhöht sich die Rückbauzeit um maximal 1 Tag, d.h. um etwa 20%.

Die zunehmende Materialvielfalt sowie die wachsenden Anforderungen an die Produktqualität machen die Ausstattung der stationären Bauschutttaufbereitungsanlagen mit Leichtstoffabscheidern unabdingbar und dies unabhängig davon, ob ein Gebäude in KlimaHaus-Standard rückgebaut werden muss.

Nutzung der Sonnenenergie: Schlussfolgerungen für die Entsorgungswirtschaft

Während spätestens mit der Aufnahme der Fotovoltaikanlagen in WEEE bzw. im nationalen Recht für die Zukunft die Grundlagen für eine umfassende Sammlung und hochwertige Verwertung von Altmodulen geregelt ist und in Bozen zudem relevante Mengen erst in einigen Jahren zu erwarten sein werden, bedarf es zur Optimierung der Entsorgung thermischer Solaranlagen der Unterstützung durch die Regierung der Provinz.

Mögliche Ansatzpunkte wären:

- Produktverantwortung stärken:
Systeme der freiwilligen Rücknahme durch Handwerksbetriebe bzw. die Hersteller stärken und ausbauen; Unterstützung durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit.
- Verwertungssysteme stützen
Öffnen der Wertstoffhöfe für diese Solaranlagen und getrennte zerstörungsfreie Lagerung;
Recherche im Rahmen eines Forschungsprojektes, bei welchen Solaranlagen in der Vergangenheit Cr VI und Pb verwendet wurden und Abschätzung der daraus resultierenden Folgen; ggf. Kennzeichnung der entsprechenden Module auf den Wertstoffhöfen mit einem Hinweis für die Verwerter. Dies und Aussagen zur Verwertbarkeit bzw.

Möglichkeiten der Weiterverwendung sind möglicherweise über die aktuelle Studie für die Fa. Santini leistbar.

- Unterstützung der Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung durch abfallwirtschaftliche Initiativen zur Entnahme und Weiterverwendung von Bauteilen.

9.2. *Prospektiv*

Beratungspraxis KlimaHaus-Agentur

Bislang ist die Verwendung von Verbundbaustoffen nach vorliegenden Informationen in Südtirol noch weitgehend unbekannt. Angesichts der ungelösten Probleme bei Rückbau derartiger Gebäude und Entsorgung der Bauabfälle sollte auch zukünftig auf derartige Baustoffe möglichst verzichtet werden.

In der Holzrahmenbauweise sind einer ersten Einschätzung nach aus ökologischer Sicht EPS-Dämmstoffe den bislang meist verwendeten Steinwolle-Dämmstoffen aufgrund deren großen Herstellungslast vorzuziehen.

Ein Informationsblatt zu diesem Thema oder eine entsprechende Beratungspraxis der KlimaHaus-Agentur wäre in diesem Zusammenhang hilfreich.

Leicht- und Massivbauweise greifen auf unterschiedliche Baumaterialien zurück und ergeben sich damit auch aus den regionalen Besonderheiten. So ist Holz als Baustoff in Italien bspw. nicht immer in ausreichendem Umfang vorhanden.

Wichtig ist in allen Fällen, auf einen Materialmix zu verzichten. Dies gilt auch für die Leichtbauweise. Nur so lassen sich bereits auf der Abbruchbaustelle weitgehend homogene Stoffströme bereitstellen, die für eine Aufbereitung und hochwertige Verwertung unabdingbar sind. Für Holzrahmenbau empfehlen sich Holzwerkstoffe oder andere Naturbaustoffe.

Bei einer Beratung zu Solarthermieanlagen sollten nicht nur die Energieeffizienz sondern auch die Möglichkeiten der Reparatur, der Weiterverwendung und damit der Langlebigkeit der Produkte beachtet werden.

Gebäudesteckbriefe

Ein selektiver Rückbau ist in allen Fällen unabdingbar. In Abhängigkeit von der Bauweise und der eingesetzten Baumaterialien müssen von dem Abbruchunternehmern zunächst Abbruchkonzepte erstellt werden, die als Grundlage für den eigentlichen Gebäudeabbruch dienen. In aller Regel erfolgt dies auf Basis von Begehungen der Gebäude in Verbindung mit entsprechenden Erfahrungswerten der Unternehmer.

Nicht alle Randbedingungen, die die Selektivität des Rückbaus und die erfolgreiche Rückführung eines möglichst hohen Anteils der Materialien in den Stoffkreislauf bestimmen, lassen sich über eine Inaugenscheinnahme der Gebäude feststellen. Es ist daher sinnvoll, bei den Genehmigungsbehörden einfache Gebäudesteckbriefe anzulegen, die die verwendeten Materialien und den Einsatzort auflisten. Diese Informationen lassen sich ggf. in einer zentralen

Stelle in Südtirol wie bspw. der KlimaHaus-Agentur zusammenführen. Diese Gebäudesteckbriefe könnten folgende Merkmale umfassen:

Klassische Bauweise im Wärmedämmverbundsystem

	Durchmesser / Stärke	Produktname
Baumaterialien Außenwände		
Baumaterialien Innenwände		
Dämmmaterialien		

Leichtbauweise / Holzrahmenbau

Aufbau Außenwand	Wandstärke	
	Dämmmaterial für Ausfachung	
	Material Außenbeplanung	
	Material Innenbeplanung	
Aufbau Innenwand	Wandstärke	
	Material für Ausfachung	
	Material Außenbeplanung	
	Material Innenbeplanung	

Bei einem Fertighaus kann alternativ auch der Hersteller, die Gebäudebezeichnung (Produktname) und –größe festgehalten werden.

Anhang A: Erläuterung der Wirkungskategorien

Die in dieser Studie umfassten Wirkungsindikatoren werden im Folgenden gegliedert nach Wirkungskategorien vorgestellt und die entsprechenden Charakterisierungsfaktoren beziffert. Der jeweilige Ursprung der Methode wird referenziert. Die Rechenvorschrift zur Berechnung des Indikatorergebnisses befindet sich am Ende jedes Unterkapitels der einzelnen Wirkungskategorien.

A 1. Klimawandel

Der Klimawandel als Wirkungskategorie steht für die negative Umweltwirkung der anthropogen bedingten Erwärmung der Erdatmosphäre und ist in entsprechenden Referenzen bereits eingehend beschrieben worden [IPCC 1995]. Der bisher in Ökobilanzen meist angewandte Indikator ist das Strahlungspotential (radiative forcing) [CML 1992, Klöpffer 1995a] und wird in CO₂-Äquivalenten angegeben. Die Charakterisierungsmethode gilt als allgemein anerkannt.

Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für jede klimawirksame Substanz errechnet und fortschreibt. Die vom IPCC fortgeschriebenen Berichte sind als wissenschaftliche Grundlage zur Instrumentalisierung des Treibhauseffektes in ihrer jeweils neuesten Fassung heranzuziehen.

Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt, daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Produkt-Ökobilanz verwendet werden soll. Es existieren Modellierungen für 20, 100 und 500 Jahre. Die Modellrechnungen für 20 Jahre beruhen auf der sichersten Prognosebasis. Das Centre of Environmental Science der Leiden University (CML) empfiehlt ebenso wie das Umweltbundesamt die Modellierung auf der 100-Jahresbasis, da sie am ehesten die langfristigen Auswirkungen des Treibhauseffektes widerspiegelt. Von der Verwendung der Modellierung auf 500-Jahresbasis wird aufgrund wachsender Unsicherheiten mit zunehmender Zeitspanne abgeraten [CML 2002]. Gemäß diesen Empfehlungen wurde in der vorliegenden Studie die Modellierung auf 100-Jahresbasis verwendet.

Nachfolgend werden die in den Berechnungen des Treibhauspotentials angetroffenen Substanzen mit ihren CO₂-Äquivalenzwerten – ausgedrückt als „Global Warming Potential (GWP) – aufgelistet:

Tabelle A-1: Treibhauspotential der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe;
CO₂-Äquivalentwerte auf 100-Jahresbasis

Treibhausgas	CO ₂ -Äquivalente (GWP _i)
Kohlendioxid (CO ₂), fossil	1
Methan (CH ₄), fossil ²	27,75
Methan (CH ₄), regenerativ	25
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	298
Tetrachlormethan	1.400
Tetrafluormethan	7.390
Hexafluorethan	12.200
Halon 1301	7.140
R22	1810
Trichlorethan	146
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	22.800
Quelle: [IPCC 2007]	

Nach IPCC werden viele weitere Gase für die Berechnung des GWP berücksichtigt. Diese fehlen in Tabelle A-1, weil sie nicht Teil der Inventardaten dieser Ökobilanz sind.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Mengen der einzelnen treibhausrelevanten Schadstoffe (m_i) und dem jeweiligen GWP (GWP_i) nach folgender Formel berechnet:

$$GWP = \sum_i (m_i \times GWP_i)$$

Es gilt zu beachten:

Unter Ökobilanzexperten werden zwei Ansätze zur Modellierung und Berechnung des CO₂-basierten Treibhauseffekts in Bezug auf biogenen Kohlenstoff zur Wirkungsabschätzung angewandt. Die zwei diskutierten Ansätze sind

- a) der „Kohlenstoff-Aufnahme“-Ansatz: die Aufnahme von nicht-fossilem CO₂ wird im Modell als negatives GWP in der Pflanzen-Wachstumsphase berücksichtigt und der nicht-fossile Kohlenstoff bei der Freisetzung als positives GWP angerechnet.

² Gemäß IPCC (2007) werden indirekte Wirkungen wie die Oxidation von CH₄ zu CO₂ nicht in den im IPCC-Bericht aufgeführten Treibhauspotenzialen berücksichtigt. Deshalb wurde ein CO₂-Äquivalent pro CH₄-Molekül hinzugezählt.

- b) der „Kohlenstoff-neutral“-Ansatz: Die Aufnahme von nicht-fossilem CO₂ wird im Treibhauseffekt ebenso wie seine Freisetzung als nicht-fossiles CO₂ außer Acht gelassen.

In der vorliegenden Studie wird Ansatz b) angewandt. Dennoch wurde die CO₂-Aufnahme auf der Inventardaten-Ebene NICHT vernachlässigt: Auf der Inventardaten-Ebene wird die CO₂-Fixierung in biogenen Materialien (z.B. Wachstum von Bäumen) als Entzug aus der Atmosphäre betrachtet, seine Freisetzung (z.B. thermische Behandlung von Karton) andererseits als CO₂-Emission angerechnet.

Methan-Emissionen von biogenen Materialien (z.B. auf Deponien) werden immer auf Inventardaten-Ebene UND als GWP ausgewiesen.

A 2. Terrestrische Eutrophierung

Die terrestrische Eutrophierung steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß für Böden. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass alle luftseitig emittierten Nährstoffe eine Überdüngung des Bodens darstellen.

Zur Berechnung der unerwünschten Nährstoffzufuhr wird der Indikator Eutrophierungspotential gewählt und dieser Indikator in der Maßeinheit Phosphatäquivalente [CML 1992, Klöpffer 1995a] angegeben. Nachfolgend sind die im Rahmen dieses Projektes vorkommenden verschiedenen Schadstoffe bzw. Nährstoffe mit ihrem jeweiligen Charakterisierungsfaktor aufgeführt:

Tabelle A-3: Eutrophierungspotential der im Rahmen dieser Studie berücksichtigten Stoffe

Schadstoff	PO ₄ ³⁻ -Äquivalente (NP _i) in kg PO ₄ ³⁻ -Äquiv/kg
Eutrophierungspotential (Boden)	
Stickoxide (NO _x als NO ₂)	0,13
Stickstoffdioxid (NO ₂)	0,13
Stickstoffmonoxid (NO)	0,13
Distickstoffmonoxid (Lachgas) (N ₂ O)	0,27
Ammoniak (NH ₃)	0,35
Quelle: [Heijungs et al 1992] in [CML Dez. 2007]	

Für die Nährstoffzufuhr in den Boden wird der Beitrag zum Eutrophierungspotential durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Schadstoffe und dem jeweiligen NP berechnet.

Es gilt für die Eutrophierung des Bodens:

$$NP = \sum_i (m_i \times NP_i)$$

A 3. Versauerung

Eine Versauerung kann sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Substanzen. Der in [CML 1992, Klöpffer 1995a] beschriebene ausgewählte Wirkungsindikator Säure-

bildungspotential wird als adäquat dafür angesehen. Damit sind insbesondere keine spezifischen Eigenschaften der belasteten Land- und Gewässersysteme vonnöten. Die Abschätzung des Säurebildungspotentials erfolgt üblicherweise in der Maßeinheit der SO₂-Äquivalente. Nachfolgend sind die in dieser Studie erfassten Schadstoffe mit ihren Versauerungspotentialen, engl. „Acidification Potential (AP)“, in Form von SO₂-Äquivalenten aufgelistet:

Tabelle A-4: Versauerungspotential der im Rahmen dieses Projekts erhobenen Stoffe

Schadstoff	SO ₂ -Äquivalente (AP _i)
Schwefeldioxid (SO ₂)	1
Schwefeltrioxid (SO ₃)	0,8
Schwefeloxide (SO _x als SO ₂)	1
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	1,88
Schwefelsäure (H ₂ SO ₄)	0,65
Schwefelkohlenstoff (CS ₂)	1,68
TRS (Total Reduced Sulphur), als S	2,0
Stickstoffdioxid (NO ₂)	0,7
Stickstoffmonoxid (NO)	1,07
Stickoxide (NO _x als NO ₂)	0,7
Chlorwasserstoff (HCl)	0,88
Fluorwasserstoff (HF)	1,6
Cyanwasserstoff (HCN)	1,6*
Hydronitrat/Salpetersäure (HNO ₃)	0,51
Phosphorsäure (H ₃ PO ₄)	0,98
Ethanthiol/Ethylmercaptan	1,03
Mercaptane	0,84**
Ammoniak (NH ₃)	1,88

Quelle: [Hauschild und Wenzel 1998] in [CML Dez. 2007], [Klöpper 1995b]:
 *Annahme wie HF; **Annahme Propanthiol, stöchiometrisch abgeleitet

Der Beitrag zum Versauerungspotential wird durch Summenbildung aus dem Produkt der ermittelten Menge der einzelnen Schadstoffe und dem jeweiligen AP nach folgender Formel berechnet:

$$AP = \sum_i (m_i \times AP_i)$$

A 4. Toxische Schädigung von Menschen durch Feinstaub (PM10)

Unter dem Begriff Feinstaub (PM 10) sind Primärpartikel und Vorläufersubstanzen für Sekundärpartikel zusammengefasst. Sie werden in der vorliegenden Studie basierend auf einem Ansatz der Europäischen Umweltagentur (European Environment Agency, EEA) charakterisiert.

Epidemiologische Studien haben eine Korrelation zwischen der Exposition von Partikeln und der Sterberate durch Atemwegserkrankungen sowie einer Schwächung des Immunsystems nachgewiesen. Als relevant haben sich die Kleinstpartikel mit einem Durchmesser von <10 µm und insbesondere solche mit einem Durchmesser <2,5 µm (kurz bezeichnet als PM10 bzw. PM2,5) erwiesen. Diese Partikel können nicht durch Schutzmechanismen absorbiert werden, dringen daher tief in die Lunge ein und verursachen dort Schäden. Feinstaub kann durch Emissionen und verschiedene Mechanismen gebildet werden: Einerseits werden Kohlenstoff-Partikel bei Verbrennungsprozessen direkt emittiert (Primärpartikel), andererseits werden die Partikel durch chemische Prozesse aus Vorläufersubstanzen wie Stickoxiden, Schwefeloxiden, Ammoniak (NH₃) und NMVOC gebildet (Sekundärpartikel).

Als Indikator der Kategorie „Toxische Schädigung von Menschen durch Feinstaub (PM10)“ wurde die absolute Menge an Staubpartikeln und Sekundärpartikeln gewählt, die einen aerodynamischen Durchmesser <10 µm aufweisen (PM10), gemessen in kg PM10-Äquivalente. Die von der Europäischen Umweltagentur [Leeuw 2002] ermittelten Charakterisierungsfaktoren (siehe untenstehende Tabelle) werden zur Quantifizierung der Sekundärpartikel bildenden Verbindungen (z.B. SO_x, NO_x und NH₃) herangezogen. Sie werden als repräsentativ für die Bedingungen in Europa eingestuft. Für NMVOC ist die Zuordnung schwierig und verlangt die Kenntnis der Einzelverbindungen. Der von [Heldstab et al. 2003] für die NMVOC-Emissionen in der Schweiz abgeleitete Mittelwert des PM10-Potenzials beträgt 0,012 und wurde für diese Studie herangezogen. Keine der beiden genannten Quellen macht Angaben über die Quantifizierung der Diesel-Partikel. Es wurde daher die (konservative) Annahme getroffen, dass Diesel-Partikel vollständig aus der Staubfraktion <10 µm Durchmesser bestehen. Daher wurden sie mit dem Faktor 1 klassifiziert.

Tabelle A-8: PM10-Risikopotenzial von Luftschadstoffen

Partikel PM10 und Vorläufersubstanzen	PM10-Äquivalente in kg PM10-Äq./kg
Partikel PM10	1
Partikel aus Dieselemissionen	1**
Sekundäraerosolbildner	
NO ₂	0,88
NO	0,88
NO _x als NO ₂	0,88
SO ₂	0,54
SO _x als SO ₂	0,54
NH ₃	0,64
NMVOC (unspezifiziert, Kohlenwasserstoffe und aus Dieselemissionen)	0,012*

Quelle: [Leeuw 2002]; *[Heldstab et al. 2003], ** IFEU-Annahme

Der Beitrag zum Potenzial wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Schadstoffe und dem jeweiligen PM10-Potenzial nach folgender Formel berechnet:

$$PM10 = \sum_i (m_i \times PM10_i)$$

A 5. Quellenverzeichnis

- [CML 1992]: Environmental life cycle assessment of products, Guide and backgrounds, Center of Environmental Science (CML), Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Fuels and Raw Materials Bureau (B&G), Leiden, 1992.
- [CML et al. 2002]: Guinée, J.B. (Ed.) - Centre of Environmental Science - Leiden University (CML), de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M., Lindeijer, E., Roorda, A., van der Ven, B., Weidema, B.: Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Eco-Efficiency in Industry and Science Vol. 7. Kluwer Academic Publishers, Netherlands 2002.
- [Heldstab 2003] Heldstab, J. et al.: Modelling of PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010. Environmental Documentation No.169. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape SAEFL. Bern, Switzerland, 2003.
- [IPCC 1995]: IPCC (Publisher): Intergovernmental panel on the climatic change. Climatic Change, Report to the United Nations 1996, New York (USA) 1995.
- [Klöpffer 1995a]: Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien, UBA-Texte 23/95, Berlin, 1995.
- [Leeuw 2002]: Leeuw, F.D.: A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution, Bilthoven 2002.

Literaturliste

ATLASOLE 2012:

<http://atlasole.gse.it/atlasole/Listalimpianti.aspx?regione=004&provincia=021&comune=&minpotenza=0&maxpotenza=&classe=0>

AEPB 2010: Amt für Energieeinsparung der Provinz Bozen, Die neuen Kriterien zur Energieförderung im Überblick, Bozen April 2010

BISOTHERM 2012: Firma Bisotherm GmbH; Mülheim-Kärlich, 2012, <http://www.bisotherm.de>

BAUNETZ 2012: BauNetz Media GmbH; Berlin, 2012, www.baunetz.de

BMVBS 2012: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin 2012, <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/oekobaudat.html>

BTU 2010: Brandenburgische Technische Universität Cottbus; Ökologische Prozessbetrachtungen – RC Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), November 2010

BV Porenbeton 2011: Bundesverband Porenbetonindustrie e.V., Berlin, 2011

ENERGIESPARHAUS 2012: Energiesparhaus Agentur, Zaubertal Österreich 2012, <http://www.energiesparhaus.at/denkwerkstatt/uwert.htm>

ENERGLOBE 2012: <http://www.energoclub.org/news/dove-finisce-il-mio-impianto-fv-fine-vita>

FH-HILDESHEIM 2009: Fachhochschule Hildesheim/Baukonstruktion und Bauphysik in der Fakultät Bauwesen, 2009

GSE 2009: Solare fotovoltaico – Rapporto statistico 2009

GSE 2010: Solare fotovoltaico – Rapporto statistico 2010

HAHNE 2010: Hahne, A. und Hirn, G., Recycling von Photovoltaik-Modulen. BINE Informationsdienst. Projektinfo 02/10

HELLMANN 2010 Hellmann und Kummer, Resolar – Entwicklung eines europaweiten Rücknahmesystems für Solarmodule. Forschungsprojekt. DBU

IPEG 2012: Institut für preisoptimierte energetische Gebäudemodernisierung GmbH, Paderborn 2012, <http://www.ipeg-institut.de>

IBU: Institut Bauen und Umwelt e.V.: Umwelt-Deklarationen (EPD), <http://bau-umwelt.de/hp1/Startseite.htm>, Zugriff im Juni 2012

- IZT 2009: Volker Handke, u. a. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung „Umweltstandards für thermische Solarkollektoren unter besonderer Berücksichtigung der selektiven Beschichtung ihrer Absorberoberflächen“, Juli 2009
- JUNGBLUTH 2007 Jungbluth, N. „Sonnenkollektor-Anlagen.“ In Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.ecoinvent report No. 6-XI, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- KÖNIGSTEIN 2007: Königstein T.: Ratgeber energiesparendes Bauen, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart
- KLB 2012: Klimaleichtblock GmbH, Andernach, 2012, <http://www.klb-klimaleichtblock.de>
- KLIMALAND 2012: <http://www.klimaland.bz.it/abfall/abfallerzeugung-suedtirol/>
- KUMMER 2012: Kummer, B., Umsetzung der REACH- und GHS-Verpflichtungen in der Recyclingwirtschaft, Müll und Abfall, 4/12.
- LfU 2003: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Photovoltaik- und Solarthermieanlagen. Aufbau, Verwendung, Verwertung und Entsorgung, Augsburg 2003
- ÖKOBAU.DAT: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Datenbank „ökobau.dat“; <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/oekobaudat.html>; Zugriff im Juni 2012
- ÖKOPOL 2004: Ökopol, Institut für Ökologie und Politik GmbH Hamburg und IE, Institut für Energetik und Umwelt GmbH, Leipzig (2004): Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung; Hamburg, Leipzig.
- PIXELIO 2012 Abb. 15: 339490_R_K_B_by_Christoph-Aron,
Abb. 25: 299179_original_R_by_Michael Struppek,
Internetzugriff: www.pixelio.de
- PETIT, E. 1997: Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Naßaufbereitung von Bauschutt. Aachener Beiträge zur Angewandten Rechner-technik, Bd. 22, 1997
- QUASCHNING 2012: Erneuerbare-Energien-und-Klimaschutz.de - <http://www.volker-quaschning.de/datserv/pv-welt/index.php>)
- RATGEBERZENTRALE 2012 R-G-Z RatGeberZentrale GmbH, Reichenberg, 2012, www.ratgeberzentrale.de
- SANDER 2007: Sander, K. et.al., Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystem für Photovoltaische Produkte; BMU, 03MAP092
- SOMMER 2011: Sommer, A.: Passivhäuser : Planung - Konstruktion - Details - Beispiele. Müller. Köln
- SPIEGEL 2012: (<http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/solarfirma-first-solar-streicht-2000-jobs-a-828104.html>)

SCHLAGMANN 2012: Firma SCHLAGMANN BAUSTOFFWERKE GMBH + CO KG 2012,
<http://www.schlagmann.de/>

SCHLENK 2012: Carl Schlenk AG, Roth 2012, <http://www.schlenk.com>

SCANHAUS 2012: ScanHaus Marlow GmbH, Marlow 2012, <http://www.scanhaus.de>

VZS 2012: Verbraucherzentrale Südtirol, Bozen Juni 2012,
<http://www.consumer.bz.it/faq.php?lang=de&mode=view&ID=38&IBa>

WAMBACH 2003: Wambach, K., The photovoltaic industry EPR for new energy systems.
Sunicon. Germany