

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

## Diplomarbeit

# Ökologische Bewertung von großflächigen Glasfassaden Vergleich von verschiedenen Befestigungsstrukturen - speziell von Holz-Glas-Klebeverbindungen mit metallischen Klemmsystemen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des  
akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
unter der Leitung

o.Univ.Prof. Dipl.Dipl.-Ing. Wolfgang Winter  
E259/2 - Institut für Architekturwissenschaften  
Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13, 1040 Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Wolfgang Kornblum  
Matrikelnummer 1028189  
Buchfeldgasse 10/15, A-1080 Wien

Wien, 27.05.2013



# Kurzfassung

Die ökologischen und energetischen Schwerpunkte von Bauaufgaben haben in den letzten Jahren an Priorität gewonnen. Zu einem Zeitpunkt, an dem die Diskussionen über den anthropogenen Klimawandel mehr und mehr in den Fokus der Gesellschaft und der Politik rücken, hat gerade auch die Gebäudeplanung eine große Verantwortung. Etwa 30% der genutzten Primärenergie entfallen auf die Errichtung, Nutzung und Entsorgung von Gebäuden unterschiedlicher Typen. Somit ist der Beitrag zu den Themen der globalen Umweltbeeinträchtigungen bedeutend, aber das Potenzial nachhaltige Verbesserungen zu erzielen gleichwertig hoch.

Der primäre Energiebedarf über den Lebenszyklus eines Gebäudes hängt von seiner Geometrie und Nutzungsart, der bauphysikalischen Qualität der Gebäudehülle und den entsprechenden Heiz- und Kühllasten sowie der Materialwahl ab. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Gegenüberstellung großflächiger Glasfassaden aus metallischen Profilen und Holz-Glas-Verbundelementen.

Einführend wird die Entwicklung dieser Verbundkonstruktionen erläutert, deren statisch wirksame Verklebung die konstruktiven Vorteile beider Stoffe symbiotisch miteinander verbindet. So entstehen statisch, bauphysikalisch und architektonisch leistungsfähige Elemente, die gerade im Bereich der Glasfassaden Teil ökologisch hochwertiger Energiekonzepte sein können. Als Basis des ökologischen Fassadenvergleichs dient das Prinzip der Ökobilanz. Diese betrachtet ein Gebäude im Kontext seines gesamten Lebenszyklus und trifft quantitative Aussagen zum Primärenergiebedarf und den damit verbundenen Umwelteinwirkungen.

Der Vergleich im Hauptteil der Arbeit bewertet fünf unterschiedliche konstruktive Lösungen hinsichtlich ihrer ökologischen Sinnhaftigkeit. Dabei werden reine Aluminium-Pfosten-Riegel-Klemmsysteme und der Ersatz der Hauptstruktur durch Brettschichtholzprofile drei Detaillösungen der Holz-Glas-Verbundfassaden gegenübergestellt. In der Auswertung werden Aussagen über die größten Einflussfaktoren über den Lebenszyklus, die Materialwahl, die statische und thermische Qualität getroffen.

Während der Auseinandersetzung mit den Themen der nachhaltigen Gebäudeplanung drängen sich Fragestellungen auf, die im abschließenden Kapitel kommentiert werden. Zunächst wird das Potenzial der methodischen Lebenszyklusanalyse für den architektonischen Alltag diskutiert, deren Denkweise eine facettenreiche Perspektive auf ein Gebäude ermöglicht. Weiter wird nochmals vertieft auf die architektonisch gestalterischen Möglichkeiten eingegangen, die die Holz-Glas-Verbundfassaden bieten. Abschließend werden die konstruktiven Aufgabenstellung innerhalb der HGV-Elemente herausgestellt und denkbare Weiterentwicklungen aufgezeigt, die vor allem die Integration der großflächigen Glasfassaden in energetische Gebäudekonzepte beinhalten.



# Abstract

The environmental and energy aspects of building projects have assumed increased priority in recent years. At a time when discussions on anthropogenic climate change are increasingly in social and political focus, building design also has a great responsibility. Approximately 30% of primary energy demand is consumed in the construction, use and disposal of buildings of various types. Thus, the contribution to the issues of global environmental damage is significant, but the potential to achieve sustainable improvements is equally high.

The primary energy consumption over the life cycle of a building depends on its geometry and type of use, the physical qualities of the façade, the proper heating and cooling loads as well as the choice of material. The focus of this work lies in the juxtaposition of large glass façades made of metal profiles and wood-glass composite elements.

The introduction will explain the development of these composite structures, whose statically effective bonding symbiotically combines the advantages of both construction materials. The result is elements with high static, physical and architectural performance that can contribute greatly to ecologically valuable energy concepts the area of glass façades in particular. The LCA principle serves as the basis for an ecological comparison of façades. This considers a building in the context of its entire life cycle and provides quantitative information on the primary energy requirements and the associated environmental impact.

The comparison in the main part of the work evaluates five different design solutions with respect to their ecological meaningfulness. Specifically, basic aluminium profile clamping systems and the replacement of the main structure with glued laminated timber profiles are compared to three detailed wood-glass composite façade solutions. The evaluation will make assertions on the most influential factors over the life cycle, the choice of material, and the static and thermal quality.

While addressing the issues of sustainable building design, questions arise that will be addressed in the final chapters. Firstly, the potential of the LCA methodology—a way of thinking that enables a multifaceted view of a building—for day-to-day architectural work is discussed. Subsequently, the architectural design possibilities offered by the wood-glass composite façades will be discussed in greater depth. Finally, the constructive tasks within the wood-glass composite elements are highlighted and conceivable developments shown, which mainly include the integration of large glass façades into energy concepts for buildings.

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	8
1.1	Holz-Glas-Verbundkonstruktionen	8
1.1.1	Holz und Glas im statischen Verbund	9
1.1.2	HGV-Konstruktionen - Stand des Wissens	11
1.1.3	Anwendungsbeispiele	12
1.2	Großflächige Glasfassaden im Gebäudekontext	18
1.2.1	Stand und Entwicklung metallischer Fassadensysteme	18
2.	Methodik der Ökobilanzierung (LCA) im Hochbau	21
2.1	Denk- und Herangehensweisen der lebenszyklischen Betrachtung	21
2.2	Die Inhalte der Ökobilanz - Sachbilanz und Wirkungsabschätzung im Detail	23
	Primärenergiebedarf P <sub>ne</sub> und P <sub>ern</sub>	23
	Treibhauspotenzial GWP	24
	Ozonschichtabbaupotenzial ODP	24
	Versauerungspotenzial AP	25
	Euthrophierungspotenzial EP	25
	Photooxidantienbildungspotenzial POCP	25
2.3	LCA in Zertifizierungssystemen für Gebäude	26
2.4	Lebenszykluskosten in der Fassadenplanung	20
3.	Vergleichende Ökobilanzierung von HGV-Fassaden und metallischen Systemen	27
3.1	Lebenszyklusbetrachtung der Baumaterialien	27
3.1.1	Lebenszyklus Schnittholz Fichte	28
3.1.2	Lebenszyklus Brettschichtholz	32
3.1.3	Lebenszyklus Dreischichtplatten	36
3.1.4	Lebenszyklus Furnierschichtholz	40
3.1.5	Lebenszyklus Einfachverglasung	44
3.1.6	Lebenszyklus Isolierverglasung	48
3.1.7	Lebenszyklus Silikondichtung- und klebstoffe	52
3.1.8	Lebenszyklus Aluminiumprofil	56
3.1.9	Lebenszyklus Baustahl	60
3.2	Ökologischer Fassadenvergleich	64
	Fassadenausschnitt Verlagsgebäude Hamburg ‚Ericusspitze‘	
3.2.1	Lebenszyklus der Fassaden	65
3.2.2	Darstellung der Basisstudie - Aluminiumfassade	70
3.2.3	Darstellung der Basisstudie - BSH-Fassade	76
3.2.4	Remodellierung Aluminiumfassade	82
3.2.5	Remodellierung BSH-Fassade	86

3.2.6	Ökobilanzierung Holz-Glas-Verbund Variante A	90
3.2.7	Ökobilanzierung Holz-Glas-Verbund Variante B	96
3.2.8	Ökobilanzierung Holz-Glas-Verbund Variante C	102
3.2.9	Auswertung	108
3.3	Einflüsse von Konstruktion, Prozessen in den Lebensabschnitten und der Szenarienbildung auf die ökologische Fassadenbewertung	111
3.3.1	Einfluss konstruktiver Zusammenhänge	112
3.3.2	Teilabschnitte der Lebenszyklus	116
3.3.3	Szenarien und Datengrundlagen	120
4.	Schlussfolgerungen: Ökologische Gebäudebewertung und der Einfluss auf die architektonische Praxis	125
4.1	Raumgestalterische Perspektive der Holz-Glas-Verbundfassaden	125
4.2	Architektonische und kulturelle Kriterien in der Gebäudezertifizierung	126
4.3	LCA als integrierbares Hilfsmittel in der frühen Phase der Gebäudeplanung	128
4.4	Gestalterische Alternativkonzepte der materiellen Wiederverwendung	129
4.5	Konstruktive Entwicklung der Koppelleiste	130
4.6	Großflächige Glasfassaden im Kontext der Gebäudeökobilanz	136
5.	Literaturverzeichnis	138
6.	Abbildungsverzeichnis	140
7.	Tabellenverzeichnis	145

# 1. Einleitung

## 1.1 Holz-Glas-Verbundkonstruktionen

### 1.2 Großflächige Glasfassaden im Gebäudekontext

In den einleitenden Kapiteln werden zunächst die Holz-Glas-Verbundkonstruktionen beleuchtet. Dabei werden die zugrunde liegenden Gedanken aufgezeigt und die materiellen Eigenschaften der Verbundpartner sowie deren kombiniertes Zusammenspiel erläutert. Ein kurzer Exkurs durch das Forschungsfeld der Verbundbauweise aus Holz und Glas beschreibt den Entwicklungsstand und die Perspektive dieser Konstruktionen, um im weiteren anhand zweier Realisierungsbeispiele das umgesetzte Potenzial aufzuzeigen. Da sich diese Arbeit auf die ökologischen Zusammenhänge von großflächigen Glasfassaden konzentriert, werden im Folgenden aktuelle Entwicklungen der konstruktiven Fragestellungen metallischer Lösungen angeführt. Abschließend wird der Blick auf die ökonomischen Gesichtspunkte gerichtet, die innerhalb der Gebäudeplanung mit großflächig verglasten Fassaden eine hohe Bedeutung haben.

## 1.1 Holz-Glas-Verbundkonstruktionen

### 1.1.1 Holz und Glas im statischen Verbund

### 1.1.2 HGV-Konstruktionen - Stand des Wissens

### 1.1.3 Anwendungsbeispiele

In einem Zeitraum, indem ökologische Fragestellungen in Bereichen der Energiegewinnung, der Produkterzeugungs- und nutzungseffizienz und auch vielen weiteren wirtschaftlichen Branchen

immer weiter in den Fokus rücken, drängt sich der Blick auf die Fassade innerhalb der Gebäudeplanung geradezu auf. Ein bedeutsamer Anteil der gesamten österreichischen Energienutzung entfällt auf die Errichtung und Nutzung von Gebäuden. Die Gebäudehülle trägt dabei gerade im Bereich der großflächigen Glasfassaden eine vordergründige Rolle. Zum einen fallen bei einer Realisierung mit etablierten metallischen Profilen enorme Energieaufwendungen in der Produktionsphase an, zum anderen trägt die thermische Qualität der Hülle zur Frage des Heiz- und Kühlbedarfs während der Gebäudenutzung bei. Im Bereich dieser Schwerpunkte agiert die Entwicklung von Holz-Glas-Verbundfassaden als alternativer Konstruktionsansatz. Die Förderung nachwachsender Rohstoffe aus nachhaltig bewirtschafteten Waldflächen trägt maßgeblich zur Verbesserung der Energiebilanz im Gebäude-

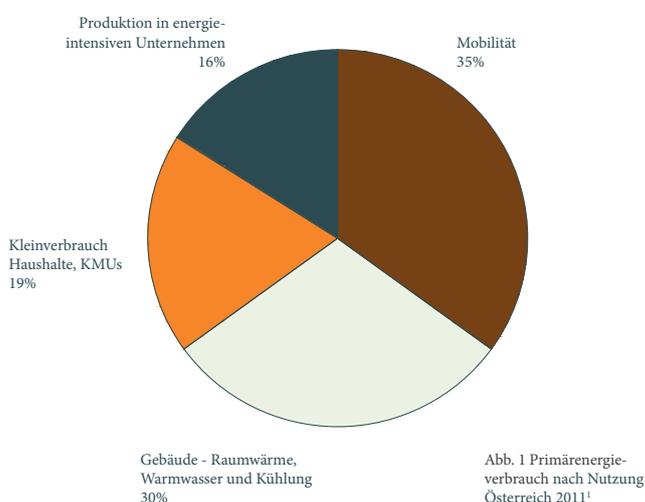


Abb. 1 Primärenergieverbrauch nach Nutzung Österreich 2011<sup>1</sup>

<sup>1</sup> nach Angaben Klimaschutzbericht 2011 - Umweltministerium

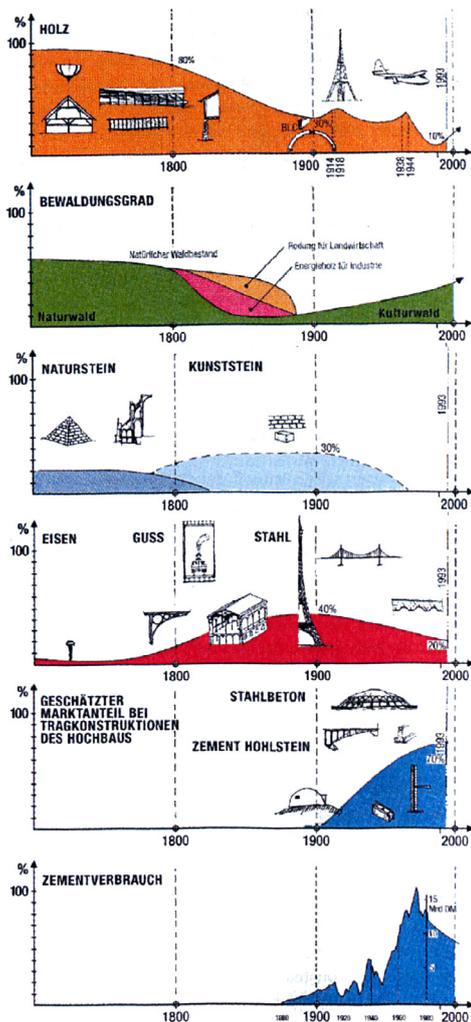


Abb. 2 Bau- und Rohstoffeinsatz in Mitteleuropa

sektor bei. Durch die wachstumsbedingte Bindung von Kohlenstoffdioxid zeigt die Verwendung zudem Potenzial auf die Treibhausproblematik zu antworten. Die konstruktive Verbindung mit Glas, die im Folgenden detaillierter erläutert wird, hebt dabei auch die tragwerksbezogene Qualität. Im Verbund vermögen es die beiden Materialien die durch strukturellen Unterschiede entstehenden Nachteile des jeweils anderen auszugleichen. Die hohe Druckfestigkeit der Verglasung ergänzt die relativ hohe Zugfestigkeit des Holzes. Die Verwendung dieses konstruktiven Prinzips hält einen weiteren Vorteil parat: die Verglasung mit ihrer Funktion als transparente Schicht zwischen Innen- und Außenraum ist immer Teil der Gebäudehülle. Hier wird sie um eine weitere Funktion ergänzt, anstatt ein neues Material in den Aufbau einzufügen. Dies hat im Rückschluss wiederum positiven Einfluss auf die ökologische Qualität eines Gebäudes, in der die Gesamtmasse und die regionale Verfügbarkeit von Materialien zentral sind.

## 1.1.1 Holz und Glas im statischen Verbund

*Holz, Eigenschaften*

*Floatglas, Eigenschaften*

*Klebstoffe*

*Die Materialien im Verbund*

*Holz, Eigenschaften*

Die Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen machen die Verwendung innerhalb der Gebäudehülle in vielerlei Hinsicht sinnvoll. Ein wichtiges ökologisches Kriterium bei der Nutzung ist unter anderem die Regionalität und die Nachhaltigkeit der Waldbewirtschaftung. Für Haupttragstruktur der untersuchten Holz-Glas-Verbundfassaden wird so etwa Brettschichtholz aus Fichtenholz verwendet, das den mit Abstand größten Flächenanteil

der österreichischen Wälder einnimmt. Technisch qualifiziert sich der Werkstoff vor allem durch seine geringe Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ), was den konstruktiven Aufwand zur Vermeidung von Wärmebrücken im Vergleich zu anderen Fassadenmaterialien erheblich reduziert. Gleichzeitig liegen die energetischen Aufwendungen in der Herstellung von Holzprodukten viele Größenordnungen unter denen von etwa Aluminiumprofilen. Der zentrale Aspekt

im Bereich von Verbundwerkstoffen ist die Eigenschaft der temperaturbezogenen Längenänderung. Der vergleichbare Ausdehnungskoeffizient ( $\alpha$ ) von Holz und Floatglas ermöglicht erst die Kombination. Auch für den raumklimatischen Einfluss ist die Materialwahl von Bedeutung. Durch das hygroskopische Verhalten, das die Holzfeuchte als Gleichgewichtsreaktion an die Umgebungsfeuchte anpasst, wirkt das Material als Puffer, der die Raumfeuchte mit reguliert.

### Floatglas, Eigenschaften

Die untenstehenden Darstellungen zeigen die hervorragende Kombinierbarkeit hinsichtlich der Ausdehnungskoeffizienten von Holz und Glas auf. Die Fähigkeit des Glases, hohe Druckbeanspruchungen aufnehmen zu können, wurde lange Zeit nicht ausgenutzt. Das Hauptargument lag dabei im spröden Versagensverhalten des Werkstoffes.

Aus bauphysikalischer Perspektive hat die Qualität der Verglasung eine große Bedeutung. Die Produktion von Mehrfachverglasungen, die Schritte der Beschichtung und Gasbefüllung machen einen hohen Anteil der aufgetragenen Primärenergie aus. Über den Zeitraum der Nutzung amortisiert sich dieser Einsatz aber über die erzielten Einsparungen von Heiz- und Kühlbedarf einer thermisch hochwertigen Gebäudefassade aber.

### Klebstoffe

Die Kraftübertragung zwischen Holzleisten und Verglasung übernehmen Klebstoffe, deren physikalischen Eigenschaften die Leistungsfähigkeit und

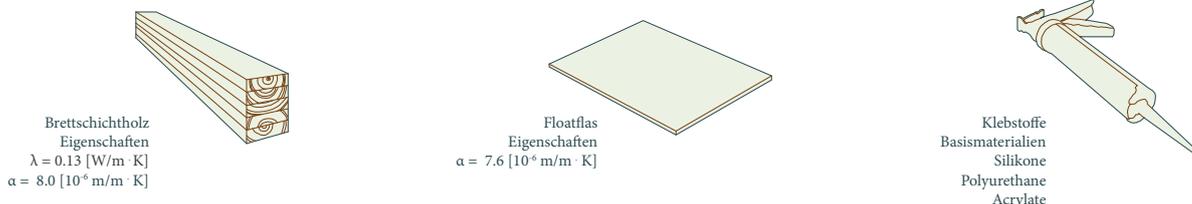
Art der Lasteinleitung mitbestimmen. Über die Auswirkungen der Verwendung unterschiedlicher Klebstoffe wird im Kapitel 3.3 weiter eingegangen, das die statische Qualität aus der lebenszyklischen Sichtweise näher betrachtet. Die im Hauptteil untersuchten und verglichenen HGV-Konstruktionen verwenden silikon-basierte Klebstoffe, deren geringer Massenanteil allerdings quantitativ nicht berücksichtigt wird. In weiteren statischen Versuchen wurden die Qualitäten von acrylat- und polyurethan-basierten Klebern getestet.

### Die Materialien im Verbund

Das grundsätzliche Potenzial des Verbundes basiert auf den beschriebenen Eigenschaften der Einzelkomponenten und ihrer Kombination. Die Ergänzung der Zugfestigkeit des Holzes parallel zur Faser mit der Druckfestigkeit des Glases bewirken eine gegenseitige Unterstützung. Je nach Fall der Lasteinleitung in die Scheibe fungiert der Holzrahmen als Kantenschutz oder Bewehrung, über die Klebung wird eine gleichmäßige Kraftübertragung erreicht. Der Einsatz dieses Zusammenspiels wird neben der Fassadennutzung in unterschiedlichen Tragwerksbereichen wie Verbundstützen, Trägern und Platten untersucht. Die Integration solch eines Rahmens im Kontext einer Pfosten-Riegel-Fassade schöpft dieses Potenzial aus; die Fassade kann so Aussteifungsaufgaben im Gebäude übernehmen. Außerdem unterstützt die kraftschlüssige Verbindung die Stabilität der Hauptkonstruktion.

Der tragwerkstechnische Fokus dieser vergleichenden Arbeit wird der ökologische Mehrwert dieser funktionalen Zusammenhänge sein.

Abb. 3 physikalische Eigenschaften Verbundmaterialien



## 1.1.2 HGV-Konstruktionen - Stand des Wissens

Im Weiteren wird ein kurzer Überblick über die Entwicklung im Forschungsfeld der Holz-Glas-Verbundwerkstoffe am ITI (Institut für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau) anhand der Veröffentlichungen gegeben.

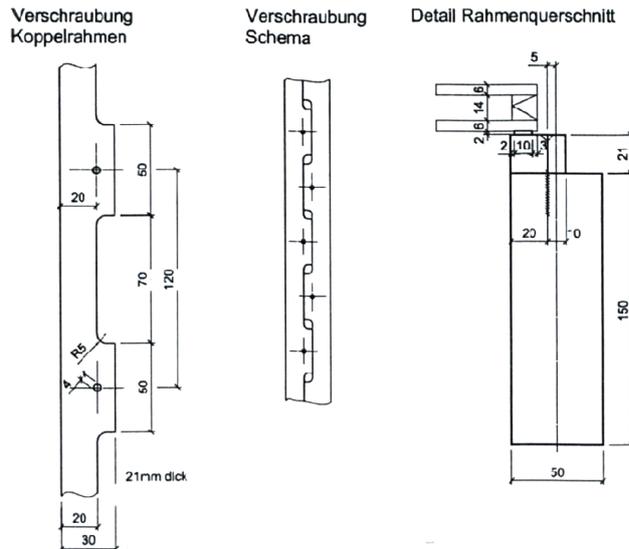


Abb. 4 Verzahnte Koppelleiste aus Edl, Thomas

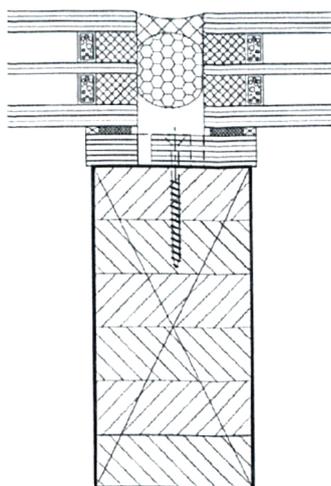


Abb. 5 Detail Eichgraben, aus Neubauer

In der Dissertation von Jan Hamm<sup>2</sup> (1999) wird das Thema der statisch relevanten Klebeverbindungen zwischen Holz und Glas erstmalig untersucht. Der Fokus der Arbeit, die Versuchsaufbauten mit Scheiben, Trägern und Plattenbalken experimentell beschreibt, liegt auf den unterschiedlichen Ausführungsstärken der Klebstoffuge. Zudem werden erste Nachweismodelle und Sicherheitskonzepte vorgeschlagen.

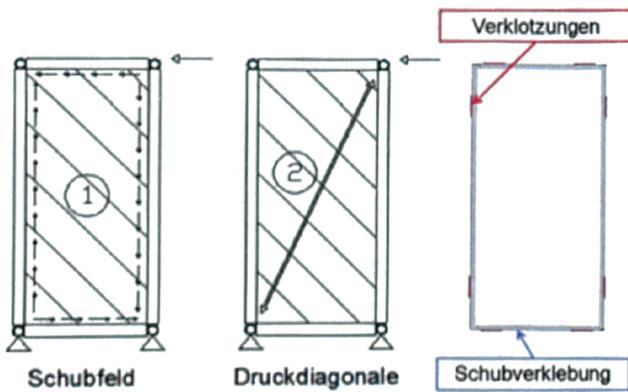
In der Arbeit von Peter Niedermaier<sup>3</sup> (2005) wird das Aussteifungspotenzial von Holz-Glas-Verbundscheiben für Wintergärten und Fassadenbauten dargestellt. Die Fügung erfolgt mittels flächiger Klebung aus Silikonen und Polyurethanen zwischen den Verbundmaterialien. Erstmals wird die Trennung von Hauptkonstruktion und Aussteifungsebene vorgeschlagen, die Subkonstruktion wird mittels Verschraubung auf die Tragkonstruktion aufgebracht.

In der weiteren Entwicklung steht die Dissertation von Thomas Edl<sup>4</sup> aus dem Jahr 2008, die sich tiefgehend mit der Fügung von Koppelleiste und Fassaden-Haupttragstruktur auseinandersetzt. Dort werden unterschiedlichen konstruktive Varianten entworfen. Unter anderem wird die Idee von verzahnten Koppelleisten entwickelt, die eine Fügung auf schmalerem Pfosten und Riegeln ermöglicht. Außerdem untersucht die Arbeit weitere Möglichkeiten elastischer Klebstoffe zur gleichmäßigen Lastverteilung in die Glasscheibe.

In der Arbeit von Georg Neubauer<sup>5</sup> (2011) werden weitere alternative Ausführungsansätze der Koppelleiste angedacht. Dabei werden auch differierende materielle Lösungen wie die Verwendung von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GfK) untersucht und deren physikalischen Eigenschaften gegenübergestellt. Diese Versuche basieren auch auf der Problematik der Feuchteanfälligkeit einer hölzernen Koppelleiste und den dadurch entstehenden Spannungen in der Klebefuge. Weiter entwickelt Neu-

2 Dipl.Ing. Jan Hamm (1999) Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas. univ.Diss. EPF Lausanne  
 3 Dipl.Ing Peter Niedermaier (2005) Holz-Glas-Verbundkonstruktionen, Ein Beitrag zur Aussteifung von filigranen Holztragwerken. univ.Diss. TU München  
 4 Dipl.Ing. Thomas Edl (2008) Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe  
 5 Dipl.Ing. Georg Neubauer (2011) Entwicklung und Bemessung von statisch wirksamen Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zum Einsatz im Fassadenbereich

Abb. 6 Verklebung und Verklotzung, Hochhauser



bauer Bemessungskonzepte zu den Holz-Glas-Verbundkonstruktionen. Im Rahmen der Arbeit wird ein erster Testbau mit einer Pfosten-Riegel-Fassade aus HGV-Elementen errichtet, der im nächsten Kapitel kurz dargestellt wird.

In der Dissertation von Werner Hochhauser<sup>6</sup> und dem Forschungsprojekt zu Berechnung und Bemessungskonzepten<sup>7</sup> (jeweils 2011) wurde in erster Linie die Fügungstechnik erweitert. Die Verbindung der flächig umlaufenden Schubverklebung wurde mit der Anordnung von Klotzen ergänzt. Die aufnehmbaren Lasten erhöhen sich durch die Maßnahme deutlich. Weiter wurde die Entwicklung von Bemessungs- und Berechnungskonzepten weiter vorangetrieben.

### 1.1.3 Anwendungsbeispiele

*Schattenbox - EFH Eichgraben*  
*Erweitertes Konstruktionsprinzip*  
*Wintergarten Haus Haas*

*Schattenbox - EFH Eichgraben*

Wie bereits erwähnt wird in der Dissertation das Prototyp-Projekt der Verwendung von Holz-Glas-Verbundelementen innerhalb einer Fassade am Beispiel eines zweigeschossigen Einfamilienhauses dargestellt. Der 'Schattenbox' liegt ein Entwurf des Büros 'Superreal-Design Strategies' zugrunde, die Ausführung der Fassade wurde in Zusammenarbeit mit der Holzforschung Austria (HfA) entwickelt. Die sich über beide Geschosse der südlich orientierten Seite des Gebäudes öffnende Pfosten-Riegel-Fassade wurde mit Scheiben aus HGV-Elementen beplankt und kraftschlüssig an den in Holzmassivbauweise ausgeführten Bau angeschlossen. So übernimmt die Fassade einen Teil der Gebäudeaussteifung. Die großflächigen Öffnungen ermöglichen

hohe solare Einträge über diese Seite des Gebäudes, was zu einem sinnvollen Energiekonzept beiträgt. In der Planung der gewünschten Ausführung wurde auch das Thema der werksseitigen Vorfertigung erprobt. Die Verklebung von Koppelleiste und Glasscheibe kann unter optimalen Bedingungen erfolgen, der präzise Abstand und die Ausrichtung der beiden Komponenten konnte vor dem eigentlichen Klebevorgang mittels beidseitiger Klebebänder eingerichtet werden. Die vorproduzierten Holz-Glas-Verbundelemente müssen baustellenseitig nur noch verschraubt und abgedichtet werden. Diese Planungsentwicklungen haben großen Einfluss auf Umsetzbarkeit einer seriellen Fertigung, auf die Präzision und die Errichtungszeit und somit indirekt auch auf die ökologischen und ökonomischen Fragestellungen der lebenszyklischen Gebäudebetrachtung. Die nebenseitige zeichnerische Darstellung zeigt die Umsetzung der Integration von Öffnungselementen in HGV-Fassaden, wie sie innerhalb dieses Projektes gelöst worden sind.

<sup>6</sup> Dipl.Ing. Werner Hochhauser (2011) Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben

<sup>7</sup> Dipl.Ing. Werner Hochhauser, Prof. DDI Wolfgang Winter, Prof. Dr.-Ing. Klaus Kreher (2011) Holz-Glas-Verbundkonstruktionen - Band 1: Berechnungs- und Bemessungskonzepte, Abschlußbericht eines FFG geförderten Forschungsprojekts



Abb. 7 Schattenbox  
Außenansicht

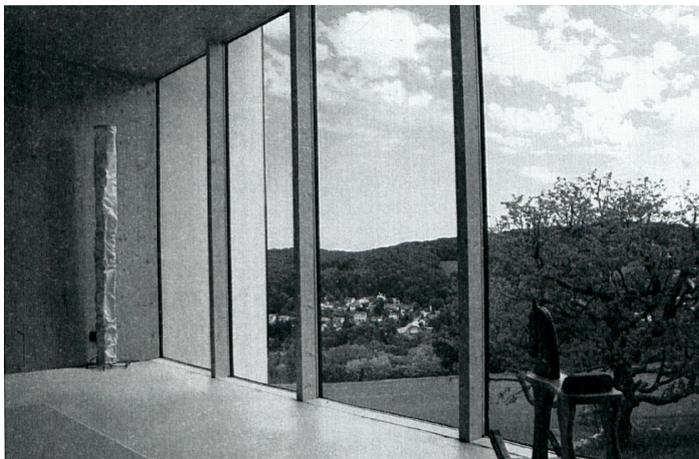


Abb. 8 Schattenbox  
Innenansicht

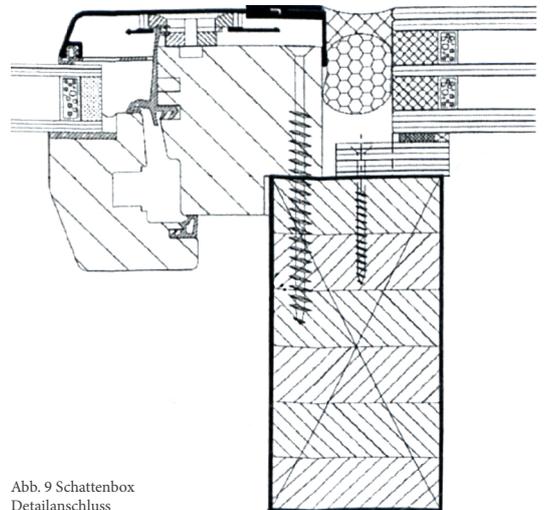


Abb. 9 Schattenbox  
Detailanschluss  
Öffnungselemente

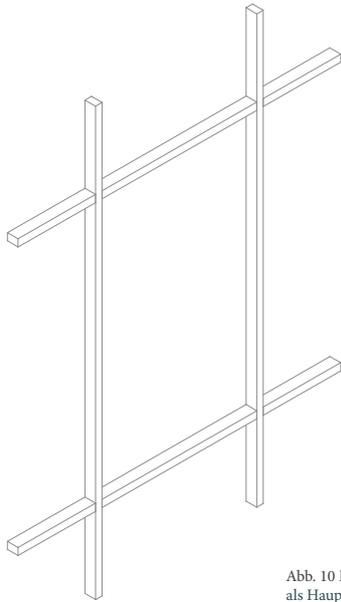


Abb. 10 Pfosten-Riegel-Konstruktion als Haupttragstruktur

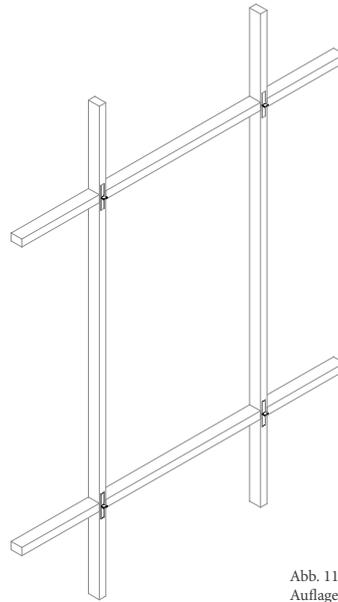


Abb. 11 Einlegen der Stahlwinkel als Auflager der vertikalen Lastabtragung des Verglasungseigengewichts

### *Erweitertes Konstruktionsprinzip*

Der Abschnitt über den 'Stand des Wissens' beschreibt die forschungsseitige Entwicklung der statischen und konstruktiven Umsetzungsmöglichkeiten der Holz-Glas-Verbundelemente, speziell im Einsatz als Fassadenbepunktung. Die hier abgebildeten Zeichnungen zeigen das Konstruktionsprinzip der kombinierten Fügung aus Verklebung und zusätzlicher Verklotzung, das die Leistungsfähigkeit der HGV-Elemente deutlich erhöht.

Im Einsatz als Pfosten-Riegel-Fassade werden Hauptstruktur und HGV-Elemente separat errichtet und auf der Baustelle verschraubt. Zur Unterstützung der Konstruktion wird in die Pfosten eine stählerne Hilfsvorrichtung eingelassen, die zur vertikalen Lastableitung der Verglasungseigengewichte beiträgt. Das entsprechende Gegenstück dazu verstärkt die Furnierschichtholz-Koppelleisten an deren Ecken. Weiter werden diese Leisten mit einer zusätzlichen Kontur im unteren Bereich versehen, die ebenfalls zur Eigenlastaufnahme beiträgt.

Im vierten Bild der Vorfertigung ist die Anordnung der umlaufenden Verklebung und der zusätzlichen Verklotzung dargestellt. Die Fügung von Koppel-

leiste und Verglasung erfolgt werkseitig und kann so der hohen Anforderung an Präzision gerecht werden. Dabei wird die Position und der erforderliche Montageabstand der beiden Komponenten mittels beidseitigem Klebeband eingerichtet, ehe die eigentliche Schubverklebung aus einem Zweikomponenten-Silikonkleber aufgebracht wird. Die so vorproduzierten Holz-Glas-Verbundelemente müssen dann auf der Baustelle lediglich mit der Pfosten-Riegel-Konstruktion verschraubt werden. Alternativen dieser Verbindung werden im weiteren angeführt werden.

Die so kraftschlüssig verbundenen Aufbauten aus Holz und Glas und zwischen den Verbundelementen und der Haupttragstruktur können zur Aussteifung des Gebäudes herangezogen werden. Die Abdichtung gegen die klimatischen Einflüsse erfolgt über eine Silikonverfugung. Dieser konstruktive Aufbau wird im Kapitel 3.2 über die ökologischen Auswirkungen der unterschiedlichen Fassadentypen mit 'Holz-Glas-Verbundfassade Variante A' bezeichnet.

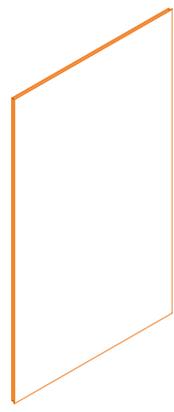


Abb. 12 Koppelleiste aus Furnierschichtholz mit Randverstärkungen Stahlwinkel und FSH-Profilerverweiterung für Vertikallasten

Abb. 13 Die Erweiterung zur Fügung aus Klebung und Klotzung - Vergrößerung des Aussteifungspotenzials

Abb. 14 Isolierverglasung in möglicher Zwei- oder Dreischiebenausführung

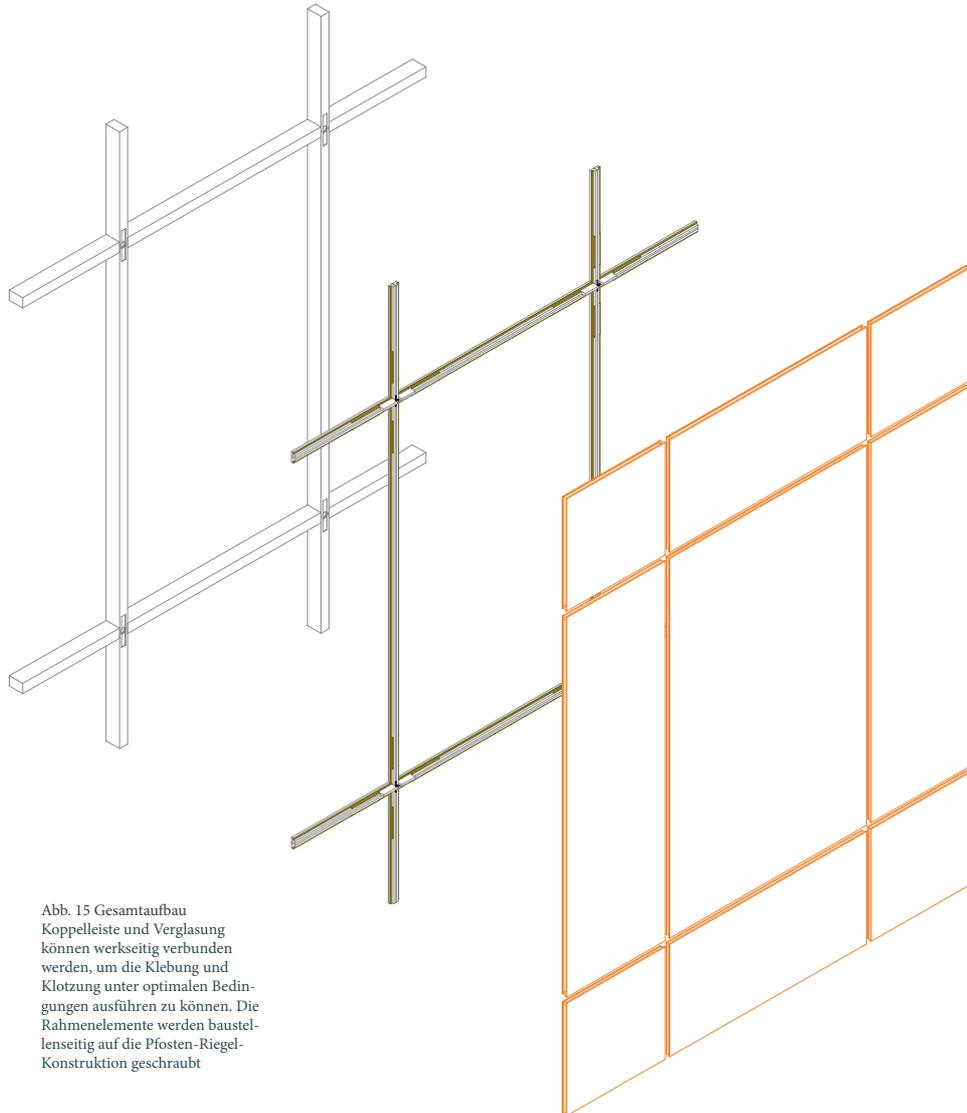


Abb. 15 Gesamtaufbau Koppelleiste und Verglasung können werkseitig verbunden werden, um die Klebung und Klotzung unter optimalen Bedingungen ausführen zu können. Die Rahmenelemente werden baustellenseitig auf die Pfosten-Riegel-Konstruktion geschraubt

## Wintergarten Haus Haas

Anhand des Wintergartenprojektes 'Haus Haas' des ITI (Institut für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau) an der TU Wien können weitere konstruktive Ansätze entwickelt und in einem realisierten Prototypen unter Realbedingungen getestet werden.

Wie die untenstehende Skizze zeigt, werden in diesem als Wintergarten vorgesezte zweigeschossige Konstruktion fünf unterschiedliche Detailansätze umgesetzt. Der als Loggia ausgeführte Bereich im oberen Geschoss wird mit einer Einfachverglasung realisiert, der Bereich der zweigeschossigen Fassade mit einer Zweischeibenisolierverglasung. Im unteren Geschoss werden dabei Öffnungselemente in Form von Schiebetüren integriert. Die Vermitt-

lung zwischen oberen und unterem Geschoss wird durch einen Holz-Glas-Verbundträger vorgenommen, der im allgemeinen einen weiteren Einsatzzweck des Verbundwerkstoffes aufzeigt.

Die vertikalen Trennstreifen über beide Geschosse beinhalten eine Einfachverglasung in Kombination mit einer Absorberschicht, die als Wärmekollektor herangezogen werden kann. Diese Schicht besteht aus einer 40mm starken Dreischichtplatte, die sich bei solarer Einstrahlung aufheizt. Je nach gewünschter Funktionsweise kann über eine veränderbare Öffnung im oberen Bereich der Fassade die erhitzte Luft in den Innenraum geführt werden. So unterstützt der Aufbau die Temperierung und führt zu Einsparungsmöglichkeiten von Heizenergie. Im

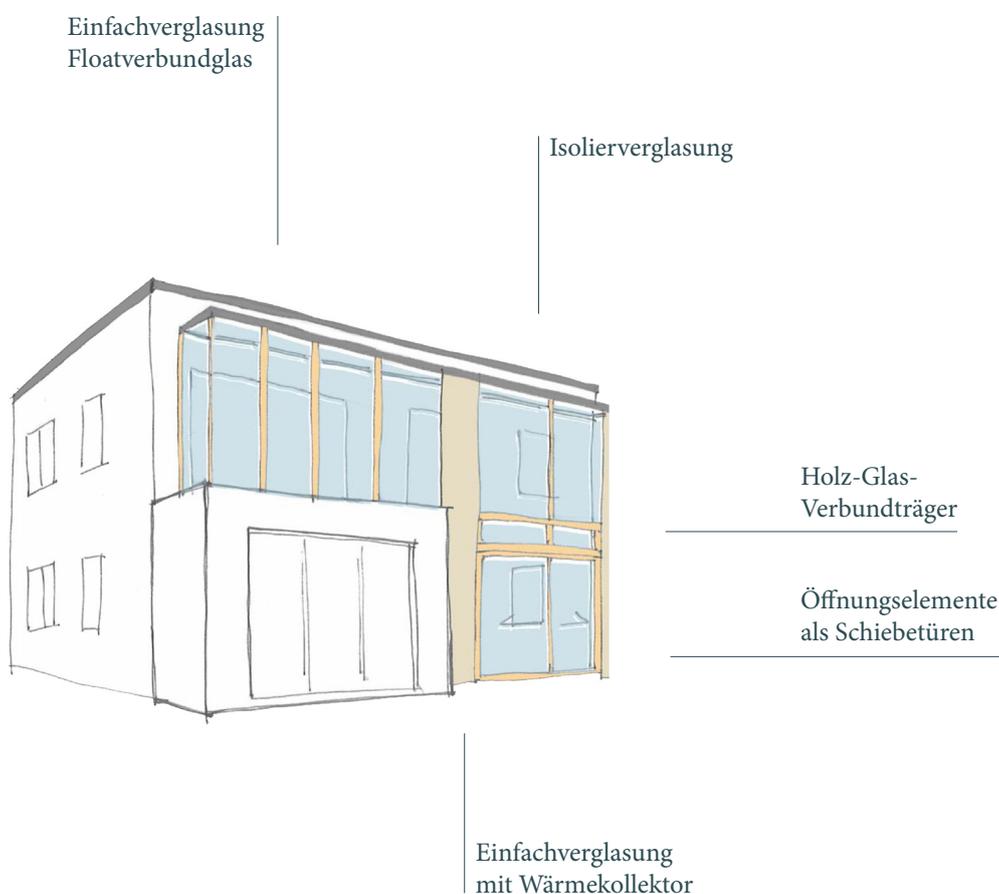


Abb. 16 Skizze Wintergarten Haus Haas mit unterschiedlichen konstruktiven Lösungsansätzen

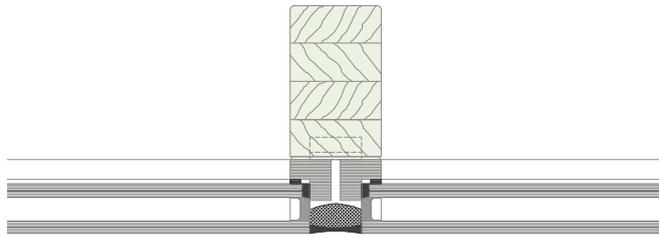


Abb. 17 Anschlussdetail der im weiteren Verlauf bezeichneten Variante Holz-Glas-Verbund A M 1:5

Zweischeibenisolierverglasung mit verschraubten Koppelleisten und 34mm Silikonfuge

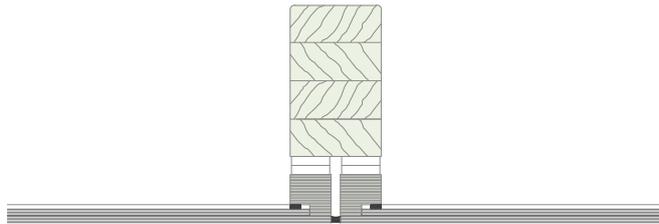


Abb. 18 Anschlussdetail Einfachverglasung M 1:5

Ausbildung einer Glasfalz und entsprechende Verkleinerung der Silikonfuge. Montage auf Pfosten-Riegel-Konstruktion mittels HVP-Verbinder

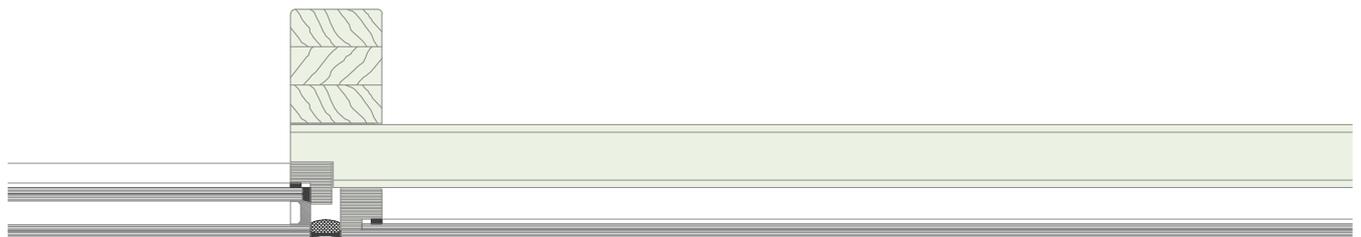


Abb. 19 Anschlussdetail Wärmekollektor M 1:5

Übergang zwischen Zweischeibenisolierverglasung und Wärmekollektor: bestehend aus einer Dreischichtplatte als Absorber, hinterlüftet zur kontrollierten Klimatisierung

Sommerfall kann die erwärmte Luft wiederum nach Außen abgeleitet werden.

Das nebenstehende Detail zeigt das Prinzip der Iso- lierverglasung, das als Variante A der Holz-Glas- Verbundfassaden in den ökologischen Vergleich einfließt. Die Koppelleisten werden hier jeweils mittels Verschraubung auf die Hauptkonstruktion gefügt, die 34mm breite Ansichtsfuge wird mit einer Isomerschaumschnur und zusätzlicher Silikon- benetzung abgedichtet. Die innere Verbundscheibe wird durch Verklebung und ergänzender Verklot- zung in die Unterkonstruktion gefügt.

Das Prinzip der Einfachverglasung im Bereich der Loggia zeigt ein verjüngtes Fugenbild durch die Ausführung einer Glasfalz. Die Scheiben werden lediglich via Schubverklebung in die Koppelleiste gesetzt. Eine Variante bildet auch die Montage mittels HVP-Verbinder, die als eingehängte Umsetzung die Verschraubung auf der Baustelle ersetzen.

Die Detaillösung mit der hinterlüfteten Einfachver- glasung in Kombination mit einer Dreischichtplatte in der Funktion als Wärmekollektor entwickelt eine zusätzliche bauphysikalische Qualität. Die Integra- tion in ein energetisches Gebäudekonzept führt zu Einsparungen, die sich in der ökologischen Betrach- tung des Lebenszyklus eines Gebäudes bemerkbar machen. Weiter zeigt die Zeichnung den Anschluss an die Bereiche der Zweischeibenisolierverglasung im Randbereich des Wintergartens.

## 1.2 Großflächige Glasfassaden im Gebäudekontext

### 1.2.1 Stand und Entwicklung etablierter Konstruktionen

Vor der Aufarbeitung der eigentlichen Lebenszyklusanalyse der verwendeten Baumaterialien und dem ökologischen Fassadenvergleich unterschiedlicher Pfosten-Riegel-Systeme wird hier ein kurzer Überblick über aktuelle Produkte metallischer Konstruktionen gegeben. Dabei werden analog zu der Betrachtung der Holz-Glas-Verbundelemente die bauphysikalischen Eigenschaften der Profile aufgezeigt sowie neben den Klemmsystemen die Entwicklung der geklebten SG-Systeme (structural glazing) beleuchtet.

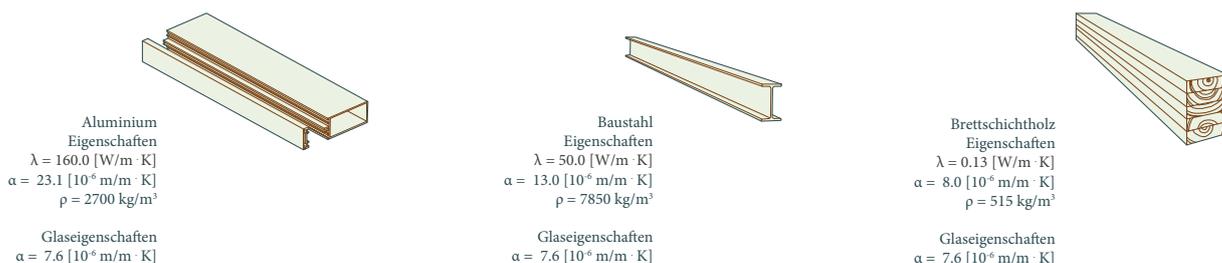
Weiter wird der ökonomische Aufwand der Errichtung großflächiger Glasfassaden in den gesamtheitlichen Kontext des Gebäudelebenszyklus gesetzt.

### 1.2.1 Stand und Entwicklung metallischer Fassadensysteme

Die hervorragende statische Leistungsfähigkeit von Metallen, bei Aluminium sogar bei gleichzeitig geringem Volumengewicht, führt zu deren sinnhafter Verwendung in konstruktiv anspruchsvollen Gebäudeelementen. Betrachtet man hingegen die bauphysikalisch relevanten Eigenschaften der unterschiedlichen Fassadenprofilmaterialien ist ein um enorme Relationen im Vergleich zu Holzwerkstoffen verschobener Wert der Wärmeleitfähigkeiten ( $\lambda$ ) festzustellen. Innerhalb der metallischen Lösungen stehen Aluminium und Stahl sogar noch einmal im Verhältnis 3/1. Diese Gegenüberstellung wirft konsequenter Weise die Fragestellung auf, wie gerechtfertigt der Einsatz innerhalb der Außenhülle eines Gebäudes ist, die im höchsten Maße den Fokus auf einen geringen Wärmedurchgang legt.

Betrachtet man nun die gängigen Fassadenlösungen aus metallischen Profilen, wird schnell offensichtlich, dass die Aufgabe der thermischen Unterteilung der Konstruktion demnach immer im Vordergrund steht. So finden bei den klassischen Klemmsystemen immer diverse kunststoffbasierte Trennprofile Einzug in den Querschnitt im Bereich der Verglasungsebene. Dies führt zeitgleich dazu, dass die Konturierung der eigentlichen Hauptprofile in der Herstellung sehr aufwändig wird, um die Kunststoffisolierstege einhängen zu können. Neben dieser Trennmaßnahme zeigen die metallischen Verbindungselemente immer eine punktuelle Durchdringung dieser Ebene. Betrachtet man die nebenstehende Abbildungen der Pfosten-Riegel-Klemmsysteme wird der hohe konstruktive und materialtechnische Aufwand, der durch die Kunststoffanteile entsteht, deutlich. Vergleicht man die unterschiedliche Konstruktionsweise zwischen

Abb. 20 Physikalische Eigenschaften Metalle



den beiden Klemmsystemen, fällt auf, dass sich eben dieser Aufwand zur Realisierung eines thermisch hochwertigen Aufbaus weiter erhöht. Im Bereich der Dreischeibenverglasung vergrößert sich nicht nur die Tiefe der Trennung, es wird ein weiteres Kunststoffprofil eingesetzt, um sich dem im Bereich der Verglasung erzielbaren U-Wert weiter anzunähern.

Ein anderes Fassadenprinzip, das eine weitestgehende Ganzglasfassade erreicht, stellt die SG-Fassade dar. Das konstruktive System lässt sich in Teilen mit dem Aufbau der Holz-Glas-Verbundkonstruktionen vergleichen, allerdings nicht bezüglich der statischen Wirkung der Verglasung. Auf das Grundgerüst aus Pfosten- und Riegelprofilen werden die sogenannten Adapterrahmen auf der Baustelle montiert. Diese bestehen aus weiteren metallischen Profilen, in die die Verglasung pro Feld eingeklebt ist. Eine zusätzliche Haltekonstruktion dient zur Unterstützung der vertikalen Lastabtragung aus dem Verglasungseigengewicht. Aus den großen Differenzen der thermisch bezogenen Ausdehnungskoeffizienten ( $\alpha$ ) von Aluminium und Glas resultiert die entsprechende Elastizität der silikonhaltigen Verklebung. Im Gegensatz zu den Holz-Glas-Verbundelementen, bei denen diese Fügung mittels Schubeinleitung zum Aussteifungspotenzial beiträgt, nimmt die Klebung hier die zu erwartenden Spannungen aus der differierenden Längendehnung auf. Die vorrangige Konstruktionsgrundlage ist die gestalterische Ausbildung eines flächengleichen und schmalen Fugenbildes. Das hier abgebildete Profil zeigt eine solche Fassadenlösung. Durch die ergänzenden Adapterprofile erhöht sich die Ansichtbreite auf 85mm. Zusätzliche thermische Trennvorrichtungen fügen sich in das Gesamtbild einer aufwändigen Herstellung. Aus bauökologischer Perspektive ist festzuhalten, dass sich die Einrichtung von gesteckten Einzelkomponenten positiv auf die Trennbarkeit zum Ende der Nutzungsphase auswirkt. Der Druck, der durch die immer weiter an Bedeutung gewinnenden Themen der Energieeffizienz in der lebenszyklischen Betrachtung ausgeübt wird, spiegelt das nebenstehende Detail wider. In dieser Variante eines geklemmten Systemaufbaus werden Polyamid-Isolierstege eingefügt, die zu Teilen aus Rizinusölen produziert werden können. Solche Entwicklungen werden mit einem ökologischen Fortschritt durch die Verwendung nachwachsender Rohstoffe beschrieben, die die enormen energetischen Herstellungsaufwendungen der Aluminiumproduktion zeitgleich außen vorlassen.

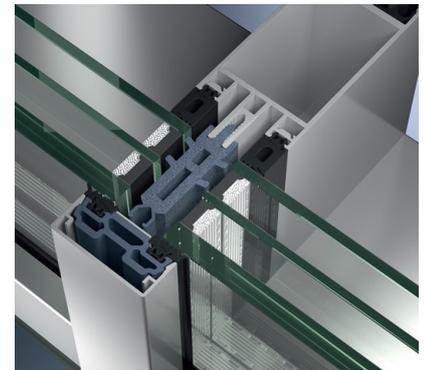
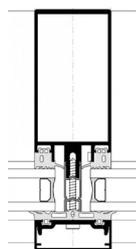


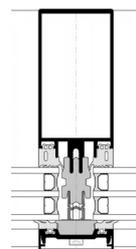
Abb. 24 Schüco FW50+<sup>10</sup> SI Green Aluminium mit Klemmprofil  
3 Scheiben Verglasung  
Polyamid Isolierstege aus Rizinusöl

Abb. 21 Heroal C50<sup>2</sup> Aluminium Klemmprofil 2 Scheiben



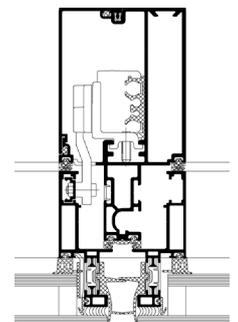
M 1:5

Abb. 22 Heroal C50\_HI<sup>8</sup> Aluminium Klemmprofil 3 Scheiben



M 1:5

Abb. 23 Schüco SFC 85<sup>2</sup> Aluminium Structural Glazing 2 Scheiben



M 1:5

## 2. Methodik der Ökobilanzierung (LCA) im Hochbau

- 2.1 *Denk- und Herangehensweisen der lebenszyklischen Betrachtung*
- 2.2 *Die Inhalte der Ökobilanz - Sachbilanz und Wirkungsabschätzung im Detail*
- 2.3 *LCA in Zertifizierungssystemen für Gebäude*
- 2.4 *Lebenszykluskosten in der Gebäudeplanung*

Die Ökobilanzierung (Life-Cycle-Assessment) stellt eine Methodik dar, die den Blick auf ein Projekt, ein Gebäude oder ein Produkt wie die Fassade im gesamtheitlichen Kontext betrachtet. Als Basis dieser Beschreibung dient die Systemanalyse, in der Zusammenhänge durch die Definitionen der Grenze zur Umwelt eines Objektes gegeben werden. Diese räumlichen Grenzen werden aufgezeigt und um die zeitlichen Abmessungen der Ökobilanz ergänzt.

In ihrer quantitativen Analyse ermittelt die Methodik die primären Energieaufwendungen über den gesamten Lebenszeitraum und ergänzt diese in der Wirkungsabschätzung durch Indikatoren, die den potentiellen Einfluss eines Gebäudes (in dieser Arbeit der Fassade) auf die Umwelt abbilden. Die konkrete Aussagekraft der LCA wird erläutert, ehe auf die Einbindung der Ökobilanz in Zertifizierungssystemen von Gebäuden eingegangen wird.

### 2.1 Denk- und Herangehensweisen der lebenszyklischen Betrachtung

Die lebenszyklische Denkweise erweitert die planerisch-zeichnerische Erfassung eines Projektes sowohl um räumliche als auch um zeitliche Dimensionen. Dieser Gedanke bietet die Möglichkeit die komplexen Zusammenhänge zu erfassen, die innerhalb eines Gebäudes über die Akteure, die Logistik und Lokalität über den Zeitraum seines Bestehens hinaus entstehen. In diesem Modell können Einflüsse von Entscheidungen frühzeitig abgewägt werden und zu einer nachhaltigen Planungsstrategie beitragen.

Im Konkreten bedeutet die räumliche Erweiterung die Beschreibung der Schnittstelle eines Gebäudes zur Natur. Damit ist sowohl die unmittelbare räumliche Umgebung gemeint, mit der der Bau in Bezug tritt, als auch der übergeordnete Einfluss der Entnahme von Ressourcen und der Ausstoß an Emissionen in die Luft und den Boden. Aus diesem System abgeleitet werden die einzelnen Vorgänge einer Ökobilanz als Prozesse definiert, die über Input- und Outputflüsse (Arbeitsenergie und Resultate wie das Produkt, die Emissionen oder die Abfälle, die die Grenze überwinden) zahlenmäßig erfasst werden.

Die zeitliche Erweiterung richtet den Blick auf die Zusammenhänge eines Gebäudes bis hin zum Ende seiner Benutzung. Die sogenannten Lebensphasen werden dabei in die Bereiche der 'Herstellung', der 'Nutzung' und der 'Nachnutzung' (End-of-Life-Verfahren) unterteilt. Im ersten Teilabschnitt werden dabei alle Prozesse berücksichtigt, die bis zur Fertigstellung eines Bauwerks benötigt werden. Gemeint sind also die Produktion aller Komponenten, deren Bearbeitung, Fügung, Transporte innerhalb der Vorfertigung und zur Baustelle bis hin zur Errichtung vor Ort. Die Grenzen der Betrachtung bieten dabei immer die Flüsse, die das unmittelbare Referenzobjekt betreten und verlassen. Die Energie, die beispielsweise für den Bau eines LKWs benötigt wird, bleibt berücksichtigt, der Treibstoff zum Antrieb aber sehr wohl. In der Nutzungsphase werden alle Vorgänge bewertet, die eine kontinuierlichen oder wiederkehrenden

Energieaufwand bedeuten. Dies inkludiert bei Gebäuden vor allem das Heizen und Kühlen von Räumen und die elektrische Energie, die für alle Geräte aufgewendet wird. Diese sind parametrisch an das Bauwerk geknüpft. So werden in dem ökologischen Fassadenvergleich dieser Arbeit lediglich die materialbasierten Vorgänge erfasst, die das Reinigen, Warten und Austauschen in einem bestimmten Betrachtungszeitraum von einzelnen Komponenten oder ganzen Aufbauten beinhalten. Die Phase der Nachnutzung beginnt mit dem Rückbau. Dabei werden die Komponenten demontiert und so gut wie möglich in ihre stofflichen Einzelteile zerlegt. Die darauf folgenden End-of-Life-Vorgänge sind je nach Material und Grad der Kontamination äußerst unterschiedlich und haben großen Einfluss auf die ökologische Bewertung von Materialien und von ganzen Gebäuden. Die Verfahren reichen vom Deponieren von schadstoffbelasteten Anteilen, über die thermische und stoffliche Verwertbarkeit bis hin zum Recycling, das die gleichwertige Wiedernutzung beinhaltet.

So vielschichtig die Art der Betrachtung der Ökobilanzierung ist, so wichtig ist die Einigung auf eine einheitliche Vorgehensweise ihrer Erhebung. So gibt die ISO 14040 sehr genau den Ablauf und die jeweilige Aussagekraft einer Lebenszyklusanalyse vor und unterteilt diese in vier Teilabschnitte. Bei der Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen werden die Intention und die Grenzen des betrachteten Systems aufgezeigt. Die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung ermitteln die quantitativen Aussagen im Bezug auf die Wechselbeziehungen zwischen einem Objekt und seiner Umwelt. In der Auswertung werden dann diese Zahlen beleuchtet, gegenübergestellt und versucht, ihre Entstehung zu klären. Die vergleichende Bilanzierung dieser Arbeit orientiert sich an den Vorgaben der Normierung, ohne dabei ihrem akribisch methodischen Raster zu folgen.

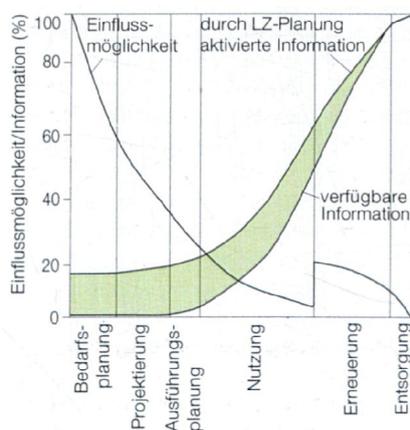


Abb. 25 Einflusszugriff der lebenszyklischen Betrachtung

Wie beschrieben bietet die Methode der Lebenszyklusanalyse einen erweiterten Blick auf die Zusammenhänge eines Gebäudes. Um dieses Potenzial auch inhaltlich ausschöpfen zu können, ist eine hohe Akzeptanz, Bereitschaft und Kommunikationsfähigkeit aller Projektbeteiligten erforderlich. Dies schiebt in der Folge das Werkzeug der integralen Planung in den Vordergrund, das eben diese Eigenschaften eines Planungsteams impliziert und dazu Mittel zur ihrer Realisierung bereithält. Dafür ist es von Vorteil, möglichst frühzeitig alle Planungsinstanzen, Bauherren und teils auch ausführende Firmen in die Planung zu integrieren und in einem steten Austausch Ziele und entstehende Widersprüche zu erörtern. Das Tool zur inhaltlichen Anpassung bietet dabei das System des 'Building Information Modeling' (BIM). Diese parametrisch orientierten Lösungen bieten die Grundlage, komplexe Zusammenhänge zu erfassen und basierte Entscheidungen treffen zu können, die sich auf die gesamte Lebensphase eines Gebäudes auswirken werden. Wie das hier abgebildete Diagramm zeigt, verhalten sich der mittels ökologischer Lebenszyklusanalyse mögliche Zugriff und der absolute Informationsgehalt antiproportional zu einander. Das bedeutet, die in frühen Planungsabschnitten gefällten Entscheidungen hinsichtlich einer Konstruktionsweise, einer Kubatur, einer Materialwahl oder eines energetischen Konzeptes haben besonders großen Einfluss auf die ökologische Sinnhaftigkeit eines Gebäudes, während die Sicherheit einzelner Information noch relativ gering ist. Bei Eindringen in die späteren Phasen der Planung und auch der Nutzung nimmt der Informationsgehalt zu, die Zugriffsmöglichkeiten aber ab.

## 2.2 Die Inhalte der Ökobilanz - Sachbilanz und Wirkungsabschätzung im Detail

In der Sachbilanz und der daraus resultierenden Wirkungsabschätzung werden die quantifizierbaren Einflüsse einer Ökobilanzierung über die Zeiträume der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Gebäudes und seiner Bestandteile dargestellt. Der Energieaufwand, der benötigt wird, um ein gewisses Element der Betrachtung über seinen Lebensweg zu beschreiben, wird dabei zerlegt in die Teilbereiche der nicht erneuerbaren und der erneuerbaren Energien. Diese Unterteilung gibt einen ersten Einblick in die ökologische Sinnhaftigkeit von Prozessen, die sich in die Gruppen der elektrischen, der thermischen und der Bewegungsenergie bei Transportwegen gliedern. Bei der Abschätzung der Auswirkungen während der Erzeugung elektrischer Energie wird ein sogenannter Strommix<sup>11</sup> angenommen, der die aktuelle Gliederung aus dem Einsatz fossiler und regenerativer Energieträger ausweist. Die fünf Kategorien der Wirkungsabschätzung zeigen die umweltrelevanten Emissionen der einzelnen Prozesse. Dabei werden die Einflüsse auf atmosphärische und bodennahe Luftschichten sowie die Gewässer und Nährböden berücksichtigt.



Abb. 26 P.ne - Gewinnung fossiler Energieträger

### P.ne - Primärenergiebedarf nicht erneuerbar

Dieser Wert bilanziert den Einsatz von endlichen, abiotischen energetischen Ressourcen, zu denen Uran, Erdgas, Erdöl sowie Stein- und Braunkohle gehören. Der Vergleich des Bedarfs gründet auf dem jeweiligen Energieinhalt bzw. dem Heizwert (je nach Verwendungszweck) der Materialien, die Angabe erfolgt in MJ (Megajoule) pro jeweiliger funktioneller Einheit. Dabei wird ein jeweils möglicher Ersatz der Energieträger untereinander vorausgesetzt. Bei der Erhebung der Anteile elektrischer Energien wird wie beschrieben eine durchschnittliche Mischung dieser Rohstoffe angenommen.



Abb. 27 Pern - Stromerzeugung durch die Nutzung der Windkraft

### Pern - Primärenergiebedarf erneuerbar

Der Einsatz regenerativer Energieerzeugung umfasst vor allem die Bereiche der Windenergie, die Wasserkraft, Geothermie, Solarenergie sowie die in Biomasse gespeicherte Arbeit. Die separate Betrachtung ist wichtig, da die jeweils zu erwartenden Emissionen der Wirkungskategorien als sehr unterschiedlich angenommen werden können. Wie auch der Wert der P.ne wird die Pern in MJ pro Einheit angegeben. In beiden Fällen ist der primäre Energiegehalt erfasst, der im Vergleich zur Zahl der Endenergie die Effizienz der Verwertung mit berücksichtigt.

<sup>9</sup> Strommix Deutschland nach ökobau.dat-Datenbank:

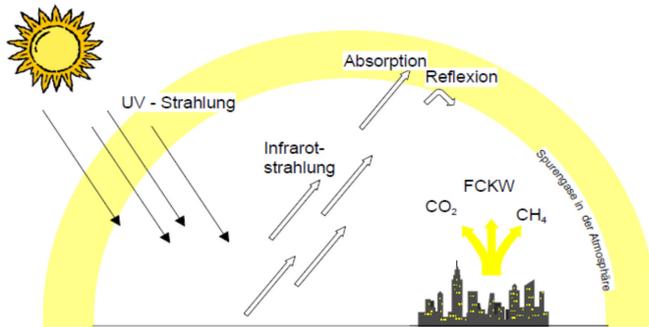


Abb. 28 Schematische Zeichnung GWP

### GWP - Treibhauspotenzial

Der Indikator des Treibhauspotenzials beschreibt den potentiellen Beitrag eines Stoffes zur Erwärmung bodennaher Luftschichten. Bei der Reflektion der kurzwelligen Strahlung der Sonne an der Erdoberfläche wird diese in langwellige Infrarotstrahlung umgewandelt. Diese wird durch das Vorkommen natürlicher Treibhausgase in der Troposphäre wiederum zur Erde reflektiert. Dieser Effekt, dass die Strahlungsenergie zum Teil in der Atmosphäre verbleibt, ist für die Bildung einer lebensgerechten Umgebung ausschlaggebend.

Doch durch anthropogene Emissionen wird diese Korrelation verstärkt. Das so wichtige Gleichgewicht zwischen Absorption und Reflektion in den hohen Luftschichten verschiebt sich durch die erhöhte Treibhausgaskonzentration in Richtung der Reflektion der Infrarotstrahlung. Die zusätzliche Erwärmung bewirkt Verschiebungen von Vegetationszonen und Niederschlagsverteilungen, führt zu Wasserknappheit einerseits und zum Schmelzen der polnahen Eisschichten andererseits.

Angegeben wird dieser Wert in  $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$ , also das Potenzial aller Treibhausgase (desweiteren vor allem Methan und FCKW) in Relation zum Kohlenstoffdioxid gesetzt.  $\text{CH}_4$  etwa hat 25 mal größere Auswirkungen als  $\text{CO}_2$ .

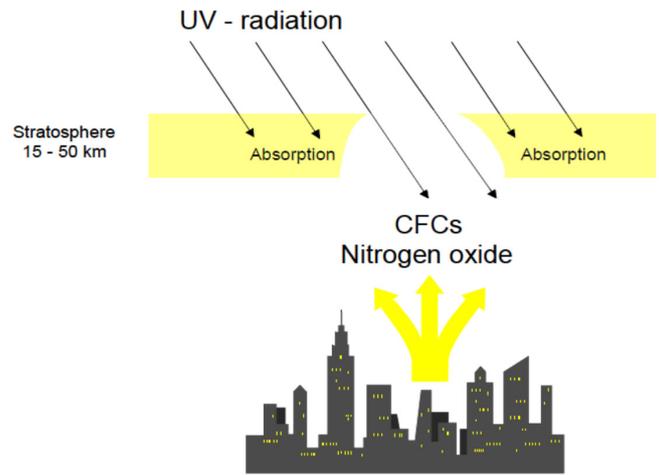


Abb. 29 Schematische Zeichnung ODP

### ODP - Ozonschichtabbaupotenzial

Diese Wirkungskategorie beschreibt den Beitrag eines Stoffes zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht. Die Angabe erfolgt in R11 eq (Bezug zum Potenzial von Trichlorfluormethan).

Bei der Reaktion von Sauerstoffmolekülen mit der UV-Strahlung der Sonne bildet sich Ozon, das in der Stratosphäre einen großen Teil dieser für Lebewesen gefährlichen Strahlung absorbiert. Die von Menschen verursachte Freisetzung von Stickoxiden und Fluorchlorkohlenwasserstoffen dreht diese Reaktion um und erwirkt die Verringerung der Ozonkonzentration. Die Auswirkungen dieses Zusammenhanges sind vielschichtig und reichen von der Störung von Photosyntheseprozessen über die Schädigung von Ernten und der Abnahme des Meeresplankton bis hin zu direkten Beeinflussungen der menschlichen Organismen. Diese betreffen vor allem oberflächennahe Körperteile und können zu Augenkrankheiten und einer verstärkten Tendenz zur Hautkrebsbildung beitragen.

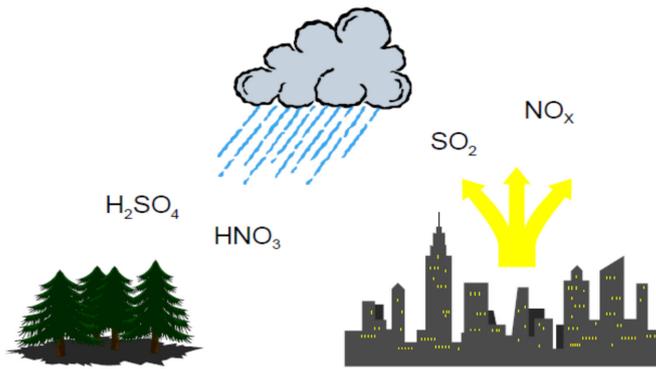


Abb. 30 Schematische Zeichnung AP

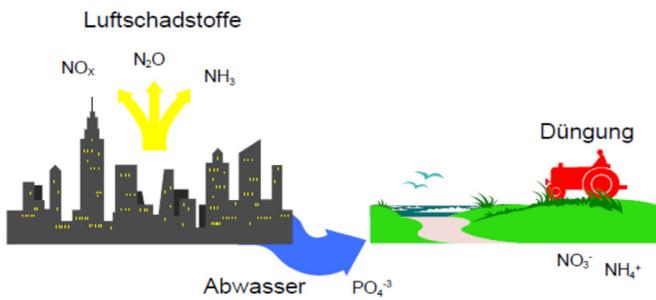


Abb. 31 Schematische Zeichnung EP

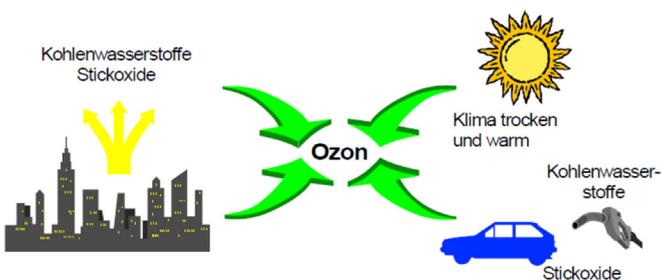


Abb. 32 Schematische Zeichnung POCP

### AP - Versauerungspotenzial

Dieser Beitrag zu umweltrelevanten Auswirkungen von Gebäuden bezieht sich auf den pH-Wert von Niederschlägen. Die Emission von Schwefeldioxid und Stickoxiden, die bei Verbrennungsprozessen entstehen, führen durch Säure-Umwandlungsreaktionen zu einer Verringerung des pH-Wertes der Luftfeuchtigkeit. Das wiederum führt folglich zu vermehrten Säureeinträgen in Böden, Oberflächenwasser und bei Pflanzen, die daraufhin eine geringere Nährstoffaufnahme aufweisen. Zudem wird die Zersetzung von Natursteinen beschleunigt und die Korrosionsgefahr von Metallen erhöht.

Die Reaktionsgröße bietet das  $\text{kg SO}_2$  äquivalent (Schwefeldioxid). Zudem wird deutlich, dass sich die Kategorien nicht aufsummieren lassen, weil manche Abgase durchaus multiple Folgen haben.

### EP - Eutrophierungspotenzial (Überdüngung)

Die Eutrophierung berücksichtigt Stoffe, die zu einem überhöhten Nährstoffeintrag in Böden und Gewässern beitragen. Dieses Problem entsteht in der Landwirtschaft, kann aber auch durch Abwasser und Luftemissionen verursacht werden.

Als Folge kommt es zu vermehrtem Algenwachstum in Gewässern, was die Sonneneinstrahlung mindert. Durch die reduzierte Photosynthese sinkt der Sauerstoffgehalt, was zu enormen Beeinträchtigungen von Lebewesen führt. Die Referenz hier sind die Phosphate ( $\text{kg SO}_4$  eq).

### POCP - Ozonbildungspotenzial (Sommersmog)

stellt den Beitrag eines Stoffes zur Bildung bodenahem Ozons und zur photochemischen Oxidantienbildung dar. Kohlenwasserstoffe und Stickoxide reagieren dabei mit der Sonneneinstrahlung. Was in den hohen Luftschichten als Schutz dient, führt hier als schädliches Spurengas zu Beeinträchtigungen von Pflanzen und anderen Materialien und kann hochkonzentriert gar giftig für den Menschen sein. Bei der Beurteilung eines Stoffes in dieser Umweltwirkungskategorie dient das Verhältnis zu einem  $\text{kg C}_2\text{H}_4$  eq als Basis.

## 2.3 LCA in Zertifizierungssystemen für Gebäude

Auf der Basis der Kriterien einer nachhaltigen Gebäudegestaltung haben sich seit Beginn der 1990er Jahre international viele Zertifizierungssysteme entwickelt, die vor allem die ökologische Qualität begutachten sollen. Intention dieser Zertifizierungen ist eine ganzheitliche Betrachtung, die eine ganze Reihe neuer Aspekte mit einander verknüpft und für die Sensibilisierung des Themas der Nachhaltigkeit verfügbar macht. Dabei steht gerade in den Systemen der frühen Entwicklung der ressourcenschonende Umgang mit der Umwelt im Fokus. Aktuelle Tendenzen der Zertifizierungen zeigen hingegen eine Erweiterung hinsichtlich der beiden weiteren Kernpunkte der Nachhaltigkeit, indem sie ökonomische und soziale Aspekte mit einbeziehen. Aus architektonischer Sicht wird in Teilen Kritik an der Rationalisierung von gebäudespezifischen Qualitätskriterien geäußert. Begreift man diese Methodik aber als erweiterten Betrachtungsrahmen für Entscheidungsfindungen und nicht als aufoktroiertes Joch der quantifizierbaren Güte eines Entwurfes, hält die Gebäudezertifizierung ein enormes Potenzial für Planer und Bauherren bereit.

Während das Ziel dieser Qualitätssiegel die Transparenzsteigerung und eine übersichtliche Strukturierung von projektbezogenen Fragestellungen ist, erfordert die Menge unterschiedlicher Systeme, Bewertungstools und Anforderungen der Umsetzung eine differenzierte Auseinandersetzung der beteiligten Akteure. Für die Erfassung einer gewissen zeitlichen und inhaltlichen Dimension seien an dieser Stelle vier relevante Systeme der Gebäudezertifizierung kurz dargestellt. Die sogenannten Systeme der ersten Generation wurden ab 1990 entwickelt, wobei das britische BRE (Building Research Establishment) mit der Herausgabe des BREEAM-Systems den Beginn markiert. Seit 1998 wird in Nordamerika die Methode des LEED-Zertifikates als Bewertungsgrundlage von Gebäuden verwendet. Diese

beiden Vorreiter sind bis heute etabliert und haben sich im Zuge der Entwicklung immer weiter internationalisiert und entsprechend den regionalen rechtlichen und klimatischen Bedingungen ausdifferenziert. Die Systeme der ersten Generation konzentrieren sich vornehmlich auf ökologische und energetische Aspekte der Gebäudeanalyse, innerhalb von BREEAM wird eine Ökobilanzierung nach ISO 14040 ausgeführt.

Im Zuge der fortführenden Ausweitung der Betrachtungsgrenzen haben sich weitere Systeme entwickelt, die teilweise international an Bedeutung gewinnen, während andere eher regional verwendet werden. Als ein Tool dieser zweiten Generation entwickelt die ÖGNB (Österreichische Gesellschaft für nachhaltiges Bauen) seit 2001 das TQB (Total Quality Building) -Werkzeug. Die ökologische Bewertung wird hier mittels der OI3-Indikatoren vorgenommen, die eine selbstständig entwickelte Basis der Auswertung umweltrelevanter Themen darstellt. Erweitert wird die Betrachtung um Aspekte der bauphysikalischen und prozesslichen Qualität. So werden die raumklimatischen und thermischen Eigenschaften eines Gebäudes ebenso wie die Organisation der Baustellenabwicklung berücksichtigt. Ein weiteres Tool zur Gebäudezertifizierung stellt das Gütesiegel des DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) dar. Auch hier findet die Ökobilanzierung Einzug in den Kriterienkatalog und wird erweitert um die LCC (Life-Cycle-Cost) -Berechnung. Dieser Aspekt berücksichtigt analog zur ökologischen Betrachtung die Kosten über den gesamten Lebenszyklus. Die LCC-Beschreibung findet zunehmend auch Berücksichtigung in den Systemen der ersten Generation. Exklusiv behandelt die DGNB jedoch die Themen soziokultureller Fragen wie die Sicherheit und die Barrierefreiheit, sowie die architektonisch gestalterische Qualität. Diese Arbeit orientiert sich an den Datengrundlagen, die dem DGNB-Siegel zugrunde liegen.

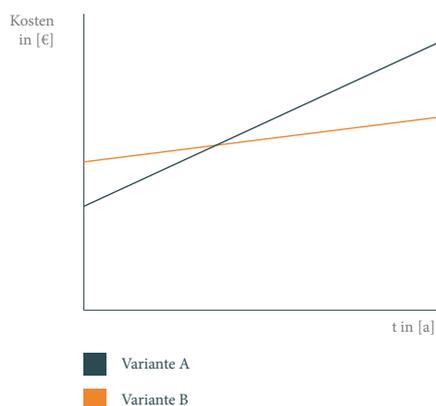
## 2.4 Lebenszykluskosten in der Fassadenplanung

Die Fassade ist ein wichtiger Teil der konstruktiven Anteile eines Gebäudes. Sie ist der architektonische Repräsentant und zugleich der dominierende Faktor in Fragen der energetischen Qualität eines Gebäudes. Entsprechend hoch sind die bei der Errichtung eines Gebäudes anfallenden Kostenanteile, die auf die Hülle zurückzuführen sind. Wenn man beispielsweise den Gebäudetypus der Bürogebäude mit hochwertiger Ausstattung betrachtet, in dem auch häufig großflächige Glasfassaden eingesetzt werden, erhält man durchschnittliche Herstellungspreise von 629 €/m<sup>2</sup> AWF<sup>8</sup> (Außenwandfläche). Diese nehmen in der Kategorie der Baukonstruktionen durchschnittliche 32.4% der ökonomischen Aufwendungen in Anspruch. Betrachtet man die Errichtungskosten des gesamten Gebäudes inklusive der technischen Anlagen nehmen die Außenwandaufbauten immer noch 23.5% der Baukosten in Anspruch. Dieser hohe Anteil fordert besonders von den großflächigen Glasfassaden, dass die integrative Planung in die Gesamtkonzeption des Gebäudes die Errichtungskosten rechtfertigt.

An exakt diesem Punkt setzt die LCC-Beurteilung (Life cycle costs) eines Gebäudes über seinen gesamten Lebenszeitraum an. Diese erweitert den Betrachtungsrahmen analog zur ökologischen Bewertung um die zeitliche Dimension und vermag es Investitionskosten, Nutzungskosten und Rückbaukosten miteinander in Relation gesetzt zu analysieren. Im Rahmen einer solchen Kostenübersicht kann der erhöhte Errichtungsanteil der großflächigen Glasfassaden ausgeglichen werden, wenn etwa das Energiekonzept Einsparpotenzial gegenüber einer Ausführung mit klassischer Lochfassade bereithält. Für diese dynamischen Bewertungsmöglichkeiten gibt es innerhalb der LCC unterschiedliche Ansätze, wovon die 'Annuitätenmethode' beispielhaft kurz erläutert wird: Die Berechnung bestimmt die Investitionskosten einer Teilkonstruktion, wie etwa der Verglasung einer Fassade, und stellt sich den energetischen Einsparungen im Verhältnis zu einer minder- oder höherwertigen Ausführung gegenüber. Dies kann sehr hilfreich als Entscheidungsgrundlage bei alternativen Ausführungsmöglichkeiten sein, um die Kosten im übergeordneten Zusammenhang sehen zu können.

Die hier abgebildete Darstellung zeigt eine allgemeine Grafik, die das Prinzip der Lebenszykluskostenberechnung verdeutlicht. Möchte man etwa den ökonomischen Aufwand zweier unterschiedlicher Fassadenvarianten vergleichen, lohnt sich der Blick über die statischen Kosten der Errichtung hinaus. Die

Abb. 33 Investitionskosten und Nutzungskosten im Lebenszyklus



Variante A zeigt deutlich geringere Investitionen zu Beginn des Gebäudelebenszyklus, hält aber weniger ökonomisches Einsparpotenzial in der Nutzung als Variante B bereit. Im Bereich der großflächigen Glasfassaden bieten die solaren Einträge, die zur Wärmezeugung, zur Warmwasseraufbereitung, zur Stromerzeugung und zur Belichtung mit Tageslicht herangezogen werden können, solche Potenziale. Dies erfordert eine sinnvolle strategische Planung der ökologisch energetischen Konzeption.

<sup>10</sup> BKI Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Hrsg. (2010) BKI Baukosten 2010 - Teil 1 Statistische Kostenkennwerte für Gebäude

## 3.1 Lebenszyklusbetrachtung Baumaterialien

3.1.1 Lebenszyklus Schnittholz Fichte

3.1.2 Lebenszyklus Brettschichtholz

3.1.3 Lebenszyklus Dreischichtplatten

3.1.4 Lebenszyklus Furnierschichtholz

3.1.5 Lebenszyklus Einfachverglasung

3.1.6 Lebenszyklus Isolierverglasung

3.1.7 Lebenszyklus Silikondichtung/klebstoff

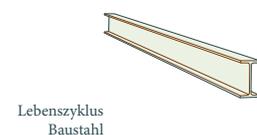
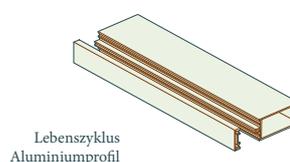
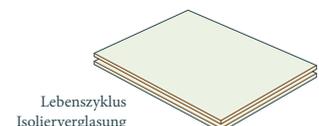
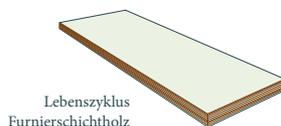
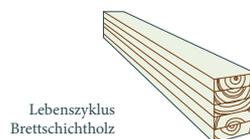
3.1.8 Lebenszyklus Aluminiumprofil

3.1.9 Lebenszyklus Baustahl

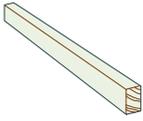
In dem ersten Abschnitt der vergleichenden Lebenszyklusanalyse werden hier die in metallischen und in den Holz-Glas-Verbundfassaden verwendeten Materialien beleuchtet. Dabei wird der jeweilige Weg vom Rohstoff über unterschiedliche Produktionsstufen hin zum fertigen Produkt analysiert (cradle-to-gate). Weiter wird ein kurzer Ausblick auf Art und Dauer der Nutzung gegeben, bevor die jeweiligen Möglichkeiten der Nachnutzung aufgezeigt werden.

Neben dieser inhaltlichen Beschreibung der genutzten Holz- und Holzwerkstoffe, Metalle, Verglasungstypen und Dichtungsmaterialien wird ein erster quantitativer Vergleich angestrebt. Die auf Grundlage der ökobau.dat-Datenbank errechneten Ergebnisse auf Basis einer vergleichbaren funktionellen Einheit beschreiben zunächst den Primärenergiebedarf über den Lebenszyklus. Dabei wird nach nicht erneuerbaren und erneuerbaren Brennstoffen differenziert, um eine erste Abschätzung einer nachhaltigen Einwirkung auf die ökologische Umwelt geben zu können. Diese wird weiter konkretisiert, indem die Umweltindikatoren der Wirkungsabschätzung angeführt werden.

Abb. 34 Übersicht über die im Lebenszyklus betrachteten Materialien



## 3.1.1 Lebenszyklus Schnittholz Fichte



*Hauptbestandteile, Lebenszyklus und Systemgrenzen*  
*Beschreibung der Teilprozesse*  
*Datenqualität*  
*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

Abb. 35 Symbol Schnittholz Fichte

Seit den 1960er Jahren werden die österreichischen Wälder durch ein stetes Monitoring des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft begleitet. Die daraus entstehenden Berichte zeigen ein kontinuierliches Wachstum der Waldflächen bis zu einem derzeitigen Stand von 3.99 Mio. ha (47,6% Flächenanteil)<sup>1</sup>. Des Weiteren ist die Fichte mit 53,7%<sup>2</sup> die mit großem Abstand häufigste Baumart, was sie auch aus ökologischer Sicht (etwa bzgl. der Transportwege im Vergleich zu importierten Rohstoffen) zur Verwendung als Baumaterial attraktiv macht.

Während seiner Verarbeitung in den Abläufen der Herstellung fallen zwei Produktgruppen an: das Schnittholz als Hauptprodukt und Nebenprodukte (Rinde, Späne und Hackschnitzel), die als Basis für Plattenwerkstoffe oder zur thermischen Verwertung genutzt werden.

### *Hauptbestandteile Schnittholz Fichte*

weitere mögliche Bestandteile

Hydrophobierungsmittel  
Holzschutzmittel



Abb. 36 Bestandteile Schnittholz Fichte

Als naturbelassenes Vollholzmaterial besteht das Schnittholz uneingeschränkt aus dem Rohstoff

Fichte. Je nach Verwendungszweck und Einsatzort werden jedoch Zusatzstoffe verwendet, die die Widerstandsfähigkeit etwa gegen externe Feuchte beeinflussen. Diese haben wiederum Auswirkungen auf die die möglichen Szenarien am Ende eines Lebensabschnittes.

### *Lebenszyklus und Systemgrenzen*

Die Darstellung auf der Folgeseite skizziert den Lebenszyklus des Schnittholzes und unterteilt die Phasen Herstellung, Nutzung und End-of-Life.

Wie bereits erwähnt fallen bei der Bearbeitungsschritte der Herstellung unterschiedliche Produkte an, die mit den Anteilen Schnittholz (61,8%), Rinde (10%), Sägespäne (14,5%) und Hackschnitzel (13,7%)<sup>3</sup> in die Gesamtbilanz einfließen. Die weitere Verwendung der Nebenprodukte wirkt sich positiv auf den aufzuwendenden Primärenergiebedarf aus. Dem gegenüber stellt der Schritt der technischen Trocknung des Holzes den in der skizzierten Prozesskette mit Abstand größten Arbeitsaufwand dar. Die Grenzen des betrachteten Systems sind hier die Flüsse, die in die Herstellung einfließen oder diese verlassen (zum Beispiel der Energiebedarf der Maschinen und die beschriebenen Nebenprodukte).

Der Bereich der Nutzung zeigt den allgemeinen Ablauf dieser Lebenszyklusphase auf, die Dimensionen von Transportwegen und Austauschzyklen hängen allerdings vom jeweiligen Verwendungszweck ab. Der Einsatz als Pfosten und Riegel in den Fassadenkonstruktionen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit betrachtet werden, geht von einer Nutzungsdauer von >50 Jahren<sup>4</sup> aus. Der Umgang mit Holz zum Ende des Lebenszyklus kann

<sup>1</sup> BMF (2011) Praxisinformation Waldinventur 2007/09 - Seite 3

<sup>2</sup> proHolz Austria (2006) Zuschnitt 23.2006 - Seite 10

<sup>3</sup> BMVBS und ByAK (2013) www.wecobis.de - Bauproduktgruppen Holz- und Holzwerkstoffe, 18.12.2012

<sup>4</sup> BMVBS (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB - Seite 7

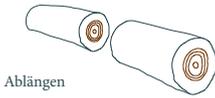
# HERSTELLUNG



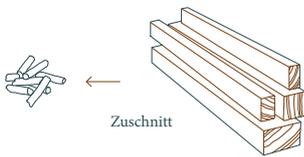
Stammholz



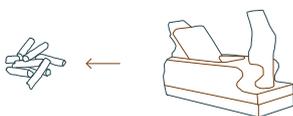
Entrinding  
thermische Verwertung



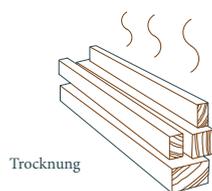
Ablängen



Zuschnitt



Endhobeln  
Verkauf Hobelspäne  
thermische Verwertung



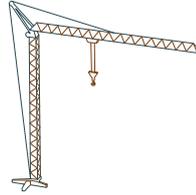
Trocknung



# GRENZE CRADLE TO GATE

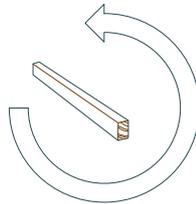


Transport zur Baustelle



Zusammenbau und Montage

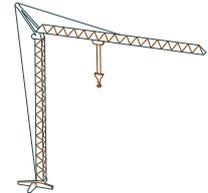
# NUTZUNG



Instandsetzung und Austausch



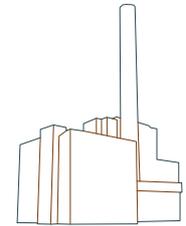
# END OF LIFE



Demontage



Transport



thermische Verwertung

Abb. 37 Skizze Lebenszyklus Schnittholz Fichte

unterschiedliche Szenarien beinhalten. Da in Abb. 2 bereits aufgezeigt wurde, dass der primäre Verunreinigungsgrad des Schnittholzes sehr gering bis nicht vorhanden ist, lassen sich die Produkte gut recyceln oder als Basisstoffe für Faser- und Plattenwerkstoffe downcyclen. Aus der Nutzung der Schnittholzes im Verbund mit anderen Materialien, der potenziellen sekundären Kontamination durch Schutzmittel und der Unsicherheit über Verunreinigungen beim Rückbau ergibt sich allerdings das gängige Verfahren der thermischen Verwertung.

## *Funktionelle Einheit*

### *Beschreibung der Teilprozesse*

Die im Rahmen Schnittholz Fichte betrachtete funktionelle Einheit bezieht sich auf die Produktion sowie die Entsorgung von 1 kg Schnittholz (dies entspricht  $0.0021 \text{ m}^3$  bei einer Rohdichte von  $430 \text{ kg/m}^3$ ), um diese mit den weiteren Ausgangsstoffen vergleichen zu können.

Die hier dargestellten Daten über den Energiebedarf und die Umwelteinwirkungen von 1 kg Schnittholz Fichte beinhalten den Teilprozess ‚cradle-to-gate‘<sup>5</sup> und das EoL-Szenario<sup>6</sup> der thermischen Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage. Der Herstellungsprozess beschreibt hierbei die gesamte Bearbeitung bis zum fertigen Produkt, das am Werkstor übergeben wird einschließlich der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme des Baumes im Wald. Das Ende des Zyklus zeigt die Gutschriften der Verbrennung zu thermischen Zwecken und zur Stromerzeugung.

Die weiteren Teilschritte des betrachteten Holzes, die Transporte zur Baustelle, die Einwirkungen der Errichtungs- und Austauschabläufe sowie die Transporte zur Verbrennungsanlage stehen im Zusammenhang mit der jeweiligen Verwendung. Somit werden diese erst in der weiteren Betrachtung der Fassadensysteme hinzugezogen.



Abb. 38 Teilprozesse  
Schnittholz Fichte

## *Datenqualität*

Die verwendeten Daten beziehen sich auf die Angaben der ökobau.dat Stand 2011 mit der fortgeschriebenen Gültigkeit für das Jahr 2013. Der Herstellungsprozess verweist auf Fichtenholz mit einer Holzfeuchte von 12%. Die Angaben sowohl für die Produktion als auch für thermische Verwertung sind mit Sicherheitszuschlägen von 10% auf die errechneten Ergebnisse versehen, da diese nicht von einer unabhängigen Institution überprüft wurden. Die angegebenen Werte basieren auf Literaturrecherche und Daten aus der Industrie.

<sup>5</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 3.1.01 Schnittholz Fichte, 18.12.2012

<sup>6</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 3.4.03 End of life - Holz naturbelassen in MVA, 18.12.2012

## Sachbilanz 1 kg Schnittholz Fichte

Der Energiebedarf für die Produktion von 1 kg Schnittholz Fichte liegt bei 24.49 MJ (18.8 MJ Anteil erneuerbarer Energien). Die Aufwendungen stehen damit im Verhältnis von etwa 4/5 zu 1 kg Brettschichtholz, 2/5 zu 1 kg Furnierschichtholz und etwa 1/7 zu 1kg Aluminium.

Auffällig ist die positive Gesamtbilanz im Bereich der nicht erneuerbaren Energien. Durch die thermische Verwertung am Ende des Lebenszyklus erhält das Schnittholz Gutschriften, die entsprechende Einsparungen im Bereich der Energieerzeugung bedeuten. Ebenfalls auffällig ist der hohe Anteil an erneuerbaren Energien in der Herstellungsphase.

### Wirkungsabschätzung 1 kg Schnittholz Fichte

Bei der Betrachtung der Umweltindikatoren, die sich bei der Bearbeitung von Schnittholz ergeben, fällt zunächst die positive Bilanz der potentiellen Treibhausgasemissionen auf (GWP). Die Einsparung von 1.61 kg CO<sub>2</sub> eq in der Herstellung wird durch die Bindung von Kohlenstoffdioxid im Wald erreicht. Da es im Moment meist zur thermischen Verwertung bei der Entsorgung von Holzprodukten kommt, wird ein großer Teil der Gewinne wieder emittiert. Die Werte der anderen Indikatoren zeich-

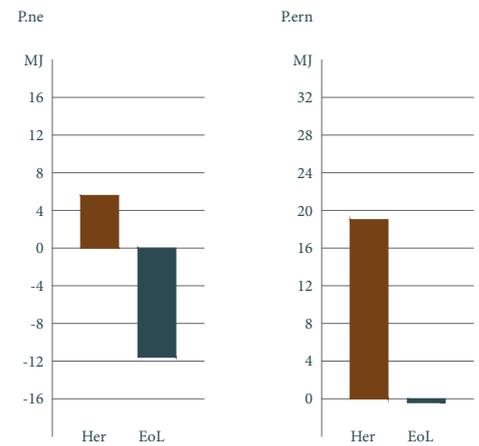


Abb. 39 Primärenergieverbrauch Schnittholz Fichte

nen ein umgekehrtes Bild. Hier entstehen Emissionspotenziale bei der Herstellung des Schnittholzes. Vergleicht man deren Dimension zu denen von Aluminium oder Silikon erhält man Verhältnisse im Bereich 1/100. Der größte Anteil der Werte wird durch die Energieerzeugung für die Produktionsschritte verursacht. Entsprechend der Gegenüberstellung beim Primärenergieverbrauch haben die Gutschriften durch die thermische Verwertung positiven Einfluss auf die jeweiligen Bilanzen. So zeigen sich beim Ozonabbaupotenzial, Versauerungspotenzial und dem Eutrophierungspotenzial sogar negative Endwerte.

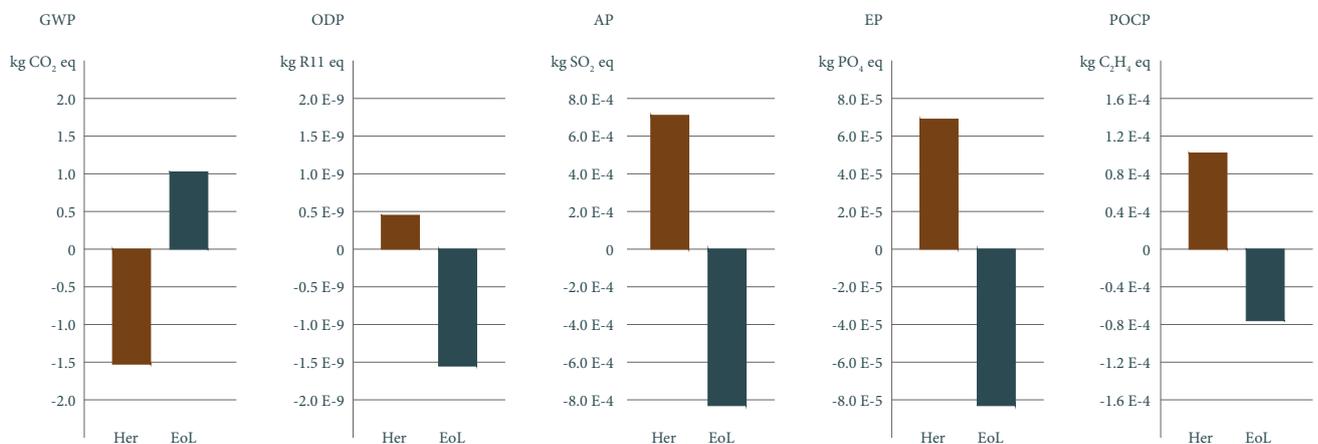


Abb. 40 Umweltindikatoren Schnittholz Fichte

## 3.1.2 Lebenszyklus Brettschichtholz (BSH)

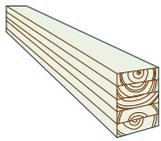


Abb. 41 Symbol Brettschichtholz

*Hauptbestandteile, Lebenszyklus und Systemgrenzen*  
*Beschreibung der Teilprozesse*  
*Datenqualität*  
*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

Brettschichtholz besteht aus mindestens drei Lamellen Schnittholz, die faserparallel aufeinandergeleimt werden. Zumeist wird für die Produktion Fichte verwendet, ein wie bereits beschrieben sehr gut verfügbarer Rohstoff in Österreich. Durch den Zuschnitt und die Fügung ist es möglich Fehlstellen wie Ästigkeit zu reduzieren, dadurch wird es bis zu 80% leistungsfähiger als Schnittholz als tragendes Element.

Außerdem besteht so die Möglichkeit größere Längen, einfach oder mehrfach gekrümmte und auch tordierte Hölzer herzustellen. Im Bereich dieser erweiterten Möglichkeiten sollten die Aspekte der effizienten Transportfähigkeit bei der Planung berücksichtigt werden.

Aufgrund der Leistungsfähigkeit wird Brettschichtholz unter anderem für höher beanspruchte Tragelemente verwendet.

### *Hauptbestandteile Brettschichtholz*

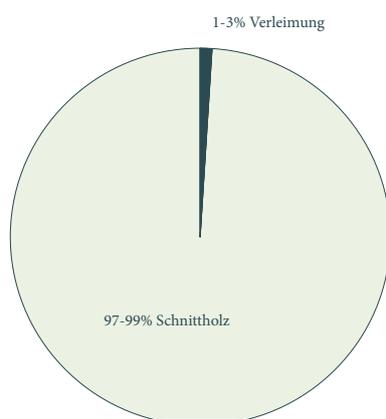


Abb. 42 Bestandteile Brettschichtholz

Brettschichtholz hat einen sehr geringen Leimanteil von 1-3%<sup>13</sup>. Dieser ergibt sich durch die größeren Lamellenstärken als etwa bei Dreischichtplatten.

Als Leime werden hauptsächlich Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffe (MUF)<sup>14</sup> sowohl für die längen- als auch die höhenbezogenen Klebungen verwendet.

### *Lebenszyklus und Systemgrenzen*

Durch die größere Anzahl an Arbeitsschritten ist der Aufwand für die BSH-Produktion größer als der für Schnittholzprodukte. Dabei entfallen etwa 75% des Energiebedarfes auf die Prozesse und die entsprechende Stromversorgung. Da für die Verleimung eine Holzfeuchte von maximal 15% vorliegen darf, wird das Holz thermisch getrocknet, was innerhalb der Prozesseinträge den größten Part einnimmt. Obwohl der Klebstoff nur einen geringen Anteil der Masse ausmacht, fällt er mit 75% Energieaufwand bei der Materialbereitstellung am stärksten ins Gewicht.

Wie auch bei anderen Holzprodukten fallen Nebenprodukte ab, die sich in der Gesamtbilanz bemerkbar machen.

Da die tragenden Bauteile aus BSH vor klimatischen Einflüssen geschützt sind, kann von einer Einsatzdauer von >50 Jahren<sup>15</sup> ausgegangen werden. Dies spielt in der Betrachtung der Nutzungsphase und der Austauschprozesse eine Rolle.

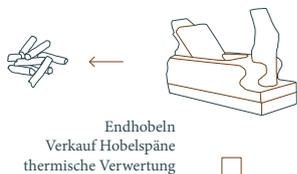
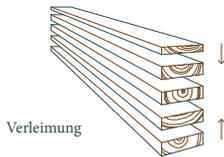
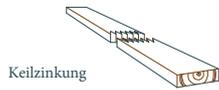
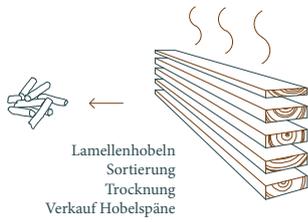
Am Ende des Lebenszyklus von Brettschichtholzprodukten steht entweder die stoffliche (Grundlage für Holzwerkstoffe) oder die thermische Verwertung. Bei einer Anwendung im Innenbereich ohne Kontaminationen ist das Recycling in gleicher Funktionweise vorstellbar, da die Elemente meist großformatig sind.

<sup>13</sup> BMVBS und ByAK (2013) www.wecobis.de - Datensatz Stabförmige-Werkstoffe - Brettschichtholz, 20.12.2012

<sup>14</sup> Institut Bauen und Umwelt e.V., Hrsg. (2010) Umweltproduktdeklaration Brettschichtholz (BS-Holz) - Seite 7

<sup>15</sup> BMVBS (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB - Seite 7

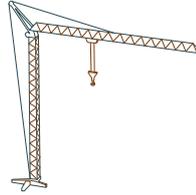
# HERSTELLUNG



# GRENZE CRADLE TO GATE

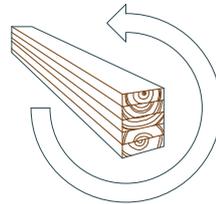


Transport zur Baustelle



Zusammenbau und Montage

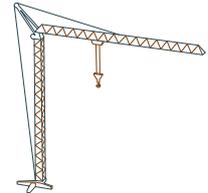
# NUTZUNG



Instandsetzung und Austausch



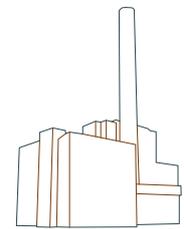
# END OF LIFE



Demontage



Transport



thermische Verwertung

Abb. 43 Skizze Lebenszyklus Brettschichtholz

## Funktionelle Einheit

### Beschreibung der Teilprozesse

Die funktionelle Einheit bei der Bilanzierung von Brettschichtholz ist 1 kg. Diese Einheit wird bei der Betrachtung der Baumaterialien gewählt um eine Vergleichbarkeit unter diesen zu erreichen. Bei einer Dichte von 515 kg/m<sup>3</sup> entspricht die funktionelle Einheit einem Volumen von 0.0019 m<sup>3</sup>.

Die hier dargestellten Daten über den Energiebedarf und die Umwelteinwirkungen von 1 kg Brettschichtholz Fichte beinhalten den Teilprozess ‚cradle-to-gate‘<sup>16</sup> und das EoL-Szenario<sup>17</sup> der thermischen Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage für Holzwerkstoffe. Der Herstellungsprozess beschreibt hierbei die gesamte Bearbeitung bis zum fertigen Produkt einschließlich der CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Baumes im Wald. Das Ende des Zyklus zeigt die Gutschriften der Verbrennung zu thermischen Zwecken und zur Stromerzeugung.

Die weiteren Teilschritte des betrachteten Holzes, die Transporte zur Baustelle, die Einwirkungen der Errichtungs- und Austauschabläufe sowie die Transporte zur Verbrennungsanlage stehen im Zusammenhang mit der jeweiligen Verwendung. Somit werden diese erst in der weiteren Betrachtung der Fassadensysteme hinzugezogen.



Abb. 44 Teilprozesse Brettschichtholz

## Datenqualität

Die Bereitstellung der entsprechenden Datensätze der ökobau.dat fand im Jahr 2007 (Herstellung) bzw. 2005 (Nachnutzung) statt. Die Aktualität wird auch für das Jahr 2013 weiter bestätigt.

Weiter beziehen sich die Werte auf Brettschichtholz mit einer Holzfeuchte von 12%. Die Ermittlung basiert auf Literaturrecherche sowie konkreten Angaben aus der industriellen Fertigung. Sicherheitszuschläge in Höhe von 10% wurde beanschlagt, da die Ergebnisse keiner externen Prüfung unterzogen wurden.

<sup>16</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 3.1.04 Brettschichtholz Nadelholz, 20.12.2012

<sup>17</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 3.4.03 End of life - Holzwerkstoffe in MVA, 20.12.2012

## Sachbilanz 1 kg Brettschichtholz

Mit einem Gesamtenergiebedarf von 29.68 MJ/kg (9.64 MJ P.ne, 20.4 MJ P.ern) für die Herstellung befindet sich das Brettschichtholz zwischen den bereits ausgewerteten Dreischichtplatten (38.77 MJ/kg) und dem Schnittholz aus Fichtenholz (24.49 MJ/kg). Die Werte für die Produktion von Furnierschichtplatten, die im weiteren Verlauf beschrieben werden, zeichnen einen nahezu doppelt so großen Aufwand ab.

Aufgrund der Substitutionen durch die thermische Verwertung am Ende des Lebenszyklus wird der Anteil nicht erneuerbarer Energien nahezu ausgeglichen.

### Wirkungsabschätzung 1 kg Brettschichtholz

Das Treibhausgaspotenzial im Lebenszyklus von Brettschichtholz zeigt eine knapp positiv zu bewertende Gesamtbilanz auf (-1.49 kg CO<sub>2</sub> eq in der Herstellung, 1.22 kg CO<sub>2</sub> eq in der Nachnutzung). Der Energieaufwand für die thermische Trocknung wirkt dem Effekt der CO<sub>2</sub>-Bindung beim Holzanbau entgegen. Hinzu kommen die Emissionen während der thermischen Verwertung, die wiederum durch die Gutschriften der eingesparten nicht erneuerbaren Primärenergieträger abgeschwächt werden.

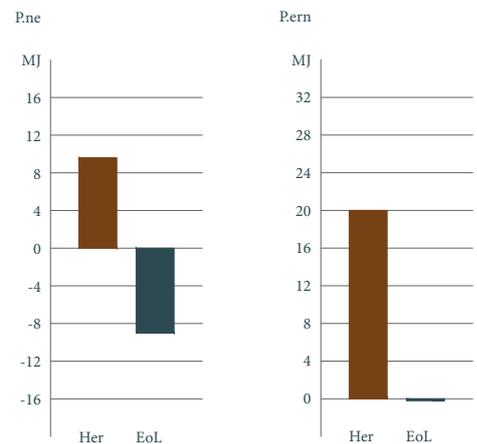


Abb. 45 Primärenergieverbrauch Brettschichtholz

Die in der End-of-Life-Phase erzielten Einsparungen an Emissionen ozonschichtrelevanter Gase sind ebenfalls auf die Substitutionen der thermischen Verwertung zurückzuführen. Die eingesparten fossilen Rohstoffe führen zu einer Bilanz, die sehr geringe Auswirkungen auf die Ozonschicht hat (5.11 E-11 kg R11 eq). Die Indikatoren des Versauerungspotenzials, des Eutrophierungspotenzials und des Sommersmogpotenzials erhalten ihre Einträge über die Stromversorgung und die Art der Verbrennung für die technische Trocknung während der Herstellung. Die entsprechenden Gutschriften am Ende des Zyklus sind sehr gering, sodass sie auf diese Potenziale kaum Auswirkungen haben (die Einsparung von kg PO<sub>4</sub> eq entspricht etwa 1% der vorherigen Emissionen).

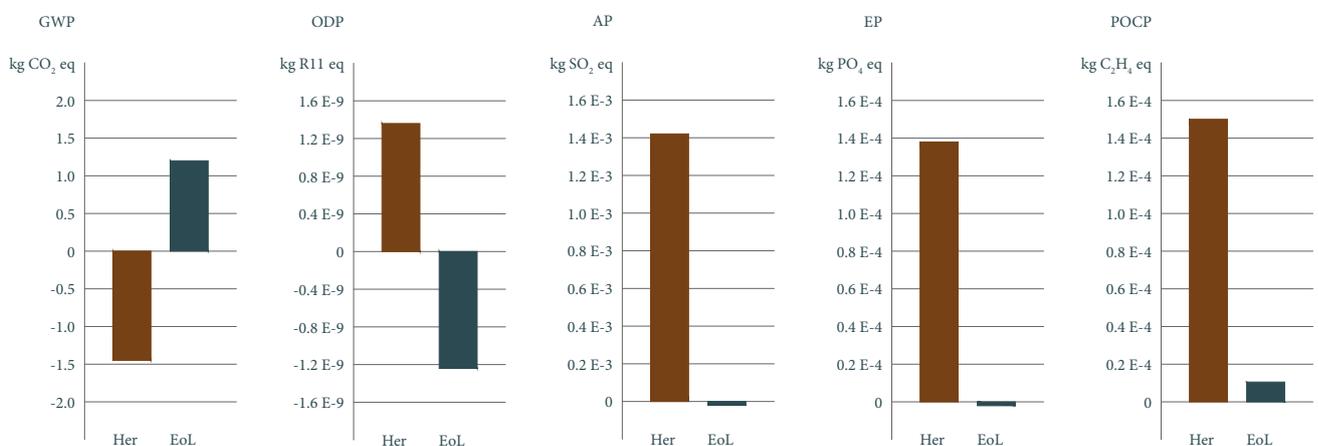
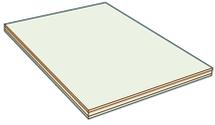


Abb. 46 Umweltindikatoren Brettschichtholz

### 3.1.3 Lebenszyklus Dreischichtplatten



*Hauptbestandteile, Lebenszyklus und Systemgrenzen*  
*Beschreibung der Teilprozesse*  
*Datenqualität*  
*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

Abb. 47 Symbol Dreischichtplatten

Die plattenförmigen Werkstoffe, bestehend aus drei flächig verleimten Schichten, können aus unterschiedlichen Holzarten, Nadel- oder Laubhölzern hergestellt werden. Die in dieser Arbeit bilanzierten Platten werden aus Fichte hergestellt. Bei der Produktion werden die beiden symmetrisch dimensionierten Deckschichten faserparallel angeordnet, die Mittelschicht um 90° dazu verdreht. Diese Maßnahme bewirkt eine Reduktion der Quell- und Schwindbewegungen, die durch klimatische Veränderungen hervorgerufen werden<sup>1</sup>.

Dreischichtplatten finden unter anderem Verwendung als aussteifende Beplankungen und werden im Möbelbau verarbeitet. Innerhalb der Holz-Glas-Fassadenkonstruktionen werden sie in mehrschichtigen Aufbauten als Absorberplatten verbaut, die solare Einträge speichern und je nach Situation an das Raumklima abgeben.

#### *Hauptbestandteile Dreischichtplatten*

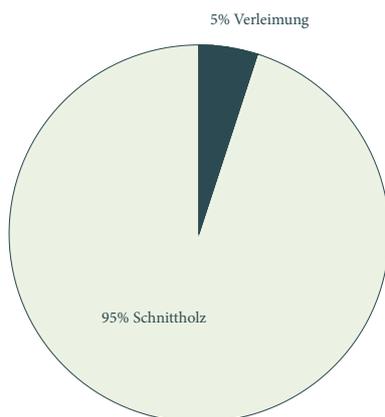


Abb. 48 Bestandteile Dreischichtplatten

Mit einem Leimanteil von etwa 5% befindet sich die Dreischichtplatte im unteren Bereich der plattenförmigen Holzwerkstoffe. Die Verleimung besteht

dabei aus Harnstoff-Formaldehyd-Harzen oder Mischharzen zusammen mit Tannin-Formaldehyd-Harz<sup>2</sup>.

#### *Lebenszyklus und Systemgrenzen*

Bei der Herstellung der Dreischichtplatten fallen in diversen Bearbeitungsschritten Nebenprodukte ab, die in Form von Rinde, Spänen, Hackschnitzeln und Pellets zur Produktion anderer Holzwerkstoffe oder zur Energieerzeugung weiter genutzt werden. Diese Einträge wirken sich positiv auf den Energiebedarf der Herstellung aus und zeigen damit gleichzeitig die Grenzen des im Rahmen der Dreischichtplatten untersuchten Systems auf. Durch die weiteren Arbeitsschritte zur Fügung der Einzelschichten sowie der Verleimung der Platten ergibt sich jedoch ein gewisser Mehraufwand im Vergleich zu den Schnittholzelementen.

Die Daten in Bereich der Nutzung hängen von der Art der Verwendung ab. Bei einer Verwendung als aussteifende Beplankung im Innenbereich kann von einer Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren<sup>9</sup> ausgegangen werden. In der Funktion als Absorber liegen die Platten zwar im Querschnitt eines Fassadenaufbaus, sind aber ebenso vor witterungsbedingten Beeinträchtigungen geschützt.

In dem hier skizzierten Lebenszyklus der Dreischichtplatten steht bei der Nachnutzung wiederum der Prozess der thermischen Verwertung im Vordergrund, da dies das aktuell verbreitetste Verfahren ist. Betrachtet man den speziellen Einsatz als großformatige, unbeschichtete Platten sind auch Szenarien im Bereich der Weiterverarbeitung oder Wiederverwendung denkbar.

<sup>7</sup> Holzforschung Austria (2012) dataholz.com - Datensatz Lagenwerkstoffe - Massivholzplatte, 20.12.2012

<sup>8</sup> BMVBS und ByAK (2013) www.wecobis.de - Datensatz Massivholzplatte (1-schicht / mehrschicht), 20.12.2012

<sup>9</sup> BMVBS (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB - Seite 7

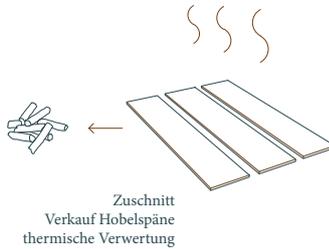
# HERSTELLUNG



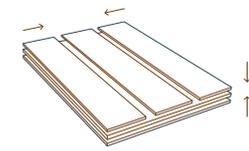
Stammholz



Entrinding  
thermische Verwertung



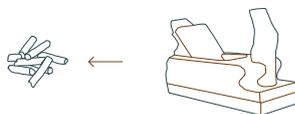
Zuschnitt  
Verkauf Hobelspäne  
thermische Verwertung



Verleimung



Formatieren



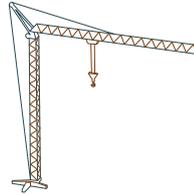
Endhobeln  
Verkauf Hobelspäne  
thermische Verwertung



# GRENZE CRADLE TO GATE

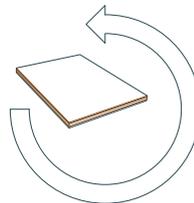


Transport zur Baustelle



Zusammenbau und Montage

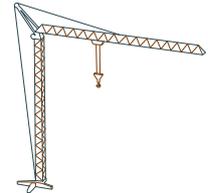
# NUTZUNG



Instandsetzung und Austausch



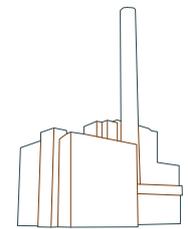
# END OF LIFE



Demontage



Transport



thermische Verwertung

Abb. 49 Skizze Lebenszyklus Dreischichtplatten

## Funktionelle Einheit

### Beschreibung der Teilprozesse

Die im Rahmen der Dreischichtplatten betrachtete funktionelle Einheit bezieht sich auf die Produktion sowie die Entsorgung von 1 kg des Werkstoffes (dies entspricht einem Volumen von 0,0021 m<sup>3</sup> bei einer Rohdichte von 472 kg/m<sup>3</sup>) um eine Vergleichbarkeit mit den weiteren Ausgangsstoffen herstellen zu können.

Die hier dargestellten Daten über den Energiebedarf und die Umwelteinwirkungen von 1 kg Dreischichtplatte beinhalten den Teilprozess ‚cradle-to-gate‘<sup>10</sup> und das EoL-Szenario<sup>11</sup> der thermischen Verwertung von Holzwerkstoffen in einer Müllverbrennungsanlage. Der Herstellungsprozess beinhaltet die gesamte Bearbeitung bis zum fertigen Produkt und berücksichtigt die CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Baumes im Wald. Das Ende des Zyklus zeigt die Gutschriften der Verbrennung zu thermischen Zwecken und zur Stromerzeugung.

Die weiteren Teilprozesse des betrachteten Holzes, die Transporte zur Baustelle, die Einwirkungen der Errichtungs- und Austauschabläufe sowie die Transporte zur Verbrennungsanlage stehen im Zusammenhang mit der jeweiligen Verwendung. Somit werden diese erst in der weiteren Betrachtung der Holz-Glas-Fassadensysteme hinzugezogen.



Abb. 50 Teilprozesse Dreischichtplatten

## Datenqualität

Die erhobenen Daten für die Sachbilanz sowie die Wirkungsabschätzung beziehen sich auf die Grundwerte der ökobau.dat. Die Herstellung der Dreischichtplatte beschreibt Holz mit einer Feuchte von 12%. Die Datenerhebung erfolgte im Jahr 2007 (für die End-of-Life-Informationen im Jahr 2005), wird aber mit Gültigkeit für das Jahr 2013 weitergeführt. Die Werte wurden durch Literaturrecherche in Verbindung mit Daten aus der Industrie zusammengestellt und erhalten jeweils einen Sicherheitszuschlag von 10%, da keine unabhängige Prüfung vorliegt.

Erwähnenswert ist die Berücksichtigung von Beschichtungen in der Produktionsphase. Die Relevanz dieser Position für Kenndaten wird im Weiteren näher erläutert.

<sup>10</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 3.2.01 Drei-Schichtholzplatte, 20.12.2012

<sup>11</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 3.4.03 End of life - Holzwerkstoffe in MVA, 20.12.2012

## Sachbilanz 1 kg Dreischichtplatte

Der Arbeitsaufwand zur Herstellung von 1 kg einer Dreischichtplatte beträgt 38.77 MJ. Mit 32.0 MJ (82.5%) ist auch hier der Anteil der erneuerbaren Energien auffallend hoch. Im Vergleich zum bereits beschriebenen Schnittholz Fichte steigt der Primärenergiebedarf um 58.3%. Dieser vergrößerte Aufwand erklärt sich zum Teil durch die zusätzlich anfallenden Arbeitsschritte während des Prozesses. Weiter kann der Position ‚Beschichtungen‘ ein Anteil dieses Anstieges zugeschrieben werden.

Wie auch im Bereich des Schnittholzes erhält die Lebenszyklusbilanz der Dreischichtplatte Gut-schriften durch die thermische Verwertung, was zu einer positiven Gesamtbilanz im Bereich der nicht erneuerbaren Energieträger führt.

### Wirkungsabschätzung 1 kg Dreischichtplatte

Ebenso hat dieses End-of-Life-Szenario Einfluss auf die Werte der Umweltindikatoren. Das im Wald gebundene CO<sub>2</sub> wird bei der Verbrennung wieder ausgestoßen, was eine Verschlechterung der Treibhausgasbilanz zufolge hat.

Besonders auffällig sind die Werte bezüglich weiterer Umweltbeeinflussungen. Im direkten Vergleich zum Massivholz ergeben sich signifikante Sprünge in der Größenordnung der Ergebnisse. Der stärkste

Anstieg liegt dabei im Bereich des ODP (Erhöhung

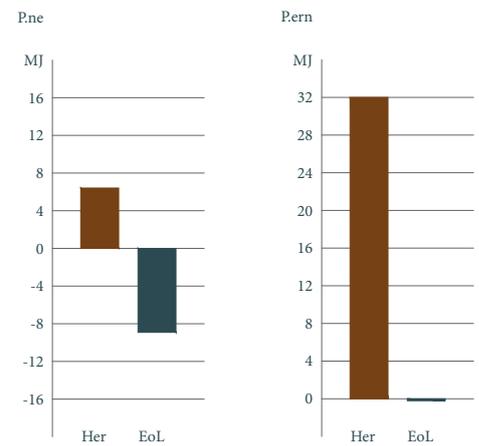


Abb. 51 Primärenergieverbrauch Dreischichtplatten

um mehr als zwei Dezimalstellen). Mit 4.34 E-7 kg R11 eq sind die Daten die höchsten aller betrachteten Holzwerkstoffe und liegen im Bereich von Silikonichtmassen.

Die Berücksichtigung von Beschichtungen in der Produktion und die Erwähnung von Testberichten von WEFAM<sup>12</sup>-Produkten als Referenzdaten legen den Schluss nahe, dass sich die Ergebnisse auf Dreischichtplatten für den Außenbereich beziehen.

Auch die Daten der anderen Umweltindikatoren sind erhöht, liegen aber im Bereich der Furnierschichtplatten. Diese weisen jedoch einen größeren Leimanteil auf, was im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschrieben wird.

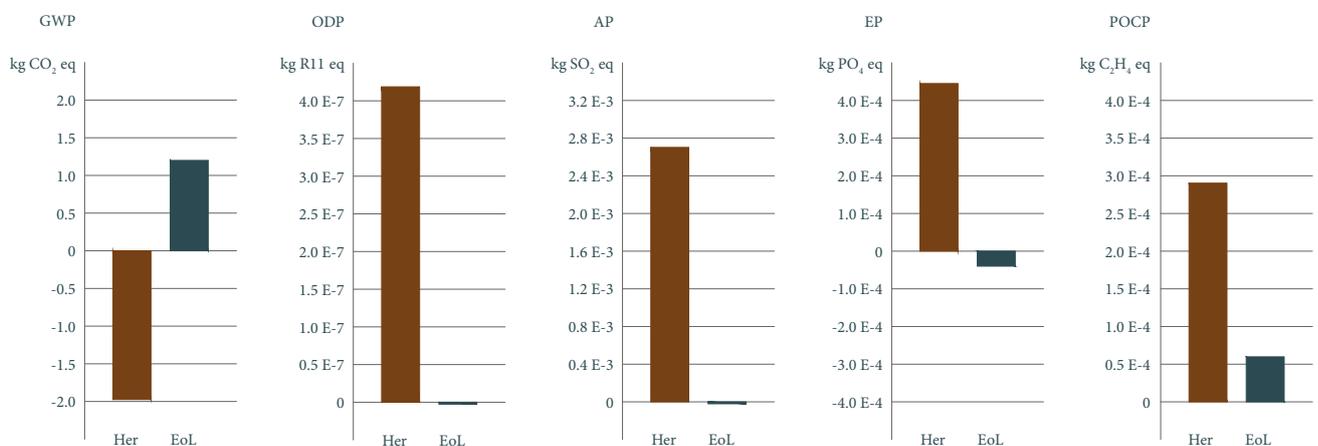
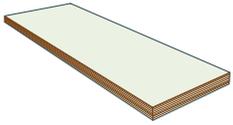


Abb. 52 Umweltindikatoren Dreischichtplatten

12 WEFAM - wetterfeste Faserplatten aus modifiziertem Holz

## 3.1.4 Lebenszyklus Furnierschichtholz



*Hauptbestandteile, Lebenszyklus und Systemgrenzen*  
*Beschreibung der Teilprozesse*  
*Datenqualität*  
*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

Abb. 53 Symbol Furnierschichtholz

Furnierschichtholz ist ein schichtweiser strukturierter Holzwerkstoff, der aus einer ungeraden Anzahl von 3-6 mm starken Furnierschichten aufgebaut ist. Diese werden hauptsächlich faserparallel (bei großen Formaten werden auch Querschichten eingesetzt) und wasserfest verleimt.

Furnierschichtholz weist eine große Festigkeit und Formstabilität auf, der Feuchtegehalt ist mit 9%<sup>18</sup> im Vergleich zu anderen Holzwerkstoffen sehr gering. Die Verwendungszwecke sind Platten, aussteifende Elemente, Träger und Stützen und ähneln so denen von Brettschichtholz.

Als Holzrohstoff werden Nadelhölzer, zumeist Fichtenhölzer, eingesetzt. Eine Besonderheit dieses Werkstoffes besteht in den Produktionsstandorten. Da Furnierschichtholz ausschließlich in Finnland sowie den USA<sup>19</sup> hergestellt wird, müssen je nach Einsatzort größere Transportwege in der Bilanzierung berücksichtigt werden. Die im Weiteren beschriebenen HGV-Fassaden verwenden jedoch Birkefurnier als Material in der Koppelleiste; die Beschreibung hier stellt eine Annäherung dar.

### *Hauptbestandteile Furnierschichtholz*

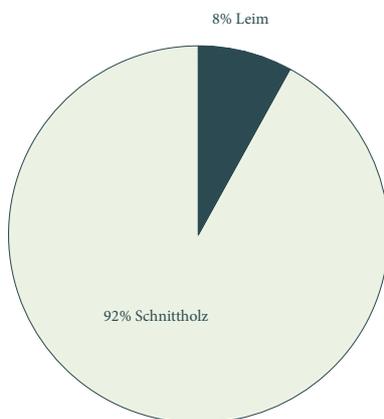


Abb. 54 Bestandteile Furnierschichtholz

Mit einem Leimanteil von 8% liegt Furnierschichtholz im oberen Bereich der Holzwerkstoffe. Die Art der Verarbeitung und Fügung verhilft dem Produkt zu seiner großen Leistungsfähigkeit, hat zugleich aber auch einen erheblichen Einfluss auf die ökologische Bilanz im Lebenszyklus.

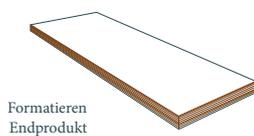
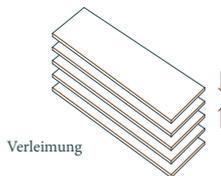
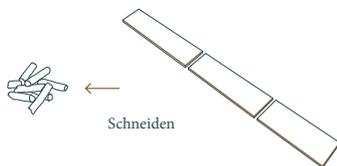
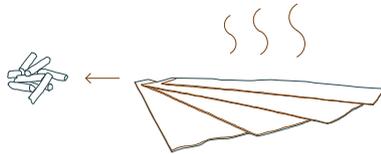
### *Lebenszyklus und Systemgrenzen*

Der Herstellungsprozess von Furnierschichtholz beinhaltet viele Einzelschritte bis zur Fertigstellung des Produkts. Bei der Bearbeitung des Stammholzes werden Furnierschichten abgeschält; der damit verbundene Arbeitsaufwand pro m<sup>3</sup> Holzerntrag ist sehr hoch, da die Blätter mit einer Stärke von 3-6 mm dünn gehalten sind. Im weiteren Verlauf werden die Blätter getrocknet bis zu einem Feuchtegehalt von 9% im fertigen Endprodukt. Dies macht das Furnierschichtholz unanfällig gegen äußere Einflüsse, bedeutet aber ebenso einen großen Energiebedarf für den Teilschritt der technischen Trocknung. Gutschriften erhält die Herstellung durch die anfallenden Nebenprodukte (Rinde, Späne, Hackschnitzel, Pellets), die als Basis für Spanholzwerkstoffe dienen oder zur Wärme- bzw. Stromerzeugung verwendet werden können. Die Beschreibung der Nutzungsphase hängt von der Art der Verwendung ab. Durch die hohe Leistungsfähigkeit und den entsprechenden Einsatz als statisch relevante Elemente im Innenbereich von Gebäuden kann von einer Nutzungsdauer >50 Jahre<sup>20</sup> ausgegangen werden. Am Ende des Lebenszyklus steht wie auch bei anderen Holzprodukten die thermische Verwertung im Vordergrund. Der Einsatz als kleinformatige Leisten im Verbund der Holz-Glas-Fassaden schließt alternative Recyclingoptionen aus.

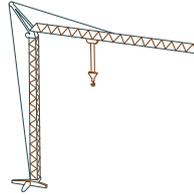
18/19 BMVBS und ByAK (2013) www.wecobis.de - Datensatz Langenwerkstoffe - Furnierschichtholz, 06.01.2013

20 BMVBS (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB - Seite 7

## HERSTELLUNG

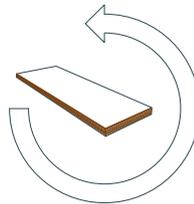


## GRENZE CRADLE TO GATE



Zusammenbau und Montage

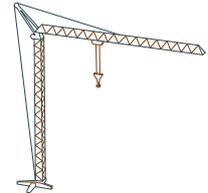
## NUTZUNG



Instandsetzung und Austausch



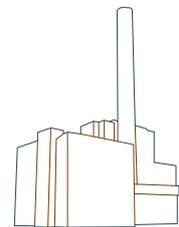
## END OF LIFE



Demontage



Transport



thermische Verwertung

Abb. 55 Skizze Lebenszyklus Furnierschichtholz

## Funktionelle Einheit

### Beschreibung der Teilprozesse

Die im Abschnitt Sachbilanz und Wirkungsabschätzung Furnierschichtholz betrachtete funktionelle Einheit bezieht sich auf die Produktion sowie die Nachnutzung von einem kg des Holzwerkstoffes. Bei einer Dichte von  $465 \text{ kg/m}^3$  beträgt das Volumen  $0.0022 \text{ m}^3$ . Die Wahl der Einheitsgröße lässt eine vergleichende Beschreibung aller im weiteren Verlauf dargestellten Materialien zu.

Bei der Auswertung der ökologischen Kriterien von Furnierschichtholz werden alle relevanten Vorgänge der Phasen ‚Herstellung‘<sup>21</sup> sowie die eines konkreten ‚End-of-Life‘<sup>22</sup>-Szenarios berücksichtigt. Neben den erforderlichen Schritten im Werk beinhalten die Daten der Produktionsphase in diesem Fall auch den Transport von 1 kg Furnierschichtholz aus Finnland nach Deutschland.

Wie auch bei den anderen beschriebenen Materialien werden die Prozesse der Nutzungsphase erst bei der Beschreibung der Fassadenaufbauten einbezogen, da diese von dem Einsatzort und dem Einsatzzweck abhängen. Das angewendete EoL-Szenario ist wiederum die thermische Verwertung von Holzwerkstoffen in einer Müllverbrennungsanlage.



Abb. 56 Teilprozesse Furnierschichtholz

## Datenqualität

Die erzielten Ergebnisse für den Energieaufwand sowie die Umwelteinwirkungen von 1 kg Furnierschichtholz beziehen sich auf die Daten der ökobau.dat. Erhoben wurden diese in den Jahren 2000 (Herstellung) bzw. 2005 (Verbrennung in der Müllverbrennungsanlage) und werden für das Jahr 2013 weiter als aktuell bestätigt.

Die Produktionsdaten berücksichtigen dabei sowohl die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme der Holzrohstoffe im Wald als auch die Aufwendungen für die anfallenden Transporte aus finnischen Werken zu einem deutschen Einsatzort. Die erzielten Werte im Bereich der HGV-Fassaden wären somit durch die Verwendung von Birkefurnieren leicht verbessert. Beide Teilprozesse wurden mit Sicherheitszuschlägen von 10% versehen, da keine unabhängige Bestätigung der Werte vorliegt.

21 BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 3.2.03 Furnierschichtholz, 06.01.2013

22 BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 3.4.03 End of life - Holzwerkstoffe in MVA, 06.01.2013

## Sachbilanz 1 kg Furnierschichtholz

Im Bereich der verwendeten Holzmaterialien, die bei den betrachteten Fassadenkonstruktionen zum Einsatz kommen, liegt der Energieaufwand für die Produktion von 1 kg Furnierschichtholz am oberen Ende. Der Bedarf beläuft sich auf 54.5 MJ/kg und teilt sich in 19.8 MJ/kg nicht erneuerbarer Energien und 34.7 MJ/kg Anteil erneuerbarer Energien auf. Der Prozentsatz von Strom aus der Erzeugung mit fossilen Elementen beläuft sich auf 36.3% und liegt damit ebenfalls an der Spitze im Vergleich der Holzprodukte.

Die Substitutionen, die durch die thermische Verwertung gutgeschrieben werden, wiegen diesen Verbrauch etwa zur Hälfte wieder auf. Die Höhe der erzielten Werte sind auf die Besonderheiten der Produktion von Furnierschichtholz zurückzuführen. Der geringe Feuchtegehalt, der hohe Leimanteil sowie die exklusive Produktion in finnischen und amerikanischen Standorten tragen zu diesem Ergebnis bei.

### Wirkungsabschätzung 1 kg Furnierschichtholz

Bei der Bewertung der Umweltindikatoren fällt auf, dass das Furnierschichtholz als einziger Holzwerkstoff eine negativ zu bewertende Gesamtbilanz in

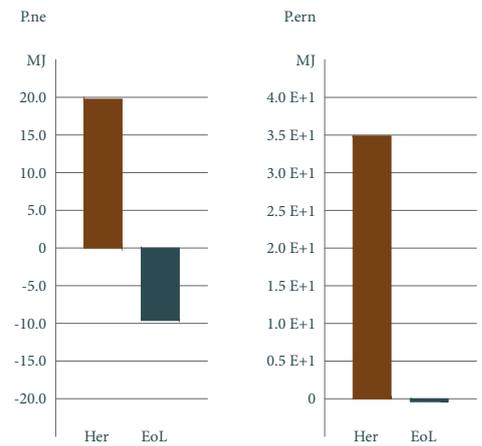


Abb. 57 Primärenergieverbrauch Furnierschichtholz

Bezug auf die Treibhausgasemissionen hat. Die üblichen Gewinne während der Produktionsphase fallen geringer aus, da die bereits beschriebenen höheren Aufwendungen sowie die Transporte gewichtige Einschränkungen bewirken. Die Bilanz des Ozonabbaupotenzials bleibt durch die Gutschriften der thermischen Verwertung im negativen Bereich, während die Emissionen von Schwefeldioxid-, Phosphat-, sowie Ethen-Äquivalenten nicht aufgewogen werden. Die Werte dieser Indikatoren sind im Vergleich zu Brettschichtholzdaten etwa doppelt so hoch und 4-10 mal größer als die dargestellten Ergebnisse der Schnitthölzer. Das Versauerungspotenzial (1/2) und das Sommersmogpotenzial (2/3) befinden sich eher in den Kategorien von Emissionswerten, die bei der Produktion von 1 kg Baustahl ausgestoßen werden.

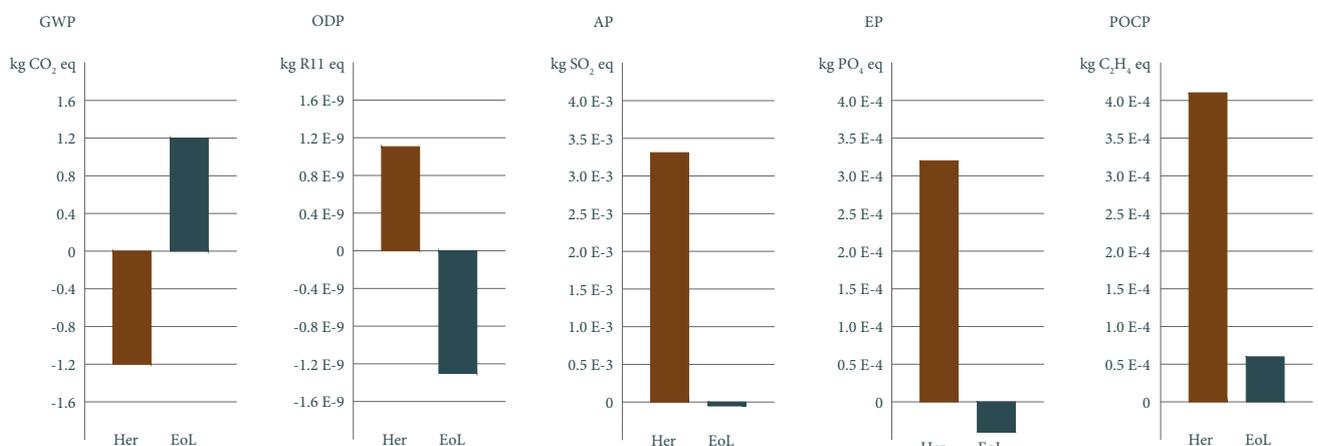
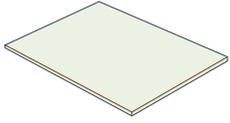


Abb. 58 Umweltindikatoren Furnierschichtholz

## 3.1.5 Lebenszyklus Einfachverglasung



*Hauptbestandteile, Lebenszyklus und Systemgrenzen*  
*Beschreibung der Teilprozesse*  
*Datenqualität*  
*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

Abb. 59 Symbol Einfachverglasung

In der Anwendung als Baumaterial werden meist Kalk-Natron-Silikat-Gläser hergestellt. Die häufigste Funktion dabei ist die transparente Fläche in der Außenhaut eines Gebäudes, wobei Einfachverglasung aufgrund seiner thermischen Qualität seltener warme Innenräume begrenzt. Es kommt eher als Fensterglas von Gebäuden ohne thermische Anforderungen, im Bereich von Doppelfassaden oder Wintergärten zum Einsatz. Im Bereich der Holz-Glas-Verbund-Konstruktionen wird dieses Spektrum um statisch relevante Funktionen erweitert. Diese sind die Aufgabe der Gebäudeaussteifung sowie der Einsatz als Biegeträger im Verbund.

### *Hauptbestandteile Einfachverglasung*

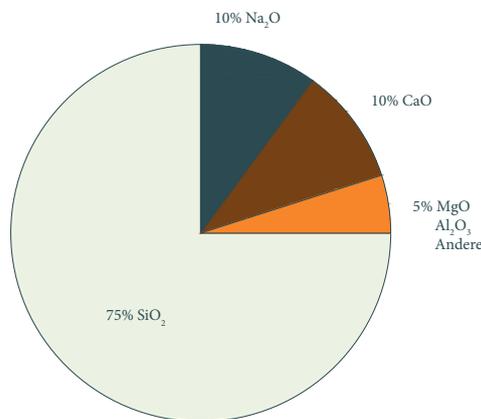


Abb. 60 Bestandteile Einfachverglasung

Im ersten Schritt der Glasproduktion wird das Gemenge erstellt, das zu einem großen Teil aus Quarzsand besteht (75%)<sup>23</sup>. Hinzu kommen viele weitere Inhaltstoffe, von denen Soda (Na<sub>2</sub>O) und Kalkstein (CaO) mit jeweils etwa 10% die höchste Konzentration erreichen. Quarzsand kann als Rohstoff im Tagebau gewonnen werden,

während natürliches Soda nur in afrikanischen Ländern sowie den USA vorkommen. Somit gehen der Glasproduktion Syntheseschritte für die Sodaherstellung voraus.

### *Lebenszyklus und Systemgrenzen*

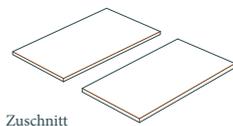
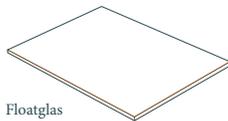
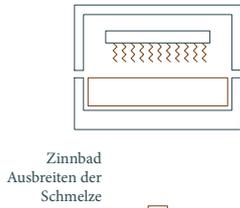
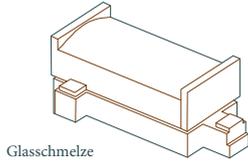
Nach der Zusammenstellung der Grundstoffe wird das Gemenge in Wannenöfen zur Glasschmelze erhitzt. Diese Öfen laufen kontinuierlich und erreichen Laufzeiten bis zu 12 Jahren. Der Energieaufwand dieses Prozessschrittes ist sehr hoch. Im ersten Schritt wird die sog. Rauhschmelze auf 1000-1200 °C erhitzt, im weiteren Verlauf, dem Vorgang der Läuterung, werden Temperaturen bis zu 1600 °C erreicht um vorhandene Gasblasen aus der Schmelze zu entfernen. Zur Befuerung der Öfen werden fossile Brennstoffe verwendet, die zur Emissionsbilanz beitragen. Ein Teil der bei der Schmelze emittierten Gase werden durch das Eingeben von Kalkhydraten gebunden.

Die Skizzierung der Nutzungsphase einer Verglasung hängt maßgeblich von der Art der Nutzung ab. In der Verwendung als transparente Füllung werden 30 Jahre<sup>24</sup> als Austauschzyklus angenommen. Funktioniert die Scheibe statisch relevant im Verbund, müssen weitere Parameter berücksichtigt werden.

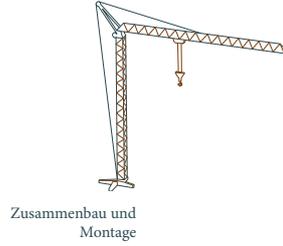
Die End-of-Life-Phase der Einfachverglasung sieht häufig die stoffliche Verwertung für Glasprodukte (wie etwa Foamglas oder Behältergläser) mit geringeren Anforderungen vor. Die Recyclingrate in der Fensterglasproduktion ist dagegen verschwindend gering.

<sup>23</sup> BMVBS und ByAK (2013) www.wecobis.de - Datensatz Verglasungen - Basisgläser, 07.01.2013  
<sup>24</sup> BMVBS (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB - Seite 3

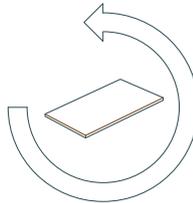
# HERSTELLUNG



# GRENZE CRADLE TO GATE



# NUTZUNG



# END OF LIFE

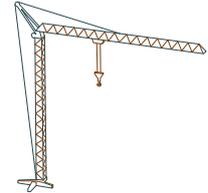


Abb. 61 Skizze Lebenszyklus Einfachverglasung

## Funktionelle Einheit

### Beschreibung der Teilprozesse

Die in der Kategorie der Verglasungen gewählte funktionelle Einheit ist  $1\text{m}^2$ . So kann der Aufwand in Relation zu einer bestimmten Fassadenoberfläche in den unterschiedlichen Lebensphasen gegenübergestellt werden. Das Flächengewicht der hier beschriebenen Einfachverglasung beträgt dabei  $7,5\text{ kg/m}^2$ . In einer vergleichenden mengenbasierten Betrachtung von  $1\text{ kg}$  wäre die Fläche somit  $0,133\text{ m}^2$ . Dieser Vergleich, etwa zu den Ergebnissen der Holzwerkstoffe, ist unter Berücksichtigung der Verwendung innerhalb der Fassadensysteme allerdings nicht aussagekräftig.

Die erhobenen Daten der Prozesse ‚Herstellung‘<sup>25</sup> und ‚End-of-Life‘<sup>26</sup> berücksichtigen alle energie- und emissionsrelevanten Arbeitsschritte der jeweiligen Lebensphase der Einfachverglasung. Die Nutzungsphase und die damit verbundenen Transport-, Montage und Austauschprozesse wurden aus der Untersuchung des Materials ausgespart. Diese hängen mit der Art des Einsatzes im jeweiligen Fassadenelement zusammen und werden somit im späteren Verlauf der Arbeit berücksichtigt.

Das etablierte Verfahren der Nachnutzung von Fenstergläsern ist die Wiederverwendung im Recycling bzw. Downcycling. Im Rahmen dieser Untersuchung werden alle Glasprodukte jedoch in die Bauschuttdeponierung überführt, da für das Recyclingpotential von Gläsern noch keine Daten vorhanden sind. Das verschlechtert die Gesamtbilanz; da aber bei jedem Element gleich verfahren wird, wirkt sich dies nicht auf die Vergleichbarkeit der Daten aus.



Abb. 62 Teilprozesse  
Einfachverglasung

## Datenqualität

Die ermittelten Werte für die Sachbilanz sowie die potentiellen Umwelteinwirkungen von  $1\text{m}^2$  Fensterglas Einfachverglasung entstammen der ökobau.dat-Datenbank. Die Herstellung bezieht sich auf eine Verglasung mit dem Flächengewicht von  $7,5\text{ kg/m}^2$  sowie einer Scheibenstärke von  $3\text{mm}$ . Die Abläufe der Bauschuttdeponierung berücksichtigen die anteiligen Einwirkungen von  $1\text{m}^2$  Fensterglas über einen Zeitraum von 100 Jahren Lagerung. Die Datensätze wurden jeweils 2005 erhoben und für das Jahr 2013 weiter als aktuell bestätigt. Die Erhebung wurde mittels Literaturrecherche sowie Daten aus der Industrie durchgeführt und mit einem Sicherheitszuschlag von 10% versehen, da keine Überprüfung durch Dritte erfolgte.

25 BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 7.2.01 Fensterglas einfach, 07.01.2013

26 BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 9.5.02 Bauschutt-Deponierung, 07.01.2013

## Sachbilanz 1 m<sup>2</sup> Einfachverglasung

Die energetischen Aufwendungen über den Lebenszyklus von 1 m<sup>2</sup> Einfachverglasung betragen 137.07 MJ. Die Anteile nicht erneuerbarer und erneuerbarer Energieträger differieren dabei in sehr hohem Maße (P.ne = 134 MJ/m<sup>2</sup> entsprechen 97.3% der Gesamtenergie). Dies wird in erster Line durch die Prozesse der Wannenöfen beeinflusst, die die Glasschmelze unter Einsatz fossiler Brennstoffe erhitzt.

Im direkten Vergleich zu der Sachbilanz von Isolierverglasungen (Energiebedarf = 442.7 MJ/m<sup>2</sup>) liegen die Werte bei 30.96%. Der Einfluss der transparenten Füllung auf eine Fassadenbilanz ist vor allem abhängig von den jeweiligen Flächenanteilen sowie dem Verwendungszweck, der sich bei Einfach- und Isolierverglasungen selten überschneidet.

### Wirkungsabschätzung 1 m<sup>2</sup> Einfachverglasung

Die relevanten Umwelteinwirkungen der Einfachverglasung entstehen in der Herstellungsphase. Die größten Einflussfaktoren sind hier die Art der Befuerung der Schmelzöfen sowie die direkten Gasemissionen des geschmolzenen Gemenges. Bestrebungen der Industrie im Bereich der Effizienzsteigerung setzen bei der Bindung von Gasen

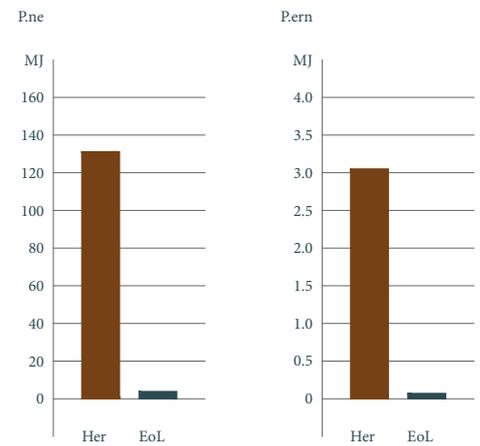


Abb. 63 Primärenergieverbrauch Einfachverglasung

mittels Kalkhydraten sowie der Verminderung der Stickoxidbildung an. Die verfolgten Ziele konzentrieren sich auf eine effizientere Verbrennung und Verfahren, bei denen Sauerstoff statt Luft bei der Befuerung verwendet werden.

Der GWP-Wert der Einfachverglasung liegt mit 8.83 kg CO<sub>2</sub> eq bei etwa 1/4 der Emissionen von Isolierverglasungen (die weiteren Ergebnisse im Bereich 1/3-1/2). Die Verdopplung der Glasscheibenzahl und die Verfahren zur Beschichtung und Gasbefüllung führen zu diesen Unterschieden.

Die Gesamtbilanz des Lebenszyklus von Fenstergläsern würde durch die Substitution in Wiederverwendungsprozessen verbessert werden. Die Vergleichbarkeit der Werte bleibt durch die identische Lagerung auf der Bauschuttdeponie erhalten.

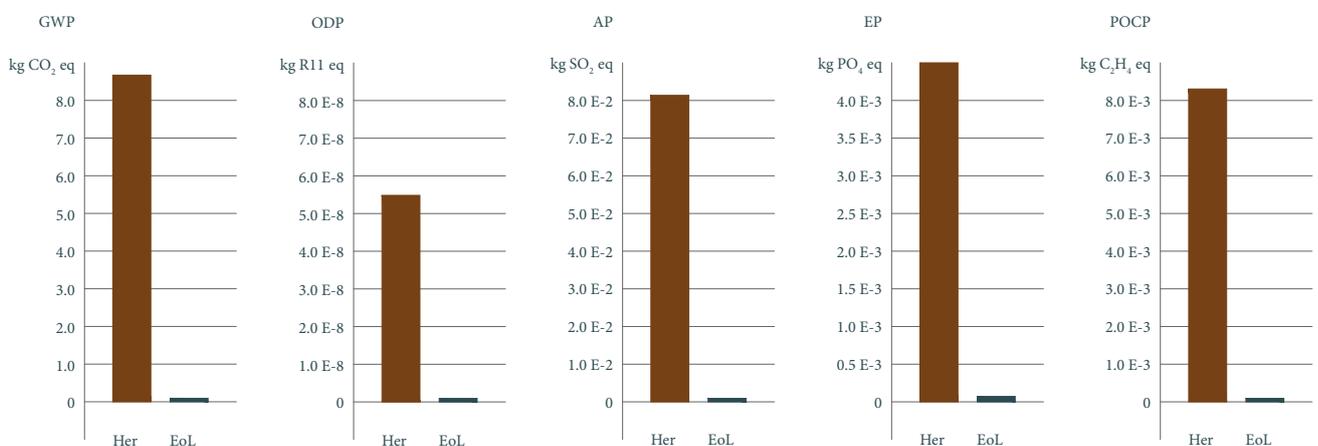
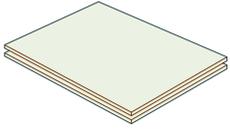


Abb. 64 Umweltindikatoren Einfachverglasung

## 3.1.6 Lebenszyklus Isolierverglasung



*Hauptbestandteile, Lebenszyklus und Systemgrenzen*  
*Beschreibung der Teilprozesse*  
*Datenqualität*  
*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

Abb. 65 Symbol Isolierverglasung

Für grundsätzliche Beschreibung der Isolierglas-herstellung gelten die selben Bearbeitungsschritte der Flachglasproduktion, die auf den vorherigen Seiten unter ‚Einfachverglasung‘ erörtert wurden. Die Unterschiede liegen in den weiterführenden Prozessen, die hauptsächlich auf die differierenden Anforderungen der Gläser zurückzuführen sind. Isoliergläser bilden immer den äußeren Abschluss einer thermischen Hülle und werden dafür mit zwei oder mehr Scheiben ausgeführt, mit Beschichtungen versehen und durch Gasbefüllung weiter optimiert. Mittels dieser Maßnahmen werden der g-Wert (der Energiedurchlassgrad in % der solaren Einträge) sowie der U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient in  $W/(m^2K)$ ) beeinflusst.

### *Hauptbestandteile Isolierverglasung*

weitere Bestandteile im Verbund

Beschichtungen  
Edelgasfüllungen  
Abstandhalter  
Dichtungen  
Trockenmittel  
innere/äußere

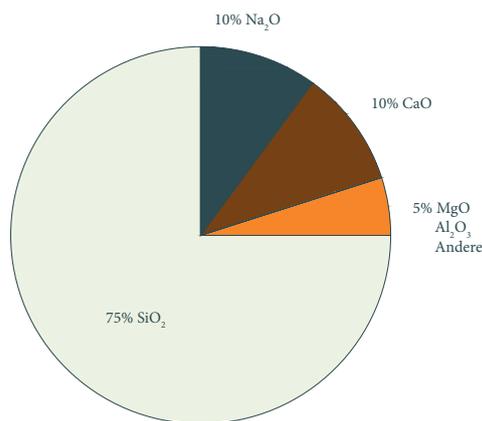


Abb. 66 Bestandteile Isolierverglasung

Die Bestandteile von Isolierverglasungen variieren entsprechend der Verwendung und der damit verbundenen thermischen Anforderungen. Zwei oder mehr Flachgläser werden ergänzt durch die Stoffe

zur Beschichtung (in unterschiedlichen Verfahren werden bis zu 9 Schichten in Stärken von 6-12 nm<sup>27</sup> aufgetragen), zur Edelgasbefüllung (meist Argonfüllungen, seltener Krypton oder Xenon) und die erforderlichen Hilfskonstruktionen um den Abstand herzustellen und abzudichten.

### *Lebenszyklus und Systemgrenzen*

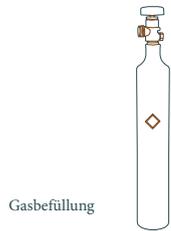
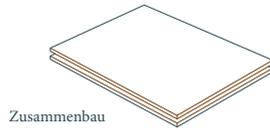
Zur Beschreibung des Lebenszyklus der Isolierverglasung dient die hier dargestellte Skizze. Als Ausgangspunkt steht die Flachglasproduktion analog der Darstellungen für die Einfachverglasungen. Zusätzlichen Einfluss auf die ökologische Gesamtbilanz haben die Schritte der Beschichtung und der Gasbefüllung während der Herstellung. Angewendet werden unterschiedliche Beschichtungsverfahren, die in die Hauptgruppen Online- und Offlineverfahren unterteilt werden können. Ersteres lässt dabei grundsätzlich höhere g-Werte zu, die Offlinebeschichtung wird eher zur U-Wert-Optimierung angewendet. Der Unterschied liegt in der Position auf der Außenseite bzw. im Scheibenzwischenraum der Isolierverglasung. Hinzu kommen die Schritte der Montage und der Vorgang der Gasbefüllung. Der größte Faktor der Ökobilanz bleibt trotzdem die Bereitung der Glasschmelze bei der Scheibenerstellung.

Die Inhalte der Nutzungsphase von Isolierverglasungen hängen mit der Art der Verwendung zusammen. Eine Mindestdauer der Verwendung bis zum Punkt des Austausches kann mit 30 Jahren<sup>28</sup> angenommen werden. Die Bedeutung der anfallenden Transporte, der Montage- und Austauschprozesse wird im Kapitel 3.2 über die Fassadenelemente berücksichtigt.

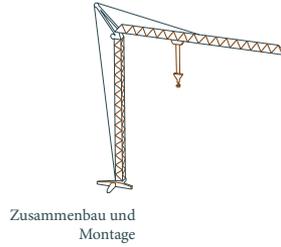
<sup>27</sup> BMVBS und ByAK (2013) www.wecobis.de - Datensatz Isoliergläser mit Beschichtungen, 10.01.2013

<sup>28</sup> BMVBS (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB - Seite 3

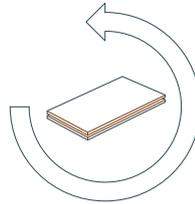
## HERSTELLUNG



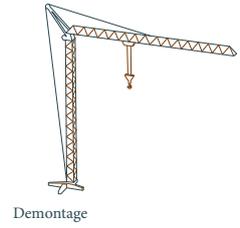
## GRENZE CRADLE TO GATE



## NUTZUNG



## END OF LIFE



In der Skizzierung der EoL-Verfahren wird analog zur Einfachverglasung die Deponierung gewählt, um eine Vergleichbarkeit erreichen. Der zumeist angewendete Vorgang ist jedoch die stoffliche Verwertung als Basisstoffe für die Foamglas- oder die Glasbehälterherstellung. Des Weiteren sind die Arbeitsschritte zu berücksichtigen, die die Trennung der Materialien erfordern. Beschichtungen und Gasbefüllungen haben Einfluss auf die Bilanz, sowohl beim Recycling als auch bezüglich des Verhaltens auf einer Deponie.

## *Funktionelle Einheit*

### *Beschreibung der Teilprozesse*

Die funktionelle Einheit bei der ökologischen Bewertung von transparenten Füllmaterialien ist der  $m^2$ . Das Flächengewicht der betrachteten Isolierverglasung beträgt  $20 \text{ kg/m}^2$ , auf einen kg bezogen ergeben sich  $0.05 \text{ m}^2$ . Das Flächengewicht ist somit 2.66 mal so groß wie das der Einfachverglasung.

Die relevanten Teilprozesse einer Baumaterialbeschreibung sind die Aufwendungen in der Phase der ‚Herstellung‘<sup>29</sup> (mit der Grenze cradle-to-gate) und der ‚End-of-Life‘<sup>30</sup>-Phase. Für Letztere wird in diesem Szenario die Deponierung gewählt; bei einer Betrachtung der etablierten Recyclingverfahren würden sich die Bilanzwerte positiv verändern.

Ausgespart (und deshalb in dem folgenden Diagramm grau dargestellt) werden die Nutzungsphase und die entsprechenden Einflüsse auf die Ökobilanz. Diese erhalten Berücksichtigung bei der Betrachtung der unterschiedlichen Fassadensysteme.



Abb. 68 Teilprozesse Isolierverglasung

## *Datenqualität*

Die Ergebnisse basieren auf den Datensätzen der ökobau.dat. Diese beziehen sich auf eine Isolierverglasung mit zwei Scheiben zu je 4 mm Stärke, einer Beschichtung sowie einer Zwischenraumbefüllung mit Argon. Die Erhebung der Daten erfolgte im Jahr 2005. Sowohl die Werte der Herstellungs- als auch die der Nachnutzungsphase sind 2013 weiter aktuell und werden mit einem Aufschlag von 10% versehen, da ein externes Review fehlt; sie basieren auf Daten aus der Industrie sowie auf Literaturrecherche.

<sup>29</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 7.2.01 Isolierglas 2-Scheiben, 10.01.2013

<sup>30</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 9.5.02 Bauschutt-Deponierung, 10.01.2013

## Sachbilanz 1 m<sup>2</sup> Isolierverglasung

Die Sachbilanz der Isolierverglasung zeigt ähnliche Teilverhältnisse wie die der Einfachverglasung. Mit 430 MJ/m<sup>2</sup> liegt der Anteil der nicht erneuerbaren Energieträger bei 97.13% (bei einem Gesamtwert von 442.7 MJ/m<sup>2</sup>). Die Aufwendungen sind weitestgehend der Herstellungsphase zuzuschreiben, der hohe Prozentsatz an fossilen Brennstoffen der Befuerung des Wannenofens.

Der vergleichsweise hohe Gesamtwert (im Vergleich Einfachverglasung = 137.07 MJ/m<sup>2</sup>) kommt durch den Einsatz zweier Scheiben, die Beschichtungen und die Edelgasbefüllung zustande.

Bei einem End-of-Life-Szenario, das die stoffliche Verwertung berücksichtigte, würden Gutschriften durch die eingesparten Rohstoffe in die Bewertung einfließen. Diese wären anteilig aufgrund der beschriebenen Arbeitsschritte zur Materialtrennung jedoch geringer als bei den unbeschichteten Einfachverglasungen.

### Wirkungsabschätzung 1 m<sup>2</sup> Isolierverglasung

Die Ergebnisse der Umweltindikatoren steigen im Verhältnis annähernd proportional im Vergleich der Verglasungstypen. Die größte Steigerung erfährt dabei das Treibhausgaspotenzial. Die Erhöhungen basieren auf den beschriebenen Zusatzer-

beitsgängen in der Herstellung. Der Einfluss einer Lagerung auf der Deponie erhöht sich anteilig, da Beschichtungen im Verlaufe der dort betrachteten 100 Jahre zu den Emissionswerten beitragen. Entsprechend der Sachbilanz fehlen die Gutschriften durch eine stoffliche Verwertung in Recyclingprozessen. Da allerdings der Energieaufwand und die damit zu erwartenden Ausstöße grundsätzlich auf der Glasschmelzung basieren, wären die zu erwartenden Substitutionen geringer als etwa durch die thermischen Verwertung der Holzwerkstoffe. Die Einsparungen betreffen den im geringeren Maße einflussreichen Part der Materialbereitstellung. Positiv fallen die erhöhten U-Werte ins Gewicht, die zur Aufwertung der Bilanz des Wärmeenergiebedarfs beitragen.

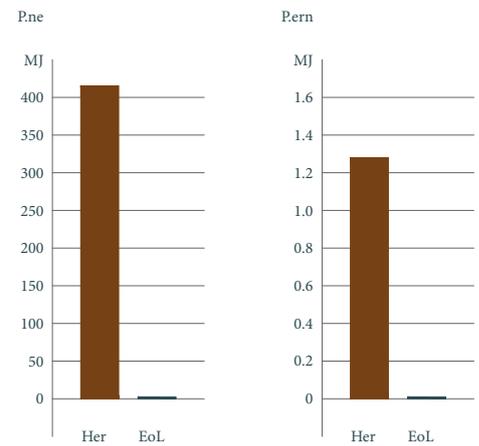


Abb. 69 Primärenergieverbrauch Isolierverglasung

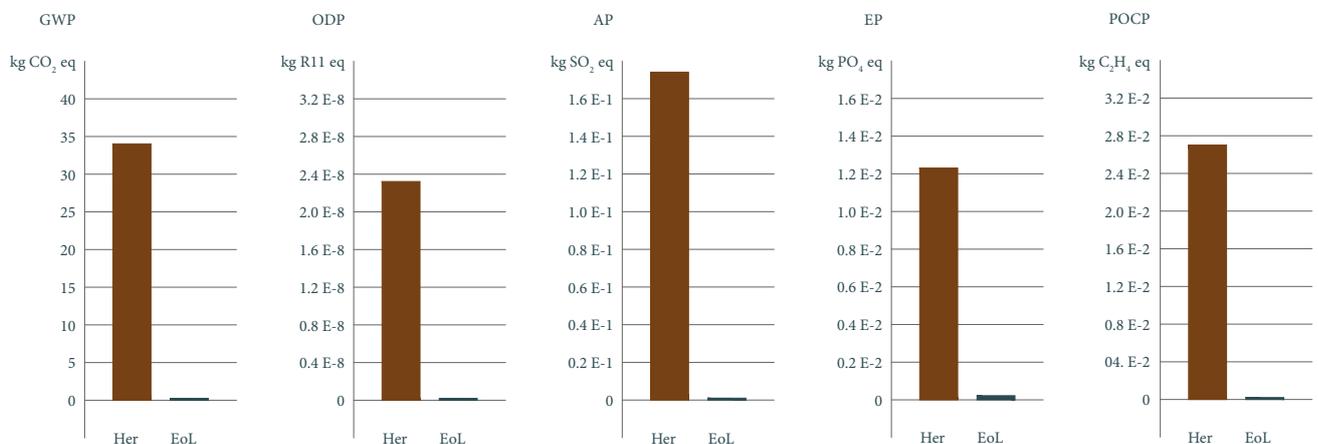
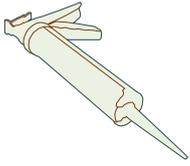


Abb. 70 Umweltindikatoren Isolierverglasung

## 3.1.7 Lebenszyklus Silikondichtmassen und -klebstoffe



*Hauptbestandteile, Lebenszyklus und Systemgrenzen*  
*Beschreibung der Teilprozesse*  
*Datenqualität*  
*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

Abb. 71 Symbol Silikondichtmassen

Dichtstoffe auf Silikonbasis kommen in unterschiedlichen Funktionen zum Einsatz, da sie je nach Zusammensetzung und Verarbeitungsart unterschiedliche Eigenschaften aufweisen können. Im Innenbereich werden sie etwa als Dichtungsmaterial in Feuchträumen eingesetzt. Im Bereich der Structural-Glazing-Fassaden und auch innerhalb der im Rahmen dieser Arbeit bewerteten Holz-Glas-Fassaden dienen sie als Abdichtung im Außenraum. Die Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse und UV-Strahlung sind entsprechend hoch. Weiter wird ein Zweikomponentenklebstoff auf Silikonbasis verwendet, der den statischen Verbund zwischen Holz und Glas herstellt.

### *Hauptbestandteile Silikondichtmassen*

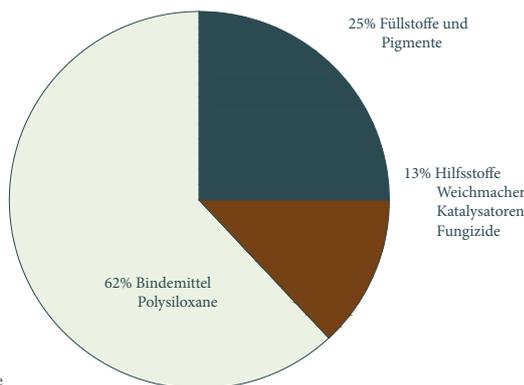


Abb. 72 Bestandteile Silikondichtmassen

Silikone sind reine Produkte aus Herstellungsketten der Chemieindustrie und enthalten keine nachwachsenden Rohstoffe. Hauptbestandteile sind die Bindemittel (Polysiloxane), die aus mehrstufigen Reaktionsverfahren aus Silicium und Bestandteilen

von Erdölfraktionen hervorgehen. Je nach erforderlichen Eigenschaften erhalten die Silikone Zuschläge wie Pigmente, Weichmacher, Katalysatoren und Fungizide, die Einfluss auf die Verarbeitungsweise und Dauerhaftigkeit haben.

### *Lebenszyklus und Systemgrenzen*

Die nebenstehende Darstellung zeichnet die Lebenszyklusprozesse von Silikonen unterteilt in die Phasen Herstellung, Nutzung und End-of-Life ab. Die Fertigungsschritte bis zum entgültigen Produkt sind durch eine Mehrzahl an Synthetisierungsverfahren gekennzeichnet. Während die Aufbereitung der Grundstoffe in großen Chemieindustriebetrieben erfolgt, wird die Finalisierung zu unterschiedlich charakterisierten Silikonen vom Hersteller des Endproduktes übernommen. Somit fallen Transporte innerhalb dieser Phase an.

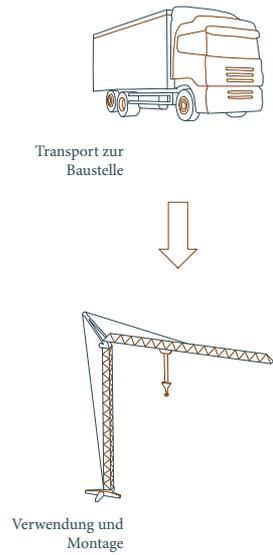
Der Zeitraum der Nutzung bildet sich je nach Verwendungszweck sehr unterschiedlich ab. Neutral-, säure- und aminhärtende<sup>31</sup> Silikone emittieren im Aushärtungsvorgang Gase, die ihre Einsatzmöglichkeiten beeinflussen. Die Dauerhaftigkeit von Dichtstoffen im Außenbereich wird mit 12 Jahren<sup>32</sup> veranschlagt, was bei einer Fassadennutzung von über 50 Jahren vier Wartungsdurchgänge erfordert. Die Entsorgung zum Ende des Lebenszyklus führt bei der Verwertung in der Müllverbrennungsanlage zur Produktion elektrischer und thermischer Energie und bewirkt entsprechende Gutschriften auf die Sach- und Wirkungsbilanzen. Die Wiederverwendung oder stoffliche Verwertung sind nicht möglich, da die Aushärtungsreaktionen nicht reversibel

<sup>31</sup> BMVBS und ByAK (2013) www.wecobis.de - Datensatz Abdichtungsmassen - Silikon-Dichtstoffe, 01.02.2013  
<sup>32</sup> BMVBS (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB - Seite 3, 01.02.2013

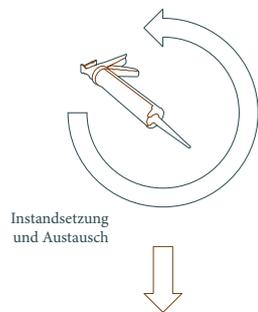
## HERSTELLUNG



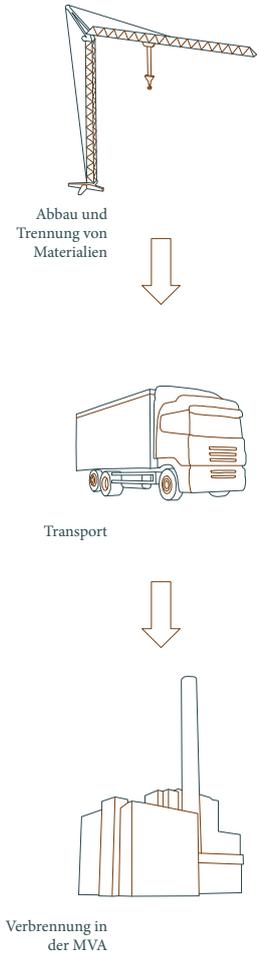
## GRENZE CRADLE TO GATE



## NUTZUNG



## END OF LIFE



sind. Weiter ist der Einfluss von Silikondichtmassen und -klebstoffen auf die benetzten und verbundenen Oberflächen zu beachten. Die Kontamination kann die Optionen des Recyclings und Downcyclings beeinträchtigen da diese Vorgänge zur stofflichen Trennung impliziert, die erneuten Energieaufwand bedeuten und teilweise die Wiederverwendung sogar irrational werden lassen.

## *Funktionelle Einheit*

### *Beschreibung der Teilprozesse*

Die bei der ökologischen Bewertung der Silikondichtmassen und -klebstoffen betrachtete funktionelle Einheit beträgt 1 kg. So lässt sich eine Vergleichbarkeit unter den eingesetzten Materialien, die in ähnlicher Volumenmenge innerhalb der Fassadenaufbauten verwendet werden, erreichen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird darüber hinaus eine Gegenüberstellung von geklebten und geschraubten Konstruktionen erarbeitet, die unter anderem auch die Menge der eingesetzten Materialien berücksichtigt.

Die Herstellung von ‚cradle-to-gate‘<sup>33</sup> sowie das EndszENARIO in der Müllverbrennungsanlage<sup>34</sup> sind die in diesem ersten Schritt beleuchteten Teilprozesse des Lebenszyklus von Silikon. Die Nutzungsphase sowie die anfallenden Transporte zum Einsatzort und zur Verbrennungsanlage werden im Abschnitt der Fassadenuntersuchungen eingeschlossen.



Abb. 74 Teilprozesse Silikondichtmassen

## *Datenqualität*

Die zugrundeliegenden Daten der ökobau.dat beziehen sich im Produktionsprozess auf Erhebungen im Jahr 2006. Ein Sicherheitsbeiwert von 10% korrigiert die Werte, da diese aus Literaturrecherche und Industrieangaben ermittelt und nicht extern geprüft wurden. Der End-of-Life-Vorgang wurde 2005 erhoben. Die eingesetzte Methode umfasst das Prinzip der Substitutionen anteilig der produzierten Energiemenge in elektrischer oder thermischer Form. Die Bezugsgröße bietet in diesem Fall die Energiegewinnung unter Einsatz von Erdgasanlagen.

<sup>33</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 6.7.02 Silikon-Dichtmasse, 02.02.2013

<sup>34</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 9.5.02 6.8.01 Verbrennung Kunststoff in MVA incl. Gutschrift, 02.02.2013

## Sachbilanz 1 kg Silikondichtmassen

Die Sachbilanz von 1 kg Silikon zeigt einen Primärenergiebedarf von 174.5 MJ auf. Die separat ausgewerteten Anteile belaufen sich auf  $P_{ne} = 137$  MJ/kg und erneuerbare Energien auf 37.5 MJ/kg. Der Anteil der nicht regenerierbaren Energieträger beträgt 78.5% und liegt damit zwischen den Werten der Vollhölzer bzw. Holzwerkstoffe und den Aufwendungen innerhalb der Glaslebenszyklen.

Die Ergebnisse lassen sich ausschließlich auf die Produktionskette (Rohstoffgewinnung, Synthetisierungsverfahren und Transporte) der Herstellung zurückführen. Die Verbrennung in der Phase der Nachnutzung erreicht gewisse Gutschriften, die auf die Gesamtbilanz positiv einwirken. Im Vergleich mit den Holzmaterialien, bei denen die thermische Verwertung die Energiebilanz mitunter ausgleicht oder sogar ins positive hebt, substituiert die Verwertung nur einen geringen Teil der Produktionsaufwendungen.

### Wirkungsabschätzung 1 kg Silikondichtmassen

Die zu erwartenden Umwelteinflüsse müssen bei der Verwendung von silikonbasierten Stoffen berücksichtigt werden. Die durchweg hohen Potenziale an verunreinigenden Emissionen lassen sich auf

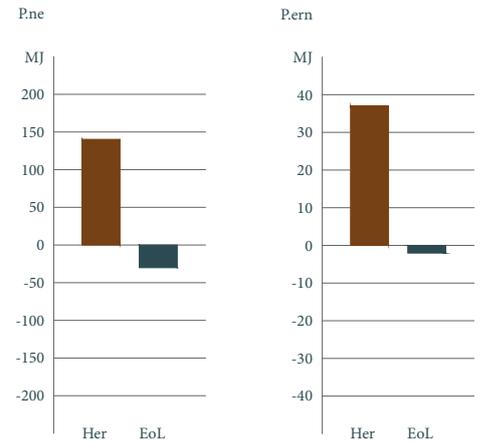


Abb. 75 Primärenergieverbrauch Silikondichtmassen

den hohen Energieaufwand in der Herstellungsphase zurückführen. Der GWP-Wert liegt mit insgesamt 7.67 kg CO<sub>2</sub> eq pro verwendetem kg Silikon deutlich höher als die Einwirkungen von Furnierschichtholz (0.023 kg CO<sub>2</sub> eq), das unter den Holzmaterialien das größte Treibhausgaspotenzial und einen vergleichbaren Massenanteil innerhalb der Holz-Glas-Konstruktionen einnimmt. Auch die anderen Indikatoren weisen hohe Werte auf, die jene übertreffen, die im Lebenszyklus von Stahl- und Aluminium auftreten, wie auf den folgenden Seiten aufgezeigt wird.

Die zu erwartenden Substitutionen durch die Verwertung können den Emissionen nur geringfügig entgegenstehen, die Treibhausgasaustritte werden sogar weiter erhöht.

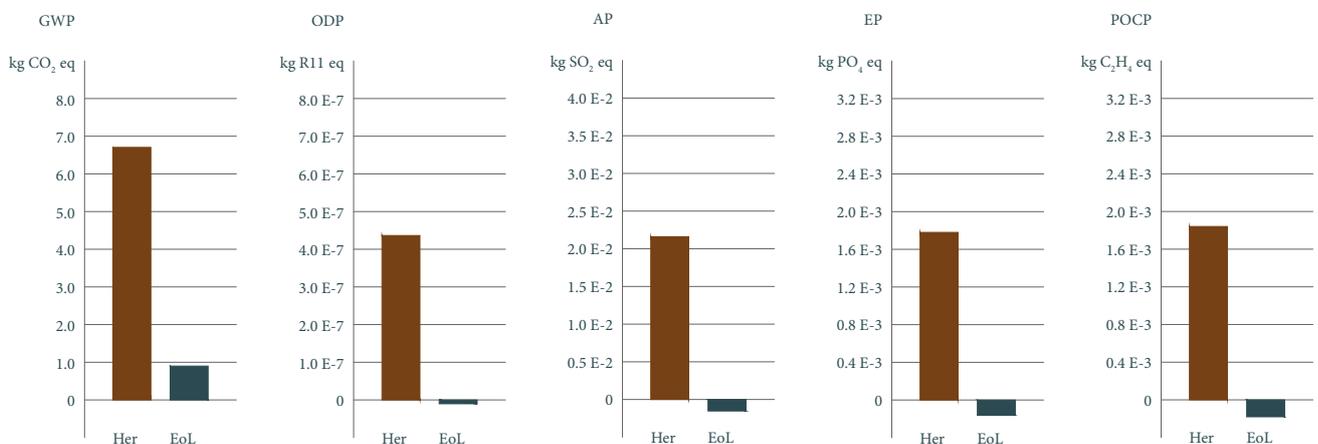


Abb. 76 Umweltindikatoren Silikondichtmassen

## 3.1.8 Lebenszyklus Aluminiumprofil

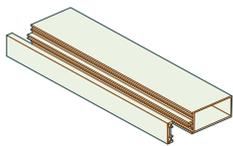


Abb. 77 Symbol Aluminiumprofil

*Hauptbestandteile, Lebenszyklus und Systemgrenzen*  
*Beschreibung der Teilprozesse*  
*Datenqualität*  
*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

Im Baubereich werden Erzeugnisse aus Aluminium vorrangig in Form von Blechen (eben oder profiliert, etwa als Fassadenbekleidung oder Teil der Dachkonstruktion) und Profilen eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit werden stranggepresste Profile betrachtet, die als Pfosten-Riegel-Konstruktionen und Abdeckleisten verwendet und im weiteren Verlauf bezüglich ihrer Aufwendungen und Umwelteinwirkungen mit den Holz-Glas-Verbundfassaden verglichen werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung von Aluminium betrifft den Umgang der Nachnutzung. Da bei der Produktion von Primäraluminium sehr hohe Energiemengen aufgebracht werden müssen, liegt das Bestreben nah die Recyclingquoten stetig zu verbessern. Im Jahr 2011 wurden in Deutschland 432.500t<sup>35</sup> Rohmaterial aus Primäraluminium hergestellt, 634.400t aus zurückgewonnenem Sekundäraluminium. Bei der Bewertung und Gegenüberstellung der Fassaden werden die Einflussgrößen auf das Recyclingpotenzial einer Aluminiumfassade näher betrachtet.

### *Hauptbestandteile Aluminiumprofile*

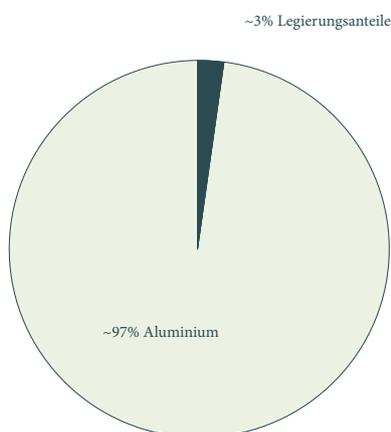


Abb. 78 Bestandteile Aluminiumprofil

Bei der Herstellung von Profilen werden neben dem Metall Legierungsanteile verwendet, die je nach Anforderung an das Profil unterschiedliche Bestandteile und Verfahren aufweisen.

### *Lebenszyklus und Systemgrenzen*

Aluminium ist mit 8% das dritthäufigste Element der Erdkruste, das jedoch immer in chemischen Verbindungen vorliegt. Dieses wird im ersten Schritt der Herstellungsphase zumeist in Form von Bauxit im Tagebau gewonnen. In den weiteren Abschnitten des Verfahrens wird das Rohmaterial zerkleinert und über chemische Zwischenstufen im Kalzinierofen unter Temperaturen von etwa 1200°C zu Aluminiumoxid verarbeitet. Die Elektrolyse als abschließender Schritt der Rohaluminiumherstellung erfordert besonders hohe Energiemengen, die bei der ökologischen Bewertung des Materials einen großen Faktor darstellen. Zusätzlich werden bei diesem Prozess Fluoride in Form von Abgasen ausgestoßen, die den Wert des Treibhausgaspotenzials negativ beeinflussen.

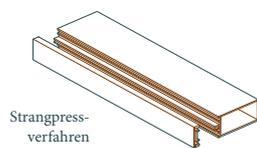
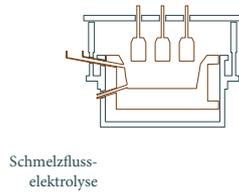
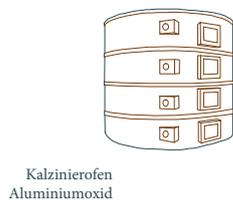
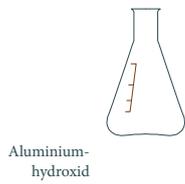
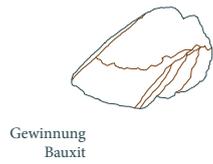
Die Bewertung der Nutzungsphasen von Aluminiumprofilen zeigt neben den anfallenden Transport- und Montageaufwendungen keine weiteren Emissionen auf. Die angenommene Nutzungsdauer wird wiederum auf 50 Jahre<sup>36</sup> festgelegt.

Die Skizzierung des End-of-Life-Szenario von Aluminium ist sehr vielschichtig. Die Verwendung und die etwaigen Legierungsanteile haben große Einwirkungen auf das zu erwartende Recyclingpotenzial. Die hier verwendeten Daten gehen von einem potentiellen Recyclinggrad von 95% innerhalb

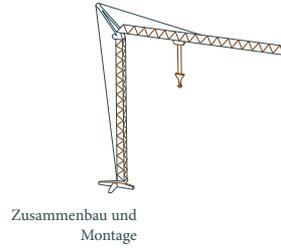
<sup>35</sup> GDA (2013) <http://www.aluinfo.de/index.php/produktion.html> - Stand 08.04.2013

<sup>36</sup> BMVBS (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB - Seite 2

## HERSTELLUNG



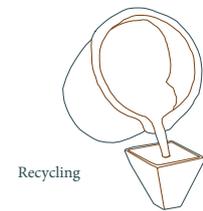
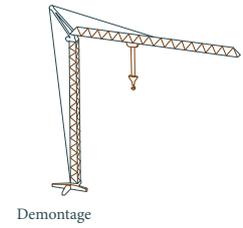
## GRENZE CRADLE TO GATE



## NUTZUNG



## END OF LIFE



der Gebäudebewertung aus. Allerdings führen die Legierungsanteile dazu, dass die Aufwendungen zur Trennung der Materialien ökologisch und ökonomisch<sup>37</sup> nicht sinnvoll sind. Da aber die Reinheitsansprüche von Fassadenprofilen sehr hoch sind, kann das gewonnene Sekundäraluminium nur für geringerwertige Funktionen genutzt werden. In dem Falle spricht man von Downcycling.

## *Funktionelle Einheit*

### *Beschreibung der Teilprozesse*

Die hier betrachtete funktionelle Einheit bezieht sich auf 1 kg eines stranggepressten Aluminiumprofils. Somit lässt sich in diesem Abschnitt ein massenbezogener Vergleich zwischen den unterschiedlichen Materialien bewerkstelligen; im weiteren Verlauf der Gegenüberstellung von Fassadensystemen rücken andere Werte wie etwa die thermische oder statische Leistungsfähigkeit als Referenzgröße in den Vordergrund. Die beschriebenen Teilprozesse beinhalten die jeweiligen Aufwendungen und Umwelteinflüsse während den Lebenszyklusphasen ‚cradle-to-gate‘<sup>38</sup> sowie das Recyclingpotenzial<sup>39</sup> von 1 kg eines Aluminiumprofils. In der Bewertung der einzelnen Baumaterialien wird die Nutzungsphase weiter ausgespart, da die Einflüsse auf die ökologische Bilanzierung von der Art der Verwendung abhängen. In der weiteren Auswertung der Teilprozesse wird auch dieser Lebensabschnitt beleuchtet.



Abb. 80 Teilprozesse Aluminiumprofil

## *Datenqualität*

Die hier bilanzierten Daten gründen auf den Erhebungen der ökobau.dat-Datenbank. Sowohl die Ergebnisse der Herstellung als auch die der Recyclingmöglichkeiten basieren auf Erhebungen aus dem Jahr 2005 und werden für das Jahr 2013 weiter als aktuell eingestuft. Die Produktion beinhaltet die Aufwendungen zur Gewinnung des Primäraluminiums und das Verfahren des Strangpressens und beruht im wesentlichen auf den Daten der EAA (European Aluminium Association). Das EoL-Szenario beschreibt das Recyclingpotenzial von 1 kg Aluminium, wobei im Bereich des Gebäuderückbaus von einer Sammelquote von 95% ausgegangen wird. Das Recycling erwirkt Gutschriften in Höhe der eingesparten Energie, die für die entsprechende Menge Primäraluminiumproduktion anfallen würden. In einer vollständigen Bewertung muss jedoch das niedrigere Niveau des Recyclats mit berücksichtigt werden.

<sup>37</sup> Arnim von Gleich, Martin Brahmmer-Lohss, Manuel Gottschick, Dirk Jepsen, Knut Sander (2004)

Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg

<sup>38</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 4.3.01 Aluminium Profil, 09.04.2013

<sup>39</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 4.8.01 Recyclingpotential - Aluminium (Blech und Profile), 09.04.2013

## Sachbilanz - 1 kg eines Aluminiumprofils

Der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung von 1 kg eines Aluminiumprofils beträgt 171.1 MJ (130 MJ/kg nicht erneuerbarer Energieträger, gleichbedeutend einem Anteil von 75,98%). Ein vergleichbares Brett-schichtholzprofil beansprucht 29.68 MJ/kg (9.64 MJ P.ne, 20.4 MJ P.ern), wobei das län-genbezogene Gesamtgewicht unter dem einer Aluminiumkonstruktion zu erwarten ist, was die Diskrepanz weiter vergrößert. Zudem liegt der prozentuale Anteil der verwendeten erneuerbaren Energieträger deutlich höher.

Zu der Höhe der erzielten Ergebnisse trägt der Teilschritt der Elektrolyse maßgeblich bei, bei der große Bindungskräfte zur Auslösung der Aluminiums überwunden werden müssen.

Bei der ökologischen Gesamtbewertung des Metalls ist die Möglichkeit der Wiederverwendung entscheidend. Während nach aktuellen Stand der Technik in Gebäuden von Recyclingquoten von über 90%<sup>40</sup> ausgegangen wird, können im Bereich des Elektroschrotts 66.5%, bei PKWs 31.4% und beim Haushaltsmüll lediglich 2.9% in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Zudem stellt sich der Kreislauf bezogen auf Fassadensysteme aufgrund des hohen Primäraluminiumanteils in der Herstellung als nicht geschlossen dar.

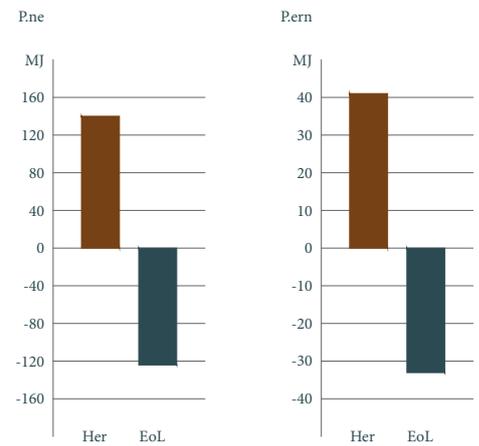


Abb. 81 Primärenergieverbrauch Aluminiumprofil

## Wirkungsabschätzung - 1 kg eines Aluminiumprofils

Bei der Betrachtung der Umweltindikatoren wird das umgekehrte Verhältnis der beiden Materialien noch deutlicher. Dem Ausstoß von 10.1 kg CO<sub>2</sub> äquivalenter Treibhausgase kann nur durch entsprechend hohe Recyclingquoten entgegengewirkt werden, während die Brett-schichtholzproduktion trotz energetischer Aufwendungen 1.49 kg CO<sub>2</sub> eq bindet. Die Verhältnisse stellen sich bei den weiteren Umwelteinflüssen ähnlich dar, obgleich der prozentuale Anteil der substituierten Emissionen variiert.

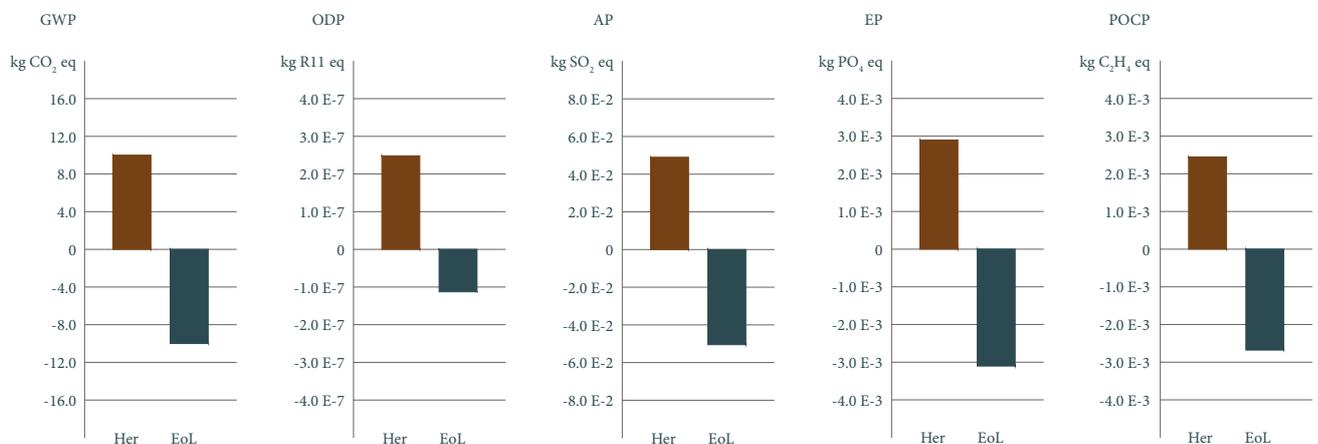
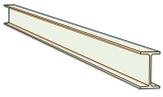


Abb. 82 Umweltindikatoren Aluminiumprofil

<sup>40</sup> Arnim von Gleich, Martin Brahmer-Lohss, Manuel Gottschick, Dirk Jepsen, Knut Sander (2004) Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg - Hamburg

## 3.1.9 Lebenszyklus Baustahl



*Hauptbestandteile, Lebenszyklus und Systemgrenzen*  
*Beschreibung der Teilprozesse*  
*Datenqualität*  
*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

Abb. 83 Symbol Baustahl

Stahl ist ein Legierungsprodukt, das aus Eisen und Kohlenstoff besteht und mit weiteren stofflichen Zugaben angereichert werden kann. Über prozentualen Anteile der Legierungsinhalte können die mechanischen Eigenschaften und Belastungsgrenzen des Stahls eingestellt werden. Man unterscheidet dabei drei Hauptgruppen, die sich nach dem Kohlenstoffanteil richten (unlegierter Stahl < 0.2%, niedrig legierter Stahl 0.2-5% und hochlegierter Stahl > 5%) und den erforderlichen Energiebedarf in der Herstellung beeinflussen.

Als Material im Bauwesen findet Stahl in vielfältiger Weise Verwendung, der bedeutendste Anteil fällt aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit auf statisch relevante Bauteile und Verbindungselemente. Innerhalb der Holz-Glas-Verbundkonstruktionen werden Stahlwinkel als Auflager eingesetzt, die das Eigengewicht der Verglasung in die Pfosten zur vertikalen Lastabtragung einleiten.

### *Hauptbestandteile Baustahl*

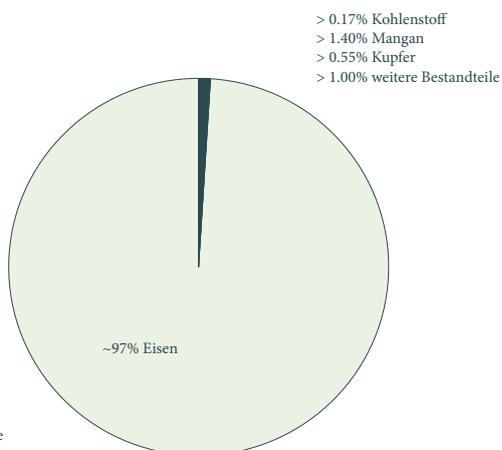


Abb. 84 Bestandteile Baustahl S235JR

Die dargestellten Bestandteile beziehen sich auf den häufig verwendeten unlegierten Baustahl des Typs S235JR.

### *Lebenszyklus und Systemgrenzen*

Die Skizzierung des Lebenszyklus von Stahlerzeugnissen betrachtet die Phasen der Herstellung, der Nutzung und die Wiederverwendung und die anteiligen Einflüsse auf den Energieverbrauch sowie die entstehenden Umwelteinflüsse.

Die Herstellung ist ein mehrstufiges Verfahren, das mit der Gewinnung eisenhaltiger Erze im Tagebau beginnt. Hier werden auch erste Aufbereitungsschritte vorgenommen, die bei geringer konzentrierten Rohstoffen die Flotation beinhalten, das sich als Trennverfahren die differierenden Oberflächenbenetzbarkeiten zunutzen macht.

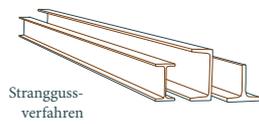
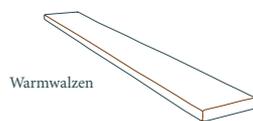
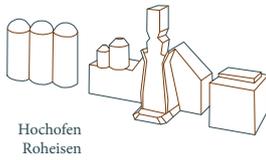
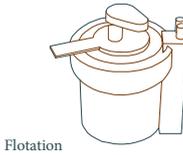
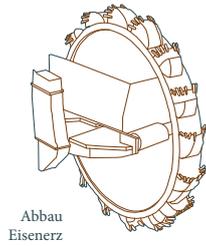
Nach dem Transport erfolgt die Roheisenherstellung im Hochofen, aus dem unter Einsatz von Koks ein Basisprodukt mit einem Kohlenstoffgehalt von 4-5% hervorgeht. Dieser Schritt benötigt den größten Anteil der aufgewendeten nicht erneuerbaren Primärenergie von Stahlerzeugnissen (mit 52% stellt Steinkohle dabei den Hauptenergieträger dar<sup>41</sup>).

In der Raffination erfolgt die Einstellung der gewünschten Legierungsanteile. Im Sauerstoffkonverter werden nicht erforderliche Stoffe mittels Oxidation entfernt und neue Bestandteile hinzugegeben. Der Abschluss der ersten Phase bilden die formgebenden Prozesse.

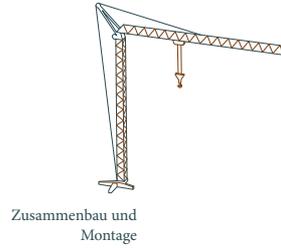
Die Nutzung des Stahls steht in Abhängigkeit seines Einsatzzwecks, im Verbund von Fassadenkonstruktionen im Zusammenhang mit der gesamten Gebrauchsdauer des Aufbaus. Zu erwähnen ist hier die hohe Korrosionsneigung, das den konstruktiven Schutz vor Feuchtigkeit in den Vordergrund rückt.

<sup>41</sup> Institut Bauen und Umwelt e.V., Hrsg. (2010) Umweltproduktdeklaration Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche - Seite 10

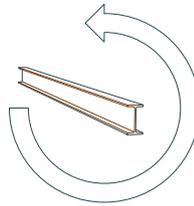
## HERSTELLUNG



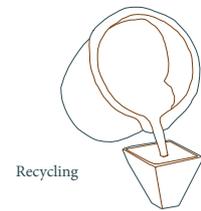
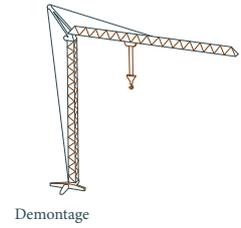
## GRENZE CRADLE TO GATE



## NUTZUNG



## END OF LIFE



Die Art der Nachnutzung des Stahls hat große Bedeutung bei der ökologischen Bewertung. Etwa 80%<sup>42</sup> des verwendeten Stahls fließt als Recyclingprodukt zurück in den Erzeugungskreislauf. Die aufzubringende Energiemenge zur Produktion von Sekundärstahl beträgt lediglich 25% der Primärherstellung. Wie bereits im Abschnitt über Aluminiumerzeugnisse erwähnt, spielen Beschichtungen auch bei der Wiederverwendung von Baustahl eine Rolle. Diese erfordern Vorstufen zur Materialtrennung und verringern die erzielten Einsparungen.

## *Funktionelle Einheit*

### *Beschreibung der Teilprozesse*

Die betrachtete funktionale Einheit ist 1 kg, um die Vergleichbarkeit unter den Baumaterialien zu ermöglichen. Die Rohdichte von Baustahl beträgt 7850 kg/m<sup>3</sup> (somit enthält 1 kg 0.000127 m<sup>3</sup> Material). Die zur ökologischen Bewertung hinzugezogenen Teilprozesse beinhalten die Aufwendungen zur Produktion<sup>43</sup> in den beschriebenen Arbeitsschritten und das Recyclingpotenzial<sup>44</sup> des Baustahls.

Nicht berücksichtigt sind die Phasen der Nutzung und die diesbezüglich zu erwartenden Transportwege, da diese von der Art der Verwendung abhängen und hier die Bewertung der Materialien isoliert dargestellt wird.



Abb. 86 Teilprozesse Baustahl

## *Datenqualität*

Zur Vergleichbarkeit der beschriebenen Baumaterialien und ihrer Umwelteinwirkungen beziehen sich alle Basiskennwerte auf Erhebungen der ökobau.dat-Datenbank. Der Datensatz der Herstellung, der 2007 aufbereitet wurde, bezieht sich auf 1 kg eines Stahlprofils (in der Zusammensetzung: 72% aus Primär- und 28% aus Sekundärerzeugnissen). Die Aktualität wird für das Jahr 2013 bestätigt. Basierend auf Literaturrecherche und Daten aus der Industrie (Umweltproduktdeklaration Baustähle) ohne extern geprüft zu sein, beinhalten die Werte eine 10%ige Sicherheitszugabe.

Das anzunehmende Recyclingpotenzial bezieht sich auf Erhebungen der Industrie aus dem Jahr 2010 mit ebenfalls fortgeschriebener Relevanz für 2013.

<sup>42</sup> BMVBS und ByAK (2013) www.wecobis.de - Datensatz Metalle - Stahl, 10.04.2013

<sup>43</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 4.1.03 Stahlprofil, 10.04.2013

<sup>44</sup> BMVBS (2013) ökobau.dat - Datensatz 4.8.09 Recyclingpotential - Stahl-Hohlprofile, 10.04.2013

## Sachbilanz 1 kg Baustahl

Der Primärenergiebedarf zur Herstellung von einem kg eines Stahlprofils beträgt insgesamt 30.2 MJ. Davon fallen mit 29.5 MJ/kg 97.7% in den Bereich der nicht erneuerbaren Energieträger. Hauptverantwortlich für diese Relation ist der Produktionsabschnitt der Roheisenaufbereitung im Hochofen. Die große Gesamtenergiemenge und der Einsatz des Koks als Reduktionsmittel fallen dabei am meisten ins Gewicht.

Im direkten Vergleich der Metalle fällt auf, dass der Gesamtenergiebedarf (inklusive erneuerbarer Energien) mit 30.2 MJ/kg nur gut 1/5 der Aufwendungen für Aluminium beträgt.

Für die ganzheitliche Ökobilanzierung von Baustahl nimmt das Recyclingpotenzial eine wichtige Position ein. Hier kommt wie bei anderen Materialien die Substitutionsmethode zur Anwendung. Die durch die Wiederverwendung eingesparte Primärproduktion erwirkt Gutschriften, die sich positiv auf den Bedarf fossiler Brennstoffe auswirken (hier 7.92 MJ/kg).

### Wirkungsabschätzung 1 kg Baustahl

Die Umweltindikatoren zeichnen ein weitestgehend analoges Bild in Bezug auf den Primärenergiebedarf. Die Aufbereitung von einem kg Baustahl

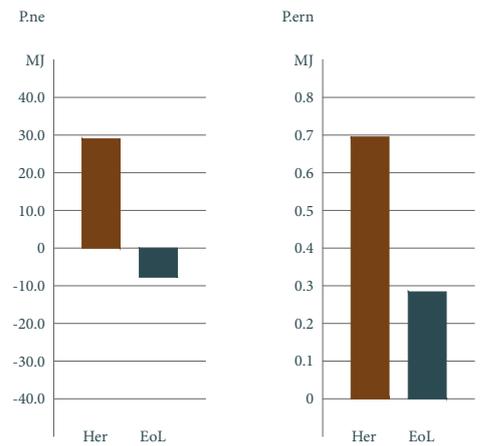


Abb. 87 Primärenergieverbrauch Baustahl

führt zu Treibhausgasemissionen in Höhe von 2.14 kg CO<sub>2</sub> eq. Dieser Wert liegt ebenso im Bereich von 1/5 der Aluminiumherstellung (10.1 kg CO<sub>2</sub> eq pro kg). Zieht man Brettschichtholz als potenzielles Pfosten-Riegel-Material zum Vergleich hinzu, präsentiert sich Baustahl zwischen den beiden Referenzangaben. Die BSH-Herstellung bindet pro kg des Produkts 1.49 kg CO<sub>2</sub>-äquivalenter Gase.

Der Wert des Ozonabbaupotenzials (ODP) fällt bei der Wirkungsabschätzung aus dem Rahmen. Laut der bereits erwähnten Umweltproduktdeklaration ist dies auf den verhältnismäßig hohen Stromverbrauch des Elektrolichtbogenverfahrens bei der Wiederverwendung zurückzuführen, sodass in dieser Kategorie keine Gutschriften erzielt werden können.

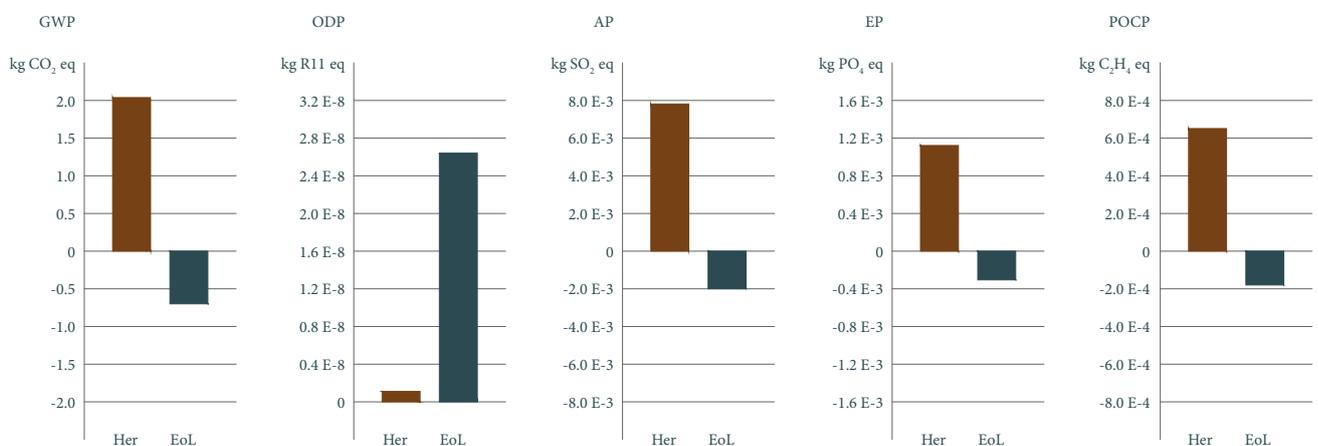


Abb. 88 Umweltindikatoren Baustahl

## 3.2 Ökologischer Fassadenvergleich - Fassadenausschnitt Verlagsgebäude Hamburg ‚Ericusspitze‘

### 3.2.1 Lebenszyklus der Fassaden

### 3.2.2 Darstellung der Basisstudie - Aluminiumfassade

### 3.2.3 Darstellung der Basisstudie - BSH-Fassade

### 3.2.4 Remodellierung Aluminiumfassade

### 3.2.5 Remodellierung BSH-Fassade

### 3.2.6 Ökobilanzierung Holz-Glas-Verbund Variante A

### 3.2.7 Ökobilanzierung Holz-Glas-Verbund Variante B

### 3.2.8 Ökobilanzierung Holz-Glas-Verbund Variante C

### 3.2.9 Auswertung



Abb. 89 Nordostfassade Verlagsgebäude  
Ericusspitze, Hamburg



Abb. 90 Südfassade Verlagsgebäude  
Ericusspitze, Hamburg

Dieser vergleichenden ökologischen Bewertung von verschiedenen Pfosten-Riegel-Fassaden liegt eine Untersuchung des Ingenieurdienstleistungsunternehmens ‚Drees & Sommer‘<sup>1</sup> (durchgeführt von Prof. Dr.-Ing. Michael Sommer) zugrunde. Das Referenzelement ist ein gut 14 m<sup>2</sup> großer Teilausschnitt der Neubaufassade eines Verlagshauses im Teilquartier ‚Ericusspitze‘ in der Hamburger Hafencity (Fertigstellung 2011). Die Studie stellt alternativ zur ausgeführten Variante berechnete Lösungen mit Aluminium- bzw. Brettschichtholzprofilen gegenüber und vergleicht diese hinsichtlich ihres Primärenergiebedarfs (P<sub>ne</sub>) in der Herstellungsphase und über den gesamten Lebenszyklus. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt auf den Potenzialen von Treibhausgasemissionen. Die Kernaussage sieht eine Einsparung CO<sub>2</sub>-äquivalenter Gase von 43% zum Vorteil der Brettschichtholzlösung (61.6 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> zu 107.2 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>).

In diesem Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse der Basisstudie dargestellt und zur Objektivierung der Gegenüberstellungen mit den erarbeiteten Daten aus der ökobau-Datenbank neu errechnet. Weiter werden dann alternative Fassadenkonstruktionen aus Holz-Glas-Verbundelementen auf die Referenzfläche übertragen und hinsichtlich ihrer ökologischen Einwirkungen im Lebenszyklus untersucht.

<sup>1</sup> Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011) Vortrag: Green Building - Einflüsse aufs Planen und Bauen

Dabei wird die Beschreibung um vier weitere Umweltindikatoren und die Einwirkungen der anfallenden Transportaufwendungen ergänzt.

In der Auswertung werden die quantitativen Ergebnisse miteinander verglichen und in einer abschließenden Untersuchung die Einflüsse von Teilabschnitten der jeweiligen Lebenszyklen der Materialien und Konstruktionsprinzipien der Fassadenaufbauten in alternierenden Szenarien betrachtet.

### 3.2.1 Lebenszyklus der Fassaden

*Vergleichsbasis und Abschneidekriterien*

*Lebenszyklus Aluminiumfassade*

*Lebenszyklus Holz-Glas-Verbundfassaden*

*Vergleichsbasis und Abschneidekriterien*

Die funktionelle Einheit der vergleichenden Ökobilanzierung ist  $1\text{m}^2$  des Fassadenausschnittes in der jeweilig aufgezeigten konstruktiven Ausführung. Die Vergleichsbasis der Massenerhebung bezieht sich auf die statischen Anforderungen abgeleitet aus den Abmessungen des Fassadenrasters.

Der gewählte Betrachtungszeitraum der Nutzungsphase beträgt analog zur vorausgehenden Untersuchung 25 Jahre, was die Mindestlebensdauer der meisten Konstruktionen unterschreitet und so den Fokus auf die Herstellungs- bzw. Entsorgungsphase richtet. Lediglich Silikonfugen, die nach Empfehlung des BNB<sup>2</sup> einen Erneuerungszyklus von 12 Jahren beinhalten, müssen in diesem Zeitraum zweimal erneuert werden. In der abschließenden Auseinandersetzung mit den Einflüssen von Szenarien auf die Ökobilanzierung werden auch andere Annahmen von Betrachtungsdimensionen erörtert.

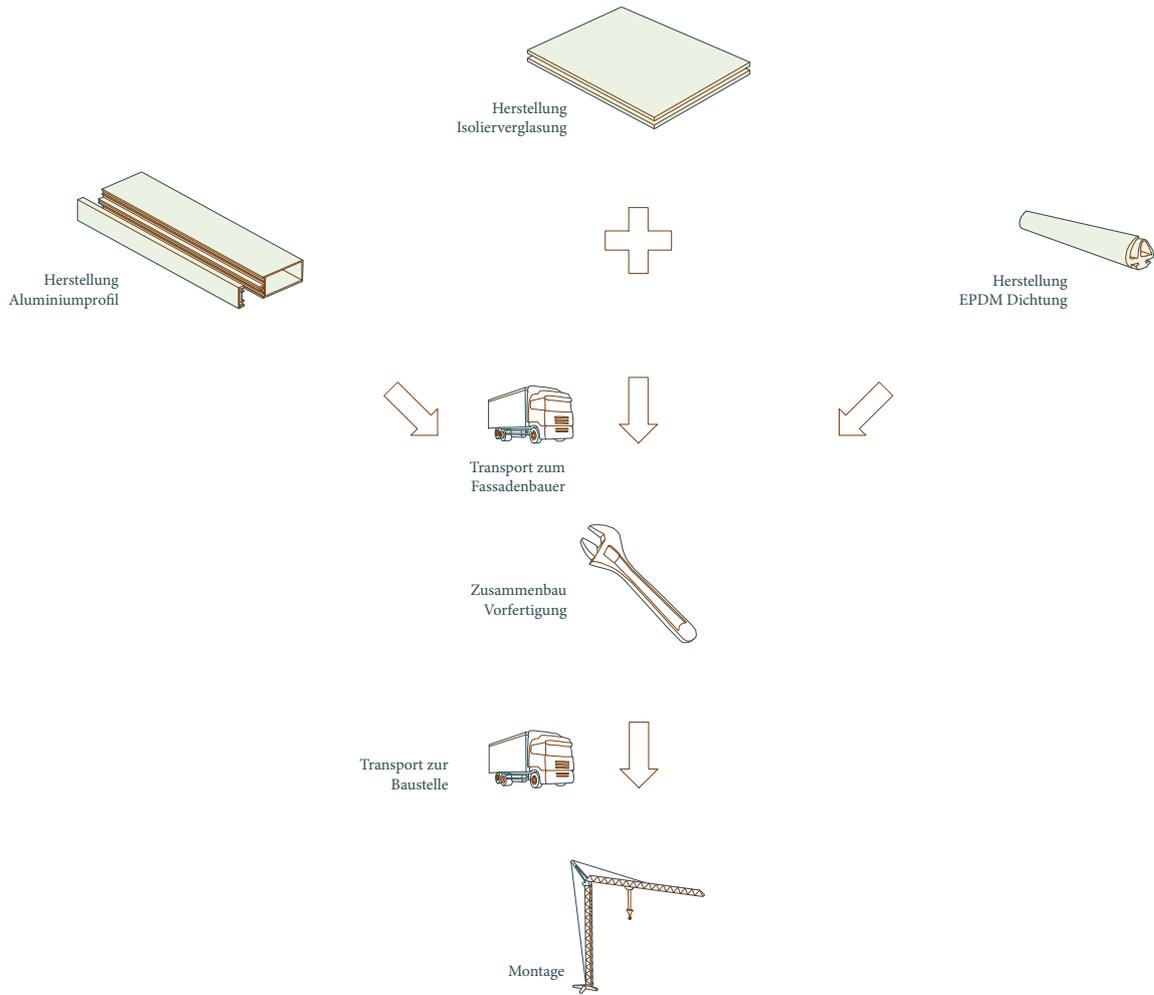
Der Lebenszyklus einer Pfosten-Riegel-Fassade, wie er im Folgenden skizziert wird, beinhaltet Teilaaspekte, die in diesem Vergleich quantitativ nicht dargestellt werden:

Alle Materialien der jeweiligen Aufbauten, die einen Massenanteil  $< 1\%$  des errechneten Gesamtgewichts (und keine signifikant größeren Einflüsse auf die Umweltbelastungen) betragen, werden bei einer Ökobilanzierung nicht berücksichtigt. Die Phase der Vorfertigung der Fassaden im Werk kann im Rahmen dieser Studie nicht zahlenmäßig dargestellt werden. Die Konstruktionen der Holz-Glas-Verbundelemente stehen in einem frühen Stadium der Entwicklung, sodass allgemeingültige, robuste Daten über diesen Lebensabschnitt fehlen. Des Weiteren ist der Aufwand der Montage/Demontage-Prozesse sowie die Einwirkungen von Reinigungsvorgängen während der Nutzungsphase ausgeklammert, weil diese als gleichwertig angenommen werden können. Darüber hinaus ist die Nutzung in vielerlei Hinsicht abhängig von den Parametern eines konkreten Projekts. Die Frage der Beanspruchung hängt eng mit den klimatischen Gegebenheiten des Ortes und der Orientierung der Fassade zusammen. Von den verwendeten Materialien selbst sind nach der Montage und einem etwaigen Aushärtungsvorgang von Kleb- und Dichtstoffen keine weiteren Emissionen zu erwarten.

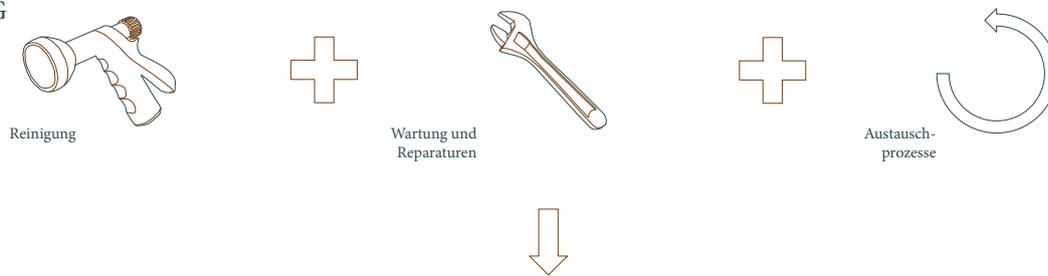
<sup>2</sup> BMVBS (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen nach BNB - Seite 3

# Lebenszyklus Aluminiumfassade

## HERSTELLUNG



## NUTZUNG



## END OF LIFE

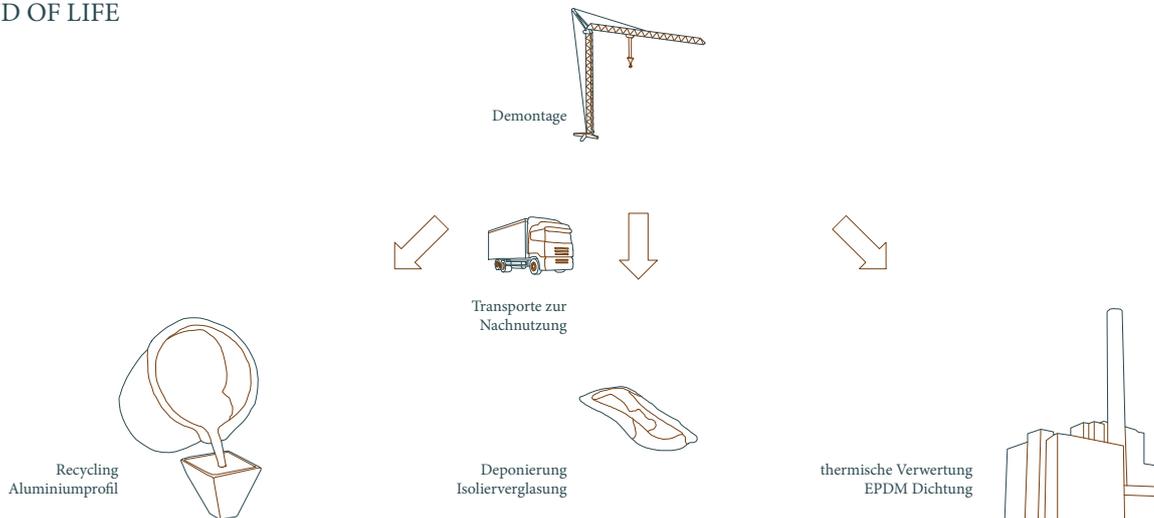


Abb. 91 Skizze Lebenszyklus Aluminiumfassade

Die nebenstehende Darstellung zeigt den Lebensverlauf einer Aluminiumfassade über die Phasen der Herstellung, der Verwendung in einem Gebäude und die materialspezifischen Wege am Ende dieses Lebenszyklus. Die Stufen zu Beginn und zum Ende der Grafik, die sich auf die einzelnen Komponenten der Fassade beziehen, sind in Kapitel 3.1, der Lebenszyklus der Baumaterialien, intensiv behandelt worden. Die dort beschriebenen und gegenübergestellten Herstellungsprozesse sind gleichbedeutend dem Abschnitt ‚cradle-to-gate‘, an den die Transportaufwendung zum Zusammenbau nahtlos anschließt. In diesem Zuge ist es nicht unerheblich zu erwähnen, dass die Profilverstellung von Aluminium unbeschichtete Produkte betrachtet. Die Auswirkungen der Oberflächenbehandlung auf das Recyclingpotenzial wird im weiteren Verlauf näher erläutert.

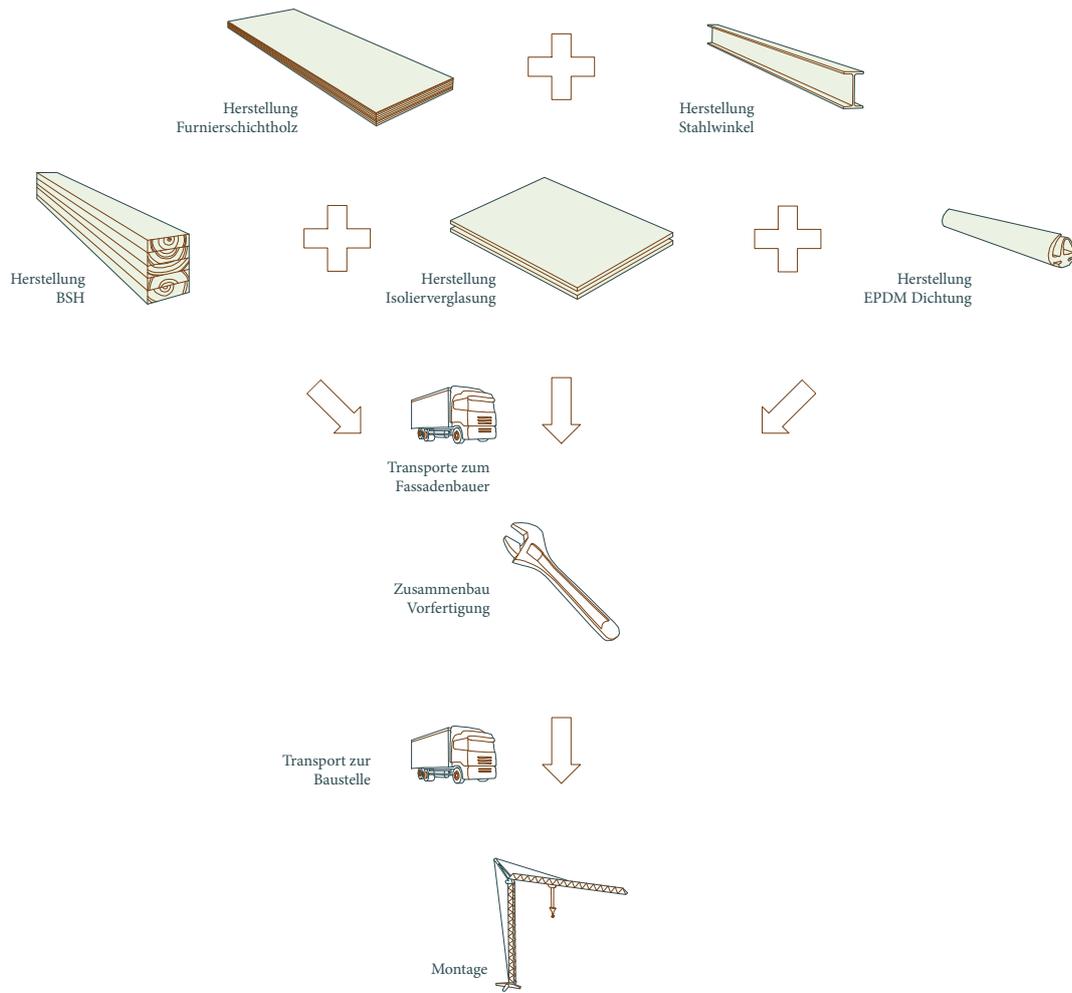
Wie zuvor beschrieben werden die Aufwendungen der zweiten Herstellungstufe zahlenmäßig nicht in den ökologischen Fassadenvergleich einfließen. Die zeitlich daran anschließenden Transporte zu einer Baustelle (ebenso wie die Transporte in der End-of-Life-Phase zum Ort der Nachnutzung) werden mit durchschnittlichen Distanzen von 100 km angenommen und fließen so in die Gesamtbewertung mit ein. Durch die gleichwertige Behandlung aller konstruktiver Lösungen und die sehr geringen Gewichtsabweichungen ist der Einfluss der Transportwege auf den Vergleich gering. Die Aufwendungen für die Errichtung und den Rückbau einer Fassade hängen erheblich von Gebäudeentwurf ab und werden quantitativ nicht behandelt.

Während der Nutzungsphase sind von einer Fassade direkt keine signifikanten Umweltbelastungen zu erwarten. Da bei dieser Arbeit der Vergleich der Strukturen und der verwendeten Materialien im Vordergrund steht, sind die Einwirkungen der Nutzungsphase von untergeordneter Bedeutung. Neben den bereits erwähnten Wartungsdurchläufen von außenliegenden Silikonfugen kann die erwartete Lebensdauer der Vergleichsaufbauten als äquivalent angenommen werden.

Nach der Demontage und den auf Annahmen basierenden durchschnittlichen Transportwegen von 100 km zum Ort der Weiterverarbeitung stehen die materialgerechten EoL-Szenarien an. Auf das große Recyclingpotenzial von Aluminium wurde bereits hingewiesen und wird in Kapitel 3.3 nochmals eingegangen. Aufgrund der Zusammensetzung inkl. Beschichtungen und Gasbefüllungen werden die Gläser in der Lebenszyklusanalyse in die Deponie übergeführt, während Kunststoffanteile in die thermische Verwertung gelangen.

# Lebenszyklus Holz-Glas-Verbundfassaden

## HERSTELLUNG



## NUTZUNG



## END OF LIFE

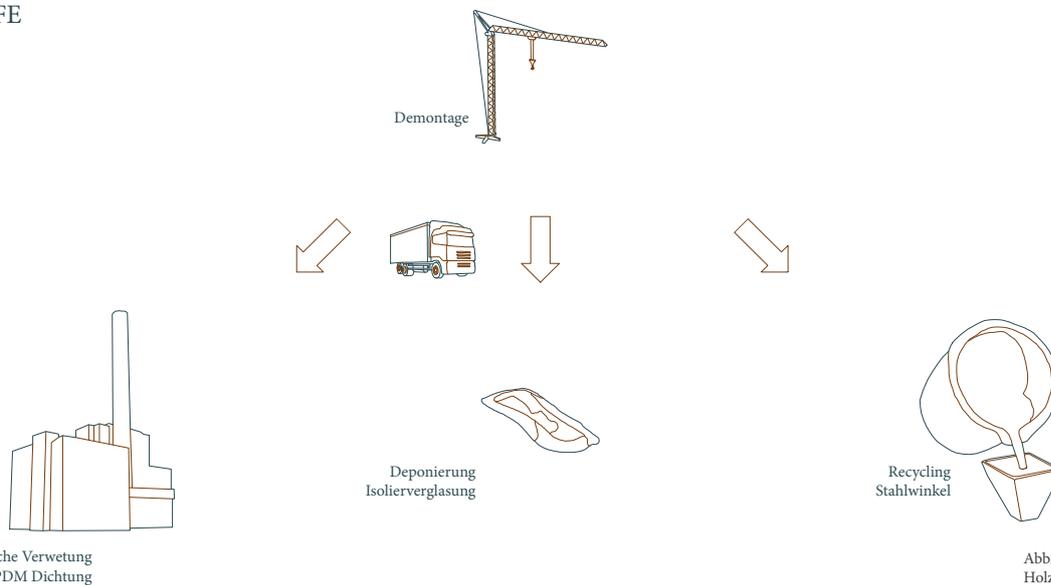


Abb. 92 Skizze Lebenszyklus Holz-Glas-Verbundfassade

Nebenstehend wird im Vergleich der Lebenszyklus einer Pfosten-Riegel-Fassade aus Holz-Glas-Verbundelementen aufgezeigt. Die Ausführung beruht auf der im Folgenden mit Variante A bezeichneten Konstruktion, der Verlauf der weiteren Varianten ist weitestgehend ident.

Der erste Schritt der Herstellungsphase bis zum Werkstor der Materialproduktion wird in Kapitel 3.1 beschrieben. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die verwendete Datengrundlage Furnierschichtholz aus Fichtefurnieren betrachtet. Die Werte für die Transporte von Produktionsstandorten in Finnland fließen somit in die Ökobilanz der Holz-Glas-Verbundfassaden mit ein, obwohl hier Birke als Furnier verwendet wird. Ab Werkstor werden die Komponenten zur Stufe der Vorfertigung eines Fassadenbauers transportiert und dort zugeschnitten und in Teilen zusammengesetzt.

Das Konzept der räumlichen Trennung von Haupttragstruktur und Aussteifung ermöglicht einen hohen Vorfertigungsgrad mit den entsprechenden Präzisionsvorteilen im Werk. Dies beeinflusst zudem die Art und den Zeitaufwand der Montage am Einsatzort. Die bewerteten Detaillösungen unterscheiden sich in der Konzeption der Montage der Koppelleiste auf der Hauptstruktur.

Die Transportdistanzen zur Baustelle werden analog zur Aluminiumfassade mit durchschnittlichen 100 km angenommen. Die Montage/Demontageaufwendungen fließen auch hier nicht in die quantitative Auswertung ein.

Wie bereits erwähnt sind die Auswirkungen der Nutzungsphase auf die Gesamtbilanz eines Zyklus der Fassaden nicht erheblich. Lediglich die Verwendung von Silikon in der Variante B als Dichtungsmaterial in der Außenhaut impliziert zwei Austauschvorgänge während der 25 Jahre Betrachtungszeitraum.

Die Skizzierung der Nachnutzung sieht zunächst die Demontage sowie durchschnittlich angenommene Transporte von 100 km zum Ort der Verarbeitung vor. Der übliche und somit in der LCA bilanzierte EoL-Vorgang der Holzanteile sieht die thermische Verwertung vor. Ebenso wird mit den Kunststoffanteilen verfahren. Während die Glasprodukte in die Deponie transportiert werden, können die Metallbestandteile aus den Auflagern in den Recyclingprozess eingebunden werden.

## 3.2.2 Darstellung der Basisstudie - Aluminiumfassade

*Referenzelement und Profildetail*

*Massenerhebung/Primärenergie Aluminium-Fassade*

*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

*Kosten im Lebenszyklus*

*Alternative Fassadenraster*

*Referenzelement und Profildetail*



Abb. 93 Referenzelement  
in Grundriss und Ansicht  
Aluminiumfassade  
Maßstab 1:25

Der Fassadenausschnitt für den Vergleich hat die Außenmaße 4.05m x 3.50m ( $A= 14.175\text{m}^2$ ) und eine zusätzliche horizontale Unterteilung. Die funktionelle Einheit ist jeweils  $1\text{ m}^2$  des Elements.

Der Aufbau der Aluminium Pfosten-Riegel-Lösung aus der Basistudie besteht aus einem Standardhohlprofil 100/50mm, Druck- und Abdeckleiste sowie einer Zweischeibenisolierverglasung. Hinzukommen die EPDM-Profile zur Abdichtung der Konstruktion sowie die Klemmvorrichtung zur Montage und thermischen Trennung von Profil und Deckleiste.

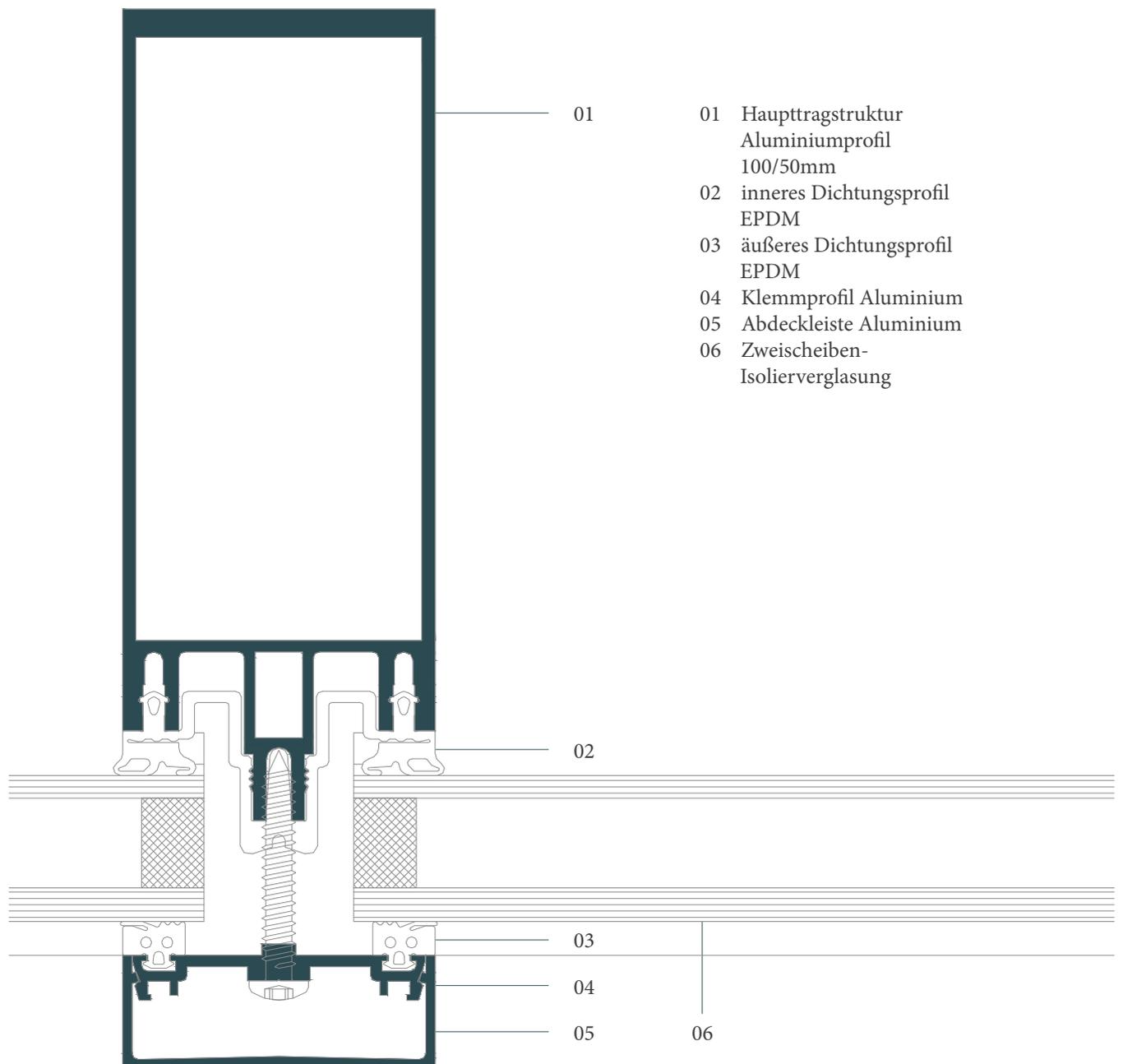


Abb. 94 Grundriss Profildetail  
Aluminiumfassade Maßstab 1:1

## Massenerhebung/Primärenergie Aluminium-Fassade

Material	Faktor	Einheit	P.ne [MJ/kg] Herstellung	Nutzungs-dauer [a]	Herstellung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Nutzung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	End-of-Life P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Total P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]
Aluminium (65% Recycling-anteil)	6.43	[kg]	151.8	25	975.9	0.0	0.0	975.9
Brettschichtholz (BSH)	0.0	[kg]	7.8	25	0.0	0.0	0.0	0.0
Floatglas	30.0	[kg]	14.0	25	420.0	0.0	4.8	424.8
EPDM Dichtung	0.7	[kg]	106.3	25	74.4	0.0	-20.3	54.0
Aluminiumfassade gesamt	37.13	[kg]	39.6	25	1470.3	0.0	-15.5	1454.7

Tab.1 Massenerhebung Aluminiumfassade

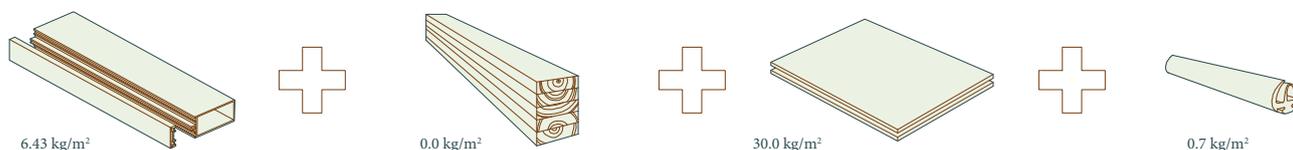
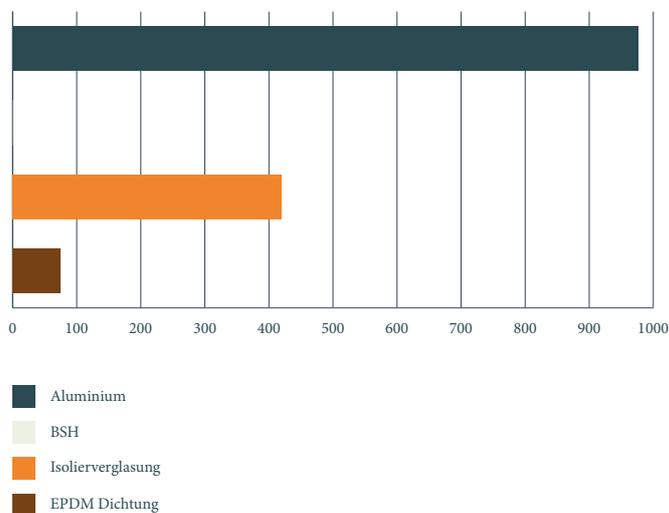


Abb. 96 Skizze Massenerhebung Aluminiumfassade

Abb. 95 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Aluminiumfassade



## Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Das Flächengewicht der Fassade beträgt 37.13 kg/m<sup>2</sup> woran die transparente Füllung mit 30 kg/m<sup>2</sup> den größten Anteil hat. Die Pfosten-Riegel-Profile sind aufgrund ihrer Materialeigenschaften leicht und tragen nur 6.43 kg dazu bei. Stellt man den Primärenergiebedarf der Herstellungsphase dem gegenüber, wird ersichtlich, dass trotz des deut-

lich geringeren Massanteils die Aluminiumprofile mit 975.9 MJ/m<sup>2</sup> der Hauptgrund für den hohen Arbeitsaufwand dieser Konstruktion sind. Dieser resultiert aus den arbeitsintensiven Schritten der Rohstoffproduktion und dem Elektrolyseverfahren bei Primäraluminium, obwohl die Erhebung einen 65%-igen Recyclinganteil vorsieht. Die nebenstehende Grafik zeigt die Primärenergieverbräuche nicht erneuerbarer Energieträger im direkten Vergleich der Materialien in der Herstellungsphase.

Die gesamte Studie lässt die Nutzungsphase außen vor, da die Einflüsse auf die Ökobilanz als weitestgehend ident angenommen werden können. Beide Basisaufbauten verwenden Aluminiumabdeckleisten, sodass die erwartete Nutzungsdauer jeweils mit 25 Jahren für alle Komponenten angenommen werden kann.

Die End-of-Life-Phase sieht gewisse weitere Aufwendungen durch die Deponierung der Verglasung sowie Gutschriften durch die thermische Verwertung der Dichtungsanteile vor.

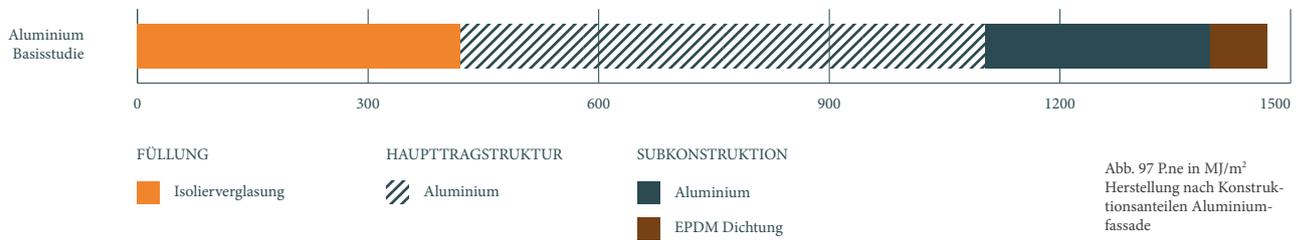
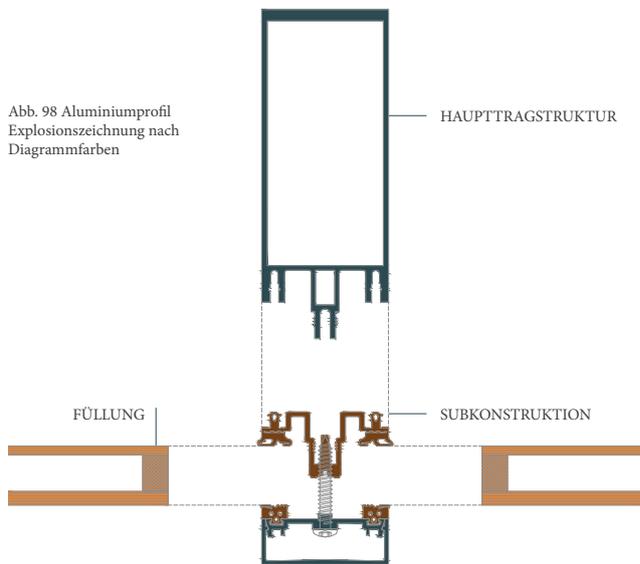


Abb. 98 Aluminiumprofil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben



Betrachtet man die energetischen Aufwendungen während der Herstellungsphase innerhalb des Detailaufbaus etwas differenzierter, werden weitere Zusammenhänge bzgl. des großen Einflusses der Aluminiumbestandteile deutlich.

Die Skizze hier zeigt das Profildetail gegliedert nach den drei Konstruktionskomponenten Füllung (Verglasung), Haupttragstruktur und Subkonstruktion. Die farbliche Darstellung verknüpft die verwendeten Materialien mit den jeweiligen Diagrammen. Die beiden Balkendiagramme auf dieser Seite zeigen weiter die differenzierte Darstellung der nicht

erneuerbaren Energieansprüche (P.ne) in diese drei Kategorien unterteilt. Die Produktion der Aluminium Pfosten und Riegel nimmt insgesamt den größten Anteil der 1470.3 MJ/m² ein. Das transparente Füllelement der Isolierverglasung bedeutet hier den zweitgrößten Faktor. Nur etwa zu 1/4 schlagen die Materialien zu Unterkonstruktion, Klemmvorrichtung und Abdeckprofilen zu Buche.

In den unten dargestellten Abbildungen soll weiter der Fokus auf die Profilkonstruktion gelegt werden. Wie im weiteren Verlauf dieses Kapitels aufgezeigt wird, bleiben die Verglasungsanteile mengen- und energetisch auf sehr konstantem Niveau. Die wesentlichen Differenzen entstehen innerhalb der voneinander abweichenden Konstruktionen; so lohnt der Blick in diesen Teil. Kumuliert man den Bereich der Haupt- und Subkonstruktion, wird ersichtlich, dass das Aluminium mit den 975.9 MJ/m² fast zur Gänze die Herstellungsenergie beansprucht. Obwohl die Produktion von Dichtungskunststoffen mengenbasiert sehr aufwändig ist, fallen diese Profilbestandteile wenig ins Gewicht. Diese Verhältnisse verändern sich im weiteren Verlauf erheblich.

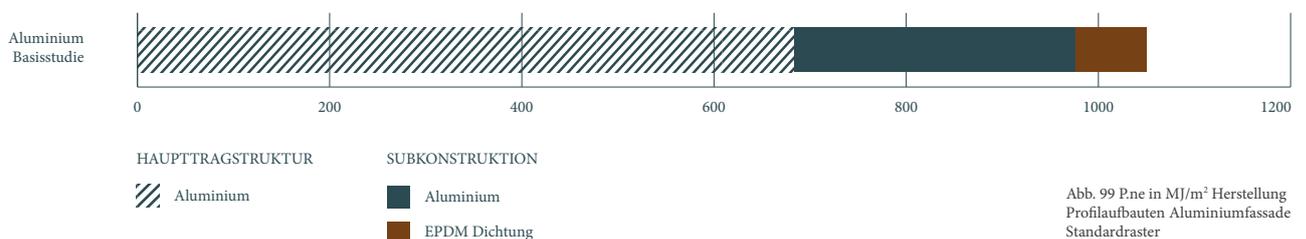


Abb. 100 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen Aluminiumfassade

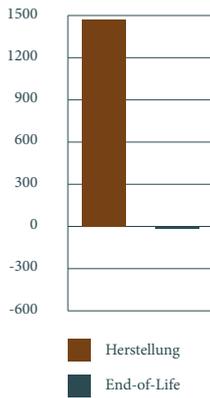
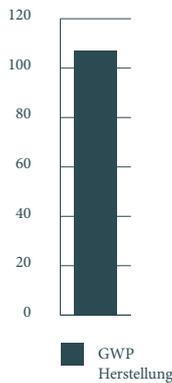


Abb. 101 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung Aluminiumfassade



Die kumulierten Ergebnisse der Herstellung aller relevanten Baustoffe ergeben einen Gesamtenergiebedarf von 1470.2 MJ/m<sup>2</sup> (P<sub>ne</sub>). Die Nachnutzung hat dabei kaum Einwirkungen auf die Bilanz.

Die Basisstudie errechnet einen GWP-Wert 107.2 kg CO<sub>2</sub> eq pro Quadratmeter Fassade. Dieser wird zwar nicht nach Materialien separiert dargestellt, aber die Daten der Produktion lassen den Schluss zu, dass auch hier die Aluminiumpfosten, -riegel, Druck- und Abdeckleisten Hauptverursacher sind. Im weiteren Verlauf des Vergleichs werden die Treibhausgaspotenziale aufeinander bezogen.

### Kosten im Lebenszyklus

Wie eingangs erwähnt nehmen die Kosten der Fassadenerrichtung großflächiger Glasfassaden einen großen Anteil innerhalb eines Gebäudes ein. Die hier dargestellte Tabelle zeigt die durchschnittlichen Errichtungskosten einer Aluminium Pfosten-Riegel-Fassade mit einem zu dem in der Ökobilanz bewerteten vergleichbaren Aufbau. Aus dieser Aufstellung und der großen Position der Verglasung lässt sich wiederum die Sinnhaftigkeit der LCC (Lebenszykluskostenberechnung) ableiten. Die hohen Investitionskosten einer Gebäudehülle sollten immer im Kontext der Nutzung und der entsprechenden energetischen Qualität gesehen werden. Wechselte man die hier angegebene Zweischeiben-Isolierverglasung etwa durch eine Dreifachverglasung mit einem geringeren U-Wert, würden die Kosten in der Herstellungsphase sicherlich deutlich steigen. Doch mit dieser Maßnahme sind innerhalb der energetischen Gesamtkonzeption des Gebäudes Einsparungen im Bereich der Heizenergie verbunden. Die LCC berücksichtigt diese Zusammenhänge und kann den Zeitpunkt der Amortisierung abschätzen. So können langfristige ökonomische Betrachtungen bereits im Planungsprozess als Entscheidungshilfen fungieren.

1m <sup>2</sup>	Pfosten-Riegel-Fassade Aluminium
	Tragprofil Aluminium 50mm Ansichtsbreite
	Anpressprofile Aluminium
	Abdeckleiste Aluminium 50mm Ansichtsbreite
	EPDM Dichtungsprofile
	Zweischeiben-Isolierverglasung, g-Wert 0.8
	Lieferung & Montage
<b>547.59 €/m<sup>2</sup></b>	<b>durchschnittliche Errichtungskosten<sup>3</sup></b>
<b>333.71 €/m<sup>2</sup></b>	Isolierverglasung separat mit U= 1.1 [W/m <sup>2</sup> k]

Tab.2 Errichtungskosten Aluminium-Fassade

<sup>3</sup> BKI Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Hrsg. (2010) BKI Baukosten 2010 - Teil 3 Statistische Kostenkennwerte für Positionen

## Alternative Fassadenraster

Abb. 102 Fassadenraster Alternative I  
Aluminiumfassade

Achismaß Raster = 2,00m  
Laufmeter Fassadenprofile = 22.11m

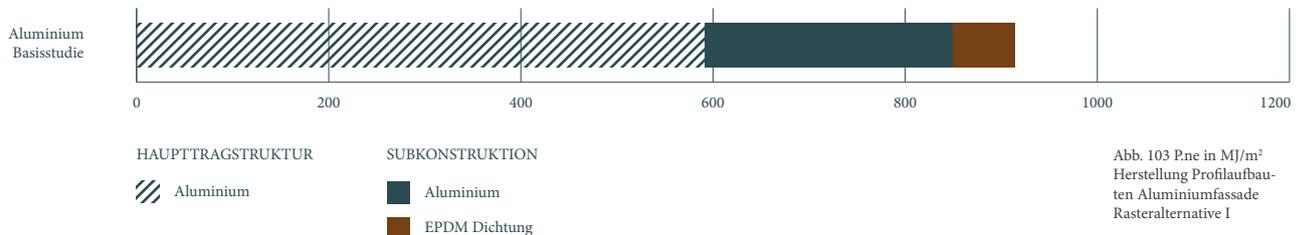
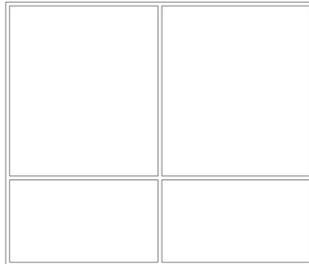
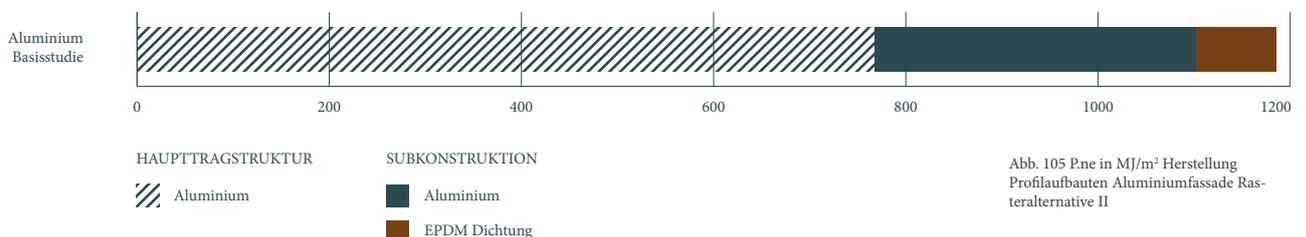
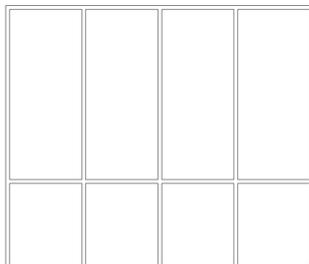


Abb. 104 Fassadenraster Alternative II  
Aluminiumfassade

Achismaß Raster = 1,00m  
Laufmeter Fassadenprofile = 28.75m



Abschließend werden die erhobenen Daten auf alternative Fassadenraster projiziert, um die Bedeutung differierender Laufmeter in der Referenzfläche aufzuzeigen. Dieser Ausblick schließt die Verglasungsteile aus, da der Einfluss auf die vergleichbaren Unterschiede gering ist, wie zuvor erwähnt wurde. Bei einem vergrößertem Raster und entsprechend geringeren Lauflänge von 22.11m reduziert sich der Primärenergiebedarf der Tragstruktur Aluminium auf 914.75 MJ/m<sup>2</sup>. Dies ist gleichbedeutend mit Einsparungen in Höhe von 13%.

Entsprechend der zunehmenden Laufmeter innerhalb der zweiten Rasteralternative von 1.00m erhöhen sich hier auch die Werte der Energieaufwendungen. In diesem Szenario fallen auf die 28.75m Fassadenprofil 1185.84 MJ/m<sup>2</sup> P.ne an. Die Verhältnisse innerhalb der Konstruktion bleiben davon unberührt und vergrößern sich proportional. Der Anteil von Aluminiumhaupt- und subkonstruktion nehmen 93% des Herstellungsaufwandes ein. In den weiteren Darstellungen der alternativen Fassadenraster werden die jeweiligen Ergebnisse einander gegenüberstellt.

### 3.2.3 Darstellung der Basisstudie - BSH-Fassade

*Referenzelement und Profildetail*

*Massenerhebung/Primärenergie Brettschichtholz-Fassade*

*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

*Kosten im Lebenszyklus*

*Alternative Fassadenraster*

*Referenzelement und Profildetail*

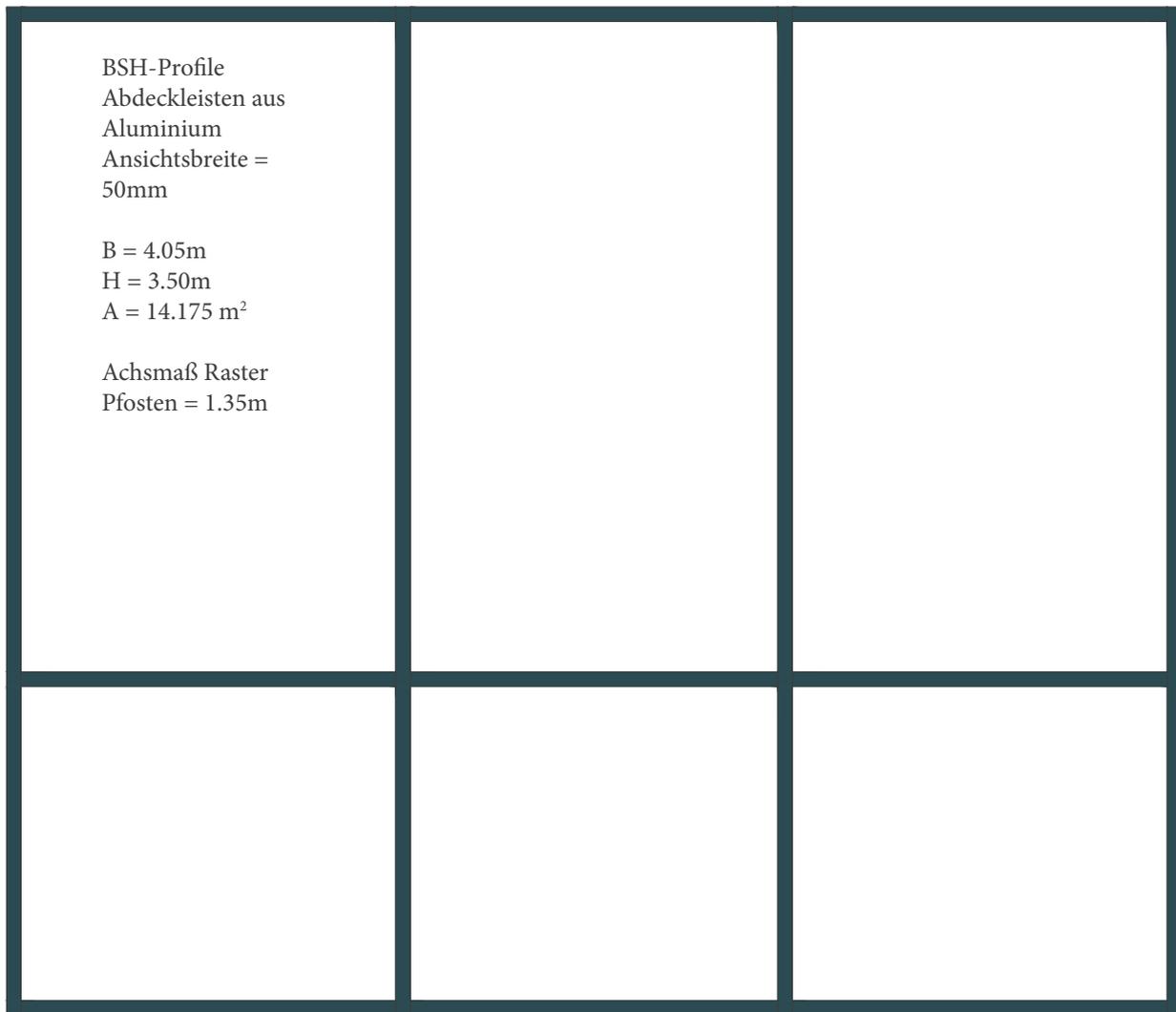


Abb. 106 Referenzelement in Grundriss und Ansicht BSH-Fassade Maßstab 1:25

Die Bezugskonstruktion zeigt im zweiten Schritt den Ersatz der statischen Hauptprofile durch Brett-schichtholzpfosten und -riegel. Die für das Flächengewicht relevanten Abmessungen sind aber unverändert. Die Verglasung bleibt ident, die Fügungselemente zur Verbindung von transparenter Füllung und Grundkonstruktionen sowie die Abdichtungen ebenso. Das Fassadenraster beträgt in beiden Verleichen-aufbauten 1,35m, das aus der umgesetzten Projektlösung übernommen wurde.

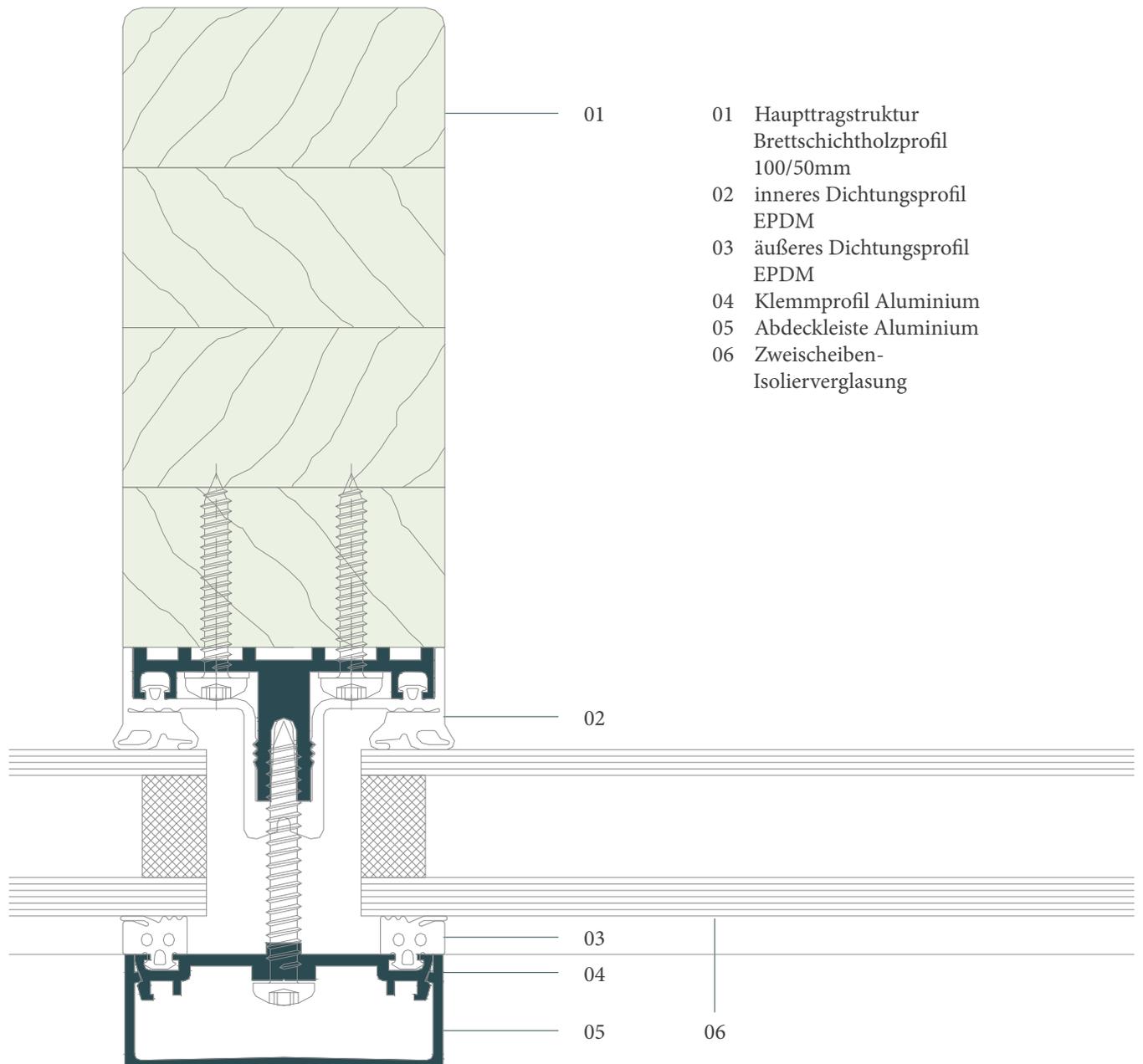


Abb. 107 Grundriss Profildetail BSH-  
Fassade Maßstab 1:1

# Massenerhebung/Primärenergie Brettschichtholz-Fassade

Material	Faktor	Einheit	P.ne [MJ/kg] Herstellung	Nutzungsdauer [a]	Herstellung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Nutzung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	End-of-Life P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Total P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]
Aluminium (65% Recyclinganteil)	1.95	[kg]	151.8	25	296.0	0.0	0.0	296.0
Brettschichtholz (BSH)	4.6	[kg]	7.8	25	35.9	0.0	-63.0	-27.1
Floatglas	30.0	[kg]	14.0	25	420.0	0.0	4.8	424.8
EPDM Dichtung	0.7	[kg]	106.3	25	74.4	0.0	-20.3	54.0
BSH-Fassade gesamt	37.25	[kg]	22.2	25	826.3	0.0	-78.5	747.7

Tab. 3 Massenerhebung Brettschichtholz-Fassade

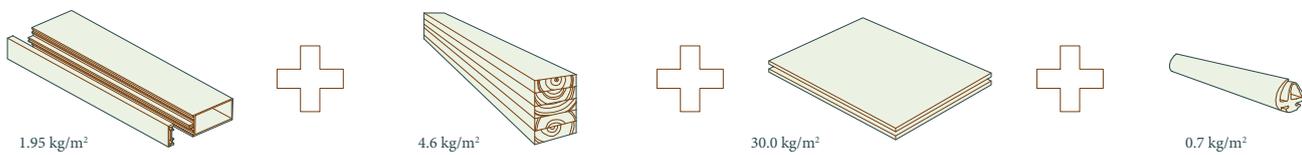
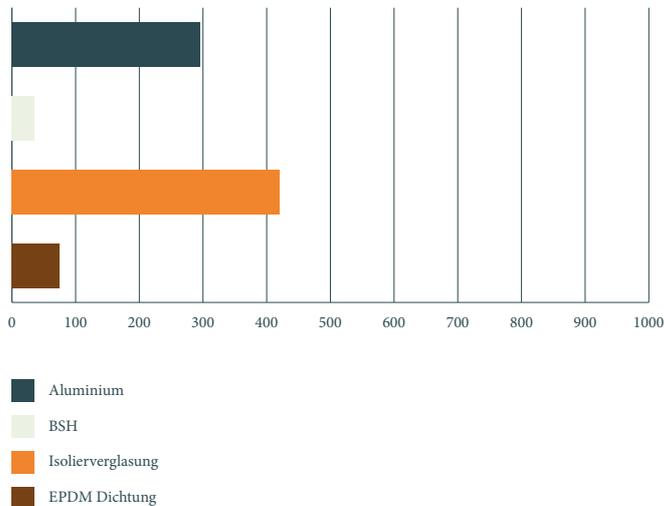


Abb. 109 Skizze Massenerhebung BSH-Fassade

Abb. 108 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung BSH-Fassade



## Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Durch die Veränderungen an den Aufbauten ergeben sich neue Massenanteile. Durch die Auswech-selung der Hauptkonstruktion reduziert sich der Aluminiumgebrauch erheblich. Dieser beträgt mit 1.95 kg/m<sup>2</sup> bei der Brettschichtholzvariante nur mehr 30% des Vergleichsaufbaus. Analog dazu verringern sich die Primärenergieaufwendungen auf 296.0 MJ (P.ne) pro Quadratmeter des Referenzauf-

baus. Hinzu kommt die Position für das Brettschichtholz. Das relevante Flächengewicht, stellt man die Werte der Tragprofile gegenüber, zeigt sich bei Aluminium und Holz nahezu unverändert (4.48 kg/m<sup>2</sup> zu 4.6 kg/m<sup>2</sup>). Umso mehr fallen die großen Differenzen in der Herstellungsphase auf: wäh- rend die Aluminiumlösung mit 679.9 MJ/m<sup>2</sup> (be- rechneter P.ne-Anteil nach Abzug der Druck- und Abdeckelemente) zu Buche schlägt, verbraucht das Brettschichtholz lediglich 35.9 MJ nicht erneuer- barer Energien. Wie bereits in Kapitel 3.1.3 aufge- zeigt liegt das einerseits an dem geringen Anteil von fossilen Brennstoffen, die in der Produktionskette zum Einsatz kommen, andererseits aber auch an den verhältnismäßig großen Teilquerschnitten der Hölzer und dem daraus resultierendem geringen Leimanteil.

Der aufsummierte Gesamtenergiebedarf beträgt nur noch 826.3 MJ/m<sup>2</sup> P.ne in der Herstellungspha- se, eine Reduktion um 644 MJ auf nur mehr 56.2%. Zusätzlich skizziert die Basisstudie eine Gutschrift von 63.0 MJ/m<sup>2</sup> in der Nachnutzung, die durch die thermische Verwertung des Holzes erzielt wird.

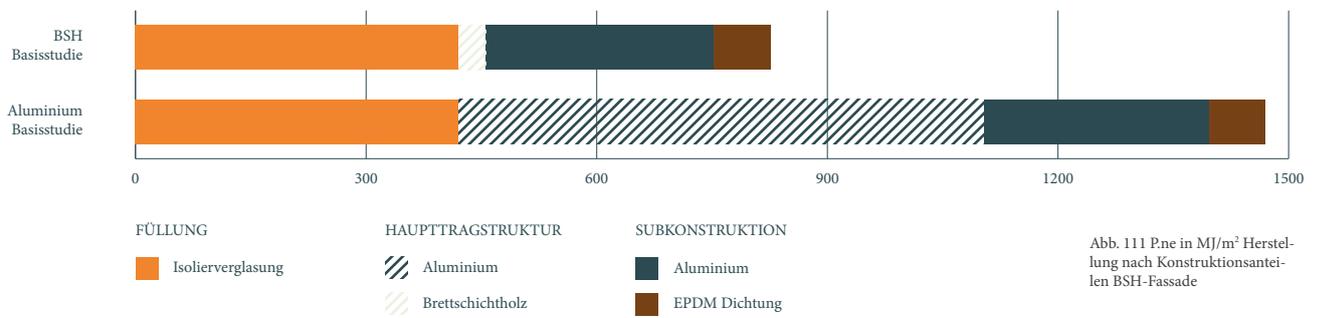
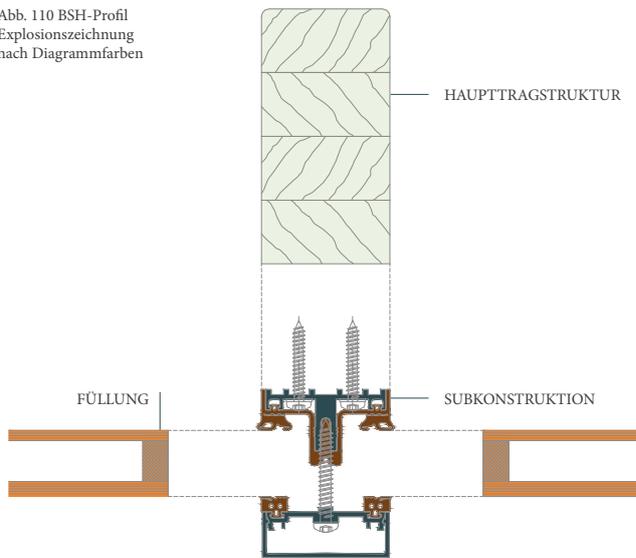


Abb. 111 P.ne in MJ/m² Herstellung nach Konstruktionsanteilen BSH-Fassade

Abb. 110 BSH-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben



In der Grafik zum Primärenergiebedarf sind die Werte nochmals bezüglich aller verwendeten Produkte gegenübergestellt. Hier wird die große Einsparung durch die Brettchichtholzprofile nochmals verdeutlicht. Obwohl es die statisch relevante Komponente der Fassade darstellt und nach der Verglasung den größten Gewichtsanteil aufzeigt, sind die zu erwartenden Aufwendungen mit 4.3% in der Herstellung sehr gering.

Dies wird bei der anteiligen Darstellung weiter verdeutlicht. Die Kategorie der Füllung bleibt, ob des gleichen Fassadenrasters von 1.35m gleich, die gesamten Einsparungen bezieht die Brettchichtholzkonstruktion aus den Profilaufbauten. Im konkreten Fall führt der Ersatz der Haupttragstruktur zu einer Reduktion des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs von 644.0 MJ/m², gleichbedeutend mit einem Prozentsatz von 94,7%.

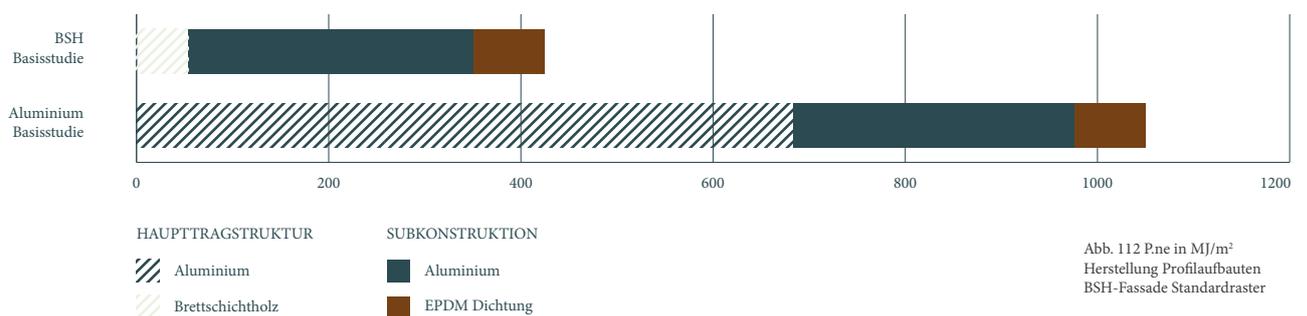


Abb. 112 P.ne in MJ/m² Herstellung Profilaufbauten BSH-Fassade Standardraster

Abb. 113 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup>  
nach Phasen BSH-  
Fassade

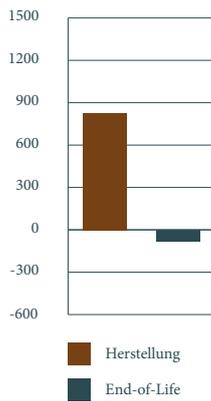
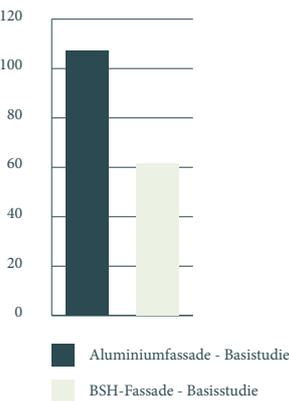


Abb. 114 GWP in kg CO<sub>2</sub>  
eq BSH-Fassade  
Herstellung



1m <sup>2</sup>	Pfosten-Riegel-Fassade Brettchichtholz
	Holztragprofil 50/60mm Ansichtsbreite
	Anpressprofile Aluminium
	Abdeckleiste Aluminium 50/60mm Ansichtsbreite
	EPDM Dichtungsprofile
	Zweischeiben-Isolierverglasung, g-Wert 0.8
	Lieferung & Montage
<b>542 €/m<sup>2</sup></b>	<b>durchschnittliche Errichtungskosten<sup>4</sup></b>
<b>333.71 €/m<sup>2</sup></b>	Isolierverglasung separat mit U= 1.1 [W/m <sup>2</sup> k]

Tab.4 Errichtungskosten  
BSH-Fassade

<sup>4</sup> BKI Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Hrsg. (2010)  
BKl Baukosten 2010 - Teil 3 Statistische Kostenkennwerte für Positionen

Ökologisch auffällig hingegen sind die Einwirkungen der Kunststoffprodukte. Die für die Abdichtung verantwortlichen EPDM-Profile fallen trotz ihrer geringen Masse mehr ins Gewicht als das Holz. Durch die verringerte Aluminiummenge machen die Aufwendungen der Isolierverglasung den größten Anteil des Energieverbrauchs aus. Nimmt man den gewünschten Transparenzgrad der Fassade als gegeben an, ist diese Einwirkung aber alternativlos. In der gesamtheitlichen Betrachtung eines Gebäudes über einen Zeitraum mehrerer Dekaden ist eine thermisch hochwertige Verglasung gerechtfertigt, um den Heizwärmebedarf zu verringern. Erhöhte energetische Anforderungen in der Produktion werden mittelfristig amortisiert.

Ein weiterer Unterschied im Vergleich der Fassadenausschnitte liegt in der Modellierung des End-of-Life-Szenarios. Durch die Substitutionen des Brettchichtholzes und der EPDM-Dichtung, die bei der thermischen Verwertung erzielt werden, wird ein nicht unerheblicher Teil (78.5 MJ/m<sup>2</sup> gesamt) der Primärenergie wieder eingespart. Die Deponierung der Gläser am Ende des Lebenszyklus wirkt sich kaum auf die Gesamtbilanz aus, davon abweichende Szenarien am Ende dieses Kapitels weisen auf das Recyclingpotenzial hin, das aktuell nicht bilanziert wird. Aus der aufgezeigten Sachbilanz ergeben sich ebenfalls stark differierende Werte für das GWP. Wie einleitend erwähnt liegt hier die Kernaussage der Basisstudie. Die Einsparungen von Treibhausgasen belaufen sich auf 43% der Holz- gegenüber den Aluminiumfassadenprofilen.

### Kosten im Lebenszyklus

Der Ersatz der Haupttragstruktur einer PR-Fassade durch Brettchitholzprofile ergibt minimale Auswirkungen auf die Errichtungskosten. Das bedeutet, dass trotz der energetischen Einsparungen und der verbesserten ökologischen Bilanz die Investitionskosten stabil bleiben.

## Alternative Fassadenraster

Abschließend wird auch die Betrachtung der BSH-Fassade um weitere Rasteralternativen erweitert und hinsichtlich des Einflusses auf die Energieaufwendungen analysiert. Wie zuvor erwähnt wird die Verglasung aus der Darstellung isoliert. Bei der Rastervergrößerung auf 2.00m verringert sich der Primärenergieaufwand (P.ne) der BSH-Profile und Subkonstruktion auf 353.99 MJ/m<sup>2</sup>. Bezogen auf das Raster der Basisstudie bedeutet dies eine Einsparung von 12.9%.

Abb. 115 Fassadenraster Alternative I  
BSH-Fassade

Achismaß Raster = 2.00m  
Laufmeter Fassadenprofile = 22.11m

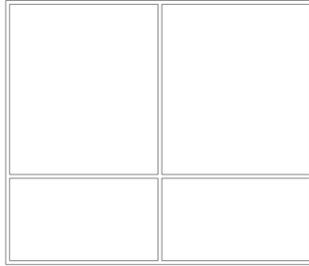


Abb. 116 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten BSH-Fassade Rasteralternative I

Erhöht man hingegen den Materialeinsatz durch eine Verkleinerung des betrachteten Fassadenrasters auf 1.00m, entwickeln sich die Werte in die entgegengesetzte Richtung. 458.45 MJ/m<sup>2</sup> Primärenergieaufwand stehen bei der berechneten Profilauflänge von 28.75m den 1185.84 MJ/m<sup>2</sup> der Aluminiumvariante gegenüber. Bei allen möglichen Ausführungen dieser Art von BSH-Fassade fällt auf, dass innerhalb der Tragstruktur alleine die Klemmvorrichtung mit Abdeckschale aus Aluminium 8 mal mehr Energie verbrauchen als der BSH-Anteil selbst.

Abb. 117 Fassadenraster Alternative II  
BSH-Fassade

Achismaß Raster = 1.00m  
Laufmeter Fassadenprofile = 28.75m

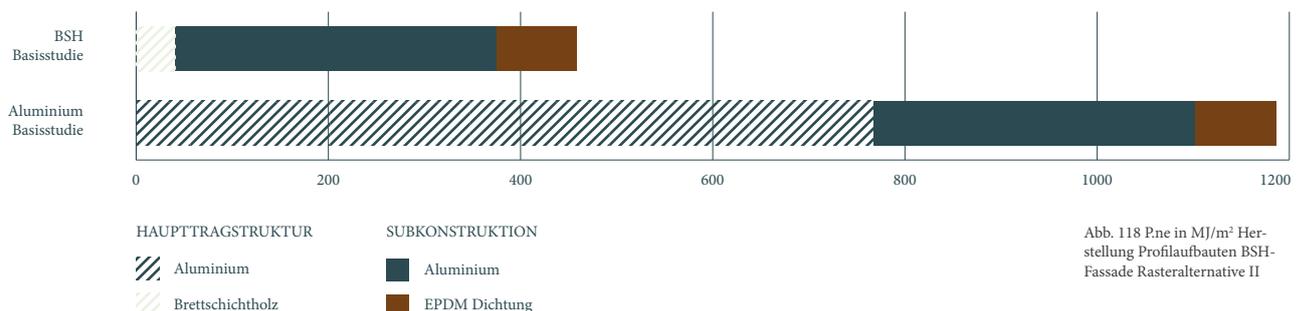
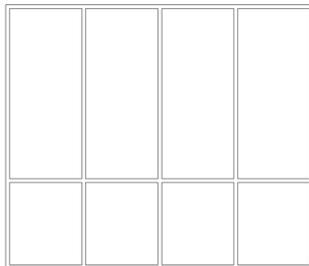


Abb. 118 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten BSH-Fassade Rasteralternative II

## 3.2.4 Remodellierung Aluminiumfassade

Massenerhebung/Primärenergie Aluminium-Fassade  
Sachbilanz und Wirkungsabschätzung  
Alternative Fassadenraster

Massenerhebung/Primärenergie Aluminium-Fassade

Material	Faktor	Einheit	P.ne [MJ/kg] / [MJ/m <sup>2</sup> ] / Herstellung	Nutzungs-dauer [a]	Herstellung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Nutzung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	End-of-Life P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Total P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]
Aluminium	6.43	[kg]	129.0	50	838.0	0.0	-506.0	332.0
Brettschichtholz (BSH)	0.0	[kg]	9.7	25	0.0	0.0	0.0	0.0
Isolierverglasung	0.95	[m <sup>2</sup> ]	452.6	30	430.0	0.0	3.92	433.9
EPDM Dichtung	0.7	[kg]	118.6	25	83.0	0.0	-17.1	66.0
Aluminiumfas-sade gesamt	27.13	[kg]	49.8	50	1351.0	0.0	-519.18	831.9

Tab.5 Massenerhebung Aluminiumfassade

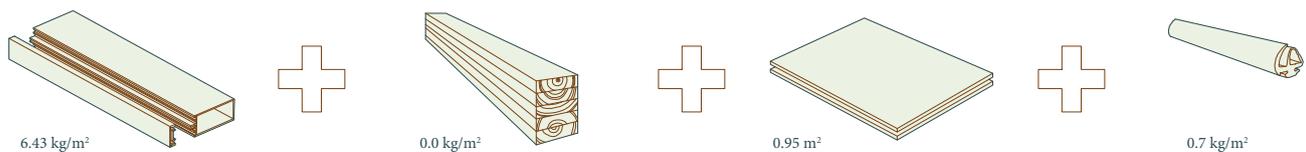
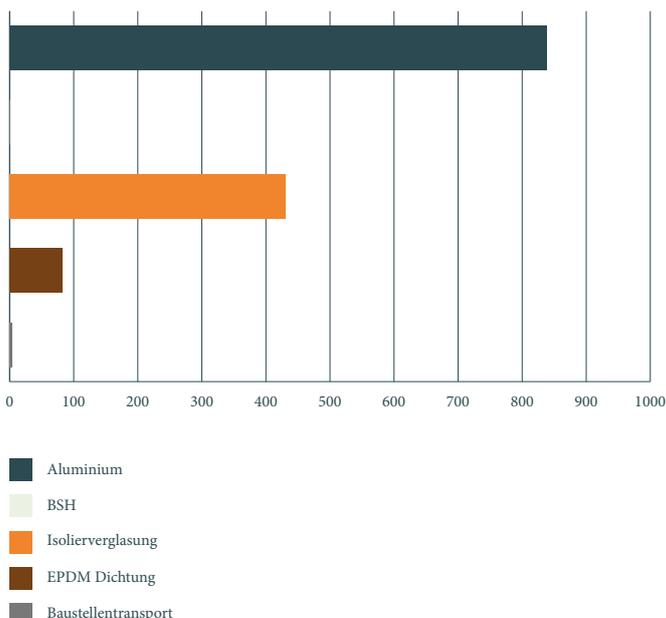


Abb. 120 Skizze Massenerhebung Remodellierung Aluminium

Abb. 119 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Remodellierung Aluminium



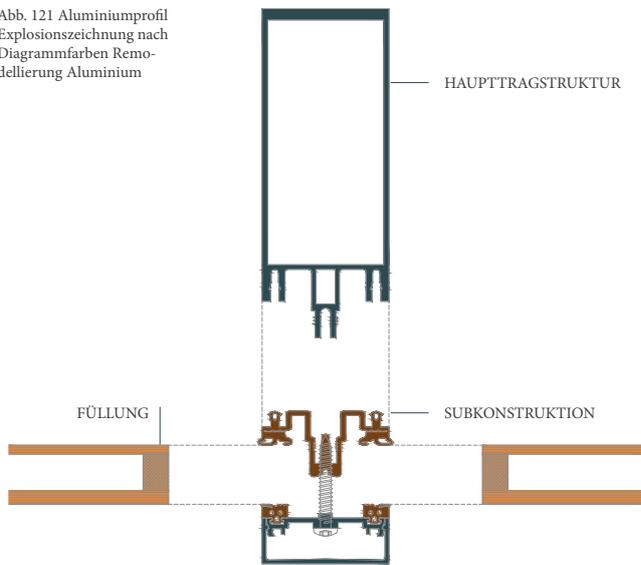
### Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Wie eingangs angekündigt folgt hier eine kurze Remodellierung der Studie des Ingenieurdienstleisters Drees & Sommer auf der Basis der in Kapitel 3.1 beleuchteten Daten aus der ökobau.dat-Datenbank. Dies ist obligatorisch, um Abweichungen aus differierenden Wertegrundlagen zu vermeiden und die vergleichende Ökobilanz zu objektivieren.

Die in der obigen Tabelle aufgeführte Massenerhebung entspricht somit denjenigen aus der Basisstudie, die Sachbilanz der energetischen Herstellungsaufwendungen im Bereich der nicht erneuerbaren Energien weicht jedoch geringfügig davon ab. Der anzunehmende Gesamtenergiebedarf verringert sich auf 1350.0 MJ/m<sup>2</sup> P.ne für die Fassadenproduktion, der Wert des Aluminiumanteils um 145.9 auf 830.0 MJ/m<sup>2</sup>.



Abb. 121 Aluminiumprofil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben Remodellierung Aluminium



Auch für die Remodellierung wird die differenzierte Betrachtungsweise nach Kategorien Füllung, Haupttragstruktur und Subkonstruktion der Fassadenkomponenten aufgezeigt. Die hier dargestellten Grafiken beziehen die vorangegangenen Ergebnisse jeweils mit ein, um einen direkten Vergleich beschrieben zu können. Der kumlierte Gesamtwert der Aluminiumfassade reduziert sich bei der Erhebung mit den Daten der ökobau.dat-Datenbank leicht. Dies ist offenbar auf die verringerte Auswirkung des verwendeten Aluminium in der Haupttrag- und Subkonstruktion zurückzuführen; denn die Ergebnisse der Verglasung und der Dichtungsanteile zeigen sich gar geringfügig erhöht. Quantitativ belaufen sich die Werte der Haupt- und Substruktur auf 920 MJ/m<sup>2</sup>. Dies ist ein Anteil innerhalb des gesamten Konstruktion von 68%, ein Verhältnis das sich im weiteren Verlauf des Fassadenvergleiches erheblich reduzieren wird.

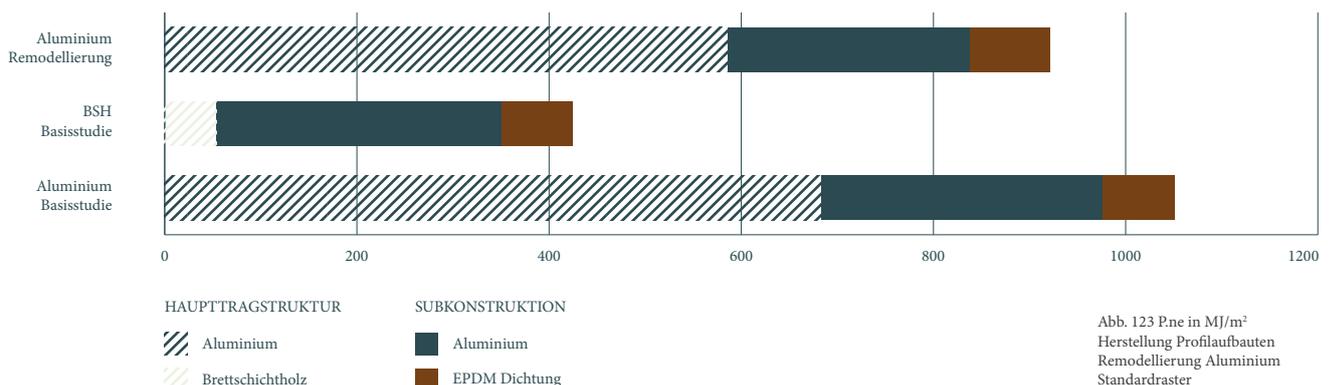


Abb. 124 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen Remodellierung Aluminium

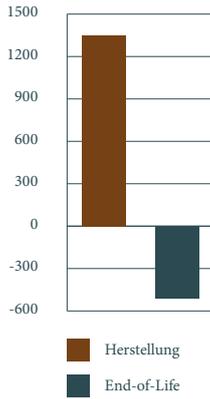


Abb. 125 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung Remodellierung Aluminium

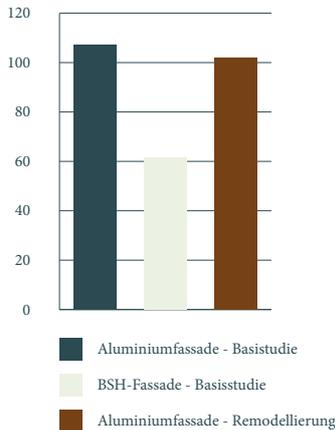
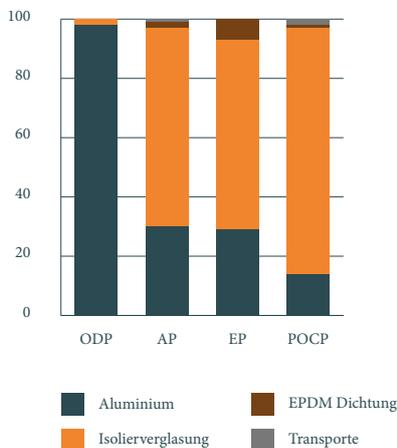


Abb. 126 Indikatoren Lebenszyklus nach % Remodellierung Aluminium



In der Nachnutzung wird innerhalb der Ökobilanzierung nach der ökobau.dat-Grundlage das Substitutionsverfahren angewendet wird. Die Produktion verweist auf Daten der Primäraluminiumerzeugung, das End-of-Life-Szenario zeigt die entsprechenden Gutschriften einer Sammelrate von 65% (analog der der Basisstudie). Die Bedeutung des Recyclingpotenzials von Aluminium wird in Kapitel 3.3 weiter vertieft. Ein zweiter Unterschied zeigt sich im Flächengewicht der Isolierverglasung. Der Flächenanteil bleibt ident, das Gewicht verringert sich in der Ausführung auf 20 kg/m<sup>2</sup>. Da dies konsekutiv fortgeführt wird, hat der Unterschied aber keinen Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

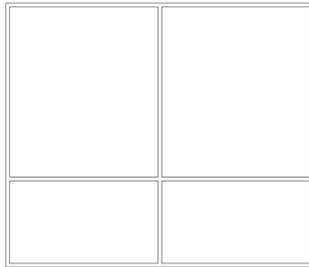
Durch die Substitutionsmethode erzielt die Bilanzierung der Nachnutzung der Aluminiumfassade mehr Einsparungen als in der ursprünglichen Erhebung. Dennoch verringert dies nicht die primären Energieaufwendungen, die sich auch in den CO<sub>2</sub>-Emissionen widerspiegeln. Das Potenzial bleibt mit 102.0 kg CO<sub>2</sub> eq nahezu unverändert.

Der Abschnitt der Remodellierung erweitert die vergleichende Ökobilanzierung um die ergänzenden Wirkungskategorien, die auch in den vorherigen Kapiteln behandelt wurden. Der Fokus der materialorientierten Gegenüberstellung liegt hier aber nicht in der Quantität der Umweltindikatoren sondern in der prozentualen Einwirkung der verschiedenen Elemente der Fassadenkonstruktion und den angenommenen Transporten. Das ODP im Lebenszyklus dieser Fassade wird fast ausschließlich durch die stromintensiven Prozesse der Aluminiumproduktion hervorgerufen. Die drei weiteren Kategorien weisen ein anderes Bild auf. Das Versauerungspotenzial (AP) und das Überdüngungspotenzial basieren hauptsächlich auf Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen, die auf die nötige Wärmeerzeugung zur Bereitung der Glasschmelze zurückzuführen sind. Auch das Sommersmogpotenzial wird von der Isolierverglasung dominiert. Die Befuerung des Schmelzofens erwirkt VOC-Emissionen, die in diesen Indikator einfließen.

## Alternative Fassadenraster

Abb. 127 Fassadenraster Alternative I  
Remodellierung Aluminium

Achismaß Raster = 2.00m  
Laufmeter Fassadenprofile = 22.11m



Die Einsparungen bei der verbreiterten Rasterannahme beschreiben einen proportionalen Verlauf im Vergleich zur Ausgangsstudie.

Die errechneten 795,19 MJ/m<sup>2</sup> (P.ne) für die Profilaufbauten bei einer Lauflänge von 22.11m in der identischen Flächengröße werden ebenso von der Herstellung der Aluminiumprofile, Klemmvorrichtungen und Abdeckschalen dominiert.

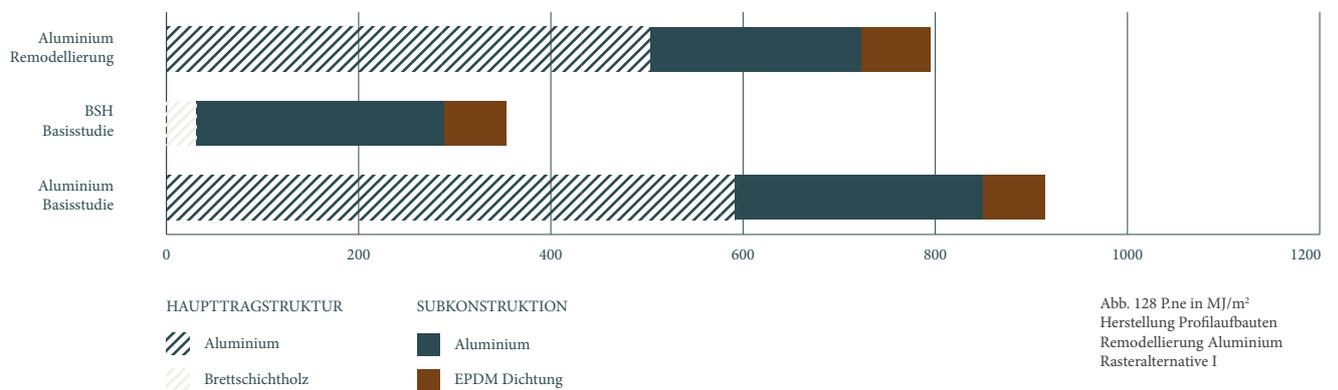
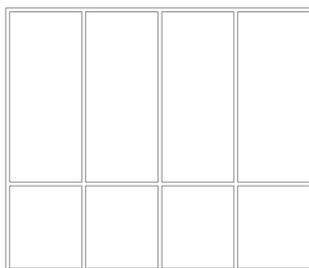


Abb. 128 P-ne in MJ/m<sup>2</sup>  
Herstellung Profilaufbauten  
Remodellierung Aluminium  
Rasteralternative I

Abb. 129 Fassadenraster Alternative II  
Remodellierung Aluminium

Achismaß Raster = 1.00m  
Laufmeter Fassadenprofile = 28.75m



Die Rasteralternative II zeigt wiederum die Profillängen von 28.75m. Die Verlängerung um 6.64m gegenüber der Alternative I verursacht Aufwendungen, die um 235.62 MJ/m<sup>2</sup> höher liegen. Bei der Lebenszyklusanalyse eines Gebäudes wären die Auswirkungen vielschichtiger, da durch die erhöhte Profilloberfläche eine Reduktion der solaren Einträge zu erwarten wären.

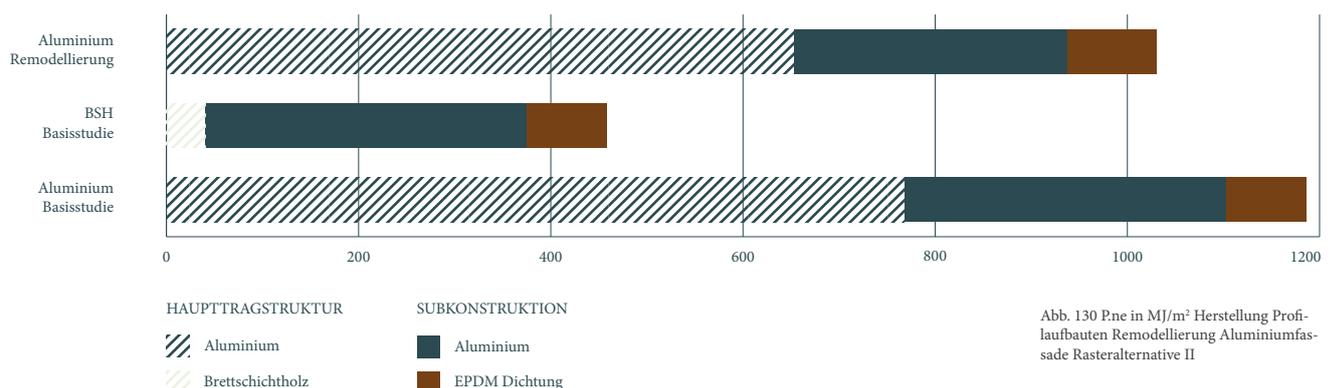


Abb. 130 P-ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Remodellierung Aluminiumfassade Rasteralternative II

## 3.2.5 Remodellierung BSH-Fassade

### Massenerhebung/Primärenergie BSH-Fassade Sachbilanz und Wirkungsabschätzung Alternative Fassadenraster

### Massenerhebung/Primärenergie BSH-Fassade

Material	Faktor	Einheit	P.ne [MJ/kg] / [MJ/m <sup>2</sup> ] / Herstellung	Nutzungs-dauer [a]	Herstellung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Nutzung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	End-of-Life P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Total P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]
Aluminium	1.95	[kg]	129.0	50	254.0	0.0	-153.0	101.0
Brettschichtholz (BSH)	4.6	[kg]	9.7	50	44.4	0.0	-41.1	3.27
Isolierverglasung	0.95	[m <sup>2</sup> ]	452.6	30	430.0	0.0	3.92	433.9
EPDM Dichtung	0.7	[kg]	118.6	25	83.0	0.0	-17.1	66.0
BSH-Fassade gesamt	27.25	[kg]	29.8	50	811.4	0.0	-207.28	604.17

Tab.6 Massenerhebung Brettschichtholz-Fassade

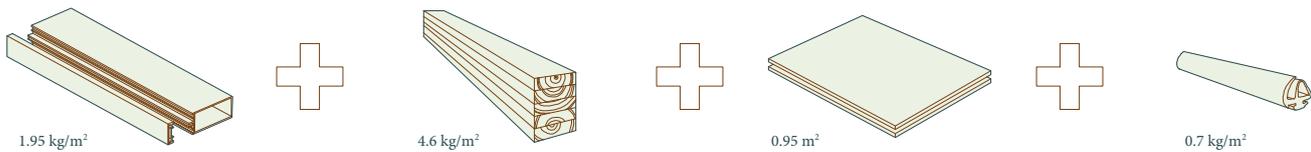
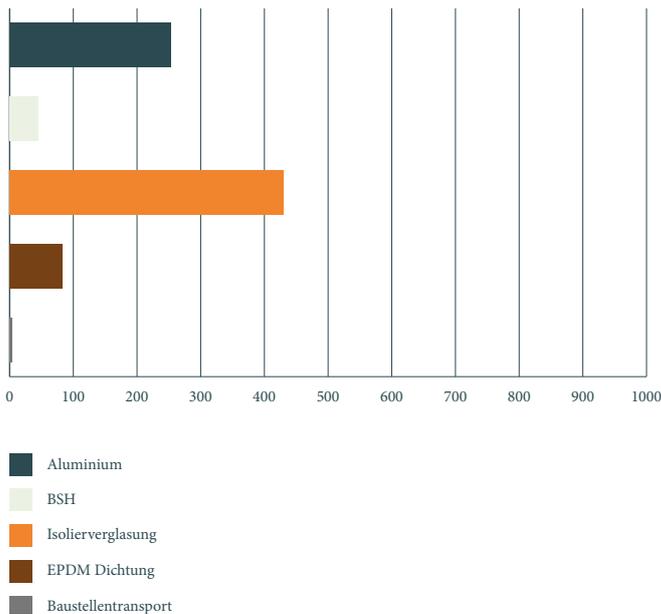


Abb. 132 Skizze Massenerhebung Remodellierung BSH

Abb. 131 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Remodellierung BSH



### Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Die Remodellierung der Daten zeigt analog zur

Erfassung der Aluminiumfassade einen geringfügig niedrigeren Gesamtenergiebedarf (p.ne) in der Herstellungsphase, der sich auf 811.1 MJ/m<sup>2</sup> verringert. Die Differenz ist auf die Reduzierung der Werte der Aluminiumproduktion zurückzuführen (254.0 zu 296.0 MJ/m<sup>2</sup>), die Bereitstellung der Haupttragstruktur aus Brettschichtholz sieht im Vergleich erhöhte Ergebnisse vor (44.4 MJ/m<sup>2</sup>, eine Erhöhung um 23%). Wie erwähnt betrachtet die Remodellierung auch durchschnittliche Transportwege zur Baustelle. Wie in der nebenstehenden Grafik ersichtlich wird, sind die Auswirkungen auf den Primärenergiebedarf jedoch sehr klein. Durch die berechneten Substitutionen des Aluminiumrecyclings erhöhen sich die erzielten Einsparungen auf 207.28 MJ/m<sup>2</sup> zum Ende des Lebenszyklus, gleichermaßen verringern sich die entsprechenden

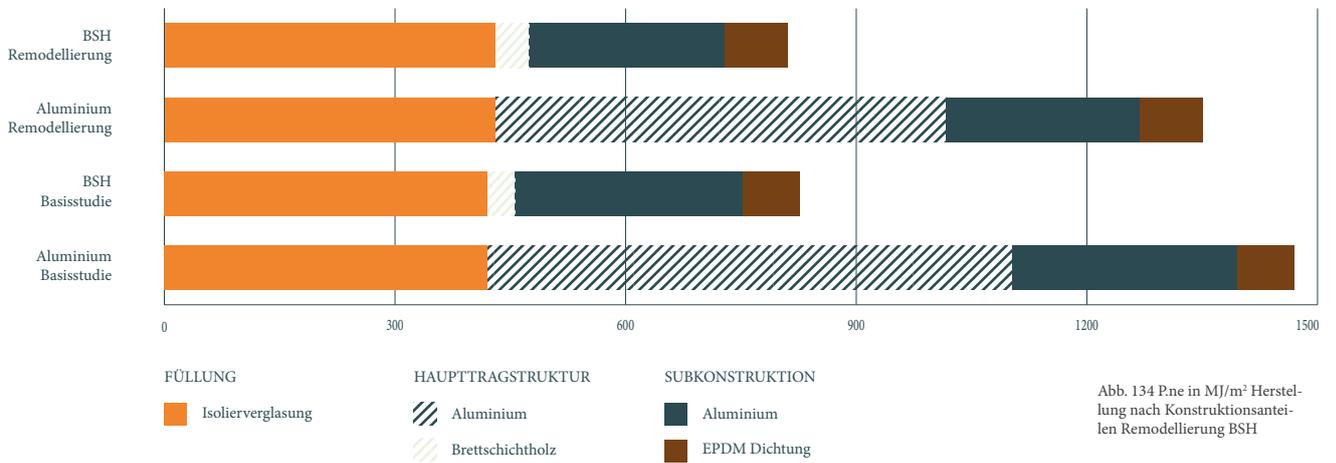
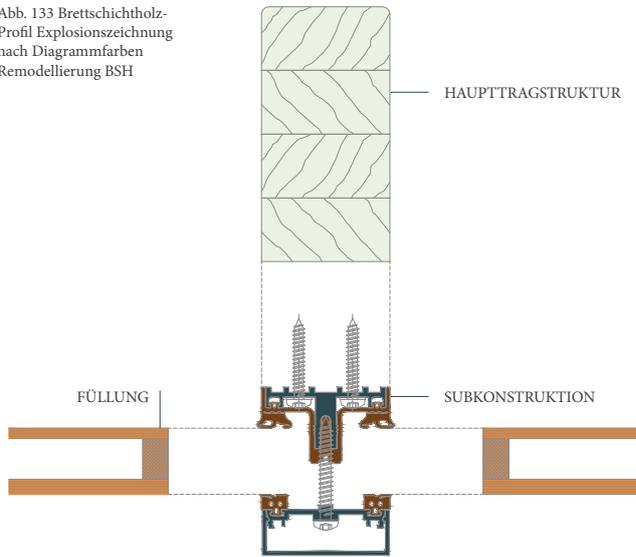


Abb. 134 P.ne in MJ/m² Herstellung nach Konstruktionsanteilen Remodellierung BSH

Abb. 133 Brett-schichtholz-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben Remodellierung BSH



Werte auf den gesamten Lebenszyklus bezogen. Weiter wird die aufgewendete Herstellungsenergie wieder aufgeteilt in die Kategorien Füllung, Haupttragstruktur und Subkonstruktion. Die verkleinerte Profildarstellung erleichtert den Bezug der konst-

ruktiven Zusammenhänge zu den ermittelten Daten. Im Verhältnis zur Aluminiumfassade ist die Verringerung der mit der ökobau.dat-Grundlage erzielten Werte der BSH-Fassade geringer. Das liegt an dem reduzierten Aluminiumanteil, der sich auf die Verwendung innerhalb der Subkonstruktion beschränkt. Deutlich wird auch, dass diese Daten-bank einen etwas höheren Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Energieträger bei der Herstellung der Brett-schichtholzelemente veranschlagt. Weiter wird in der unteren Grafik die Isolierverglasung aus der Betrachtung herausgenommen, um den Fokus auf den wesentlichen Unterschied der Konstruktionen zu legen. Vergleicht man die Remodellierungen miteinander erhält man eine Energiedifferenz von 538.9 MJ/m² (381.11 zu 920.0 MJ/m²). Prozentual formuliert benötigt die BSH-Konstruktion lediglich 41.4% der Primärenergie (P.ne).

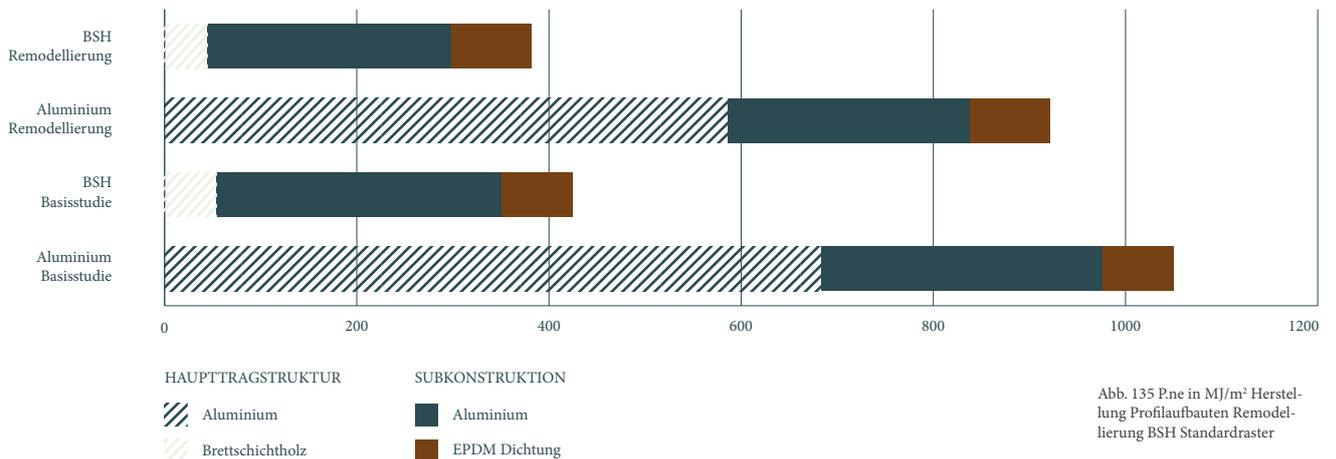


Abb. 135 P.ne in MJ/m² Herstellung Profilaufbauten Remodellierung BSH Standardraster

Abb. 136 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen Remodellierung BSH

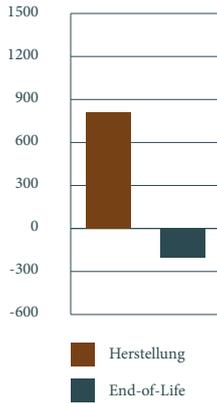


Abb. 137 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung Remodellierung BSH

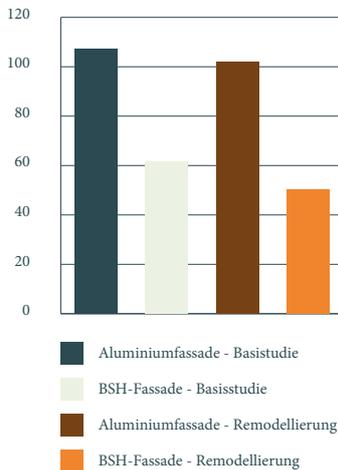
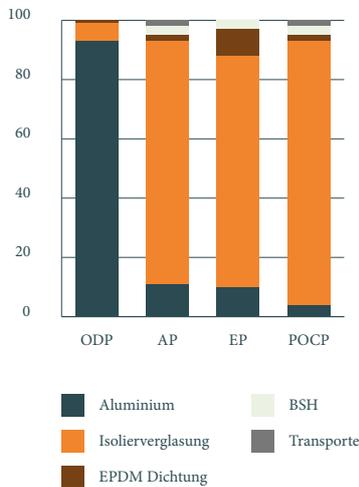


Abb. 138 Indikatoren Lebenszyklus nach % Remodellierung BSH



Die hier dargestellte Grafik der phaserelevanten Gegenüberstellung des Primärenergiebarfs zeigt diesen Zusammenhang auf.

Um die vergleichende Analyse der lebensbezogenen Einflüsse der untersuchten Fassaden und ihrer Materialien zu vereinfachen, bezieht das Diagramm zum Treibhausgaspotenzial die jeweiligen vorausgehenden Ergebnisse mit ein. So wird direkt deutlich, dass sich die Ausstöße CO<sub>2</sub>-äquivalenter Gase im Abschnitt der ‚Remodellierung‘ ähnlich den erzielten Ergebnissen des P.ne verringern. Allerdings sinken die zu erwartenden Emissionen im Bereich der BSH-Fassade prozentual deutlicher als bei der Aluminiumvariante. Um auf die Hauptthese der Ausgangsstudie zurückzukommen: wird die Fassadentragsstruktur aus Aluminiumprofilen durch Brettschichtholz ersetzt, können nach Angaben der ökobau.dat-Grundlagendaten sogar 51% der Emissionen in dieser Wirkungskategorie eingespart werden (8% größeres Reduktionspotenzial als bei den ursprünglich erhobenen Werten).

Als zusätzliche Erweiterung neben der Berücksichtigung von Transportaufwendungen zeigt die Remodellierung auch die materialrelevanten Anteile an den weiteren Wirkkategorien. Beim Ozonabbau-potenzial fällt der hohe Stromverbrauch der Aluminiumproduktion ins Gewicht. Obwohl der Massenanteil der Abdeckleisten nur bei 7.2% liegt, fallen der Herstellung über 93% der Emissionen zu, die zur anthropogenen Konzentrationsminderung von Ozon in der Strathosphäre führen.

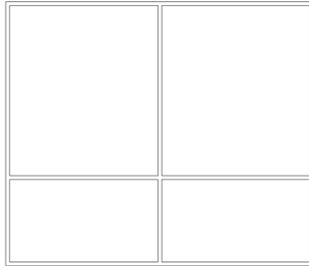
Über den gesamten Lebenszyklus sind die Auswirkungen der Pfosten-Riegel-Konstruktion aus Brettschichtholz auf die Umwelt sehr gering. Während sich die CO<sub>2</sub>-Bilanz durch die thermische Verwertung etwas verschlechtert, erzielt die Substitution zum Ende des Zyklus Einsparungen bei dem Versauerungs- und dem Eutrophierungspotenzial.

In diesen Bereichen und beim Einfluss auf die Bildung des sommerlichen Smogs sind wiederum die thermischen Aufwendungen der Glasproduktion hauptverantwortlich.

## Alternative Fassadenraster

Abb. 139 Fassadenraster Alternative I  
Remodellierung BSH

Achismaß Raster = 2.00m  
Laufmeter Fassadenprofile = 22.11m



Wiederholt man die Gegenüberstellung mit der verkürzten Lauflänge des 2.00m-Rasters, fallen die verringerten Einsparungen auf. Dennoch liegt die Herstellungsenergie weiter deutlich unter der für die Profilanteile der Aluminiumlösung. Wie weiter ersichtlich ist, gründen diese Unterschiede ausschließlich auf der Haupttragstruktur, da die Konstruktion der Substruktur identisch bleibt.

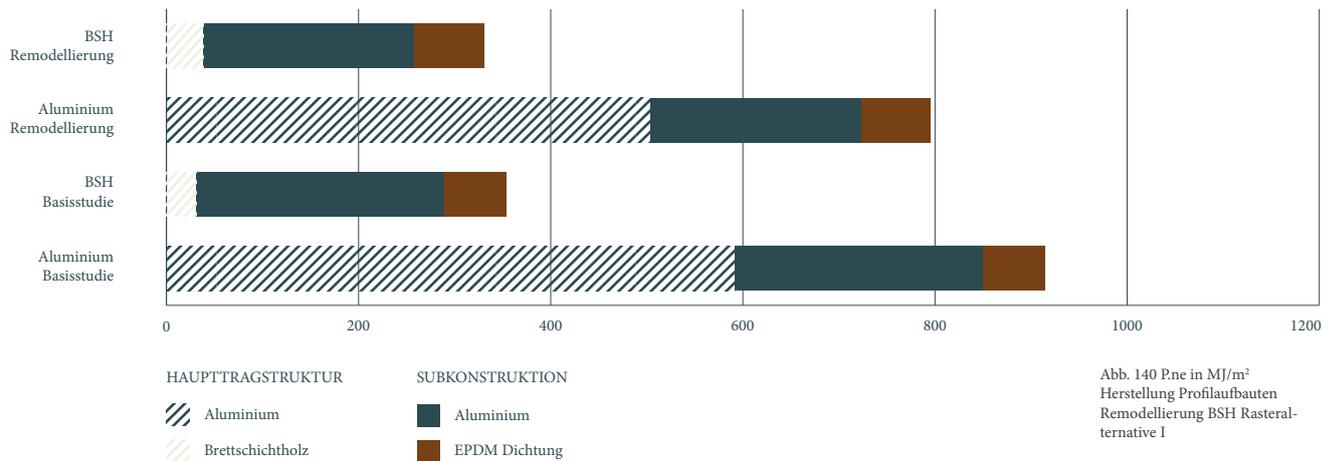
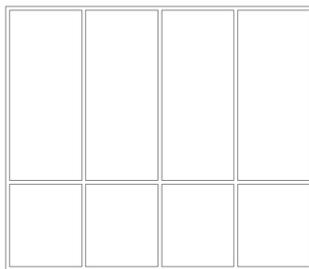


Abb. 140 Pnc in MJ/m²  
Herstellung Profilaufbauten  
Remodellierung BSH Raster-  
alternative I

Abb. 141 Fassadenraster Alternative II  
Remodellierung BSH

Achismaß Raster = 1.00m  
Laufmeter Fassadenprofile = 28.75m



Die Rasteralternative II beinhaltet Profile mit einer aufaddierten Gesamtlänge von 28.75m. Der Gesamtenergiebedarf der Herstellung von Haupt- und Subkonstruktion belaufen sich dabei auf 427,84 MJ/m² Fassadenfläche. Im Vergleich zur ursprünglich angenommenen Rasterbreite von 1.35m erhöhen sich die Werte um 46.74 MJ/m². Die Glasfläche wird nicht berücksichtigt, da die Veränderungen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis haben.

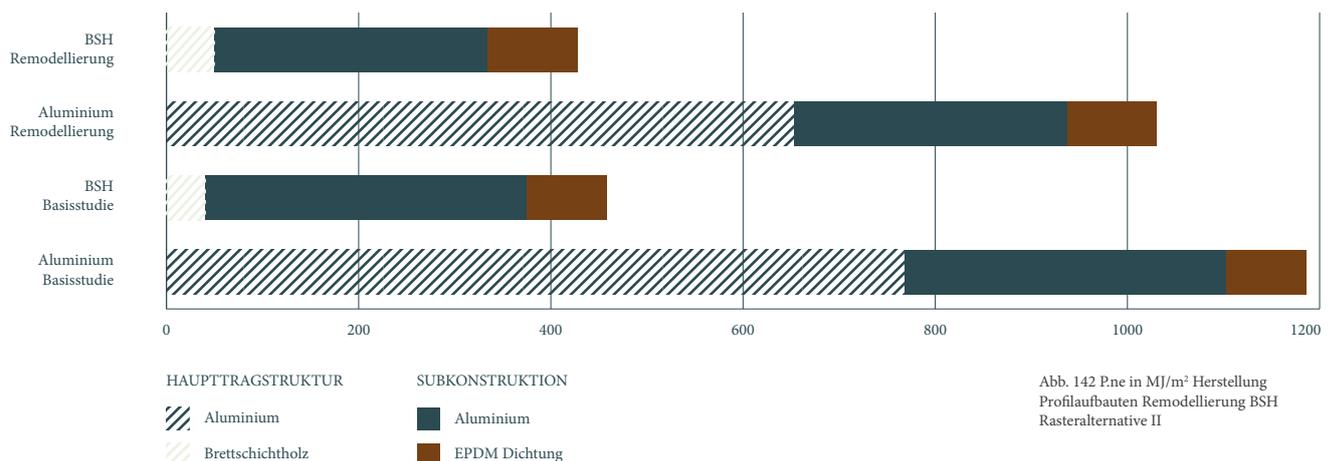


Abb. 142 Pnc in MJ/m² Herstellung  
Profilaufbauten Remodellierung BSH  
Rasteralternative II

## 3.2.6 Ökobilanzierung Holz-Glas-Verbund Variante A

*Referenzelement und Profildetail HGV-A*

*Massenerhebung/Primärenergie HGV-A*

*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

*Kosten im Lebenszyklus*

*Alternative Fassadenraster*

*Referenzelement und Profildetail*

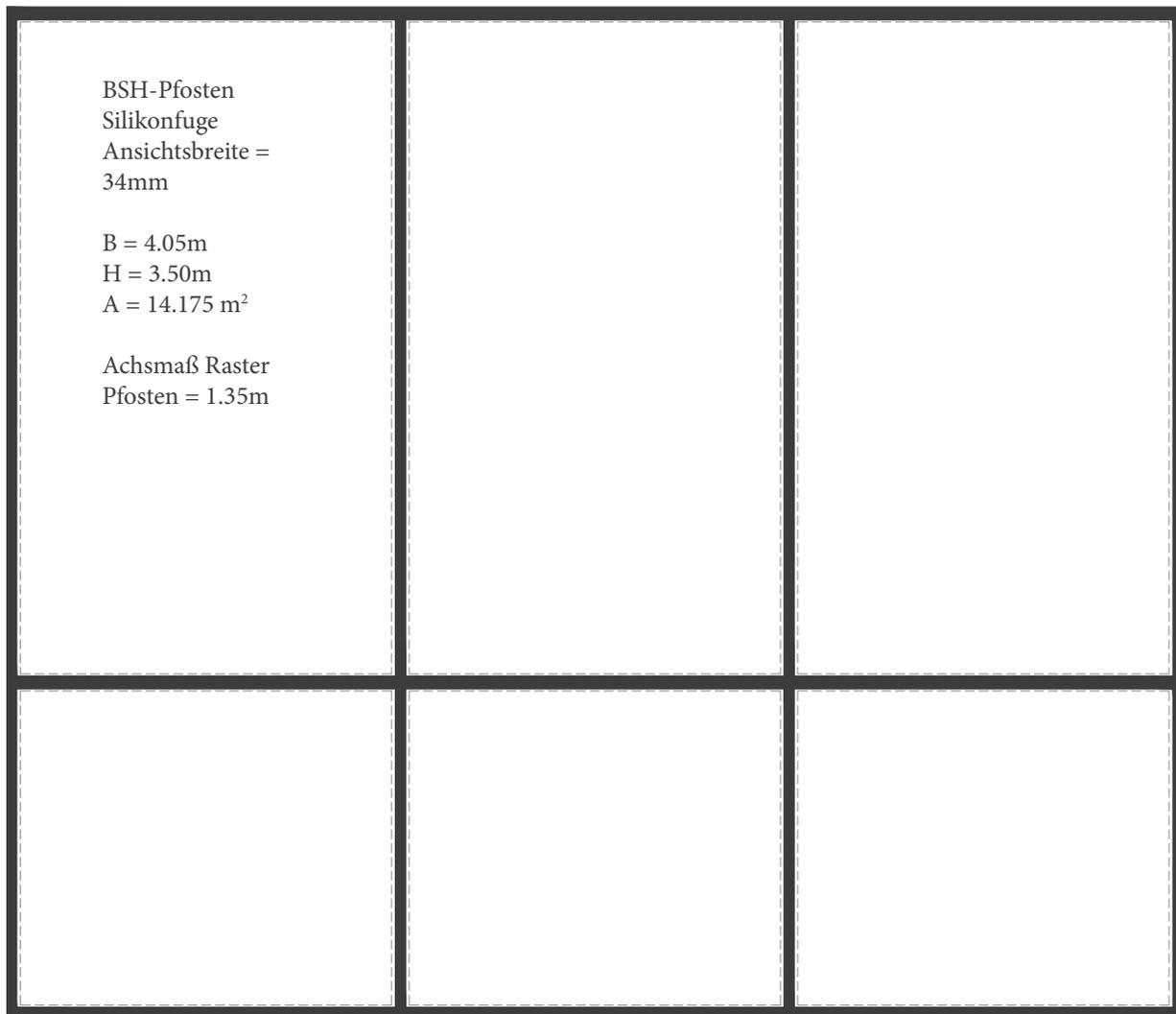


Abb. 143 Referenzelement in Grundriss  
und Ansicht HGV-A Maßstab 1:25

Für die vergleichende ökologische Fassadenbewertung wurden im Weiteren die Abmessungen des Fassadenausschnitts übernommen und die Aufbauten durch die Holz-Glas-Verbundkonstruktionen ersetzt. Die Variante A bezieht sich dabei auf die eingangs beleuchteten Detailansätze mit Isolierverglasung des Wintergartenprojektes. Der Aufbau zeigt eine Haupttragstruktur aus Brettschichtholzpfosten- und riegeln und Koppelleisten aus Birkefurnierschichtholz. Zur Erzeugung des statischen Verbundes mit der Verglasung wird diese mittels Schubklebung und ergänzender Verklotzung mit der Koppelleiste verbunden. Die Abdichtung der Fuge wird über eine elastische Elastomerschnur mit zusätzlicher Silikonbenetzung hergestellt.

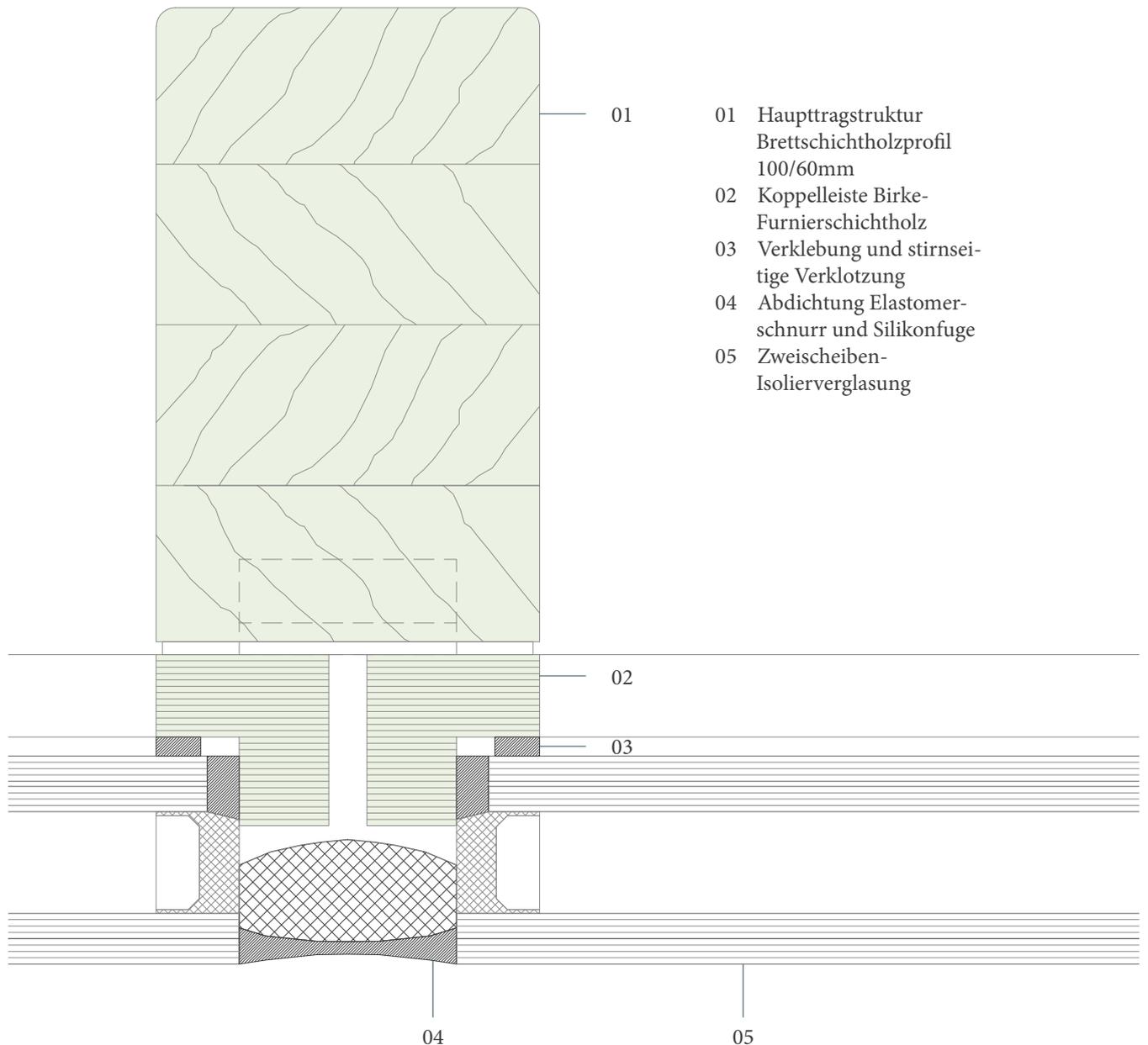


Abb. 144 Grundriss Profildetail HGV-A  
Maßstab 1:1

Material	Faktor	Einheit	P.ne [MJ/kg] / [MJ/m <sup>2</sup> ] Herstellung	Nutzungs-dauer [a]	Herstellung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Nutzung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	End-of-Life P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Total P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]
Aluminium	0.0	[kg]	129.0	50	0.0	0.0	0.0	0.0
Brettschichtholz (BSH)	5.56	[kg]	9.7	50	53.6	0.0	-49.7	3.96
Furnierschicht-holz	0.67	[kg]	19.9	50	13.3		-5.98	7.27
Isolierverglasung	0.92	[m <sup>2</sup> ]	452.6	30	393.0	0.0	3.59	397.0
Elastomer Rundschnur	1.01	[kg]	118.6	25	120.0	0.0	-24.6	95.2
Silikondicht-masse	0.21	[kg]	133.8	12	28.1	46.3	-5.0	69.4
Stahlprofil	0.27	[kg]	29.1	50	7.85	0.0	-2.11	5.74
HGV-Fassade Typ A gesamt	25.64	[kg]	24.1	50	6115.85	46.3	-83.8	578.57

Tab.7 Massenerhebung  
HGv-Fassade Variante A

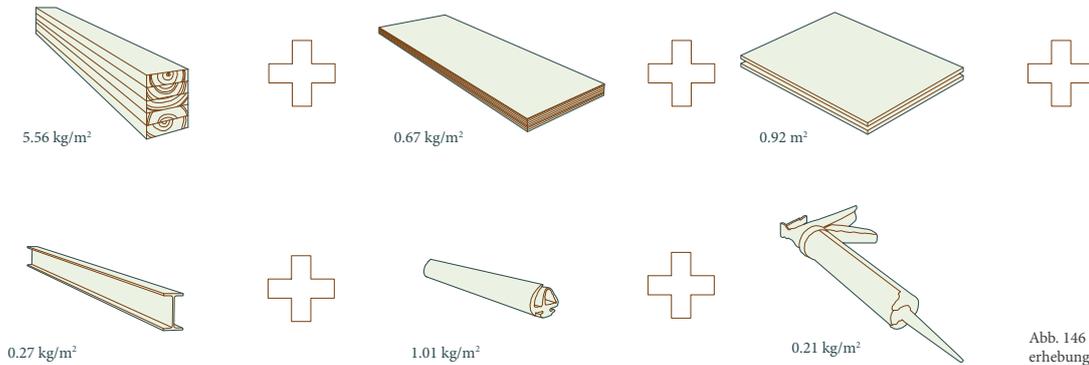
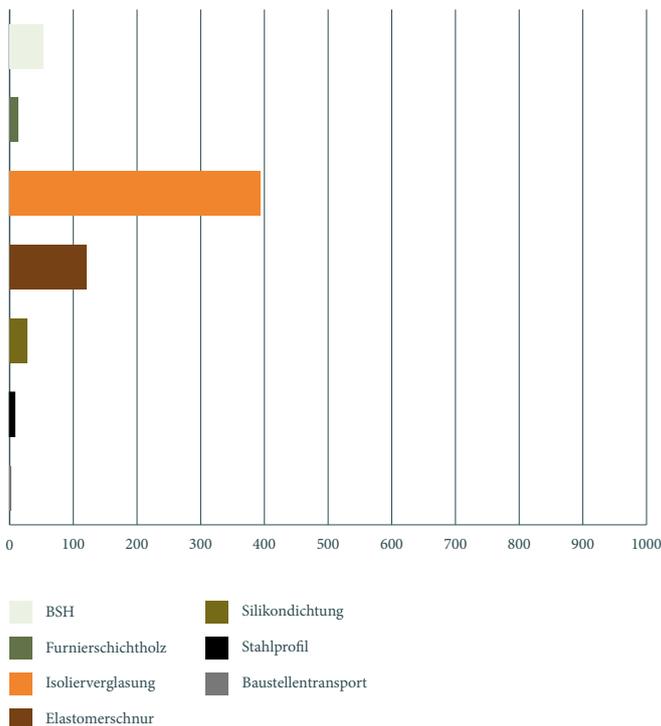


Abb. 146 Skizze Massen-  
erhebung HGv-A

Abb. 145 P.ne in MJ/m<sup>2</sup>  
Herstellung HGv-A



## Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Durch den kompletten Ersatz der Aluminiuman-teile, sowohl in der Tragsstruktur (durch BSH) als auch in der Abdichtung, reduziert sich der zu er-wartende Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Energieträger für einen Quadratmeter Fassade in der Herstellung auf 615.85 MJ. Diese Reduktion be-läuft sich auf 54% gegenüber der Aluminiumlö-sung, die auf der Grundlage der ökobau.dat-Daten einen kumulierten Aufwand von 1350.0 MJ/m<sup>2</sup> zeigt. Bei der Auflö-sung des Ergebnisses nach Materialien fällt auf, dass die Glasproduktion mit knapp 400 MJ/m<sup>2</sup> nun die größten Anteil ausmacht. Trotz der Funktion als Haupttragstruktur und eines fünffach

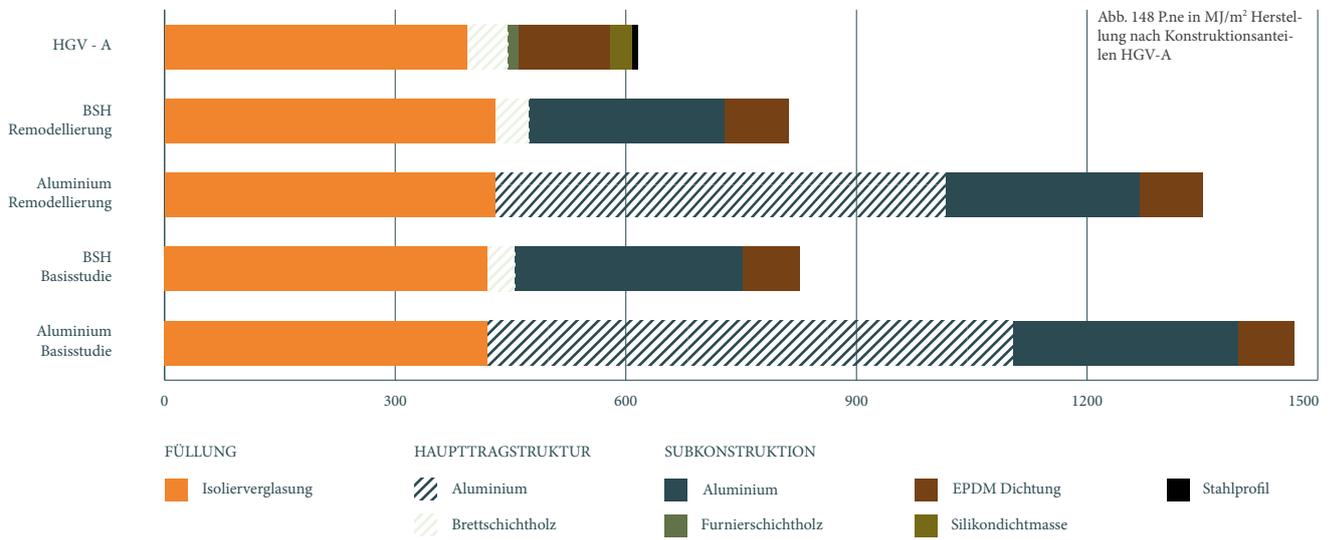
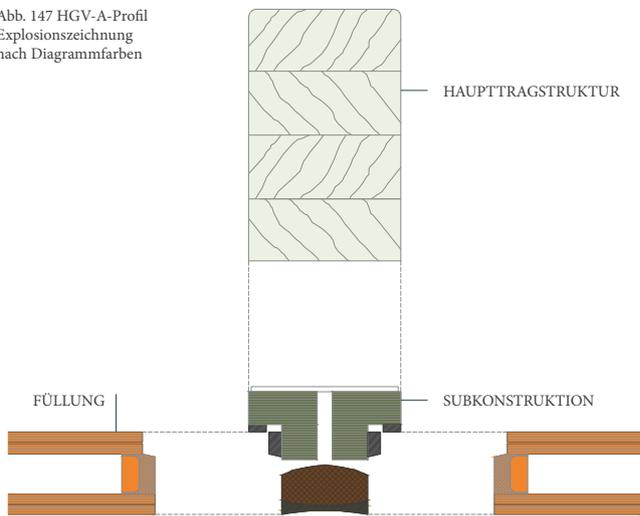


Abb. 147 HGV-A-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben



größeren Massenanteils im Bezug auf die Abdichtungsmaterialien, zeigen die Holzkomponenten nur eine untergeordnete Rolle in dieser Bilanz.

In diesem Schritt des Vergleichs wird die Bedeutung der nach Komponenten unterteilten Grafiken klar. Während der Primärnergiebedarf (P.ne) der Isolierverglasung quasi gleich bleibt, reduzieren sich die Werte der Profilkonstruktion auch gegenüber der BSH-Variante der Ausgangsstudie erheblich. Der Verlauf geht von der Aluminiumfassade (920.0 MJ/m²), über die BSH-Variante (381.11 MJ/m²) bis zur HGV-Variante A mit einem Ergebnis von 226.0 MJ/m². Innerhalb der isolierten Betrachtung bedeutet dies eine Reduktion auf 24.6% gegenüber der Aluminiumkonstruktion.

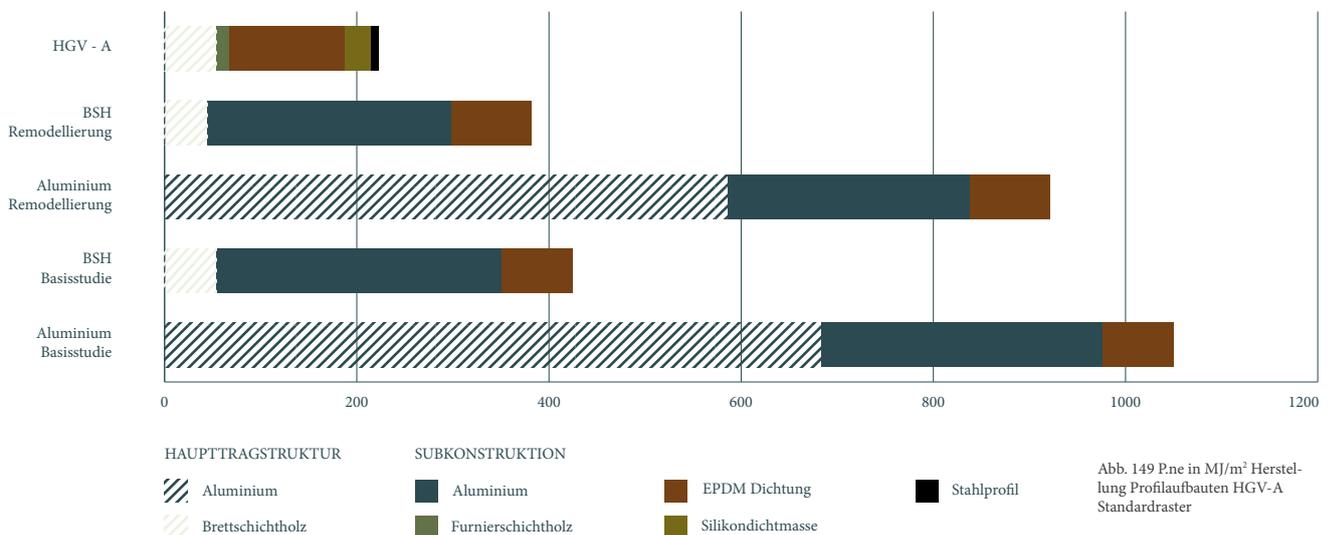


Abb. 150 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen HGV-A

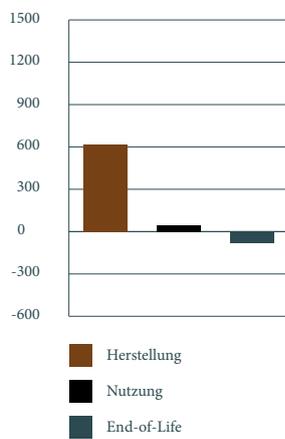


Abb. 151 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung HGV-A

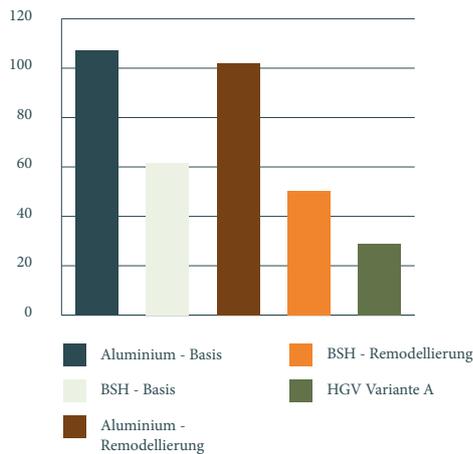
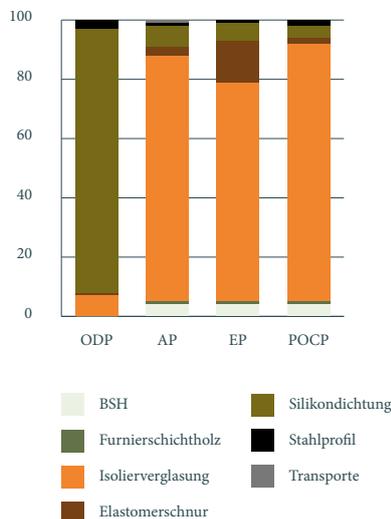


Abb. 152 Indikatoren Lebenszyklus nach % HGV-A



Betrachtet man den Primärenergiebedarf (P<sub>ne</sub>) über die beiden hier relevanten Lebensphasen, wird deutlich, dass das Substitutionsverfahren quantitativ aber auch prozentual geringere Gutschriften vorsieht, als durch das Recyclingpotenzial von Aluminium erreicht werden können. Zusammenfassend beträgt die Einsparung über den gesamten Zyklus dadurch 30%.

Die Analyse der in der Herstellungsphase ausgestoßenen CO<sub>2</sub>-äquivalenten Gase unterstreicht die ökologische Sinnhaftigkeit der Holz-Glas-Verbundfassade weiter. Der Beitrag zur troposphärischen Treibhausgaskonzentration beträgt 28.8 kg/m<sup>2</sup>, was einer Verminderung von knapp 72% gegenüber der Aluminiumkonstruktion gleichkommt. Im der Detailbetrachtung emittiert alleine die Isolierverglasung sogar über 30 kg dieser Gase, die Bilanz wird von den Holzkomponenten und ihren CO<sub>2</sub>-Bindungseigenschaften auf den hier erzielten Wert gedrückt.

Drei der vier weiteren Umweltindikatoren zeigen Wertanteile auf, die durch einen Analogieschluss aus der Primärenergienutzung, wie zuvor beschrieben, erklärt werden können. Ein davon abweichendes Bild zeichnet das Ozonabbaupotenzial (ODP). Durch den hohen massenbezogenen Energieaufwand und die im Betrachtungszeitraum zu erwartenden Erneuerungsvorgänge der Silikonverfugung dominiert dieses Material hier. Ein weiterer Erklärungsansatz bezieht sich auf die Synthetisierungsstufen der Herstellung, in der Chlorwasserstoffverbindungen abgestoßen werden, die äußerst schädigend für die Ozonkonzentration sind.

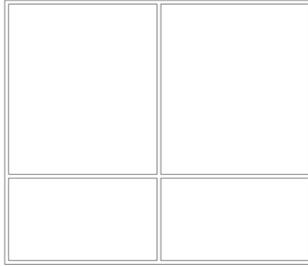
### Kosten im Lebenszyklus

Eine annähernde Beschreibung der Errichtungskosten kann hier über die Daten der BSH-Fassade geschehen. Diese zeigte durchschnittliche Werte von 542 €/m<sup>2</sup>. Durch den Wegfall der Aluminumanteile lägen die Investitionskosten noch etwas niedriger. Die LCC geht in ihrer Methodik jedoch noch weiter: die 'ökologische Amortationsdauer' bezieht die energetischen Aufwendungen und die Umwelteinflüsse mit deren Folgekosten einer Konstruktion in die ökonomische Bewertung mit ein. So würden die geringen Umweltbelastungen, die von den Holz-Glas-Verbundelementen ausgehen, im ganzheitlichen Kontext der LCC eine erhebliche Aufwertung erzielen. Dieser Zusammenhang gilt auch für die weiteren HGV-Varianten.

## Alternative Fassadenraster

Abb. 153 Fassadenraster  
Alternative I  
HGV-A

Achismaß  
Raster = 2.00m  
Laufmeter  
Fassadenprofile =  
22.11m



Bei der Veränderung des Fassadenrasters zu 2.00m verändern sich auch die Primärenergieaufwendungen (P.ne) im Bezug zum Ausgangsraster von 1.35m. Für die Herstellungspahse der Profilkonstruktion ergibt sich nun mehr ein Wert von 190.76 MJ/m<sup>2</sup>. Eine Reduktion von 15.6%.

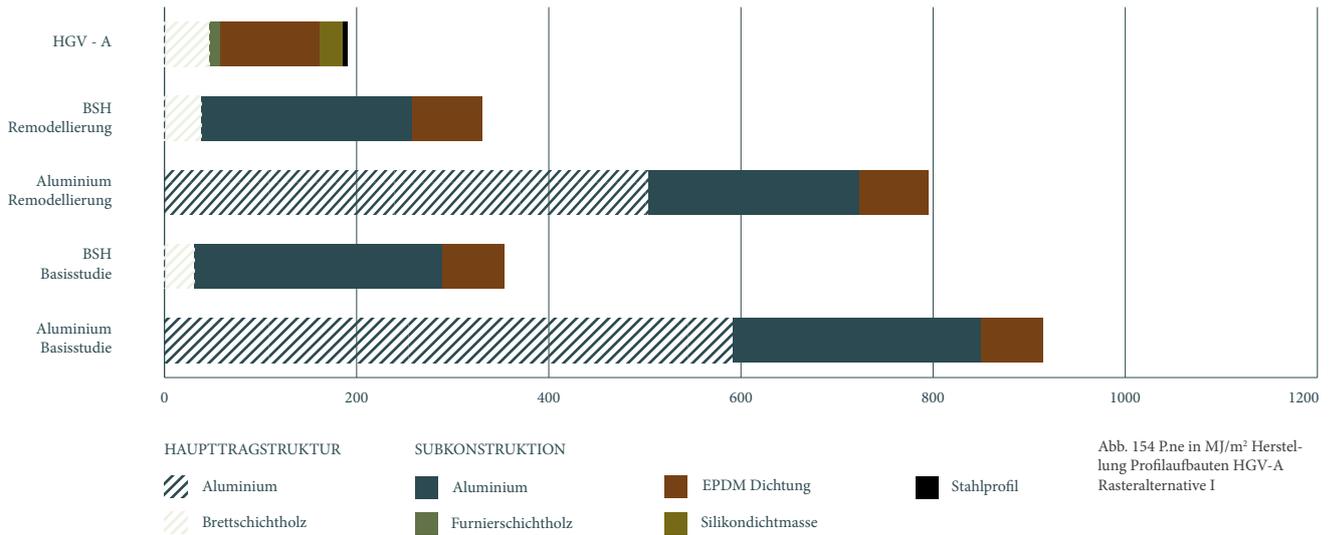
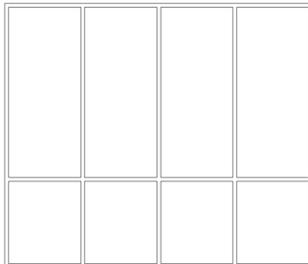
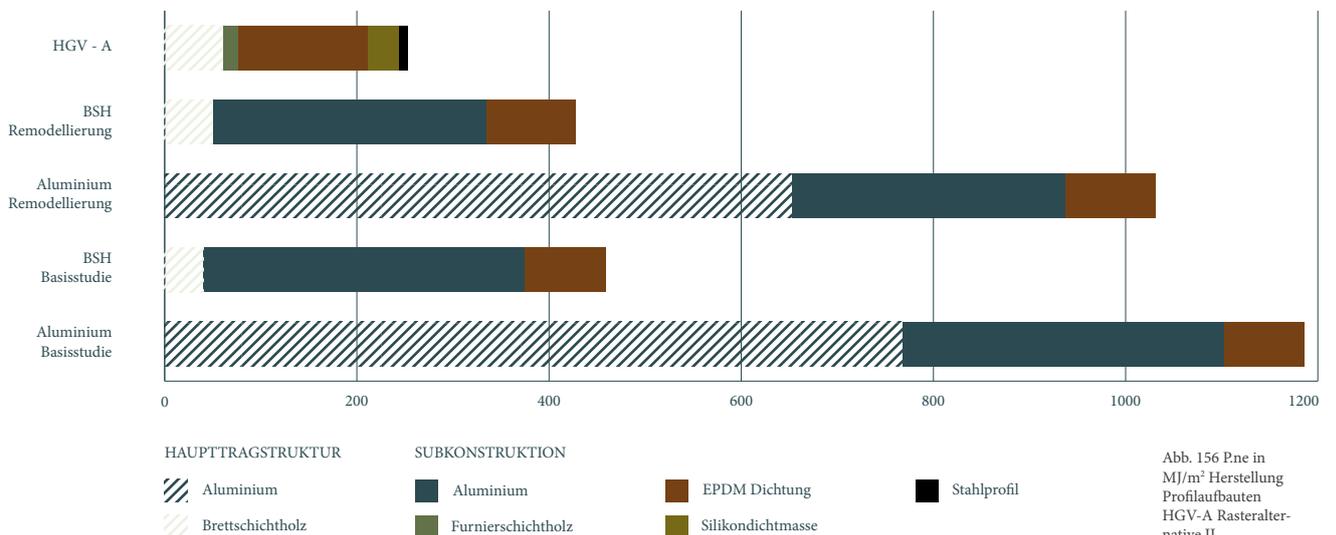


Abb. 155 Fassadenraster  
Alternative II

Achismaß  
Raster = 1.00m  
Laufmeter  
Fassadenprofile =  
28.75m



Die zweite Alternative verengt das Rastermaß auf 1.00m Pfostenabstand. Damit gehen wiederum vergrößerte massenbezogene und arbeitstechnische Anteile der Profile einher. 253.11 MJ/m<sup>2</sup> P.ne würden bei dieser Variante zur Produktion von Haupt- und Substruktur aufgewendet werden.



## 3.2.7 Ökobilanzierung Holz-Glas-Verbund Variante B

*Referenzelement und Profildetail HGV-B*

*Massenerhebung/Primärenergie HGV-B*

*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

*Alternative Fassadenraster*

*Referenzelement und Profildetail*

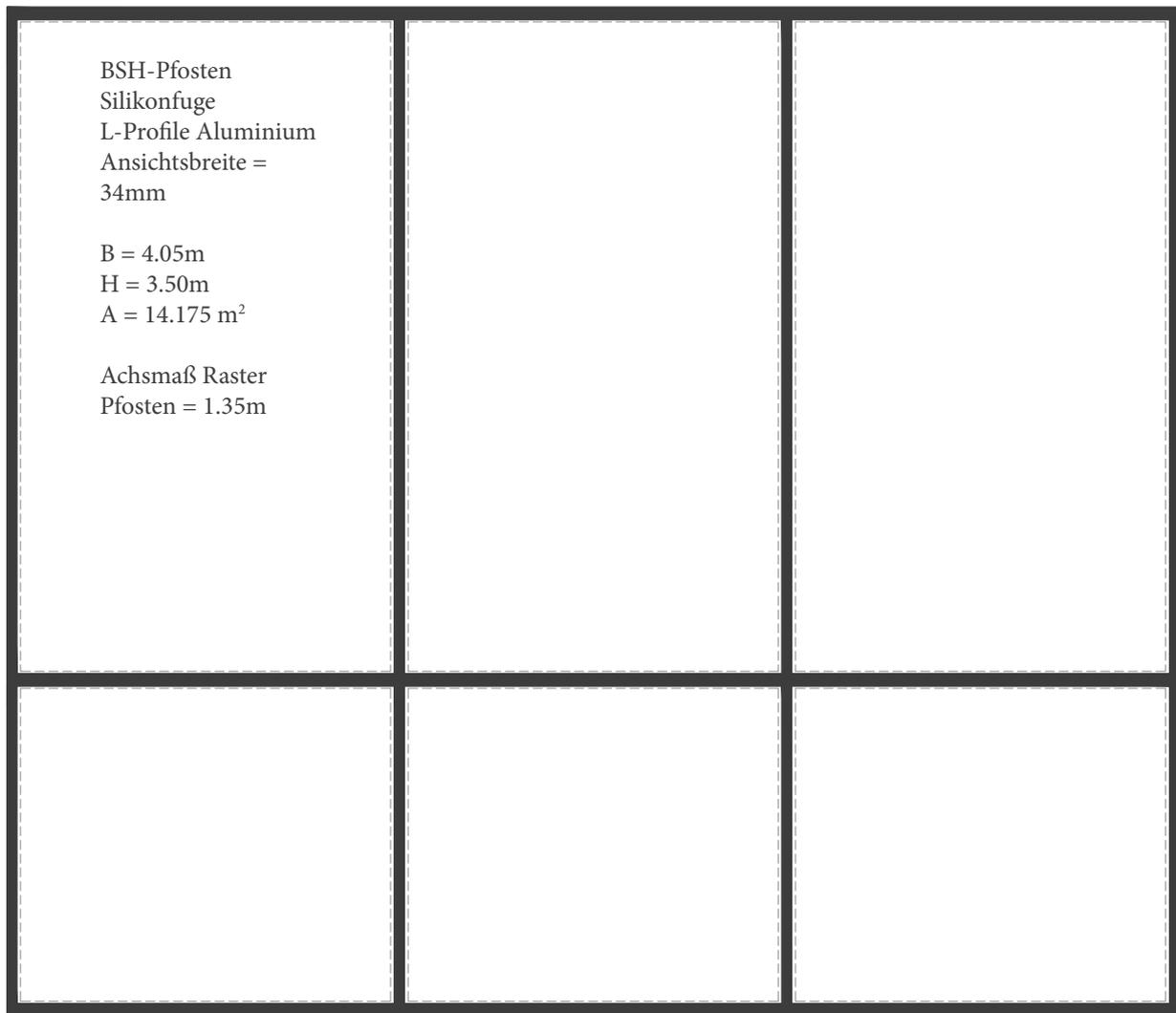


Abb. 157 Referenzelement in Grundriss  
und Ansicht HGV-B Maßstab 1:25

Die mit B und C bezeichneten Varianten der Detaillösung einer Holz-Glas-Verbundfassade beschäftigen sich mit den Fragestellungen der Montage auf der Hauptstruktur und der damit verbundenen Abdichtungsmethode. Weitere Überlegungen beziehen sich auf die Reduzierung der Kunststoffbestandteile sowie die Möglichkeit einer statischen Aktivierung der äußeren Glasscheiben.

Die Variante B zeigt eine größere Tiefe der Koppelleisten. Über zwei Aluminium L-Profile sind die äußeren Glasscheiben angeschlossen, die Rahmen werden mittels Druckleiste auf die Fassadenpfosten montiert. Die äußere Abdichtungsschicht übernimmt eine schmale Silikonfuge.

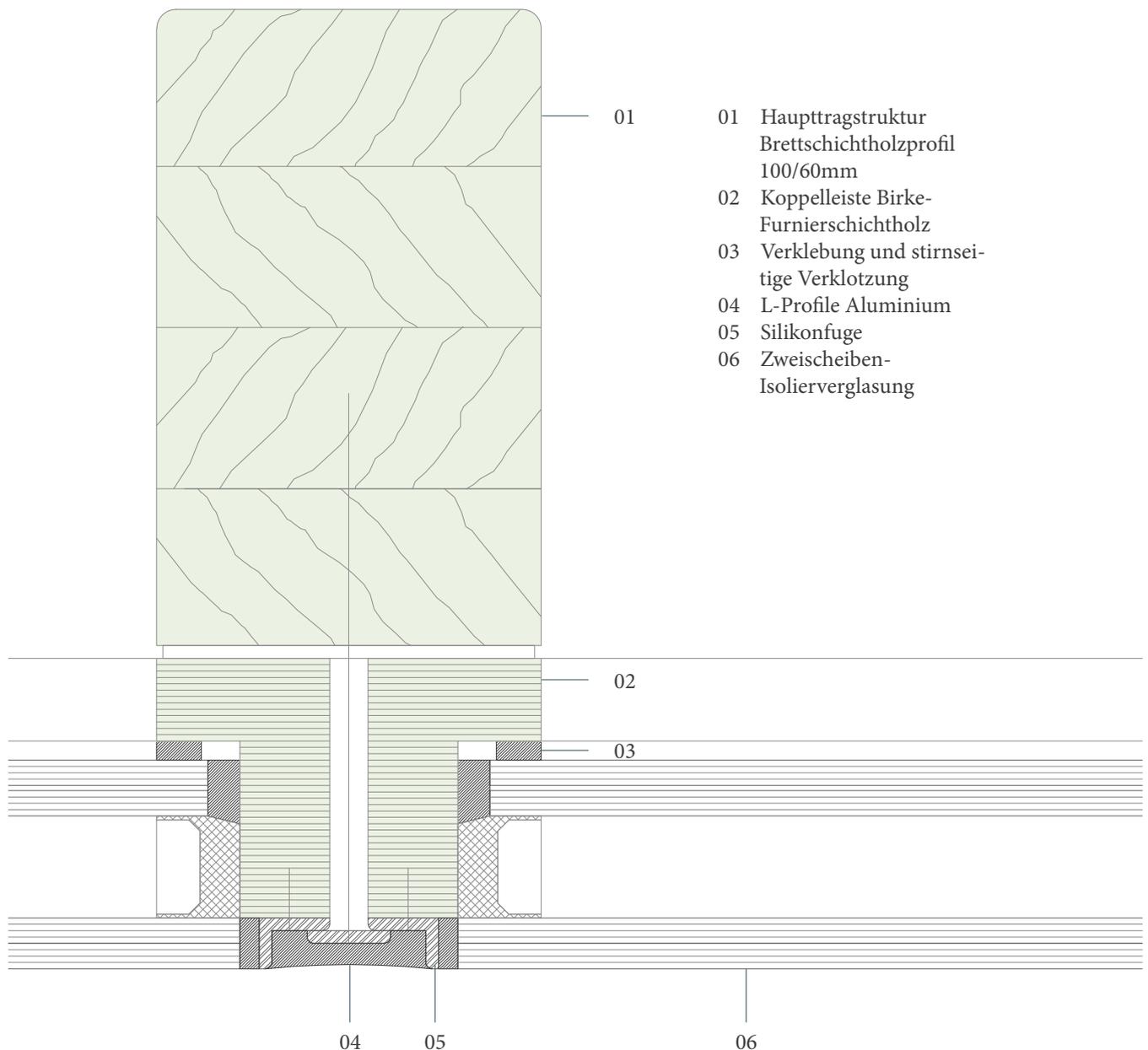


Abb. 158 Grundriss Profildetail HGV-B  
Maßstab 1:1

# Massenerhebung/Primärenergie HGV-B

Material	Faktor	Einheit	P.ne [MJ/kg] / [MJ/m <sup>2</sup> ] Herstellung	Nutzungsdauer [a]	Herstellung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Nutzung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	End-of-Life P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Total P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]
Aluminium	0.44	[kg]	129.0	50	56.8	0.0	-34.3	22.5
Brettschichtholz (BSH)	5.56	[kg]	9.7	50	53.6	0.0	-49.7	3.96
Furnierschichtholz	0.87	[kg]	19.9	50	17.2	0.0	-7.77	9.44
Isolierverglasung	0.92	[m <sup>2</sup> ]	452.6	30	395.0	0.0	3.61	399.0
Silikondichtmasse	0.19	[kg]	133.8	12	25.7	42.2	-4.56	63.3
Stahlprofil	0.27	[kg]	29.1	50	7.85	0.0	-2.11	5.74
HGV-Fassade Typ B gesamt	25.46	[kg]	21.8	50	556.15	42.2	-94.83	503.94

Tab.8 Massenerhebung HGV-Fassade Variante B

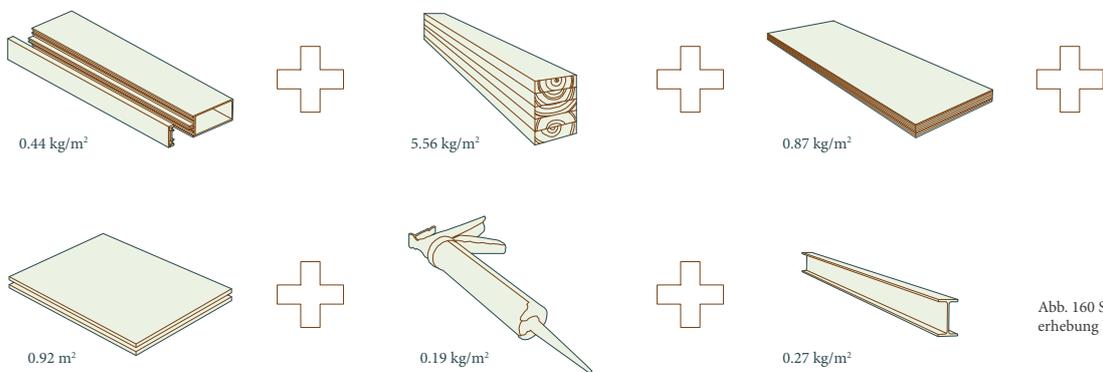
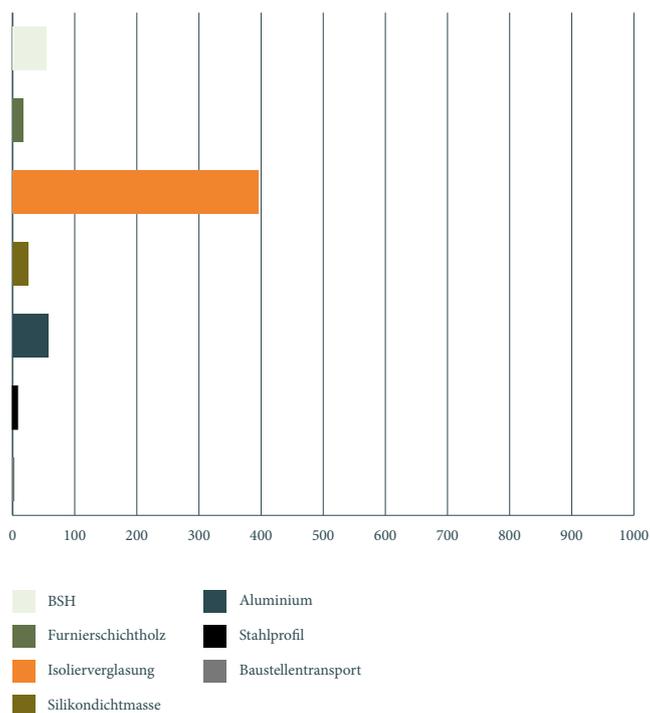


Abb. 160 Skizze Massenerhebung HGV-B

Abb. 159 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung HGV-B



## Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Durch die veränderten Stoffanteile an der Referenzeinheit des Fassade verändern sich auch die errechneten Primärenergieaufwendungen (P.ne) in er Herstellung. Der kumulierte Bedarf ergibt 556.15 MJ/m<sup>2</sup> (im Vergleich zu 619.0 MJ/m<sup>2</sup> in Variante A). Diese 10%-igen Einsparungen sind vorrangig der Verkleinerung der Fugentiefe zwischen den Holz-Glas-Verbundrahmen und der entsprechenden Reduzierung von kunststoffbasierten Dichtungsanteilen zuzuschreiben. Die Größe der Glasfläche bleibt unverändert und somit auch die Dimension des Energieaufwandes. Die Stahlprofile zur Unterstützung der Eigenlastabtragung in allen Varianten verursachen keine bemerkenswerten Erhöhungen der umweltrelevanten Parameter der Fassaden.

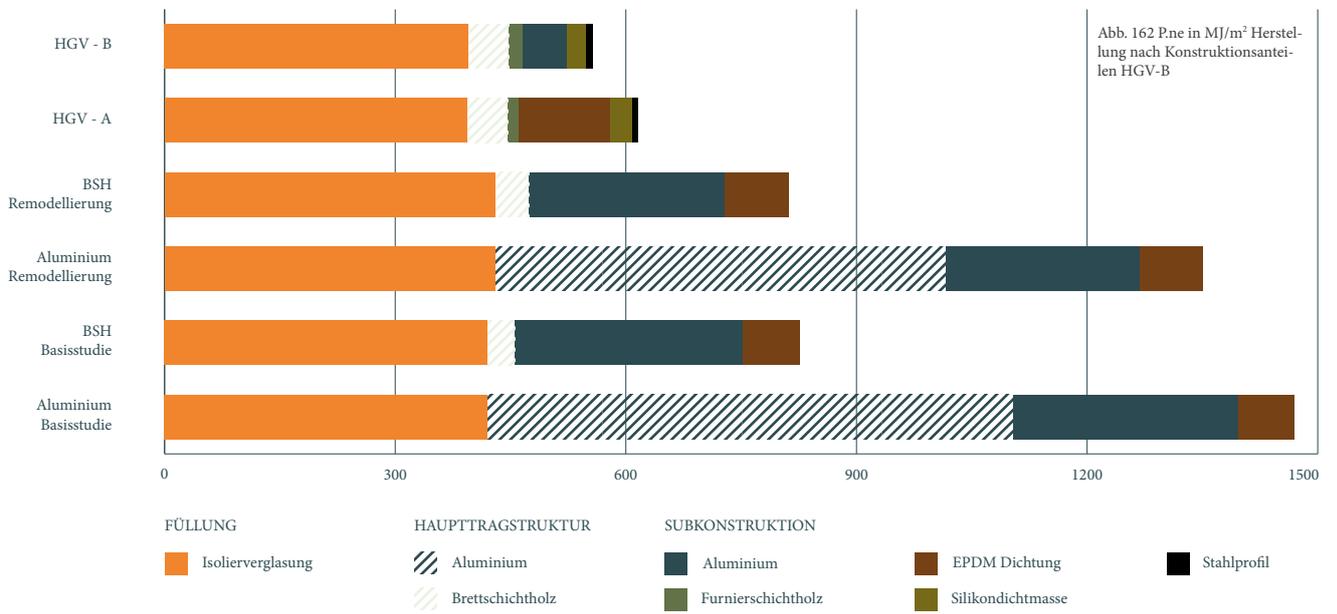
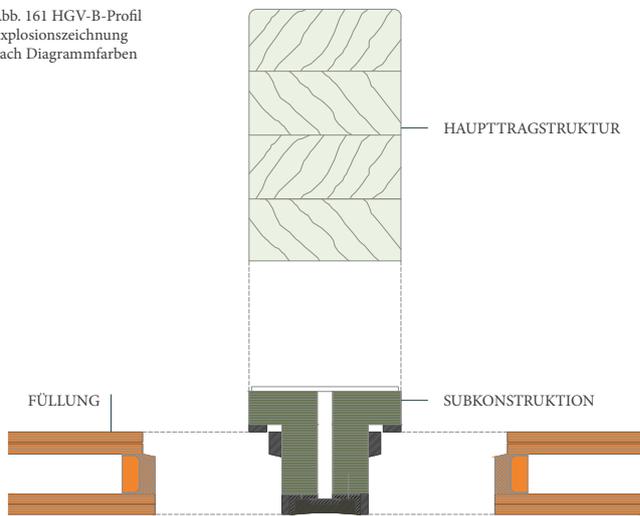


Abb. 161 HGV-B-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben



Diese Zusammenhänge verdeutlicht die nach Konstruktionsteilen getrennte Grafik umso mehr. Der absolute Wert im Bereich der Verglasungsanteile bleibt nahezu stabil, während sich die Aufwendungen der Tragstrukturen innerhalb der Holz-Glas-Verbundelemente deutlich reduziert zeigen. Durch die verringerten Kunststoffanteile in der Abichtung werden gewisse Einsparungen gegenüber der ersten Variante erzielt. Zieht man den Vergleich zur Aluminiumfassade, sieht man, dass der kumulierte Herstellungsaufwand beider bisher untersuchten HGV-Varianten geringer ist als das alleinige Ergebnis der Aluminiumsubkonstruktion der Basisstudie.

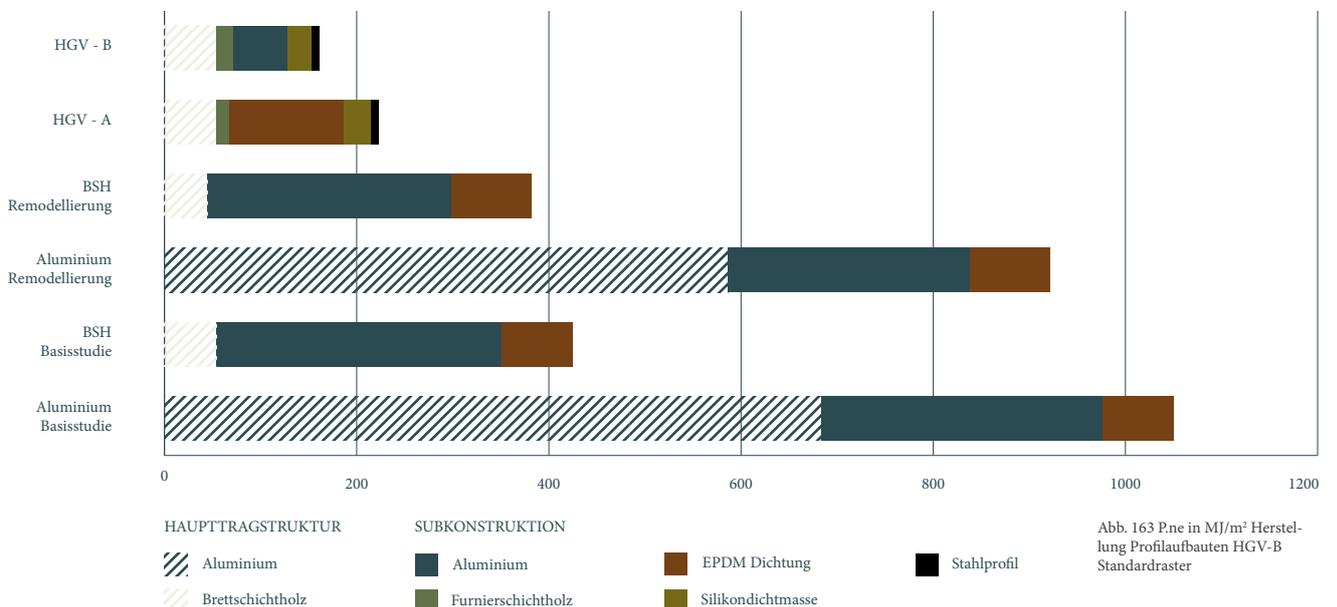


Abb. 164 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen HGV-B

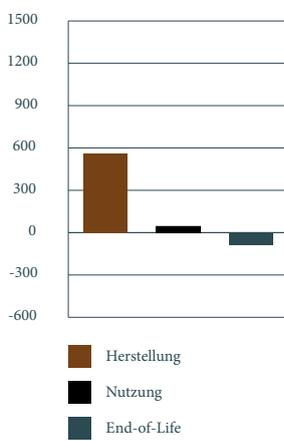


Abb. 165 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung HGV-B

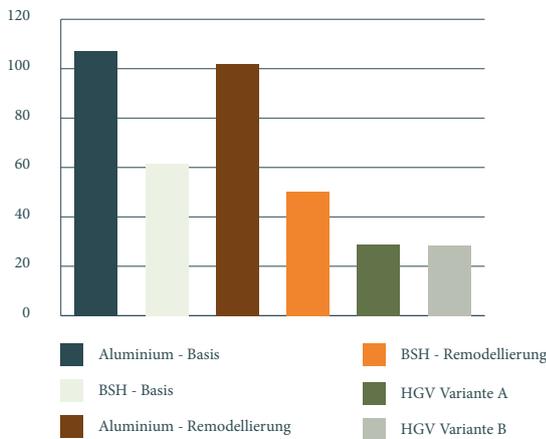
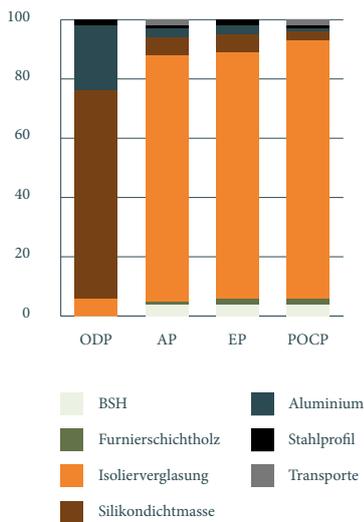


Abb. 166 Indikatoren Lebenszyklus nach % HGV-B



Durch die geringere zu erwartende Lebensdauer von klimatisch beanspruchten Silikonfugen gegenüber Dichtungsprofilen sind die nebenstehend aufgeführten Aufwendungen während der Nutzungsphase zuzuordnen. Der Betrachtungszeitraum von 25 Jahren impliziert zwei Erneuerungsdurchläufe. In Summe über den gesamten Lebenszyklus betrachtet muss mit Arbeit in Höhe von 510.0 MJ/m<sup>2</sup> (inkl. der Transporte) bereitgestellt durch nicht erneuerbare Energieträger gerechnet werden. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Aluminiumfassade reduziert sich der Wert um 328.0 MJ/m<sup>2</sup> und damit um 38.8%.

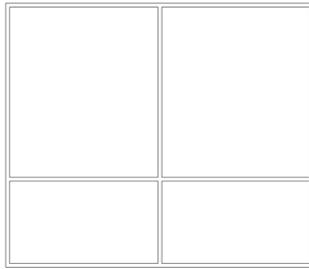
Die Fortschreibung der Grafik bzgl. der Treibhausgasemissionen in der Produktionsphase zeigt sehr geringe Unterschiede zwischen Variante A und B der Holz-Glas-Verbundfassaden. Die erzielten CO<sub>2</sub>-Bindungen in der Wachstumsphase des Holzes erhöhen sich durch die vergrößerten Furnierschichtholzleisten. Der Einsatz der Aluminium L-Profile und die Art der Befestigung gleichen diesen Wert praktisch wieder aus. Weiter ist der Effekt der angenommenen durchschnittlichen Transportdistanzen auf die Gesamtergebnisse der Bilanzen als gering einzuschätzen. Die Abnahme der treibhausrelevanten Gase im Vergleich zum Aluminiumaufbau bleibt bei 72% eingesparter Emissionen.

Wie in der Auswertung der Variante A bereits beschrieben haben die silikonhaltigen Kunststoffe großen Einfluss auf die Verminderung der Ozonkonzentration in der Atmosphäre. Betrachtet man die Wirkungsanteile innerhalb der metallischen Fassade oder auch der BSH-Fassade der Basisstudie, ist jeweils das Aluminium der treibende Faktor. Das zeigt die große Einflussnahme der Silikone und die Berechtigung ihrer ökologischen Berücksichtigung trotz sehr geringer Massenanteile. Der Vergleich des Versauerungspotenzials (0.197 zu 0.265 kg SO<sub>2</sub> eq), des Eutrophierungspotenzials (0.013 zu 0.018 kg PO<sub>4</sub> eq) und des Sommersmogpotenzials (0.029 zu 0.033 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq) zeigt geringere Unterschiede, da hier die Verglasung den Haupteffekt aufzeigt.

## Alternative Fassadenraster

Abb. 167 Fassadenraster Alternative I HGV-B

Achsmaß  
Raster = 2.00m  
Laufmeter  
Fassadenprofile = 22.11m



Der Anteil der Laufmeter der Profile vermindert sich bei der Rasteralternative I auf 22.11m. Die Energieeinsparungen verhalten sich proportional dazu. Bei dieser Fassadenvariante wären die Aufwendungen um 85% geringer als bei der Ausführung mit einer Aluminiumkonstruktion.

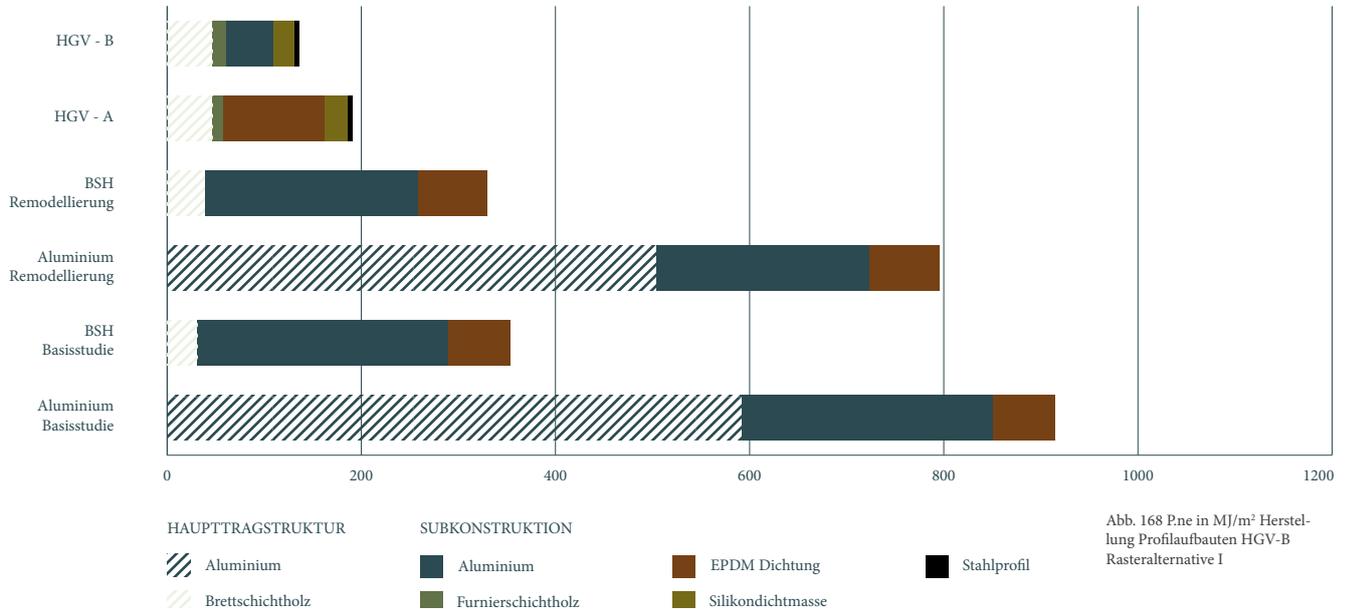
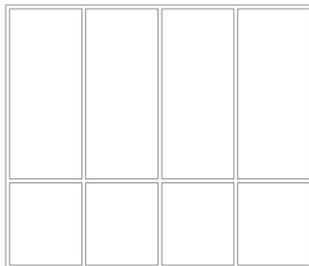
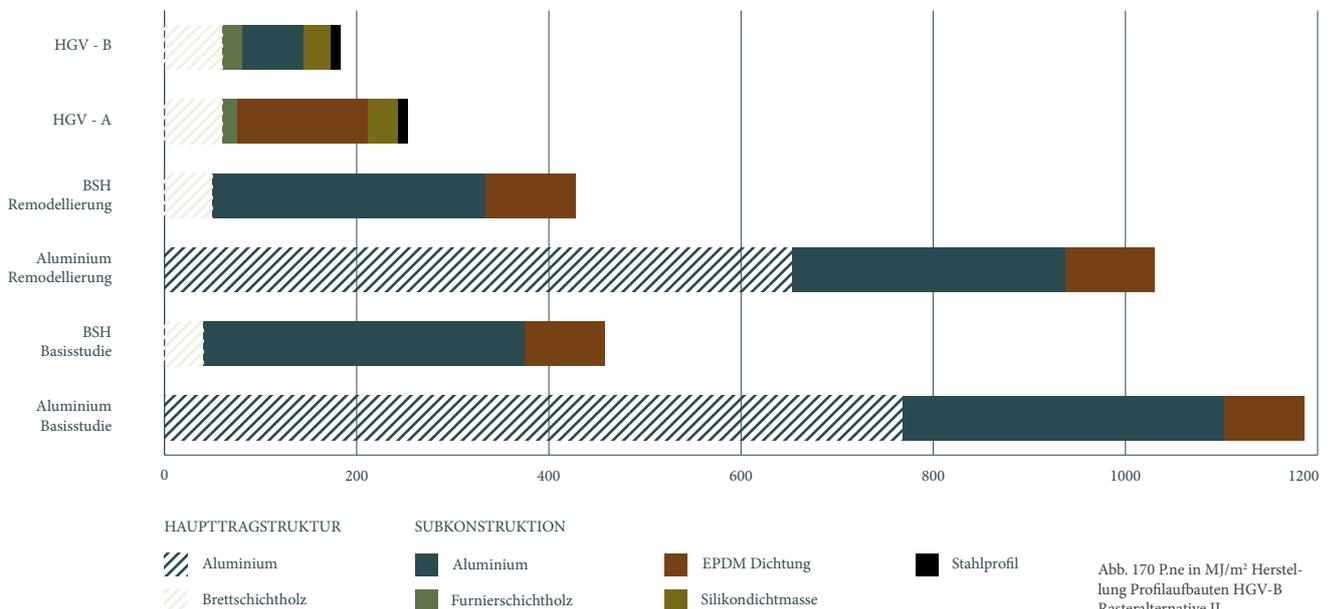


Abb. 169 Fassadenraster Alternative II

Achsmaß  
Raster = 1.00m  
Laufmeter  
Fassadenprofile = 28.75m



Ebenso stellen sich die Verhältnisse bei einer Fassade mit einem Pfostenraster von 1.00m dar. Die Herstellungsenergie (P<sub>ne</sub>) von 183.34 MJ/m<sup>2</sup> unterschreitet sogar den Aufwand für die Aluminiumklemmvorrichtungen. Die Konstruktion der L-Profile zeigen den größten Anteil innerhalb des HGV-B-Aufbaus.



## 3.2.8 Ökobilanzierung Holz-Glas-Verbund Variante C

*Referenzelement und Profildetail HGV-C*

*Massenerhebung/Primärenergie HGV-C*

*Sachbilanz und Wirkungsabschätzung*

*Alternative Fassadenraster*

*Referenzelement und Profildetail*

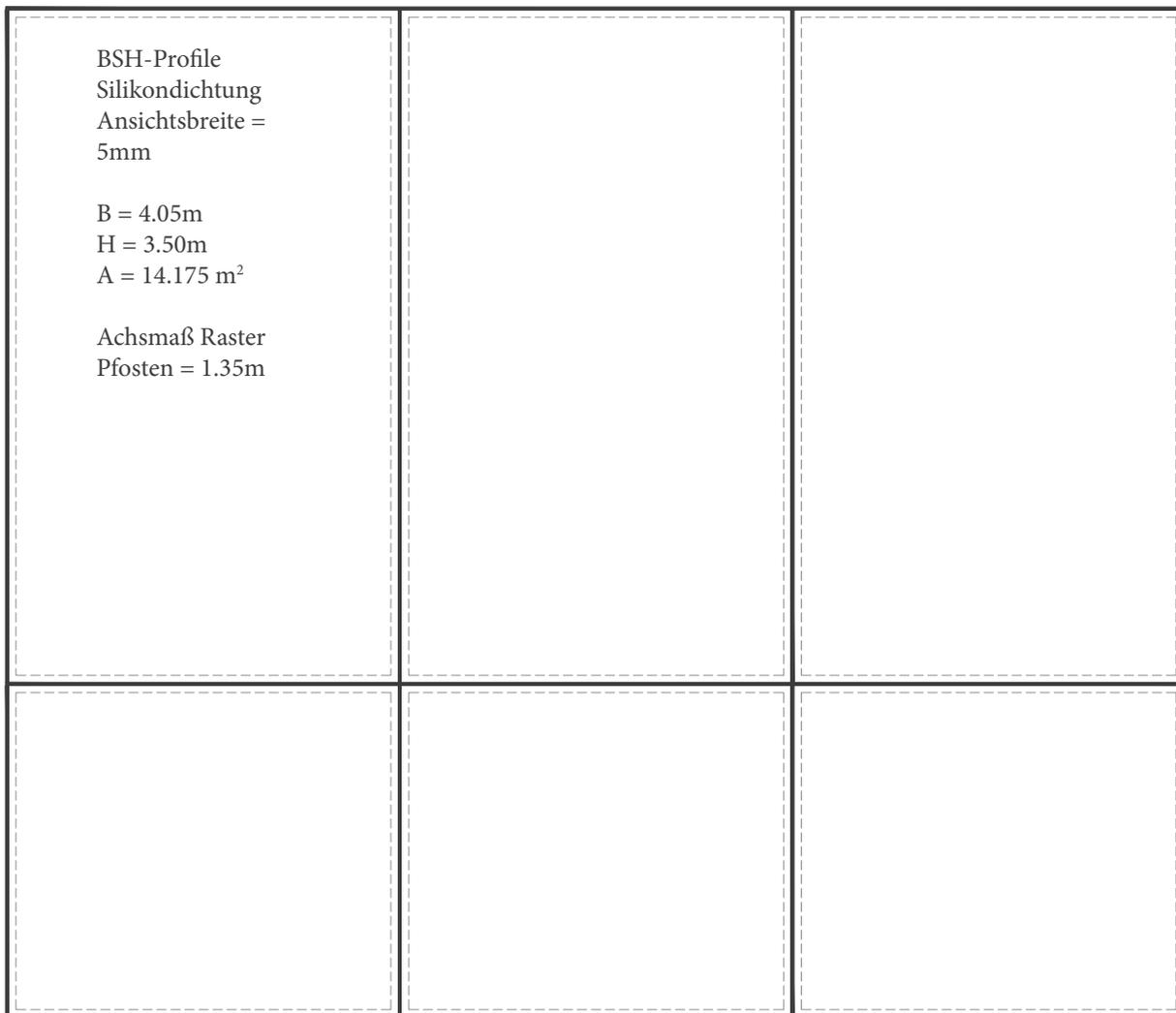


Abb. 171 Referenzelement in Grundriss  
und Ansicht HGV-C Maßstab 1:25

Die Variante C der Holz-Glas-Verbundfassaden beinhaltet die Möglichkeit, die Koppelleiste in die Haupttragstruktur einzuhängen und somit auf Anpressvorrichtungen zu verzichten. Dies ermöglicht eine Versmälerung der Ansichtsfuge mittels Glasfalz, da keine außenseitige Montagevorgänge nötig sind. Dadurch ist auch kein Durchdringen etwaiger Dichtungsschichten zu erwarten. Die statischen Möglichkeiten der Aktivierung des Aussteifungspotenzials der äußeren Scheibe sind quantitativ noch nicht untersucht worden. Die Abdichtung wird hier mittels eines Klemmprofils angenommen.

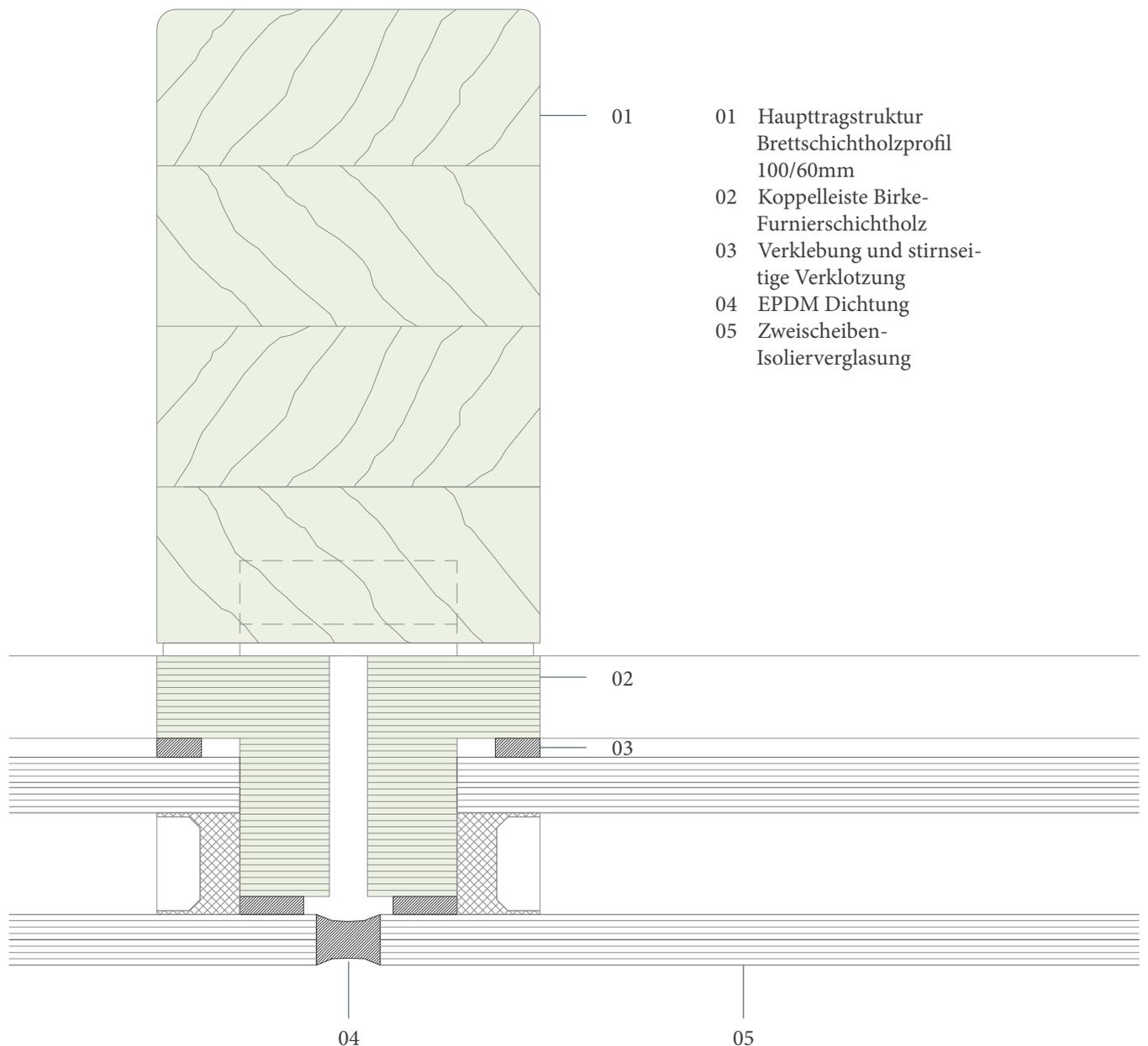


Abb. 172 Grundriss Profildetail HGV-C  
Maßstab 1:1

## Massenerhebung/Primärenergie HGV-C

Material	Faktor	Einheit	P.ne [MJ/kg] / [MJ/m <sup>2</sup> ] / Herstellung	Nutzungs- dauer [a]	Herstellung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Nutzung P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	End-of-Life P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]	Total P.ne [MJ/m <sup>2</sup> ]
Aluminium	0.0	[kg]	129.0	50	0.0	0.0	0.0	0.0
Brettschichtholz (BSH)	5.56	[kg]	9.7	50	53.6	0.0	-49.7	3.96
Furnierschichtholz	0.87	[kg]	19.9	50	17.2	0.0	-7.77	9.44
Isolierverglasung	0.99	[m <sup>2</sup> ]	452.6	30	425.0	0.0	3.88	429.0
EPDM Dichtung	0.19	[kg]	118.6	25	22.2	0.0	-4.56	17.6
Stahlprofil	0.27	[kg]	29.1	50	7.85	0.0	-2.11	5.74
HGV-Fassade Typ C gesamt	26.42	[kg]	19.9	50	525.85	0.0	-60.26	465.74

Tab.9 Massenerhebung  
HGV-Fassade Variante C

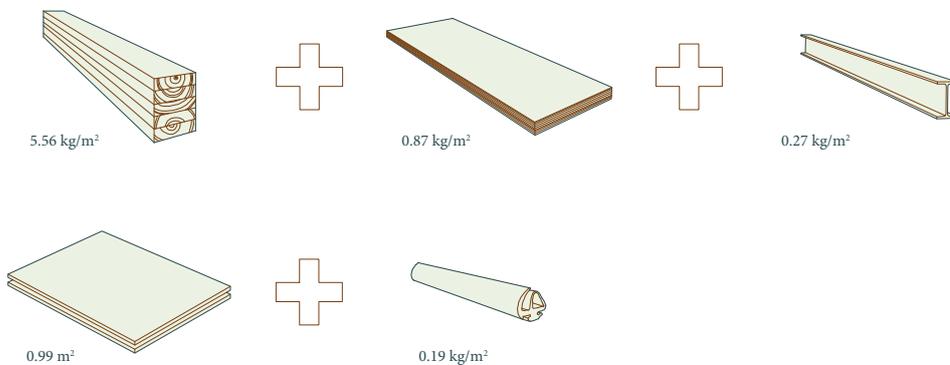
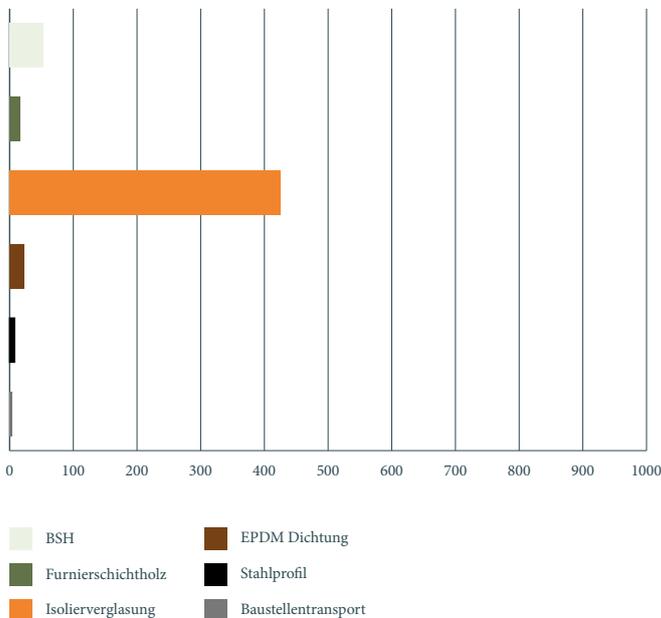


Abb. 174 Skizze Massenerhebung HGV-C

Abb. 173 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung  
HGV-C



## Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Durch die Verkleinerung der Fuge, den Verzicht auf Silikondichtstoffe und den Wegfall der Aluminiumbestandteile reduziert sich der Primärenergiebedarf (P.ne) nochmals geringfügig. Die Differenz von 30 MJ/m<sup>2</sup> fällt bei der isolierten Betrachtung der Herstellungsphase nicht signifikant ins Gewicht, dies verursacht die entsprechend vergrößerte Verglasungsfläche.

Die Reduktion der stofflichen Anteile arbeitsintensiver Materialien wie des Aluminiums und der Silikone führen dazu, dass die Pfosten- und Riegelprofile aus Brettschichtholz mit 53.6 MJ/m<sup>2</sup> den zweitgrößten Effekt im Bereich der Energieaufwendungen aufzeigen. Der kumulierte Arbeitsaufwand für die materialbezogene Auswertung liegt mit 525.85 MJ/m<sup>2</sup> deutlich unter den Ergebnissen der Aluminiumkonstruktion. Diese weisen 1350 MJ/m<sup>2</sup> P.ne in der Produktion auf, dies ist gleichbedeutend mit einer Verringerung von 61%.

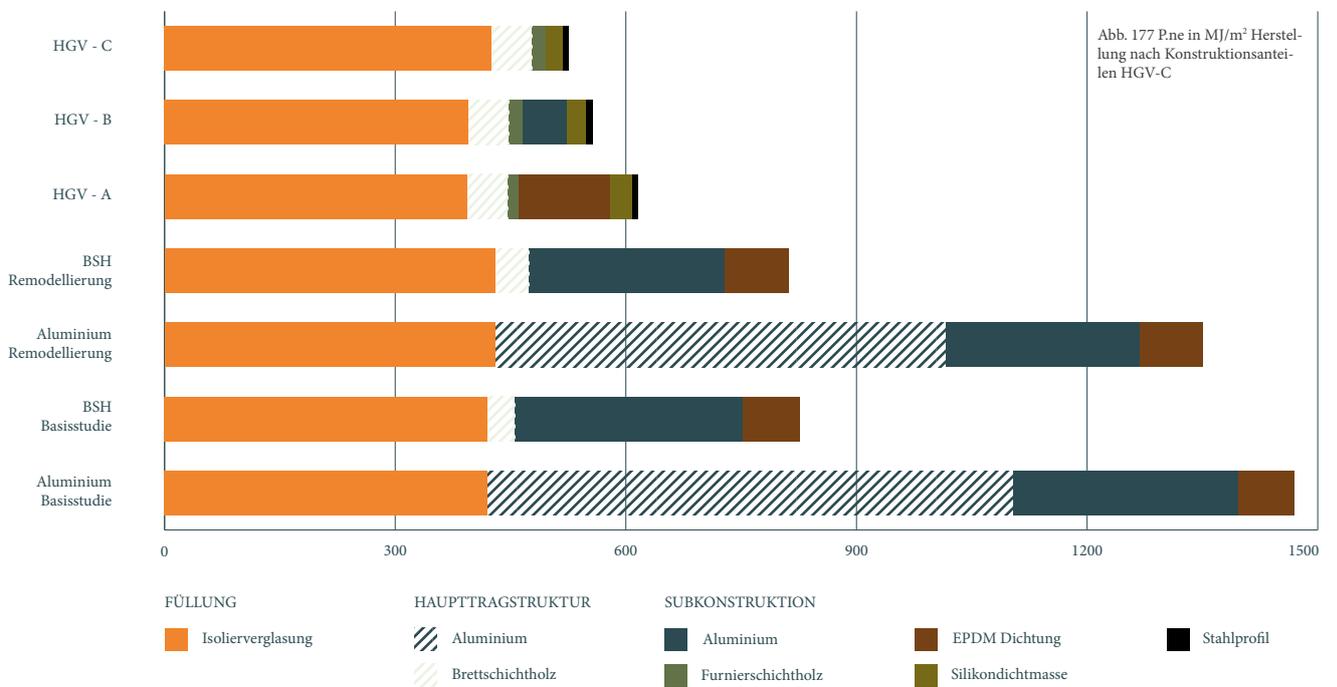
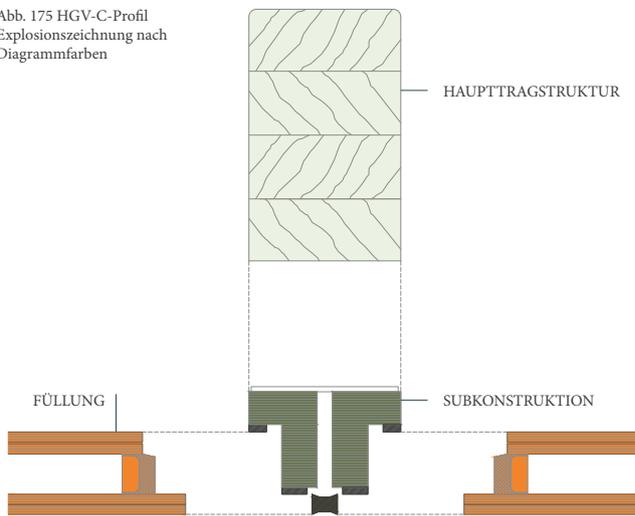


Abb. 175 HG-V-C-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben



Noch größer werden diese bei der isolierten Betrachtung. Die Glasfläche erhöht sich durch die Falz etwas, die Ergebnisse der Profilkonstruktion sind allerdings die absolut geringsten. Wie in der Gegenüberstellung deutlich wird, sind die Differenzen innerhalb der HG-V-Konstruktionsansätze eher gering, aber dennoch erwähnenswert. Der Verzicht dieser Variante auf Aluminium- und Silikonanteile verbessert die ökologische Bilanz weiter. Der P.ne-Bedarf beläuft sich auf 101.0 MJ/m<sup>2</sup>. Gegenüber der Aluminiumfassade eine Einsparung von beachtlichen 819 MJ/m<sup>2</sup>, oder ein Verhältnis von 1:9.

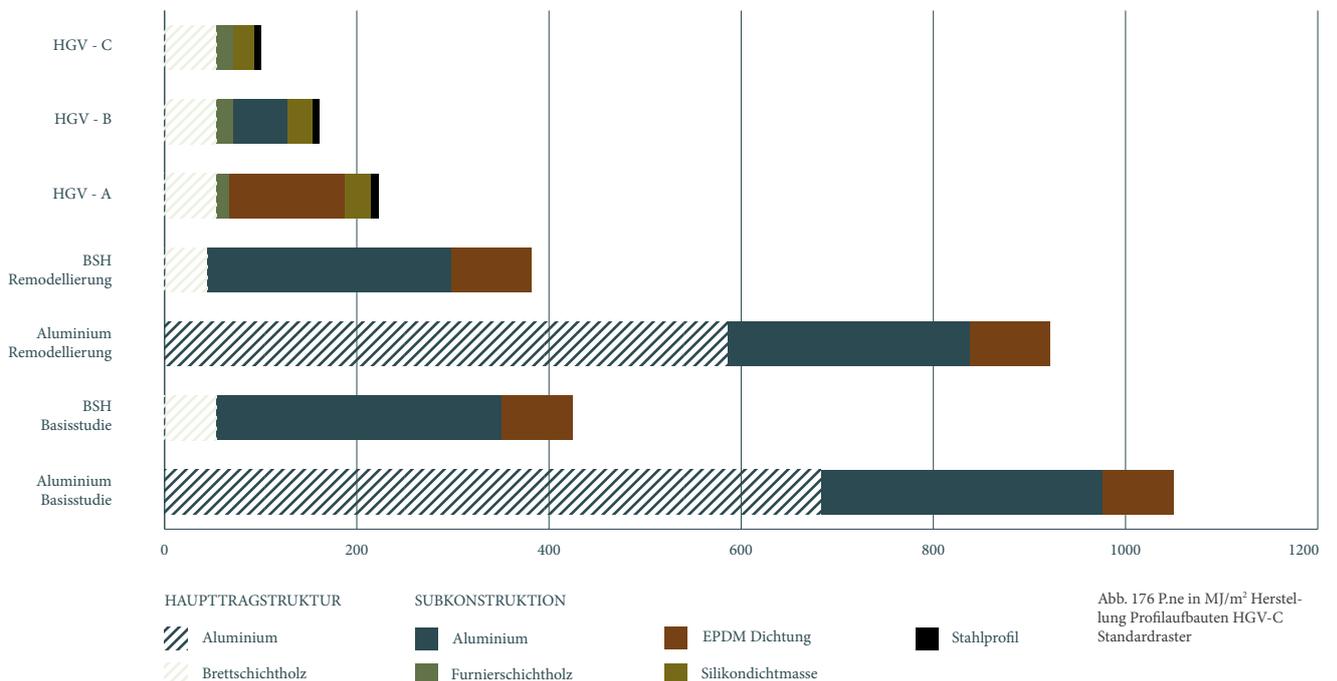


Abb. 178 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen HGV-C

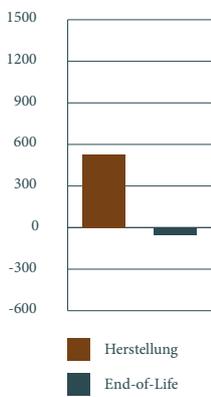


Abb. 179 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung HGV-C

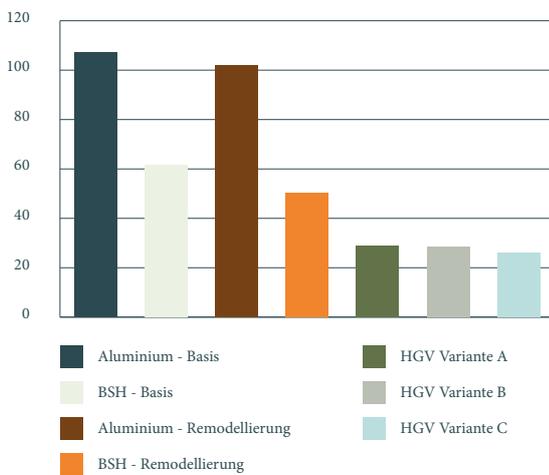
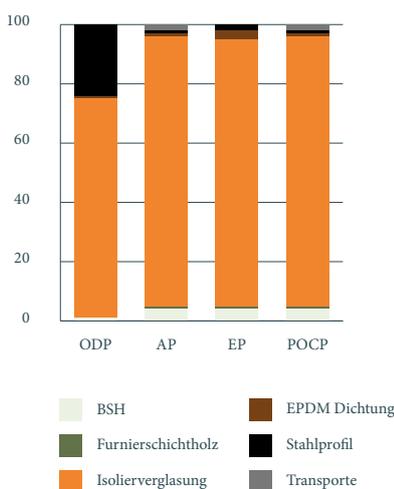


Abb. 180 Indikatoren Lebenszyklus nach % HGV-C



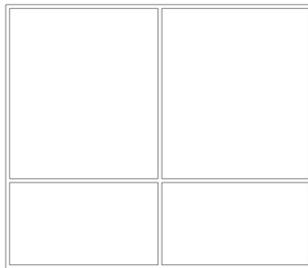
Interessant ist die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus. Bei dem durch die Ausgangsstudie vorgegebenen betrachteten Zeitraum fallen hier keine weiteren Aufwendungen in der Nutzungsphase an. Die erwartete Lebensdauer der Dichtungsprofile liegt über der der der Silikonabdichtungen. Bei der veranschlagten Art und Weise der Nachnutzung der vorhandenen Materialien erzielt die Konstruktionsvariante HGV-C Substitutionen im Wert von 60.2 MJ/m<sup>2</sup>. Aufgerechnet und unter Berücksichtigung aller relevanten Transporte ergibt sich so ein Ergebnis von 472.0 MJ/m<sup>2</sup> Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Energien. Der Vergleichswert der Aluminiumfassade beträgt 838.0 MJ/m<sup>2</sup>, die Einsparung beträgt hier demnach 43.7% über den gesamten Lebenszeitraum.

Die errechneten GWP-Daten der drei Varianten der Holz-Glas-Verbundfassaden befinden sich in sehr vergleichbaren Dimensionen. Die hier dargestellte kleine Reduzierung lässt sich wiederum mit dem eingesparten Herstellungsaufwand unterlegen. Der absolute Wert der Detaillösung C beträgt 26.1 kg CO<sub>2</sub> eq / m<sup>2</sup>.

Wie bereits auf der vorherigen Seite erläutert führen die Veränderungen der gewählten Stoffanteile zur weiteren Verschiebung aller erhobenen Umweltindikatoren auf die Lebenszyklusbetrachtung der Isolierverglasung. Der Wegfall der Silikone und der Verzicht auf Aluminiumprofile zeichnet somit auch im Bereich der ozonschädigenden Emissionen ein verändertes Bild. Die bis dato ökologisch kaum relevanten Stahlaufleger verursachen mehr als 20% der hier verantwortlichen Ausstöße. Der Wert liegt mit 0.0316 E-6 kg R11 eq / m<sup>2</sup> bei lediglich 2.8% des Vergleichswert der Aluminiumlösung (1.14 E-6 kg R11 eq / m<sup>2</sup>). Absolut gesehen sind die Umwelteinwirkungen der HGV-Fassaden sehr gering, die nebenstehende Grafik impliziert dennoch das Bedürfnis alternativer Nachnutzungsszenarien für die Isolierverglasung jeder Fassade.

Abb. 181 Fassade raster Alternative I HGV-C

Achismaß  
Raster = 2.00m  
Laufmeter  
Fassadeprofile =  
22.11m



## Alternative Fassadenraster

Die Einsparungen des verringerten Massenanteils bei der Erweiterung des Rasters innerhalb der HGV-C-Variante betragen 16.13 MJ/m<sup>2</sup>.

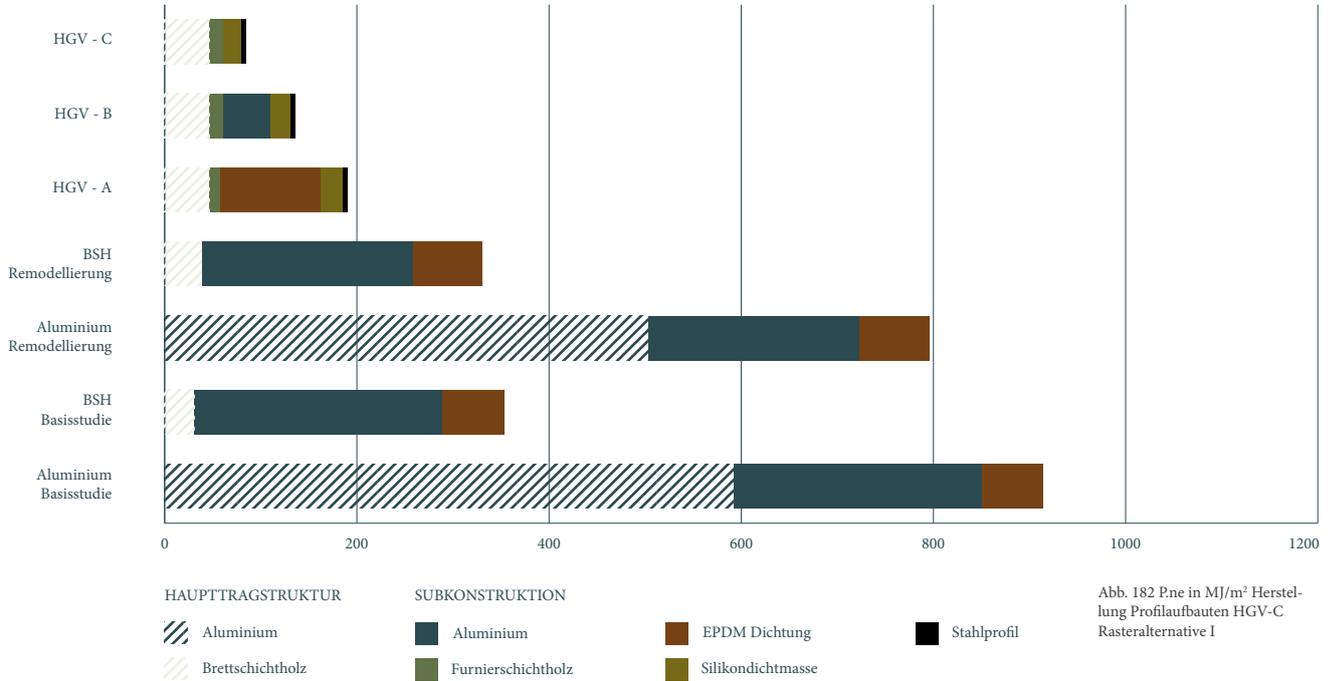
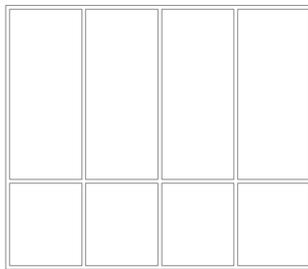


Abb. 182 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-C Rasteralternative I

Abb. 183 Fassade raster Alternative II HGV-C

Achismaß  
Raster = 1.00m  
Laufmeter  
Fassadeprofile =  
28.75m



Dem gegenüber erhöhen sich die Werte bei der Verengung des Rasters auf 116.23 MJ/m<sup>2</sup>. All diese Vergleichsdarstellungen zeigen ein enormes Einsparpotenzial der Holz-Glas-Verbundkonstruktion im Energiebedarf (P<sub>ne</sub>) der Errichtungsphase gegenüber einer alternativen Ausführung in Aluminium.

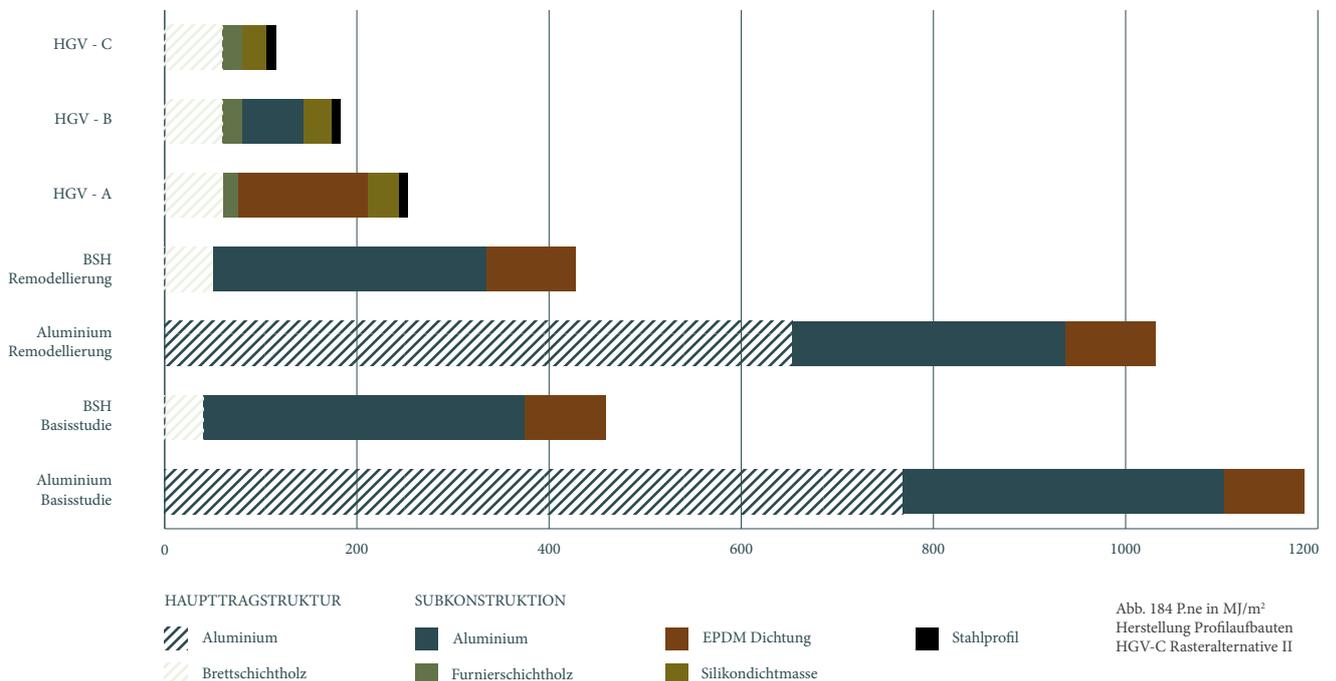


Abb. 184 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-C Rasteralternative II

## 3.2.9 Auswertung

Abb. 185 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Vergleich

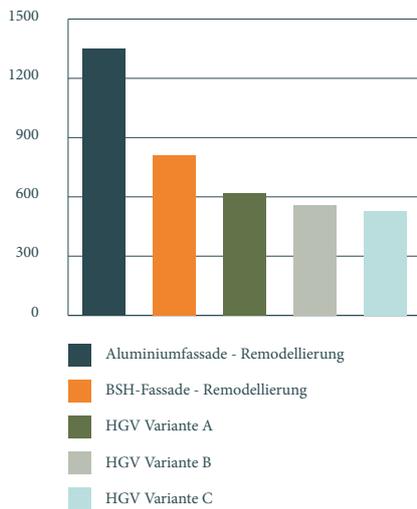


Abb. 186 P<sub>en</sub> in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Vergleich

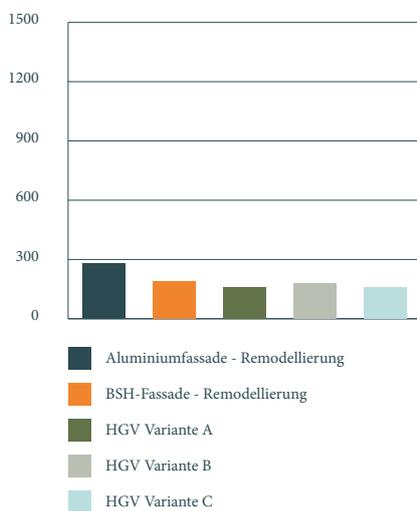
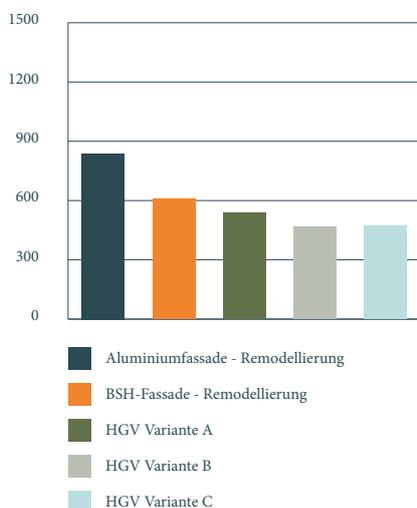


Abb. 187 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich



## Sachbilanz - Energieaufwand

Zusammenfassend werden nun die Kernaussagen, die sich aus der vergleichenden Ökobilanzierung ableiten lassen, grafisch aufbereitet und textlich analysiert.

Stellt man den schwerpunktmäßig betrachteten Primärenergiebedarf fossiler Brennstoffe in der Herstellung gegenüber, wird nochmals ersichtlich, dass eine Fassade mit großem Holzanteil (in der Haupttragstruktur sowie Teilen der Unterkonstruktion) einen deutlich geringeren Aufwand bedeutet. Die maximale Differenz von 824.0 MJ/m<sup>2</sup> (bezogen auf Variante C) zwischen den Konstruktionsarten ist auf die vielschichtigen und stromintensiven Verfahren der Aluminiumproduktion zurückzuführen. Der Einfluss von projektbezogenen Transportaufwendungen ist sehr gering und wirkt sich auf den Vergleich nicht aus. Die Transporte innerhalb der Materialproduktion sind eher von Bedeutung, da das Rohstoffvorkommen von aluminiumhaltigem Bauxit lokal bedingt, die Möglichkeiten der Forstwirtschaft global betrachtet räumlich unabhängiger sind. Der quantitative Unterschied im Einsatz erneuerbarer Energieträger ist deutlich geringer. Die jeweiligen Anteile in der Herstellung entspringen, wie in Kapitel 3.1 aufgezeigt, dem durchschnittlich errechneten Strommix aus unterschiedlichen Kraftwerkstypen und den eingesetzten Rohstoffen bei thermischen Prozessen.

Bilanziert man den Energieaufwand fossiler Ressourcen über den gesamten Lebenslauf verringert sich die Differenz. Das Substitutionsverfahren schreibt dem Recyclingvorgang die relativ zur Produktion von Primäraluminium eingesparte Energie gut. Dies zeigt zeitgleich die enorme Bedeutung der Betrachtungsweise auf eine Lebenszyklusanalyse. Die Gutschrift impliziert die Annahme, dass Aluminium mit Aluminium ersetzt wird, während diese Arbeit alternative Materialzusammensetzungen untersucht. Beschriebe man einen abgeschlossenen Kreislauf von Gebäudefassaden würde sich wiederum ein anderes Bild abzeichnen, da der Einsatz von

Sekundäraluminium hier aufgrund der alternierenden Legierungsbestandteile sehr gering ist.

### Treibhauspotenzial (GWP)

Wie bereits beschrieben sind die Energiebilanzen und der Ausstoß treibhausrelevanter Gase eng miteinander verknüpft, was die untenstehenden Abbildungen verdeutlichen.

Die Emissionen im Verlaufe der Herstellungskette von Aluminiumfassaden liegen pro Quadratmeter bei 102.0 kg CO<sub>2</sub> eq. Durch die entgegengesetzte Eigenschaft des Holzes CO<sub>2</sub> während der Photosynthese zu binden ergeben die Datengrundlagen bei den Holz-Glas-Verbundkonstruktionen Werte von 26.1 - 28.8 kg CO<sub>2</sub> eq / m<sup>2</sup>. Diese liegen demnach im Vergleich bis zu 74% niedriger.

Erweitert man die Sichtweise auf den gesamten Lebenszyklus erkennt man in zwei der drei Varianten in einem Zeitraum von 25 Jahren gewisse Zuwächse durch die Austauschprozesse der Abichtungsstoffe. Dem kann durch sinnvolle und langlebige konstruktive Lösungen begegnet werden. Die Skizzierung der Nachnutzung hat auch hier erheblichen Einfluss auf die Gesamtbilanz. Durch das große

Potenzial von Metallen wiederverwendet werden zu können, werden bei der von der Ausgangsstudie veranschlagten Sammelrate 41.1 kg klimaschädlicher Gase wieder eingespart, die bilanzierten Zahlen nähern sich einander an. Der Zusammenhang zwischen Aluminiumbeschichtungen, Sammelraten und dem Recyclingpotenzial werden in Kapitel 3.3 weiter vertieft.

Das Diagramm zeigt auch den Effekt der thermischen Verwertung von Holzprodukten. Substitutionen erhält die Verbrennung durch die relativ dazu eingesparten fossilen Energieträger, das in der Struktur gebundene Kohlendioxid wird dadurch aber der Atmosphäre zurückgegeben, was einen weiteren Anstieg der Gesamtbilanz zufolge hat. Dieses Szenario fließt als etabliertes End-of-Life-Verfahren in die ökologische Betrachtung ein. Gleichzeitig verdeutlicht es den Bedarf nach alternativen Konzepten wie etwa der stofflichen Verwertung zu Holzwerkstoffen. Dieser Weg ist durchaus im Holzkreislauf üblich, wird quantitativ aber nicht bewertet. Dieser Gedankenansatz wird in der Folge nochmals aufgegriffen und im Abschnitt über die Szenarien in der Lebenszyklusanalyse bewertet.

Abb. 188 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung Vergleich

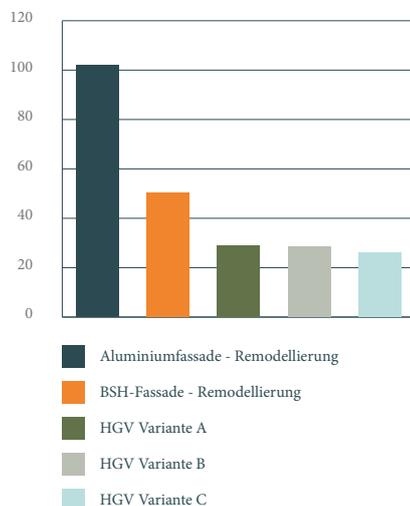
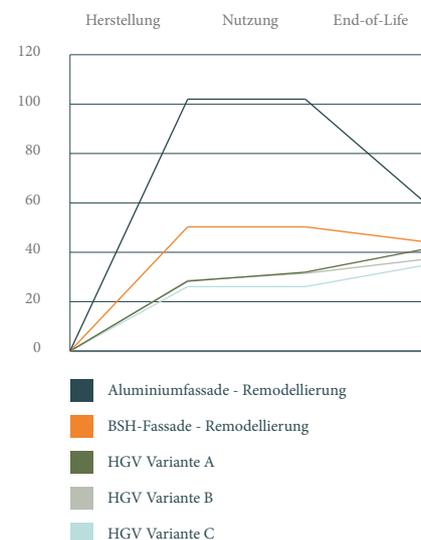


Abb. 189 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Lebenszyklus Vergleich



## Wirkungsabschätzung

Die vier Grafiken stellen die weiteren Umweltindikatoren der unterschiedlichen Fassadenkonstruktionen gegenüber. Diese Vergleiche zeigen große Differenzen in ihren Verhältnismäßigkeiten, die hier erläutert werden.

Die stromintensive Aluminiumproduktion zeigt in Relation zur eingesetzten Masse die größten Emissionen ozonreaktiver Gase. Die vergleichbaren Dimensionen des ODP zwischen der Brettschichtholzausführung der Basisstudie und den Varianten A und B der Holz-Glas-Verbundfassaden ergibt sich durch den stofflichen Einsatz von Aluminium

auf der einen und Silikonem auf der anderen Seite. Der Verzicht auf silikonhaltige Abdichtungen im Detailansatz C verhindert Auswirkungen auf die Ozonschicht fast zur Gänze.

Ausstoße von Schwefeloxiden, Stickoxiden und VOC (flüchtigen organischen Verbindungen) beeinflussen den pH-Wert von Niederschlägen (AP) und die regionalbedingten Nährstoffeinträge (EP) und tragen zur Bildung bodennahen Ozons (POCP) bei. Da innerhalb aller verglichenen Konstruktionen diese Stoffe mit großer Mehrheit bei den thermischen Aufwendungen in der Produktionskette der Verbundgläser emittiert werden, fallen die Unterschiede im Lebenszyklus geringer aus.

Abb. 190 ODP in kg R11 eq/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich

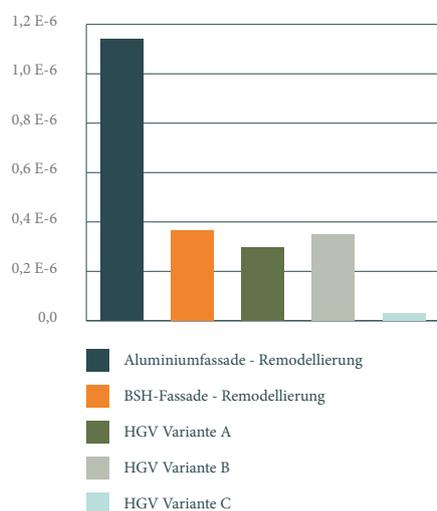


Abb. 191 AP in kg SO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich

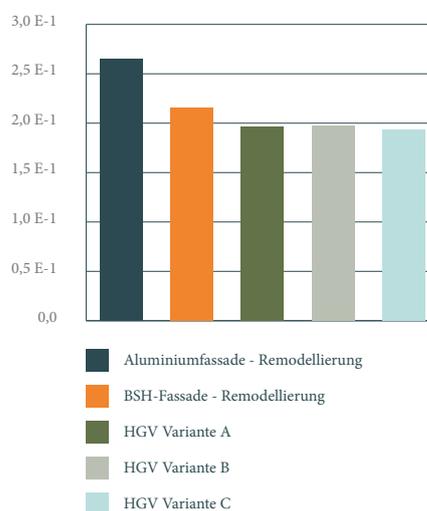


Abb. 192 EP in kg PO<sub>4</sub> eq/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich

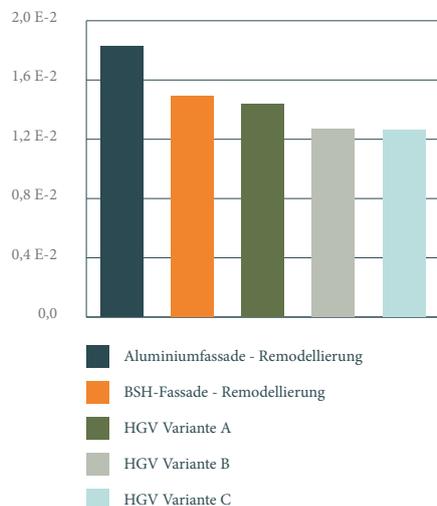
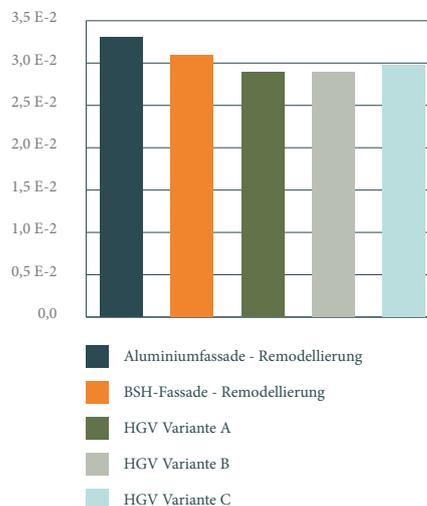


Abb. 193 POCP in kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich



## **3.3 Einflüsse von Konstruktion, Prozessen in den Lebensabschnitten und der Szenarienbildung auf die ökologische Fassadenbewertung**

### *3.3.1 Einfluss konstruktiver Zusammenhänge*

### *3.3.2 Teilabschnitte der Lebenszyklus*

### *3.3.3 Szenarien und Datengrundlagen*

Die quantitative Gegenüberstellung von Fassadenaufbauten, die Auswertung ihrer materiellen Zusammensetzungen, Berücksichtigung aller umweltrelevanten Teilabschnitte ihrer Lebenszyklen und jener Energieaufwendungen, Transporte und Fertigungsleistungen, die die Ökobilanz beeinflussen, können eine basierte Grundlage für Entscheidungen im Entwurfsprozess eines Gebäudes bieten. Wie aber im Abschnitt der Auswertung angedeutet sollte eine gesamtheitlich orientierte Betrachtung über die reine Zahlenbeschreibung hinausgehen, da viele Ergebnisse durch die Modellierung des Lebenszyklus begingt sind. Diese weiterführende Beleuchtung wird im Folgenden, unterteilt in drei Kategorien, vorgenommen.

Wie in den einführenden Kapiteln erläutert sind die Verbundkonstruktionen aus Holz und Glas ein Forschungsfeld, dessen vereinheitlichten Bemessungsgrundlagen und Normierungszusammenhänge sich in der Entwicklung befinden. So versucht diese Arbeit den Blick auf das konstruktive und statische Potenzial des Verbundes zu richten und aus der Perspektive der ökologischen Bewertung einzuordnen. Im Weiteren wird nochmals die Methodik des Lebenszyklusanalyse in den Fokus gerückt. Die ermittelten Daten basieren auf gängigen Verfahren in den drei Abschnitten der Konstruktionen. Ausblicke auf mögliche alternative Schritte im Umgang mit den Ressourcen sollen eine Einschätzung der ökologischen Eigenschaften jenseits der quantitativen Beschreibung geben. Im letzten Teil dieses Kapitels wird dann der Begriff der Szenarienbildung in der Ökobilanzierung präzisiert. Die Bedeutung von abweichenden Betrachtungszeiträumen, die die veranschlagten 25 Jahren der Studie überschreiten, und der Einfluss der ausgewählten Datengrundlagen für eine zahlenmäßige Erhebung schließen die erweiterte Betrachtung ab.

### 3.3.1 Einfluss konstruktiver Zusammenhänge

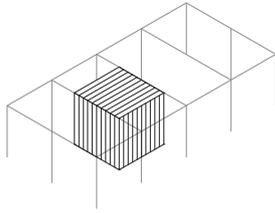
#### *Holz und Glas im Verbund als Gebäudeaussteifung*

#### *Fassade - Vergrößerung des Trägheitsmomentes*

#### *Fassade - Trägerwirkung gegen horizontale Windlasten*

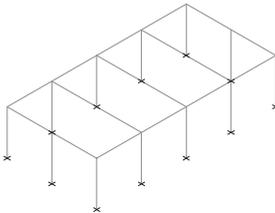
#### *Folgewirkungen*

Abb. 194 etablierte Aussteifungsmaßnahmen im Skelettbau

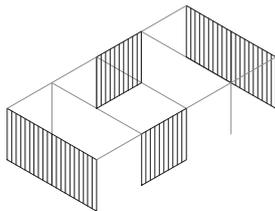


Aussteifung mittels massivem Kern

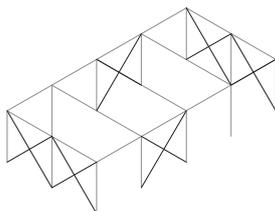
Aussteifung mittels eingespannter Stützen



Aussteifung mittels massiver Wandscheiben



Aussteifung mittels Auskrenzungen



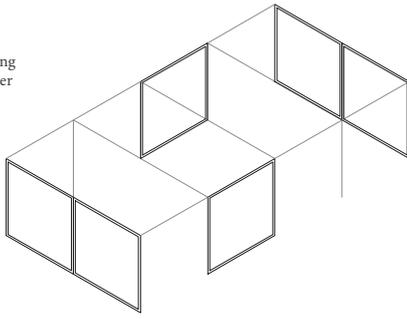
#### *Holz und Glas im Verbund als Gebäudeaussteifung*

Die statische Aktivierung der Verglasung im Verbund mit Holz bringt neue Möglichkeiten der Gebäudeaussteifung mit sich. Ein klassischer Skelettbau etwa erfordert immer zusätzlich zu den transparenten Hüllflächen Maßnahmen zur Aussteifung, die entweder einen erhöhten Energieaufwand oder eine Vergrößerung des Materialeinsatzes implizieren. Ein massiver Kern oder steife Scheiben in der Fassadenebene erfüllen natürlich auch funktionale Zwecke innerhalb des Gebäudeentwurfes, die statischen Anforderungen schränken den Planer in der gestalterischen Freiheit der Außenhülle sowie der Grundrisstrukturierung aber nicht unerheblich ein. Die Einspannung von Stützen vergrößert die Einwirkungen im Bereich der Fundamentierung, was sowohl einen höheren Energiebedarf während der Errichtung als auch einen vermehrten Materialaufwand verursacht.

Auch bei der Aussteifung mittels filigraner Auskrenzungen wird die Freiheit der Sichtbeziehung zwischen Innen und Außen beeinträchtigt, zudem wird diese Maßnahme auf der Baustelle montiert und muss dort feinjustiert werden.

Der statische Verbund zwischen Holz und Glas kann im Werk unter optimalen Bedingungen hergestellt werden, je nach Befestigungskonzept müssen die geklebten oder geklotzten und geklebten Rahmen nur noch auf die Hauptstruktur (beim Einsatz innerhalb einer Pfosten-Riegel-Fassade) aufgebracht werden.

Abb. 195 Aussteifung mittels transparenter HGV-Elemente



Weiter bedarf es bei der Aktivierung des Aussteifungspotenzials keine Materialien, die nicht auch innerhalb des Aufbaus einer transparenten, statisch nicht aktivierten Fassade verwendet werden. Im Umkehrschluss führt das auch aus ökologischer Sicht zu Materialeinsparungen um das Maß des über die Holz-Glas-Verbundelemente erreichten Aussteifungsanteils des Gebäudes. Bezüglich der planerischen Freiheiten des Architekten ergeben sich größere Flexibilitäten in der Fassadengestaltung und in zweiter Instanz auch in der Grundrisskonzeption.

Inwiefern das Verbundmaterial die Anforderungen der Aussteifung erfüllen kann, hängt im wesentlichen Sinne von der Gebäudekubatur, Materialität

und statischen Gesamtkonzeption ab. Überdies beeinflusst die Art und Weise des Verbundes das Potenzial. Wie in den einführenden Kapiteln dargestellt hat sich der Stand der Technik über die reine Schubverklebung mit den entsprechenden Versagensarten zu einer kombinierten Fügung aus Schubverklebung und zusätzlicher Klotzung entwickelt. Weiter wird mit differierenden Klebstoffen und kantenausgleichenden Klotzungsmaterialien experimentiert. Die unten abgebildeten Diagramme beziehen sich auf vergleichende Untersuchungen der 'Holzforschung Austria' einerseits und des ITI (Institut für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau) der TU Wien andererseits. Hier wurden die mittleren Bruchlasten und die errechneten Wandscheibensteifigkeiten unterschiedlich gefügter Holz-Glas-Verbundelemente mit einseitig und beidseitig OSB-beplankten Scheiben gegenübergestellt. Die Klotzung aus Epoxidharz kombiniert mit einer Silikonverklebung (ITI-ES-14/3), aber vor allem die Kombination aus Acrylatklotzung und -klebung (ITI-AA\_14/3) erzielen Ergebnisse, die im Bereich der doppelt OSB-beplankten Konstruktionen liegen und diese teilweise sogar übertreffen.

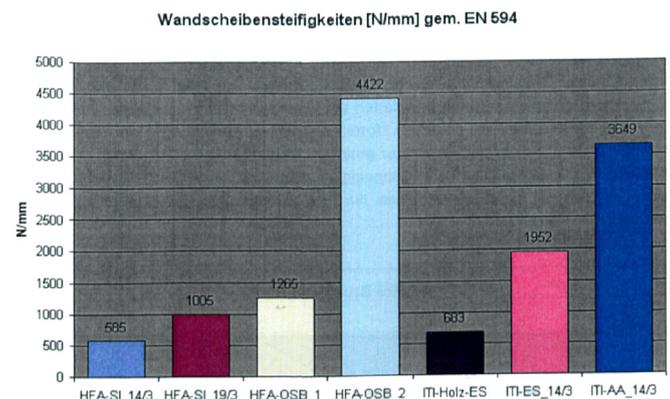
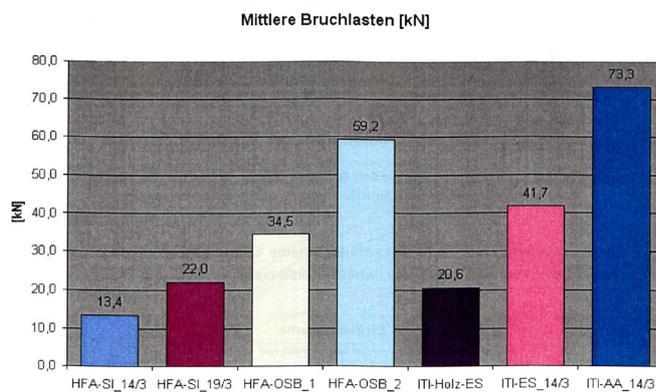


Abb. 196 mittlere Bruchlasten  
Abb. 197 Wandscheibensteifigkeit

Fall 1 - Pfosten-Riegel-Fassade  
mit transparenter Füllung  
ohne statischen Verbund

Trägheitsmoment  $[I_y]$  in  
Abhängigkeit der Querschnitts-  
größen des Holzes

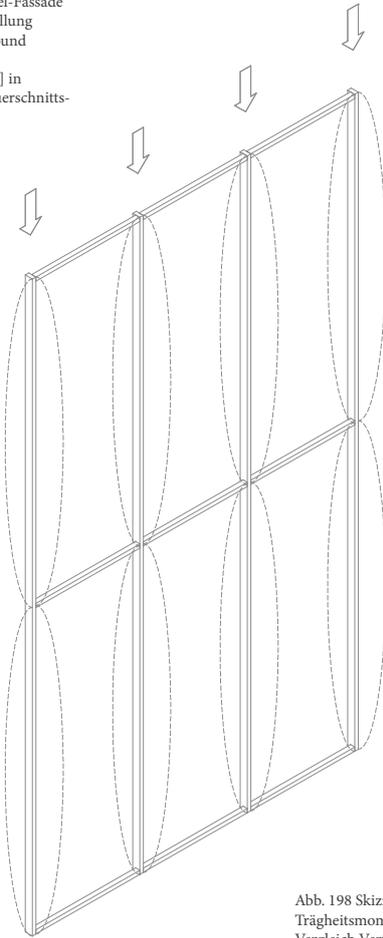
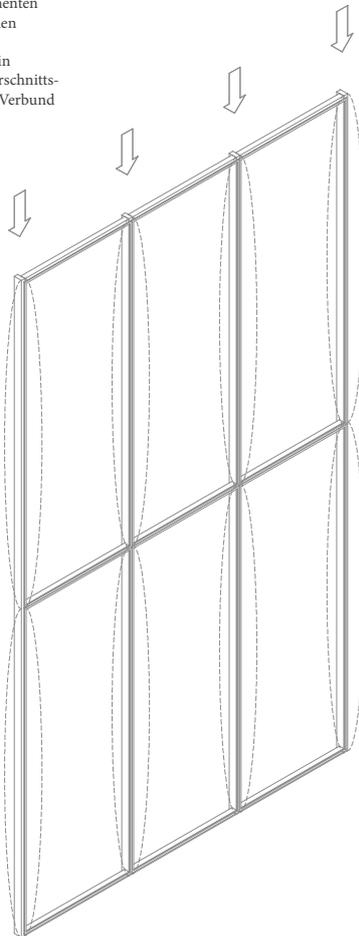


Abb. 198 Skizze  
Trägheitsmomente im  
Vergleich Vertikalkräfte

Fall 2 - mit HGV-Elementen  
kraftschlüssig verbunden

Trägheitsmoment  $[I_y]$  in  
Abhängigkeit der Querschnitts-  
größen des Holzes im Verbund  
mit der Glasscheibe



## Fassade - Vergrößerung des Trägheitsmomentes

Bei der vertikalen Lasteinleitung in eine Fassadenstütze berechnet sich das Trägheitsmoment über die Querschnittsgrößen in y- und z-Richtung. Bei der Frage der Gebrauchstauglichkeit einer bestimmten Abmessung ist dies von zentraler Bedeutung, da die Schlankheit und damit die Knickgefahr des Pfosten parallel zur Fassadenebene in die Berechnung der maximal einleitbaren Druckspannungen einfließen. Die Definition des vorliegenden Eulerfalls und der entsprechenden Knicklänge wiederum sind systemabhängig (etwa von den Lagerbedingungen der Kopf- und Fußriegel).

Betrachtet man unter gleichen systematischen Voraussetzungen aber eine Fassadenkonstruktion mit Holz-Glas-Verbundelementen, kann die Verglasung mit einberechnet werden und so das Trägheitsmoment erhöhen. Die Quantität dieser Vergrößerung wurde bisher nicht erfasst, hängt aber wiederum im wesentlichen Sinne von der Art der Klebeverbindung, der Lagerbedingung und der Dimensionierung der Glasscheibe ab.

Im Umkehrschluss könnte sich also die Breite eines Holzquerschnittes im Verbund gerechnet verringern, um einen äquivalenten Wert für das Trägheitsmoment zu erhalten. Aus dem Blickwinkel der Lebenszyklusanalyse zielt diese Herleitung auf Materialeinsparungen ab, die zu einer Verringerung des Primärenergiearfs und den entsprechenden Umwelteinwirkungen führen könnte. Auch im Bereich der Transportleistungen, die in der Bewertung eines Gebäudes einen höheren Stellenwert einnehmen als in der zahlenmäßigen Gegenüberstellung der Fassaden in dieser Arbeit, führen Gewichtsreduktionen zu einer Verbesserung der Gesamtbilanz.

## Fassade - Trägerwirkung gegen horizontale Windlasten

Fall 1 - Pfosten-Riegel-Fassade mit transparenter Füllung ohne statischen Verbund

Trägheitsmoment  $[I_y]$  in Abhängigkeit der Querschnittsgrößen des Holzes

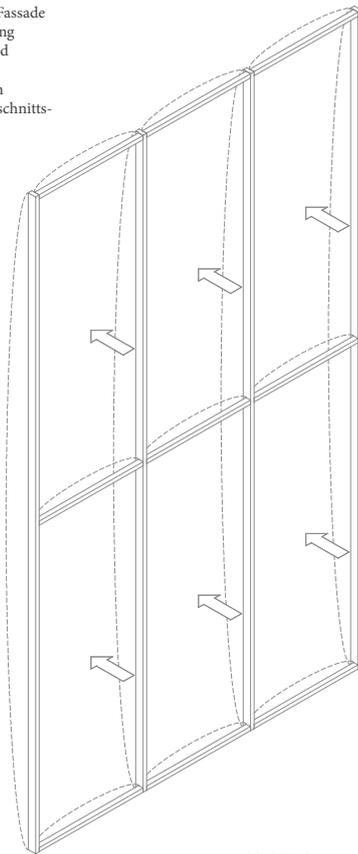


Abb. 199 Skizze Trägheitsmomente im Vergleich Horizontalkräfte

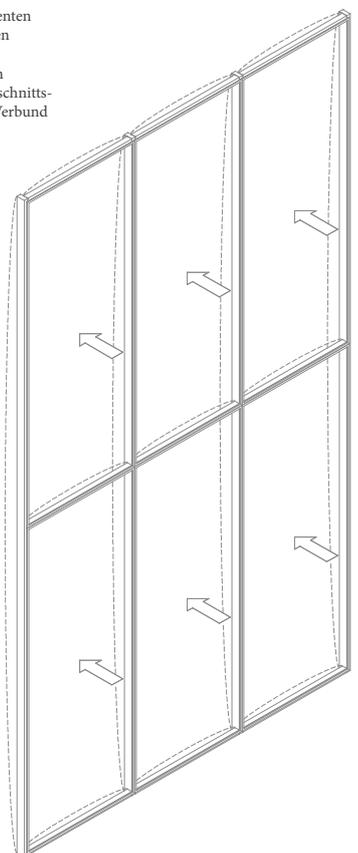
Auf den selben ökologischen Überlegungen basieren die Einflüsse der Verbundwirkung im Lastfall der Horizontalkräfte. Die Verklebung von Holz und Glas bewirkt eine Vergrößerung des zusammengesetzten Trägheitsmomentes  $[I_y]$ . Die an der Außenseite gelagerte Glasscheibe liegt in der Belastung in der Druckzone des liegenden Trägers. Wie zuvor beschrieben hat vor allem die Wahl des Klebstoffes Auswirkungen auf die Berechnung des Momentes.

### Folgewirkungen

Neben der quantitativen Verbesserung der Ökobilanz einer Fassadenkonstruktion durch Materialeinsparungen ergeben sich aus den aufgezeigten statischen Zusammenhängen auch weitere planerische Möglichkeiten. Die Reduzierung zusätzlicher Aussteifungsmaßnahmen (wie etwa der geschlossenen Wandabschnitte mit Scheibenwirkung) erhöht die gestalterische Freiheit des Planers bei der Fassade. In Verbindung mit der Verschmälerung der Pfosten kann der Verglasungsgrad der Außenhülle erhöht werden, um zum Beispiel auf südlich orientierten Gebäudeseiten eine Vergrößerung der solaren Einträge zu bezwecken. In diesem Gedankenspiel hat die so gestaltete Fassade einen positiven Einfluss auf die thermische und belichtungstechnische Qualität eines Gebäudes - und damit auch auf den zu erwartenden Primärenergiebedarf in der Nutzungsphase, der bei der Ökobilanzierung eines Gebäudes eine hohe Priorität hat.

Fall 2 - mit HGV-Elementen kraftschlüssig verbunden

Trägheitsmoment  $[I_y]$  in Abhängigkeit der Querschnittsgrößen des Holzes im Verbund mit der Glasscheibe



## 3.3.2 Teilabschnitte der Lebenszyklus

### Holz und Aluminium im gesamtheitlichen Kontext

#### Perspektiven der Nachnutzung und ihre Bedeutung für die Ökobilanz

Abb. 200 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> Fassadenfläche Lebenszyklus

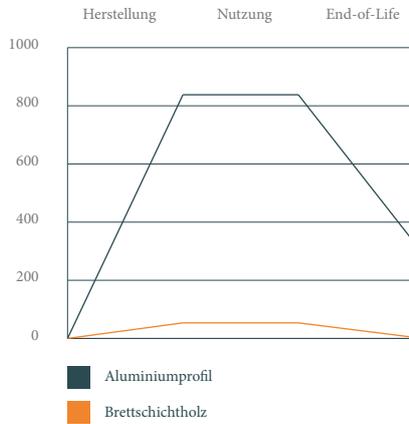


Abb. 201 P<sub>ern</sub> in MJ/m<sup>2</sup> Fassadenfläche Lebenszyklus

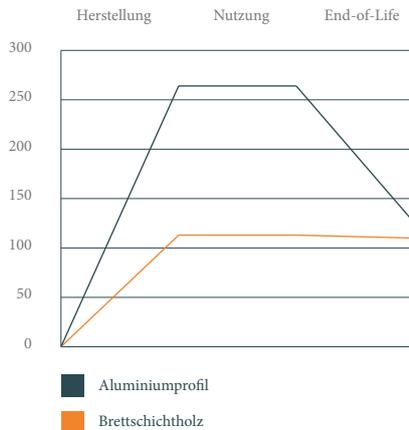
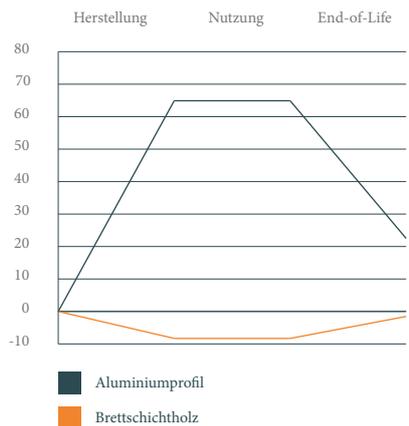


Abb. 202 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> Fassadenfläche Lebenszyklus



### Holz und Aluminium im gesamtheitlichen Kontext

Neben den konstruktiven Aspekten wird nun ein qualitativer Blick auf den übergeordneten Zusammenhang der Lebensphasen der Vergleichsmaterialien geworfen. Zur Beschreibung werden als Hilfe Kurven zum Primärenergiebedarf und zur CO<sub>2</sub>-Bilanz hinzugezogen. Alle drei Darstellungen zeigen im Grunde einen ähnlichen Verlauf. Die Aufwendungen und demnach zu erwartenden Emissionen in der Herstellungsphase des Aluminium übertreffen die des Brettschichtholzes erheblich. Die separate Grafik über den Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Energieträger weist zudem bei Aluminium einen größeren Anteil auf. Den allerdings signifikantesten Unterschied zeigt der GWP-Wert der Produktionsphase auf. Die vor allem stromintensiven Prozesse der Aluminiumherstellung führen zu Ausstoßen in Höhe von 64.9 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>, während die Holzaufbereitung durch die CO<sub>2</sub>-Aufnahme im Wachstum eine Speicherung von 8.31 kg treibhausrelevanter Gase beschreibt.

In der Nutzung sind von beiden Materialien keine weiteren Einwirkungen zu erwarten. Die aktuell standesgemäße Nachnutzung lässt sich die Kurven hingegen deutlich einander annähern. Dieser Effekt wurde bereits mit den unterschiedlichen End-of-Life-Vorgängen erklärt. Fakt ist, dass die Ökobilanz von Aluminium durch das Substitutionsverfahren eine erhebliche Aufwertung erhält, deren zahlenmäßige Dimension durch den Recyclinggrad bestimmt wird.

Diese Darstellungen verdeutlichen aber auch, dass jedes kg Primäraluminium, das hergestellt wird, starke Einwirkungen auf die ökologischen Zusam-

menhänge der Atmosphäre und des Bodens hat, die unwiderruflich sind. Für eine positivere Bewertung müssen diese zum Ende des Zyklus wieder eingeholt werden. Die beiden Materialien beschreiben quasi einen charakterlich spiegelbildlichen Lebensverlauf. So sei auch darauf hingewiesen, dass die Kurven die kontroverse Beurteilung der thermischen Verwertung von Holz demonstrieren. Während vor allem der Primärenergiebedarf (P.ne) über

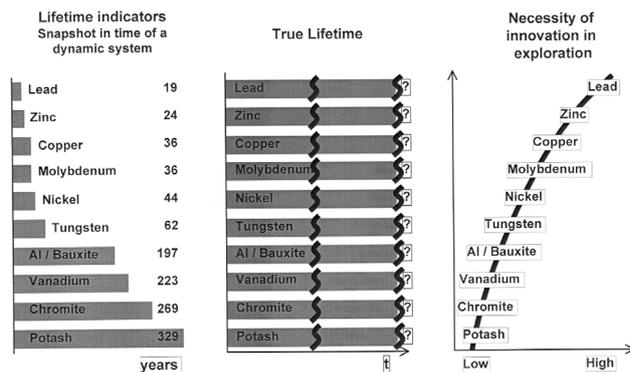


Abb. 203 statische Reichweiten und Explorationsnotwendigkeit mineralischer Rohstoffe

	Reserven	Reservebasis	Ressourcen
Aluminium in Bauxit	23-25 Mrd. Tonnen	27-35 Mrd. Tonnen	40-75 Mrd. Tonnen
Kupfer in Kupfererzen	308-340 Mio. Tonnen	590-650 Mio. Tonnen	2-2,3 Mrd. Tonnen

Abb. 204 Globale Reserven, Reservebasis und Ressourcen für Aluminium und Kupfer

### Perspektiven der Nachnutzung und ihre Bedeutung für die Ökobilanz

Die in der Auswertung veranschlagten Skizzierungen der End-of-Life-Prozesse von Holz, Aluminium und der Verglasung sowie die Fügung und Abichtung der Baustoffe bestimmen die ökologische Sinnhaftigkeit einer Fassade mit.

Bei einem vertiefenden Blick auf das Vorgehen im Bereich der Isolierverglasungen sei nochmals darauf hingewiesen, dass alle Ergebnisse der Vergleichskonstruktionen in gewissen Umweltindikatoren von der Glasherstellung dominiert wurden. Dies ruft die Notwendigkeit alternativer Nachnutzungen auf den Plan. Die Problematik des Qualitätsverlust-

den Lebenszeitraum durch die Gutschriften nahezu ausgeglichen wird, bewirkt sie eine Verschlechterung der CO<sub>2</sub>-Bilanz. Dieser Zusammenhang impliziert die Vorstellung die stoffliche Verarbeitung zu fördern und die Verbrennung soweit wie möglich hinauszuzögern.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Fragestellung der Knappheit der Ressourcen. Die hier dargestellte 'statische Reichweite' berechnet den Quotienten aus der Menge bekannter Reserven eines Rohstoffes und der aktuellen globalen Jahresproduktion. Die sich im Bezug zur Datenerhebung dieser Grafik weiter vergrößerte Einschätzung der Reichweite für Aluminium zeigt ein gewiss langfristigeres Vorhandensein des Metalls im Vergleich zu anderen Rohstoffen. Weiter ist das Aluminium mit seinen physikalischen Eigenschaften sicherlich nicht in jeder Funktion durch andere Materialien zu ersetzen. Richtet man aber wiederum den Blick auf den Fassadenvergleich, ist festzuhalten, dass Holz ein nachwachsender Rohstoff ist, der in einer nachhaltig betriebenen Fortwirtschaft eine uneingeschränkte Reichweite hat. Diese Einschätzung findet so keine Berücksichtigung in der quantitativen Analyse der Ökobilanz.

freien Recyclens besteht dabei in der aufwändigen Trennung der Teilkomponenten. Die Auflösung des Randverbundes inklusive der Dichtmassen erfolgt manuell, das Abwaschen von metallischen Beschichtungen zur weiteren Verwendung ist ebenso arbeitsintensiv. Eine so aufgearbeitete Scheibe könnte ebenso wie die Verschnittanteile im Herstellungsprozess der Glasschmelze wieder zugeführt werden. Eine Weiterentwicklung und entsprechende Rationalisierung dieser Vorgänge wäre für eine ökologische Aufwertung denkbar. Alternative und durchaus etablierte Verfahren sehen das Downcycling, also die stoffliche Verarbeitung zu geringwertigen Produkten vor. So erreicht die Behälterglasindustrie inzwischen Recyclingquoten von bis

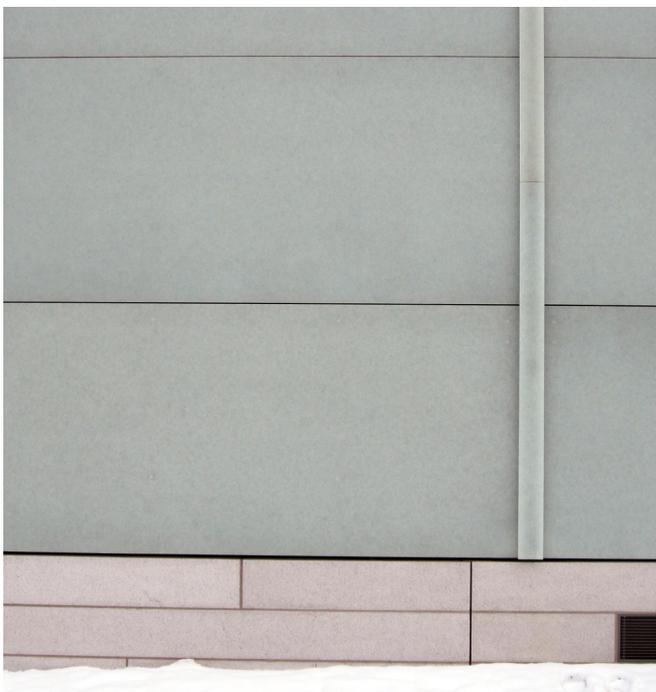


Abb. 205 Fassadenbekleidung aus Altglas - Folkwang Museum Essen

zu 75%. Zyklen, die die weitere Verwendung im Baubereich vorsehen, sind etwa die Verarbeitung zu Foamglas, das als Dämmmaterial von Gebäuden gegen Erdreich verwendet werden kann.

Innovative Ansätze versuchen das Glas auch auf höherer funktionaler Ebene einzusetzen, wie die hier abgebildete Fassade des Folkwang Museums (Essen, D), die aus 100% Altglasanteilen besteht. Diese ermöglicht durch unterschiedliche Körnung und Poliervorgänge einen spielerischen Umgang mit dem Thema der Transluzenz, was einen Mehrwert für den Architekten jenseits der ökologischen

Bedeutung hat. Die Berücksichtigung solcher Ansätze ist durch die Annahme der Deponierung der Isoliergläser derzeit nicht zahlentechnisch erfasst.

Die guten Möglichkeiten Aluminium nach seiner Verwendung in den Herstellungskreislauf zurückzuführen wurden bereits beschrieben. Hier soll nun der Einfluss der Recyclingvorgänge auf die ökologische Bewertung des Aluminiums konkretisiert werden. Beschreibt man ein in sich abgeschlossenes Modell der reinen Fassadenkonstruktionen wäre eine nullprozentige Annahme von Recyclinganteilen denkbar, da bei der Erstellung von Pfosten- und Riegelprofilen ein hoher Reinheitsgrad des Rohstoffes verlangt wird. Diese hätte ähnlich der Regelung bei den Glasprodukten zur Folge, dass die großen Aufwendungen der Produktion nicht substituiert würden und eine Aluminiumverwendung ökologisch sehr infrage gestellt werden müsste. Ginge man hypothetisch von einer 100%-igen Sammelrate aus, die in der Praxis kaum erreichbar ist, würden sich die lebenszyklischen Auswirkungen sowohl im Energiebedarf als auch in den Umweltindikatoren erheblich reduzieren. Die reale Einschätzung hängt also immer von der Art der Verwendung und den konstruktiven Lösungen ab. Die ökologische Bewertung muss immer vieldimensional abgewägt werden. Die beiden weiteren Grafiken zeigen zu-

Abb. 206 Aluminiumbewertung in Relation zur Recyclingquote

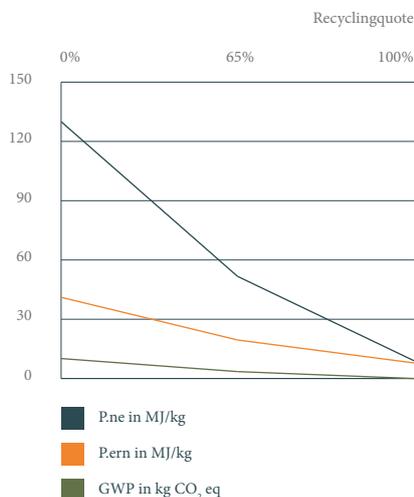
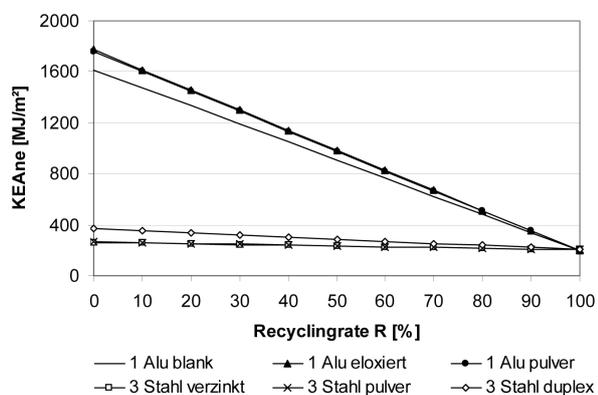


Abb. 207 Primärenergiebedarf in Abhängigkeit der Beschichtung und des Materials



dem die Abhängigkeit der Recyclingquote von der Art der Beschichtung. An der TU München wurden mehrere konstruktive Fassadenlösungen eines Projektes (in der Legende mit 1 bzw. 3 bezeichnet) in alternierenden Ausführungen mittels Stahl- und Aluminiumprofilen bewertet. Dargestellt wird der kumulierte Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Energien der jeweiligen Aufbauten einer Fassade und die Relation der Beschichtung zu dem entsprechenden Recyclinggrad. Zwei Aussagen stehen dabei im Vordergrund: der ganzheitlich betrachtete Energiebedarf einer Aluminiumlösung ist immer höher anzusetzen als eine Ausführung in Stahlprofilen. Lediglich bei einer Recyclingquote von 100% liegen die Werte im gleichen Bereich. Die Differenz im Aufwand der Stahlproduktion aus primären oder recycelten Anteilen ist deutlich geringer. Zum Zweiten liegen die Sammelraten und die Nutzungserwartungen bei blanken und eloxierten Profilen über denen der pulverbeschichteten.

Ähnliche Alternativgedanken lassen sich auch für die Ökobilanzierung von Holz und Holzwerkstoffen aufzeichnen. Die thermische Verwertung verschlechtert die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Baumaterials erheblich, führt aber gleichzeitig zu positiv zu bewertenden Energieaufwendungen, vor allem im Bereich der fossilen Brennstoffe. Im Umkehrschluss

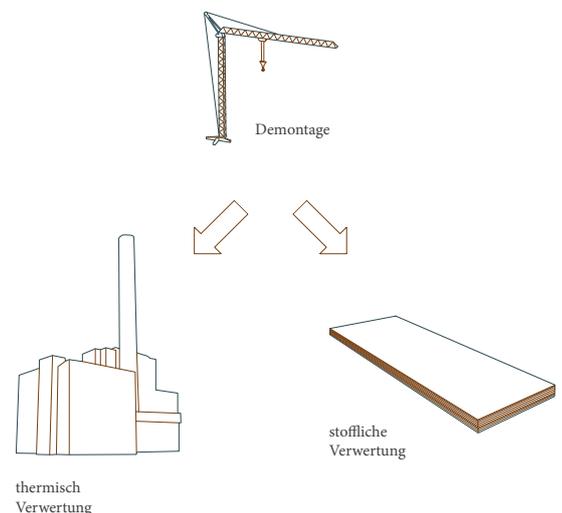
bedingt eine Variante der Nachnutzung zeitgleich die Förderung regenerativer Energieerzeugung etwa aus Wind und Sonne. Demnach würde der angenommene durchschnittliche Energiemix, auf dem das Substitutionsverfahren basiert, die Kräfteverhältnisse in diese Richtung verschieben und der Verzicht auf die Verbrennung würde an Wert gewinnen. In diesem Szenario wäre die stoffliche Verwertung zu Holzwerkstoffen das primäre Verfahren zum Ende des Lebenszyklus. Und an einem Punkt, an dem dies nicht mehr möglich ist, wäre eine Lagerung und Kompostierung denkbar, bei der ein großer Teil des gespeicherten CO<sub>2</sub>-Anteils dauerhaft gebunden werden kann. Die Maßstäblichkeit dieses Gedankenspiels wäre natürlich zu hinterfragen.

Ein letzter Punkt der Nachnutzung der Holz-Glas-Verbundkonstruktionen bezieht sich auf die Verwendung von Silikonen als Dichtungsmaterial. Während die Nutzung der unterschiedlichen Klebstoffe innerhalb des Verbundes mehr als gerechtfertigt erscheint, liegt hier Potenzial zur weiteren Aufwertung der ökologischen Kriterien. Zum einen haben die alternativen Lösungsvorschläge quantitative Unterschiede beim Verzicht gezeigt, zum anderen geht damit sekundär auch die Frage der Kontamination der abgedichteten Baustoffe einher. Je geringer der Aufwand zur Trennung von Material desto sinnvoller werden Nachnutzungsalternativen.

Abb. 208 Recyclingquote Aluminium in Abhängigkeit der Beschichtung

Oberflächenbehandlung	Erneuerung	Recyclingrate [R]
Aluminium blank	---	$94,6\% = 98\% \cdot 98,5\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Aluminium eloxiert	---	$94,6\% = 98\% \cdot 98,5\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Aluminium pulverbeschichtet	nach 30 und 60 Jahren	$89,6\% = 98\% \cdot 93,25\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Stahl verzinkt	nach 40 Jahren	$92\% = 98\% \cdot 95,75\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Stahl pulverbeschichtet	nach 30 und 60 Jahren	$89,6\% = 98\% \cdot 93,25\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Stahl Duplexbeschichtung	nach 50 Jahren	$89,6\% = 98\% \cdot 93,25\% \cdot 98\% \cdot 100\%$

Abb. 209 End-of-Life-Alternativen der Holzprodukte



### 3.3.3 Szenarien und Datengrundlagen

*Alternative Betrachtungszeiträume und deren Auswirkungen*

*Bauphysikalische Qualität im Lebenszyklus eines Gebäudes*

*Szenarienbildung in der Ökobilanzierung*

*Einfluss der Datengrundlagen auf die quantitative Bewertung*

#### *Alternative Betrachtungszeiträume und deren Auswirkungen*

Die Grundlage der Vergleichsstudie waren die Fassadenkonstruktionen fokussiert auf deren Errichtungsparameter, da im Betrachtungszeitraum von

25 Jahren kaum Austauschvorgänge zu erwarten sind. In einer erweiterten Betrachtung über 50 und 100 Jahre Nutzungsdauer werden hier nun die Einflüsse der bereits in Kapitel 3.1 beschriebenen materialspezifischen Verwendungszeiträume quantifiziert. Der Zeitraum von 50 Jahren beschreibt genau die nach den BNB-Kriterien vorgeschlagene Nutzungsdauer beider Hauptkonstruktionsarten. Die zu erwartenden Austausche beziehen sich also ausschließlich auf die der Witterung ausgesetzten Komponenten der Fassaden. Die Isolierverglasung wird demnach nach 30 Jahren einmal ausgewechselt, was den Großteil der unter 'Nutzung' angeführten Primärenergie (P.ne) beansprucht. Bildet man die erste Ableitung der nebenstehenden Kurven in diesem Lebensabschnitt, zeigt der Verlauf eine nahe zu synchrone Steigung. Das bedeutet, die enormen Differenzen im Energieaufwand bleiben nach der Herstellung stabil. Innerhalb der Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zeigt die Lösung A

Abb. 210 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> in Zeitraum von 50 Jahren

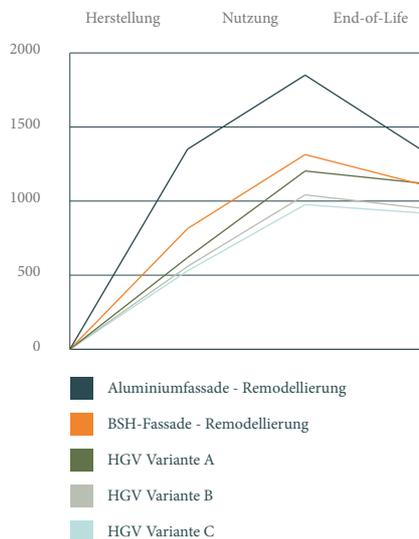


Abb. 211 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> in Zeitraum von 100 Jahren

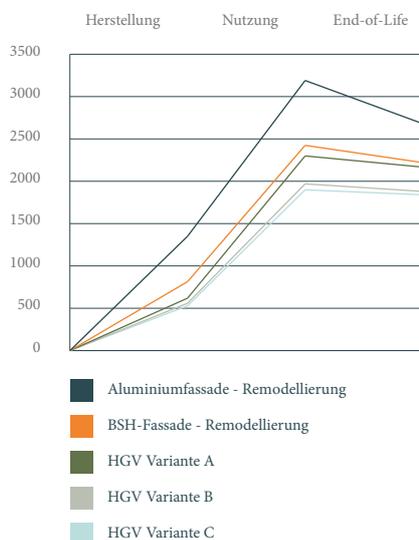
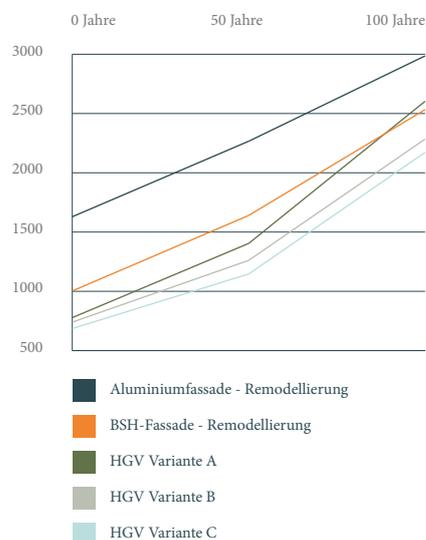


Abb. 212 P.ges in MJ/m<sup>2</sup> in Zeitraum von 100 Jahren



eine leicht erhöhte Steigung. Dies ist auf den relativ großen Silikonanteil zurückzuführen, der bei einer Nutzungsdauer von 12 Jahren 4 mal erneuert werden muss.

Die zweite Grafik bezieht sich auf den P.ne im Zeitraum von 100 Jahren, der somit auch den einmaligen Austausch der jeweiligen Hauptkonstruktion mit einbezieht. Die Steigung innerhalb der jeweiligen Nutzungsdauer nimmt erheblich zu, aber wiederum um ähnlich Dimensionen. Die Gründe dafür ergeben sich aus der Einzelbetrachtung der ausgewechselten Komponenten. Die Verglasung wird in dieser Betrachtung insgesamt 3 mal erneuert und beeinflusst alle fünf Kurven maßgebend. Dass der Austausch der Aluminiumprofile und -subkonstruktion nicht stärker ins Gewicht fällt, liegt vor allem an dem hohen Recyclingpotenzial. Die ausgebauten Materialien werden wieder eingeschmolzen und dämpfen den Primärenergiebedarf der Nutzungsphase.

All die beschriebenen Einwirkungen unterschiedlicher Entsorgungsstrategien der Komponenten fließen in den Kurvenverlauf im Bereich 'End-of-Life' mit ein. Bezogen auf den Teil nicht erneuerbarer Energieträger erzielt Aluminium wie erwähnt ein höheres Maß an Gutschriften. So nähern sich die Kurven leicht an. Der kumulierte Gesamtenergiebedarf in der dritten Grafik zeigt einen nahezu

konstanten Zuwachs des Bedarfs von Aluminiumfassaden über den Zeitraum von 100 Jahren. Die leichte Erhöhung der Steigung der Holz-Glas-Verbundvariante A gründet wiederum auf der relativ großen Fuge zwischen den Scheiben. Alle Kurven unterstreichen den enormen Einsparungsvorteil der HGV-Fassaden in der Herstellungsphase.

Abschließend werden die Wirkungsindikatoren GWP und ODP über 50 (breiter Balken) und 100 (schmäler Balken) Jahre dargestellt. Die weiteren Umwelteinwirkungen wurden ausgeklammert, da der Einfluss der Glasanteile dort bereits ausreichend dargelegt wurde. Analog zu den energetischen Darstellungen beziehen sich die ökologischen Vorteile der Holz-Glas-Verbundkonstruktionen auf die Produktion. Entsprechend gleichmäßig entwickeln sich die Werte über 50 und 100 Jahre weiter. Bei einer isolierten Betrachtung der Haupt- und Subkonstruktionen analog der Vorgehensweise in Kapitel 3.2 wären die Differenzen der Kategorien entsprechend deutlich erhöht. Die Auswirkungen der Verglasung sind in den jeweiligen Aufbauten maßgebend. Die Betrachtung der absoluten Werte des Ozonabbau-potenzials zeigt nochmals den Einfluss von Silikonen und deren Emissionen. Der Verzicht auf diesen Kunststoff in der letzten Holz-Glas-Verbundvariante lässt diesen Indikator gegen null tendieren.

Abb. 213 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> in 50 und 100 Jahren

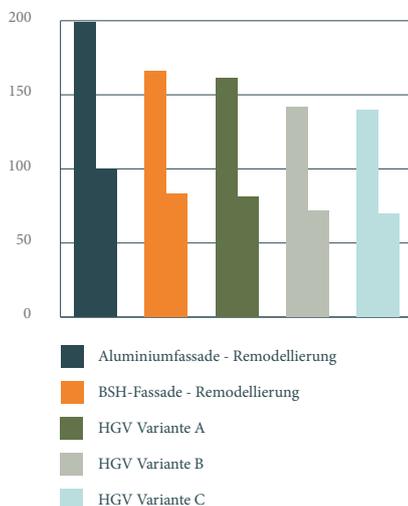
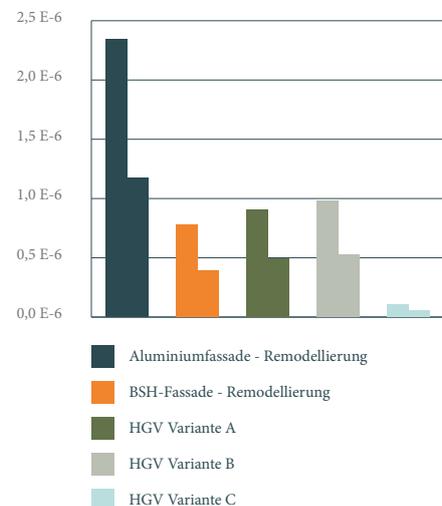


Abb. 214 ODP in kg R11 eq/m<sup>2</sup> in 50 und 100 Jahren



## Bauphysikalische Qualität im Lebenszyklus eines Gebäudes

Abb. 217 beispielhafte Isothermengrafik eines HGV-Fassadenprofils

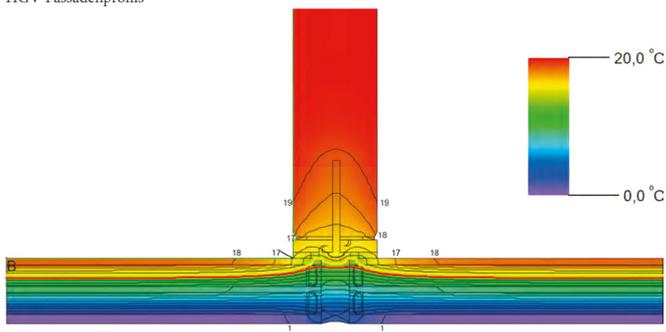


Abb. 216 symbolischer Wärmedurchgang Aluminium-Profil

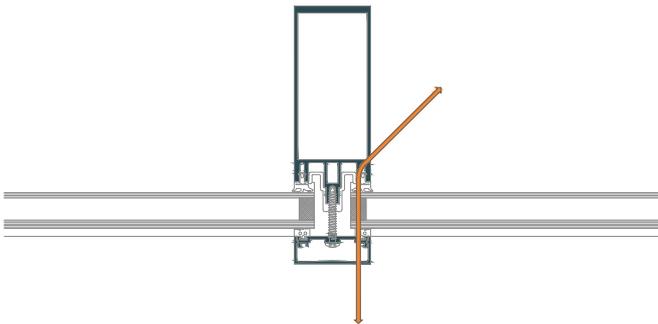
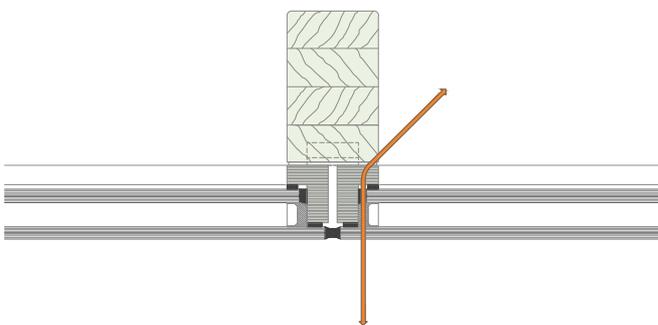


Abb. 215 symbolischer Wärmedurchgang HGV-Profil



Nach der erweiterten Betrachtung von Lebenszeiträumen von Fassaden soll hier nun kurz der Blick auf die Ökobilanz eines Gebäudes mit den jeweiligen Fassaden geworfen werden. Das Thema der physikalischen Eigenschaften der Materialien wurde in den einführenden Kapitel bereits angeschnitten. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Aluminium beträgt  $160 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})^5$  und ist somit um mehrere Größenordnungen höher als die  $0,13 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  Wärmeleitfähigkeit von Brettschichtholz. Daraus ergeben sich ganz grundsätzlich unterschiedliche Anforderungen an die Trennung thermischer Übertragungen innerhalb des Profilquerschnitts.

Die beispielhafte Darstellung der Isothermengrafik eines alternativen Holz-Glas-Verbundsystems<sup>1</sup> zeigt die allgemeine Schwachstelle jeder Pfosten-Riegel-Fassade am Punkt der Abstandhalter der Verglasung. Die dort zu erwartenden Wärmeübertragungen beeinflussen die U-Werte der gesamten Fassade. In den beiden weiteren Abbildungen wird deutlich, dass die Kunststoffprofile innerhalb und außerhalb der Abstandhalter den direkten Kontakt zum Aluminiumprofil unterbinden. Das Detail der Holz-Glas-Verbundfassade zeigt ein anderes Bild. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit ist diese Art der Trennung nicht nötig. Ganz im Gegenteil, der unmittelbar anschließende Querschnitt aus Koppelleisten und BSH-Profil erhöht im Vergleich die zu erwartenden Oberflächentemperaturen an der kritischen Stelle der Konstruktion. Der zu betreibende Aufwand zum Erreichen eines qualitativ hochwertigen U-Wertes steht also im unmittelbaren Widerspruch: das Aluminiumprofil muss getrennt werden, während das Holz diese begünstigt.

Der Primärenergiebedarf bei der Herstellung einer Fassade beträgt etwa 6-8% des Nutzungsenergiebedarfs eines Gebäudes (zusammengesetzt aus Heiz-, Kühl-, Lüftungs- und Beleuchtungsenergie). Dies untermauert die Relevanz der thermischen Qualität der Gebäudehülle.

<sup>6</sup> Knapp GmbH, Hrsg. (2013) Broschüre FASCO - Fassadensystem - Verklebte Glaselemente für den modernen Holz- und Metallbau

<sup>7</sup> Lehrstuhl für Baukonstruktion III, Hrsg. (2007) Scriptum: Bauphysik. RWTH Aachen Lehrstuhl für Baukonstruktion III

Die Szenarienbildung bietet Modellierungshilfen neben der quantitativen Auswertung eines Bauteils wie der Fassade, der Erweiterung auf das gesamte Gebäude und alternative Betrachtungszeiträume. Für diese Art der Konzeption muss allen Projektbeteiligten bewusst sein, dass der Lebenszyklus eines Gebäudes immer in Abhängigkeit von vielen Faktoren steht. Diese sind zum Beispiel die funktionale, technische und materielle Qualität, aber die architektonisch räumliche Umsetzung und Flexibilität. Die Anforderungen etwa an ein Mehrfamilien-Wohngebäude verlangen vom Planer ein hohes Maß an Variabilität, die ohne unverhältnismäßigen

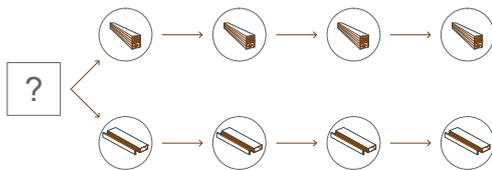


Abb. 218 I. lineare Planung mit Trendfortschreibung

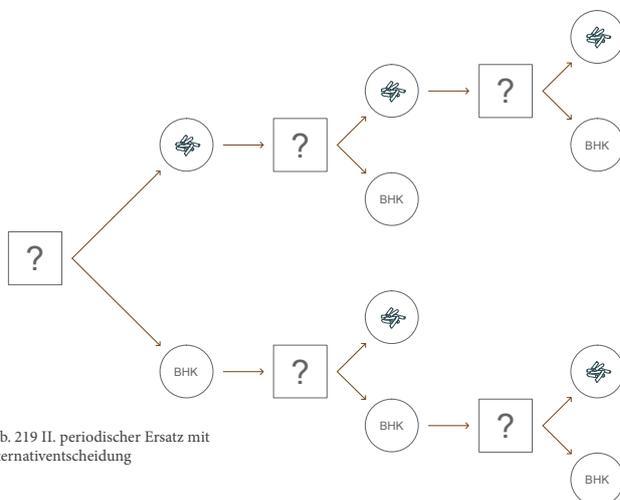


Abb. 219 II. periodischer Ersatz mit Alternativentscheidung

Aufwand das Zusammenschalten oder Abtrennung von Wohneinheiten ermöglicht. Diese vielfältigen Fragestellungen weisen darauf hin, dass der reale Lebensverlauf eines Gebäudes immer unvorhersagbar bleibt. Aus dieser Tatsache entwickeln sich drei Methoden der Szenarienbildung, die versuchen eine Perspektive zu skizzieren; die Quantifizierbarkeit innerhalb dieser Methoden verhält sich dabei antiproportional zu Flexibilität der jeweiligen Sichtweise.

### I. Lineare Planung mit Trendfortsetzung

Dieses Konzept weist das höchste Maß an zahlenmäßiger Bewertbarkeit auf, ist im realen Verlauf eines Gebäudelebenszyklus aber eher unwahrscheinlich. Hier wird zum Zeitpunkt der Errichtung eine Entscheidung, zum Beispiel über die Art der Fassadekonstruktion, getroffen. Im weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass diese in den angenommenen Austauschzeiträumen jeweils äquivalent ersetzt wird. Dies lässt sehr konkrete Ergebnisse der ökologischen Bewertung zu, da die Sachbilanz und Wirkungsgrade der Varianten bekannt sind.

### II. Periodischer Ersatz mit Alternativentscheidung

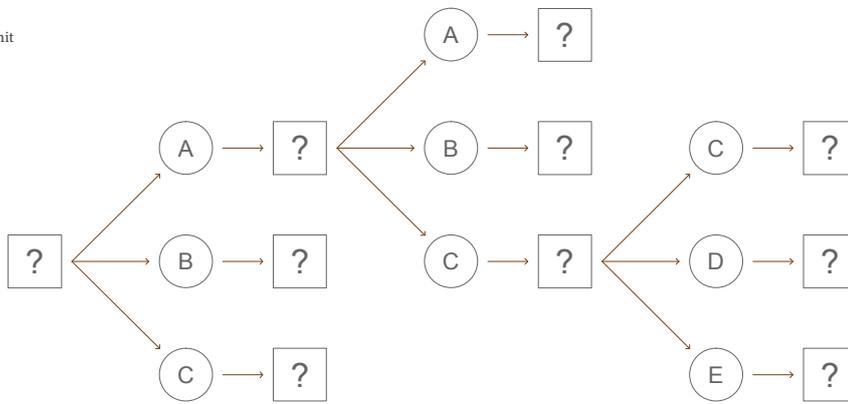
Ein zweiter Ansatz sieht vor, dass gewisse Entscheidungen in periodischen Abständen neu getroffen werden, um technische Weiterentwicklungen implementieren zu können. Ein Thema könnte etwa die Art des Heizungssystems einer Siedlung sein. Während bei der Errichtung ein Blockheizkraftwerk installiert wurde, lohnt sich eventuell der Ersatz durch ein anderes System nach einer bestimmten Nutzungsdauer. Diese neue Entscheidung könnte aus der technischen Weiterentwicklung und damit verbundener Effizienzsteigerung heraus entstehen. Diese Sichtweise lässt sich relativ gut quantitativ erfassen, behält sich aber auch eine gewisse Flexibilität bei der getroffenen Annahme des Lebenszyklus des Gebäudes vor.

### III. Lebenszyklusmodell mit Optionenbildung

Die Optionenbildung ist die dritte Möglichkeit sich dem Thema der vorausschauenden Modellierung des ganzheitlichen Verlaufs eines Gebäudes zu nähern. Diese Betrachtung arbeitet mit vielen Variablen, lässt sich demnach aber auch schwer zahlenbasiert darlegen. Die Erweiterung gegenüber dem zweiten System stellt die Einschätzung dar, dass manche Alternativen wegfallen und neue Optionen in die Entscheidungsfindung integriert werden können. Der Wegfall kann technische, ökologische oder normative Gründe haben oder auf einer funktionalen Umstrukturierung des Gebäudes basieren.

Die zunehmende Komplexität der Modelle verlangt eine hohe Qualität der integralen Planungsstrategie aller Projektinstanzen. Die Reaktionsfähigkeit auf parametrische Änderungen und die Bereitschaft zu vielschichtigen Denkweisen sind dabei von zentraler Bedeutung. Wie diese planerisch und technisch umgesetzt werden kann, wird in Kapitel 4.3 erläutert.

Abb. 220 III. Lebenszyklusmodell mit Optionenbildung



### Einfluss der Datengrundlagen auf die quantitative Bewertung

Auch die Auswahl der Datengrundlagen hat Einfluss auf die quantitative Bewertung von Ökobilanzen. Da sich die Erhebungsgrundlagen und Verarbeitung unterscheiden, sollte ein Vergleich, wie er in dieser Arbeit aufbereitet wurde, immer Daten aus einer einheitlichen Quelle beziehen. Neben den vom deutschen BMVBS bereitgestellten Werten der ökobau.dat, gibt es weitere etablierte Referenzsysteme. Das österreichische IBO (Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie) erarbeitet die Daten für die sog. baubook.info. Diese Grundlage wiederum wird von der ÖGNB (Österreichischen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen) für ihr Gebäudezertifizierungstool 'TQB' (Total Quality Building) verwendet. Die unten abgebildete Tabelle zeigt Referenzwerte dieser beiden Datenbanken im Vergleich.

Weitere, häufig verwendete Datengrundlagen entstammen der schweizerischen Variante der 'Ecoinvent'-Datenbank, die wie die im Ökobilanztool 'GaBi' aufbereiteten Werte kostenpflichtig ist.

Tab.10 Vergleich der Datenbankenwerte

	Ökologische Datenbankgrundlagen für Brettschichtholz im Vergleich				
Wert	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Einheit [kg]	P.ne [MJ/kg]	GWP [kg CO <sub>2</sub> eq]	AP [kg SO <sub>2</sub> eq]
ökobau.dat	515.0	1.0	9.64	-1.495	0.0014
baubook.info	495.0	1.0	7.95	-1.235	0.0024

## 4.1 Raumgestalterische Perspektive der Holz-Glas-Verbundfassaden

In den abschließenden Ausführungen soll die Brücke zwischen der ökologischen Lebenszyklusanalyse und den architektonisch gestalterischen Prioritäten geschlagen werden. Dabei wird zunächst der Zusammenhang zwischen den ausführlich dargestellten und ausgewerteten ökologischen Qualitäten der Holz-Glas-Verbundfassaden und dem architektonischen Mehrwert veranschaulicht.

Die grundsätzliche Idee, ein Fassadenprinzip als alternative Lösungsmöglichkeit zu etablierten Systemen und Materialien zu schaffen, erweitert die gestalterischen Möglichkeiten des Planers. Auf diesem Gedanken basiert der ökologische Fassadenvergleich dieser Arbeit. Die Perspektive, Holz-Glas-Verbundelemente in großflächigen Glasfassaden einsetzen zu können, hebt dieses konstruktive Prinzip auf ein neues funktionelles Niveau. Dies beruht auf der Möglichkeit, die Fassade zur Gebäudeaussteifung heranziehen zu können und zeitgleich auf materialökologischer Basis eine geradezu symbiotische Verbindung zweier Materialien zu schaffen.



Abb. 221 Oberflächenstruktur Holz



Abb. 222 Oberflächenstruktur Aluminium

### Raumgestaltung

Die Gebäudehülle ist von großer funktioneller, gestalterischer und soziokultureller Bedeutung in der Architektur. Sie ist die Membran zwischen dem Innen- und dem Außenraum und lässt das Gebäude im Kontext mit seiner Umgebung kommunizieren. Wenn also die planerische Absicht die immer weiter an Bedeutung gewinnenden Gedanken einer nachhaltigen Gestaltung des Raumes abbilden will, ist die Fassade ein vordergründiges und offensichtliches Mittel der Umsetzung.

Betrachtet man die innenräumlichen Qualitäten, erweitern sich die Möglichkeiten durch die der Oberflächenstruktur und Haptik des Holzes. Projiziert man diese gedanklich an den Arbeitsplatz im Büro, in das Klassenzimmer eines Schulgebäudes oder den Kindergarten, wird die gestalterische Qualität im Raum erlebbar. Außerdem kann die Verwendung auch den sozialen und pädagogischen Auftrag erfüllen, die Sensibilisierung der Gesellschaft für die drängenden Themen der Umweltbelastungen durch den Menschen zu verstärken. Nicht zuletzt steht das Aussteifungspotenzial auch im Fokus der räumlichen Gestaltung. Die Substitution zusätzlicher struktureller Maßnahmen ermöglicht dem Architekten Freiheiten in der Grundrissgestaltung und der natürlichen Belichtung.

### Fassadengestaltung

Die Innovationskraft der Verwendung des statischen Verbundes aus Holz und Glas schafft auch entwurflichen Spielraum innerhalb der eigentlichen Fassadengestaltung. Die zu erwartende Verringerung der Knickgefahr ermöglicht schmalere Profillbreiten und vergrößert den planerischen Zugriff auf die Transparenz und damit zu erzielenden solare Einträge. Zudem sind die konstruktiven Entwicklungsmöglichkeiten sehr vielseitig. Die im Vergleich zu Metallen sehr guten Eigenschaften bzgl. der Wärmeleitung eröffnen alternative Detailmöglichkeiten. Die Problematik der feuchtebasierten Quell- und Schwindeigenschaften des Holzes sind dabei im äußeren Bereich des Fassadenquerschnitts zu beachten. Die strukturelle Trennung von Haupttragwerk und Unterkonstruktion ermöglicht wie beschrieben ein hohes Maß an Vorfertigung. Da sich dies positiv auf die Präzision der Ausführung auswirkt, lässt sich auch hier ein Mehrwert an konstruktiv gestalterischem Potenzial ableiten.

### Energieerzeugung

Die Möglichkeiten, die Gebäudehülle zur energetischen Optimierung heranzuziehen, sind vielseitig und sicherlich nicht auf die Verwendung von Holz-Glas-Verbundfassaden beschränkt. Doch die Verknüpfung von Photovoltaikzellen, Methan produzierenden Algenpaneelen oder den beschriebenen Wärmekollektoren mit einer Fassade, die sich von Grund auf an einer ökologisch nachhaltigen Denkweise orientiert, ist sehr authentisch.

### Raumklima und Akustik

Die Behaglichkeit des Raumklimas ist eine wichtige Aufgabe in Planung. Die physikalischen Eigenschaften des Holzes können dazu beitragen, diese zu erhöhen. Das hygroskopische Verhalten, das Bestreben den inneren Feuchtegehalt mit der Umgebung im Gleichgewicht zu halten, ist bei großflächigen Glasfassaden sehr wichtig. Die Materialbeschaffenheit arbeitet so als eine Art Pufferoberfläche, die

Metalle oder auch die Verglasung nicht aufweisen. Ein weiteres Merkmal kommt unter anderem in Räumen hoher Frequentierung zum tragen, die etwa in Bürogebäuden denkbar ist. Die geringe Oberflächenhärte und Porösität des Holzes kann als schallabsorbierende Fläche den Charakter der Raumakustik mitbestimmen. Bei der Verteilung von Schallwellen im Raum bewirken Holzwerkstoffe eine Minderung des Pegels und eine Verkürzung der Nachhallzeit. Dies ist in gesprächsdominierten Bereichen förderlich.

## **4.2 Architektonische und kulturelle Kriterien in der Gebäudezertifizierung**

Eine Problematik, die manche Architekten und Planer in der Bewertung von Gebäuden mittels Zertifikaten sehen, liegt in der Objektivierung eines Entwurfes mit dem Fokus auf rein technisch ökologische Aspekte. Das wirft die Frage auf, inwiefern gestalterische und kulturelle Kriterien in diesen Systemen Beachtung finden. Befasst man sich mit den Katalogen der Herausgeber, wird zunächst einmal deutlich, dass der Versuch einer ganzheitlichen Analyse eines Projektes ernsthaft angestrebt wird. Die Beachtung von organisatorischen Abläufen der Planung und Errichtung, der infrastrukturellen Anbindung und der Sensibilität der Flächeninanspruchnahme gehen weit über eine reine technisch mathematische Wertschätzung hinaus. So ist die Denkweise dieser Systeme ebenso vielschichtig und komplex wie die Planungsaufgabe des Architekten selbst. Auch innerhalb der konstruktiven Bewertung werden Punkte für alternative Lösungsideen vergeben. So beinhalten BREEAM und LEED die Kategorie der 'Innovationen', die den Einsatz und die Erprobung neuer zielgerichteter Technologien belohnt. Weiter wird auch die Verwendung von recycelten Materialien über ein gewisses Mindestmaß hinaus positiv bilanziert.

Richtet man den Blick auf die Fragestellungen der räumlichen Qualitäten selbst, liegt der Fokus der Betrachtung eher im bauphysikalischen Bereich. Dieser steht aber im äußerst zentralen Maße für den architektonisch gestalterischen Wert des Gebäudes. In der mit 'Gesundheit & Komfort' betitelten Kategorie des TQB-Zertifikates werden etwa die Punkte 'Thermischer Komfort', 'Raumluftqualität', 'Schallschutz' und 'Tageslicht und Besonnung' aufgeführt. Zwar liegt die Optimierung dieser Aufgabenbereiche innerhalb eines Projektes immer in der fruchtbaren Zusammenarbeit von Architekten und Bauphysikern, die entwurflichen Qualitäten, die Raumgestaltung, Materialwahl und Grundrissgestaltung bestimmen diese Eigenschaften aber maßgeblich mit. Die Berücksichtigung findet in leicht variierender Form in allen Gebäudezertifizierungssystemen Einzug.

Obwohl die Tendenz zur Internationalisierung und individuellen Anpassungsfähigkeit deutlich erkennbar ist, kann in der Berücksichtigung unmittelbarer soziokultureller Aspekte ein Verlauf zwischen den Systemen erster und zweiter Generation bezeichnet werden. Die TQB- und die DGNB-Zertifizierungen bewerten etwa die barrierefreie Erreichbarkeit eines Gebäudes, das System der 'deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen' auch die 'Umnutzungsfähigkeit'. Die Punkte zielen auf eine langfristige, nachhaltige Planung eines Gebäudes ab, die die gesellschaftliche Demografiewandlung und Berücksichtigung veränderlicher Anforderungen und Nutzerstrukturen beinhaltet. Diese eingeschlagene Richtung zeigt sicher weiter gelungene Ansätze der breit aufgestellten Gebäudebewertung, allerdings wäre eine weitere Vertiefung hinsichtlich der Nutzbarkeit wünschenswert. In den vergangenen Jahren hat sich die Denkweise der barrierefreien Gestaltung entwickelt hin zum sogenannten 'Universal Design'. Dieser Ansatz versucht die Brandmarkung, die Menschen mit gesundheitlichen Einschränkungen bei der Ergreifung spezieller baulicher Maßnahmen erfahren, aufzulösen. Die Tendenz dieses

planerischen Instrumentes schlägt entwurfliche Umsetzungen vor, die für alle Menschen ebenbürtig nutzbar sind, die gleichen Erschließungswege verfügbar machen und mittels Integration eine universelle Aufwertung des Gebäudes bereithalten.

Zuletzt beinhaltet der Kriterienkatalog der DGNB die Punkte der 'Sicherung der gestalterischen und städtebaulichen Qualität im Wettbewerb' und die 'Kunst am Bau'. Hier werden gar im unmittelbaren Maße architektonische und künstlerische Themen angesprochen. Die Durchführung von Wettbewerben wird lobend erwähnt, um die Kreativität und den Ansporn die bestmögliche räumliche Lösung umzusetzen zu fördern. Die Etablierung von künstlerischen Projekten im Verbund mit Gebäuden erfährt in den letzten Jahren eine Renaissance. Innerhalb der Gebäudebewertung wird vor allem auf das Potenzial der Individualisierung eines Bauwerks hingewiesen, das die Kunst zu wecken vermag. Im Umkehrschluss verwurzeln solche Projekte auch das Gebäude mit seiner unmittelbaren Umgebung. Da sich abzeichnet, dass die Gebäudezertifizierung in den kommenden Jahren an Bedeutung gewinnen wird und sich der Betrachtungsrahmen auf ganze Quartiere und deren Interaktionen ausweiten, sind solche Identifikationsmerkmale ein gelungener Ansatz der Implementierung architektonisch gestalterischer Kriterien.

Aus dieser Perspektive lässt sich abschließend festhalten, dass der befürchtete Widerspruch von architektonischer Freiheit und der Gebäudezertifizierung keiner sein muss. Zur Realisierung der Bewertung in der Praxis werden die ausgebildeten Auditoren als eine Art Fachplaner in die Strukturen von Projektteams aufgenommen. Wenn alle Beteiligten die Kriterien der Zertifizierung demnach als Orientierung und Erweiterung der umzusetzenden Möglichkeiten begreifen und im Sinne der integralen Planung ein reger Austausch praktiziert wird, bilden die Systeme eine Chance, die Gedanken der ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Nachhaltigkeit mit der Architektur zu vereinen.

## 4.3 LCA als integrierbares Hilfsmittel in der frühen Phase der Gebäudeplanung

Die Ökobilanzierung als planerisches Instrument ist durch ihren ganzheitlichen Ansatz sehr komplex, abhängig von soliden Datengrundlagen und der Kompetenz des Erstellers. Dennoch ist der Zugriff auf die ökologische Qualität, wie bereits gezeigt wurde, in der frühen Entwurfs- und Planungsphase eines Gebäudes besonders hoch. Wie also lässt sich die Methodik in den Prozess integrieren?

Die Strategie der integralen Planung ist für diese Aufgabe hervorragend geeignet. Sie versucht frühzeitig einen Kompetenzraum für das gesamte Planungsteam eines Projektes zu schaffen, indem ein steter Austausch stattfindet. Dies erfordert eine große Kooperationsbereitschaft aller Beteiligten und die nötigen technischen Hilfsmittel zur erfolgreichen Realisierung. Im klassischen Fall organisieren die Fachplaner ihre Informationen in separaten Programmen: für die grafische Darstellung, Kostenberechnung, statische und bauphysikalische Angaben etc. gibt es jeweils eigene Lösungen. Der Datenaustausch unter diesen Programmen verläuft mühsam in zeitlichen Intervallen anstatt kontinuierlich oder findet gar nicht erst statt. Dies führt zu einem enormen Aufwand und einer großen Anfälligkeit, Konflikte zu übersehen. Dies alleine und vor allem bei der Ergänzung um die Daten der Lebenszyklusanalyse erfordert andere Lösungen. Einen Ansatz bietet hier das BIM (Building Information Modelling). Planungssoftware, die dieses Prinzip verfolgen, integrieren eine große Menge dieser unterschiedlichen Informationen in parametrischer Weise in das Gebäudemodell. Der Architekt kann die Kubatur des Gebäudes bearbeiten, während die einzelnen Komponenten mit weiteren Daten verknüpft sind. Stellt man sich beispielsweise einen Wandaufbau aus Massivholzquerschnitten vor lassen sich aus dem Modell bereits Kosten berechnen, die thermische Qualität des Querschnitts

berechnen und mittels der parametrischen Zuweisung Alternativen erörtern. Genau an dieser Stelle lässt sich das Potenzial der Ökobilanz hervorragend entfalten. Die Verbindung zu einer aktuellen ökologischen Datenbank zeigt dem Planer die Sinnhaftigkeit seiner alternativen Entwürfe, der Konstruktionen und der Materialwahl und kann in den Entscheidungsprozess integriert werden. Die Tendenz in diesen Ansätzen geht außerdem in die Richtung der Implementierung der zeitlichen Dimension. So wird die Möglichkeit geschaffen, um den ganzheitlichen Betrachtungsrahmen auf den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes ausweiten zu können.

Dass das Prinzip der integralen Planung noch nicht flächendeckend etabliert ist, hat mehrere Gründe. Der technische Anspruch an die Umsetzung ist komplex und demnach anspruchsvoll für den Planer und die verwendete Hardware. In anderen Fällen fehlt es aber auch an der Bereitschaft zum kontinuierlichen Informationsaustausch unter den Beteiligten. So bleibt ein Spielraum für Gedanken, wie sich der Wert der Ökobilanzierung auch ohne den ausgebildeten Auditor für die Gebäudezertifizierung in die frühen Phasen der Planung einbinden lassen. Ein möglicher Ansatz wäre die Entwicklung von Hilfsmitteln, die sich an der Strategie der Kostenplanung des Architekten orientieren. Der Anspruch der Informationstiefe könnte je nach Planungsphase zunehmen, sodass in frühen Abschnitten bereits erste Schätzungen zu ökologischen Fragestellungen abgegeben werden könnten. Die vergleichende Lebenszyklusanalyse dieser Arbeit hat gezeigt, dass manche Aspekte wie die Materialwahl der Hauptkonstruktionen sehr großen Einfluss auf die Bewertung nehmen. Andere Prozesse, die in eine vollständige Analyse einfließen müssen, verursachen eher geringere Unterschiede.

So könnten die komplexen Zusammenhänge der Ökobilanzierung in Form eines händelbaren Tools für Architekten auf die wesentlichen Kernaussagen heruntergebrochen werden. So könnten auch ohne vertiefte Kenntnisse quantitative Aussagen über ökologische Zusammenhänge getroffen werden.

## 4.4 Gestalterische Alternativenkonzepte der materiellen Wiederverwendung

Eine Konklusion aus dem ökologischen Fassadenvergleich dieser Arbeit ist die Wichtigkeit der Nachnutzungsphase. Wie sich gezeigt hat, entscheidet der Recyclinggrad über die ökologisch verantwortliche Aluminiumnutzung. Die stoffliche und thermische Verwertung von Holz erzielen gewisse Gutschriften, wirken den hervorragenden CO<sub>2</sub>-Eigenschaften aber entgegen. Die Verwertung von Isoliergläsern wird derzeit gar kaum umgesetzt, da die Aufwendungen zur stofflichen Trennung die gleichwertige Wiederverwendung sehr aufwändig machen. Dies bedeutet gleichzeitig, dass es ein großes Potenzial für neue Strategien gibt. Je früher in der Produktion oder in der Gebäudeplanung die Nachnutzungsfrage berücksichtigt wird, desto größer sind die Möglichkeiten der Realisierung. Diese können auf materieller oder entwerflich konstruktiver Basis ausgearbeitet werden. Wenn man diese Betrachtung auf die architektonische Planung projiziert, könnte man drei unterschiedliche Stufen des Recyclings feststellen:

Die erste Stufe wäre demnach die Verwendung stofflich recycelter Elemente wie es etwa in der Metallproduktion umgesetzt wird. Diese Auseinandersetzung mit dem Thema geschieht eher passiv und impliziert keine konzeptuellen Schwerpunkte, die sich mit der Wiederverwendung beschäftigen.

Die zweite Stufe wäre die Aufnahme von Materialien, Elementen oder ganzen Bauteilen, die aus ande-

ren Branchen abfallen. Diese Idee bezieht sich auf architektonische und künstlerische Projekte wie die ungewöhnlichen Wandaufbauten aus alten PET-Flaschen, Altpapier oder nicht mehr verwendeten Magazinen. Im großen Maßstab steht in dieser Kategorie der Wiederverwendung auch die Containerarchitektur. Diese Konzepte erfordern eine frühe und intensive Auseinandersetzung mit dem Thema der Wiederverwendung. In so einem Falle verbindet es die Idee sogar mit einer Art sinnvollen Zweckentfremdung. Die dritte Stufe wäre die

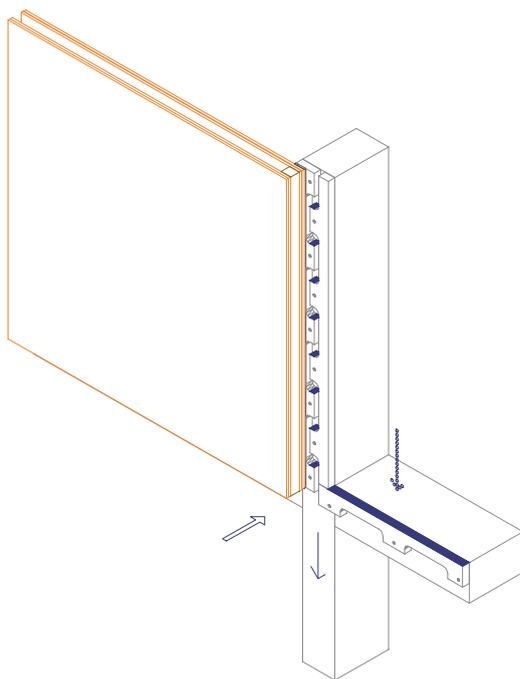


Abb. 223 Bürotrennwand aus Zeitschriften

konzeptuelle Ausrichtung eines Gebäudes auf die perspektivische Nachnutzung. Umsetzung findet dies häufig bei Bauprojekten mit einer temporären Nutzung. So bestand der schweizerische Expopavillon im Jahr 2000 aus gestapelten und verspannten Vollholzquerschnitten. Dieser Verbindungen waren beim Rückbau reversibel, die Hölzer konnten vollwertig wieder genutzt werden. Solche Prinzipien lassen sich auch auf die konstruktive Umsetzung langfristig genutzter Gebäude übertragen. Da häufig die stoffliche Trennung einer effizienten Wiederverwendung im Wege stehen, wären Lösungen wünschenswert, die reversible Verbindungen zulassen. Auch die zunehmende Verwendung der Massivholzbauweise ist in diesem Sinne positiv zu sehen. Die großen Holzquerschnitte machen eine Wiederverwendung sinnvoll. Die frühzeitige, architektonisch konzeptuelle Auseinandersetzung mit dem Recyclingthema hält viel Potenzial für eine nachhaltige Gebäudeplanung bereit.

## 4.5 Konstruktive Entwicklung der Koppelleiste

Die konstruktive Entwicklung der Holz-Glas-Verbundelemente hinsichtlich ihres Einsatzes in großflächigen Glasfassaden wird stetig weiter optimiert und in Versuchsaufbauten und Probebauten (wie der Schattenbox sowie dem Wintergartenprojekt) getestet. Im Rahmen der Dissertation Neubauer (2011) wurden verschiedene Lösungen hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Qualitäten überprüft, um zu einer Umsetzung für zwei Testgebäude zu kommen. Untersucht wurden dabei die Luftdichtigkeit, die Schlagregendichte, der Windwiderstand und die Differenzklimabeanspruchung. Im Folgenden werden die konstruktiven Entwicklungen über diese Versuche, die Weiterentwicklung durch die zusätzliche Anordnung der Klotzung und das Wintergartenprojekt aufgezeigt. Abschließend werden weitere Ansätze auf der Basis des ökologischen Fassadenvergleichs dieser Arbeit erarbeitet.



- Einflüsse
- Schlagregen
- Luftkonvektion
- ⋯⋯⋯ Kondensation
- Modifikationen

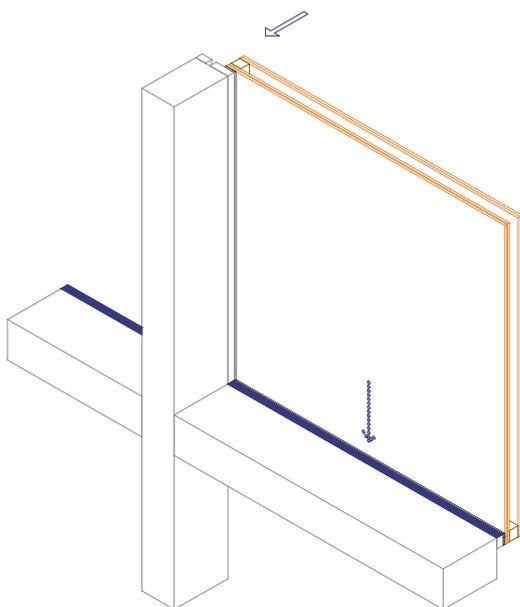


Abb. 224 Verzahnte Koppelleiste I Kondensatbildung  
Eindringen von Schlagregen  
an der Eckausbildung der  
Koppelleisten

### Verzahnte Koppelleiste I (Neubauer 2011)

Der erste Versuchskörper wurde mit einer verzahnten Geometrie der Koppelleiste ausgeführt, wie sie die diesseitigen Abbildungen zeigen. Dabei wurden alle Holzverbindungen ohne weitere Zwischenschichten ausgeführt, die Leisten selbst nicht vorbehandelt und die äußere Abdichtung nach dem Sealant-Prinzip mit einer PE-Rundschnur und Nassverfugung errichtet.

In der Auswertung wird deutlich, dass die bauphysikalischen Eigenschaften optimiert werden müssen. Im Bereich der Abstandhalter der Isolierverglasung fällt innen Kondensat aus, das in den horizontalen Teil der unbeschichteten BFU-Koppelleiste eindringt. Dies führt zu einer starken Durchfeuchtung und Beeinträchtigung der Leiste, die Auswirkungen der vertikalen Abschnitte und der Hauptkonstruktion sind geringer ausgeprägt. Außerdem entstehen Quell- und Schwindspannungen in der Klebefuge zum Glas. Um der Kondensatproblematik entgegen-

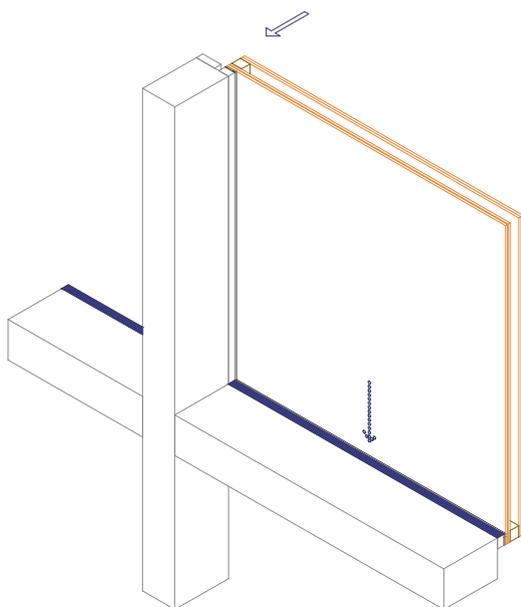
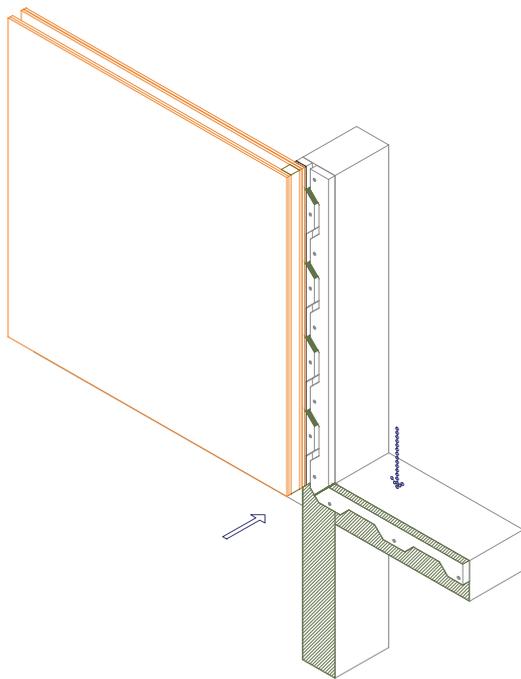


Abb. 225 Verzahnte Koppelleiste  
Modifikation veränderte Geometrie zur Wasserableitung Abdichtung zwischen Hauptkonstruktion und Koppelleiste Beschichtung und optimierte Eckausbildung der Leiste

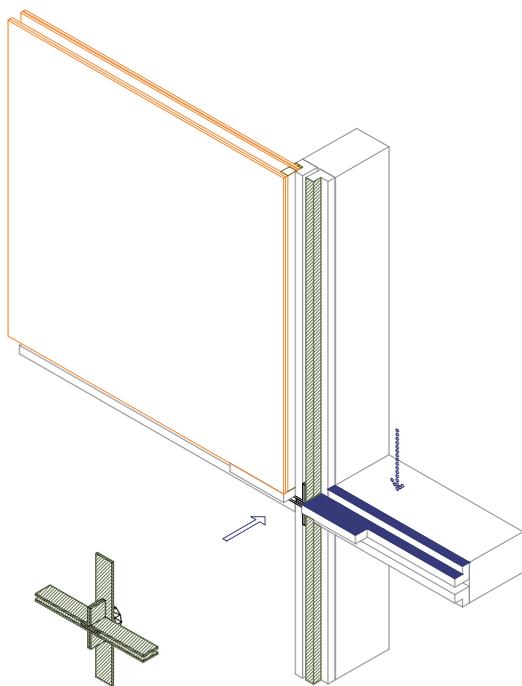
genzuwirken wurden verschiedene Positionen eines Heizdrahtes in der Falz ausprobiert. Weitere Problematiken werden den fehlenden Dichtungsschichten zwischen den Holzkonstruktionen sowie der Eckausbildung der Koppelleiste zugerechnet, an der durch Konvektion feuchter Luft sogar teilweise Eisbildung festgestellt wird. Dem so begünstigten Eindringen von Schlagregen und der geringen Luftdichtheit wurden im zweiten Aufbau entsprechende Modifikationen entgegengesetzt.

### Verzahnte Koppelleiste - Modifikation

Zur Verbesserung wurde die Geometrie der Koppelleiste dahingehend verändert, dass durch die Verschneidung im 45°-Winkel keine horizontalen Flächen mehr entstehen, in denen ausfallendes Wasser nicht abfließen kann. Zusätzlich wurde mit unterschiedlichen Vorbehandlungen der Koppelleisten (Dicklasur und Versiegelung) experimentiert, um das Eindringen des Kondensats zu erschweren. Dabei wurde beobachtet, dass der Widerstand der Lasur geringer ist, aber entsprechend die Rücktrocknung schneller erfolgt. Beide Behandlungen verhindern jedoch nicht die volle Sättigung der Holzfeuchte der horizontalen Koppelleiste.

In diesem zweiten Aufbau wurden zusätzliche Maßnahmen ergriffen, um die Ecklösung der Leiste zu optimieren. Neben der Silikondichtung der Gehrungsschnitte zwischen den Leisten wurde das Einbringen einer 'Hofmannschwalbe' getestet. Zwischen der Pfosten-Riegel-Konstruktion und den Koppelleisten wurden kompressible Klebebänder angeordnet. Diese Modifikationen führten zu deutlichen Verbesserungen der Widerstandsfähigkeit der Konstruktion gegen Schlagregen und eine Erhöhung der Luftdichtheit.

Augrund der Herausforderung der Feuchteproblematik der horizontalen Koppelleiste werden in der Schlussfolgerung die Tauglichkeit alternativer Materialkonstruktionen vor allem rechnerisch erörtert. Viele Optionen (wie Aluminium, Hart-PVC



- Einflüsse
- Schlagregen
- Luftkonvektion
- ⋯⋯⋯ Kondensation
- Modifikationen

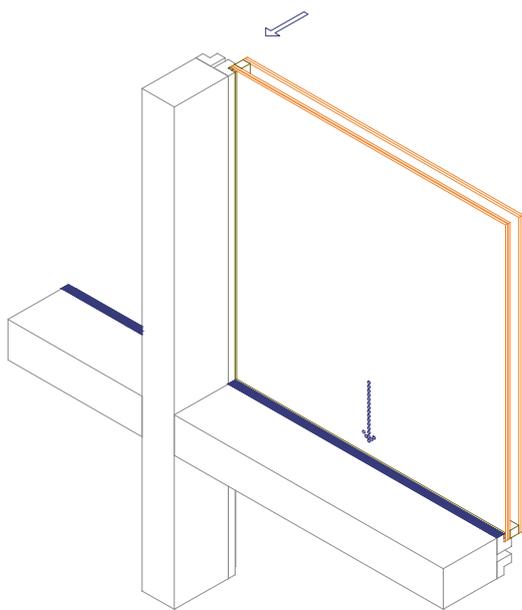


Abb. 226 L-förmige Koppelleiste kein stehendes Wasser in der vertikalen Leiste Übertragung von Horizontalkräften mittels schubverklebung und Klotzung Eigenlastabtragung über Stahlkonsolen

und Hartschaumstoff) fallen in diesem Gedanken-gang schnell aus dem Raster, da die Verklebung mit der Verglasung aufgrund der hohen temperaturbe-dingten Ausdehnungskoeffizienten nicht möglich ist. Auch andere Metalle wie Stahl weisen eine zu große Wärmeleitfähigkeit aus. Am interessan-ten, und inzwischen in manchen Fassadensystemen auch verwendet, scheint eine Koppelleiste aus GfK (Glasfaserverstärktem Kunststoff). Einzige Ein-schränkung dieser Materialwahl ist die aufwändige Bearbeitung und Formbarkeit, was besonders in der weiteren Entwicklung relevant wird. Diese erschwert demnach die Herstellung einer L-förmigen Koppelleiste, die zur Druckübertragung mittels Klotzen nötig ist.

### L-förmige Koppelleiste

In der Fortführung der statischen Ausbildung der Holz-Glas-Verbundelemente wurde eine L-förmige Koppelleiste entwickelt, die die gemeinsame Kle-bung und Klotzung zur Aktivierung der Glasschei-be bei Horizontallasten ermöglicht. Materiell wur-de weiter Furnierschichtholz aus Birkefurnieren gewählt. Weiter wurde ein Kreuzungspunkt erar-beitet, der mittels der bereits erwähnten Stahlwin-kel die Ableitung der vertikalen Kräfte unterstützt. Die zuvor eingebrachten Dichtbänder zwischen Pfosten-Riegel-Konstruktion und den jeweiligen Koppelleisten wurde fortgeführt. Die Oberfläche der Klebung wurde zu verbesserten Kontaktbildung beschichtet.

Durch die geänderte Geometrie der Koppelleiste wird die verzahnte Ausbildung hinfällig, die Ge-fahr von stehender Feuchtigkeit in der Vertikalfalz ist somit nicht mehr gegeben. Die L-förmige Leiste lässt sich zudem in der Eckausbildung gut falzar-tig verschneiden. Dies unterstützt die Konstruktion bei den Themen des Schlagregenwiderstandes und der Luftdichtheit. Bei einem Verzicht auf den zuvor vorgeschlagenen Heizdraht bleibt jedoch die Pro-blematik des Kondensats und die massive Beein-trächtigung der horizontalen Leiste unverändert.

### Auslassung der horizontalen Koppelleiste

Neben den bereits erwähnten Überlegungen, alternative Materialien zur Verwendung als Koppelleiste zu benutzen, wird innerhalb des Wintergartenprojektes eine Detaillösung erarbeitet, die den Verzicht auf den horizontalen Anteil der Leiste beinhaltet. Dabei wird die Geometrie der Stahlaufleger so erweitert, dass die Eigenlast der Verglasung komplett über diese in die Pfosten eingeleitet werden kann. Die Stirnseite der Koppelleiste wird dabei so eingeschlitzt, dass sie über den Steher des Stahlwinkels gesteckt werden kann. Der Vorteil dieser Entwicklung liegt auf der Hand. Die Problematik des stehenden Wassers in der horizontalen Koppelleiste wird so egalisiert. Zudem kann die Luft im Falzraum zirkulieren, sodass bei etwaigen Feuchtigkeitsanstiegen der weiteren Holzanteile schnell wieder die Rücktrocknung ablaufen kann. Beim Ausfall von Kondensat an der Scheibeninnenseite ist die Möglichkeit des Abfließen gewährleistet.

Zeitgleich wird bei dieser Lösung auf die horizontalen Anteile der sonst umlaufend aufgetragenen Verklebung und die jeweiligen Klotze verzichtet. Die Eigenlastabtragung wird wie erwähnt allein durch die Stahlwinkel übernommen. Inwiefern diese Maßnahme die Aufnahme der Horizontallasten der Holz-Glas-Verbundelemente einschränkt und das Aussteifungspotenzial beeinflusst, wurde noch nicht versuchstechnisch bewertet.

Eine weitere Entwicklung in diesem Ansatz wäre die Übertragung der Horizontalkräfte zwischen zwei benachbarten Holz-Glas-Verbundelementen über die Hilfskonstruktion aus Stahlwinkeln.

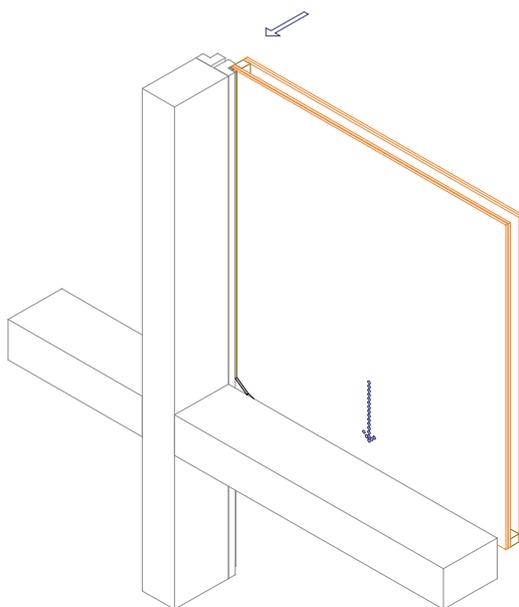
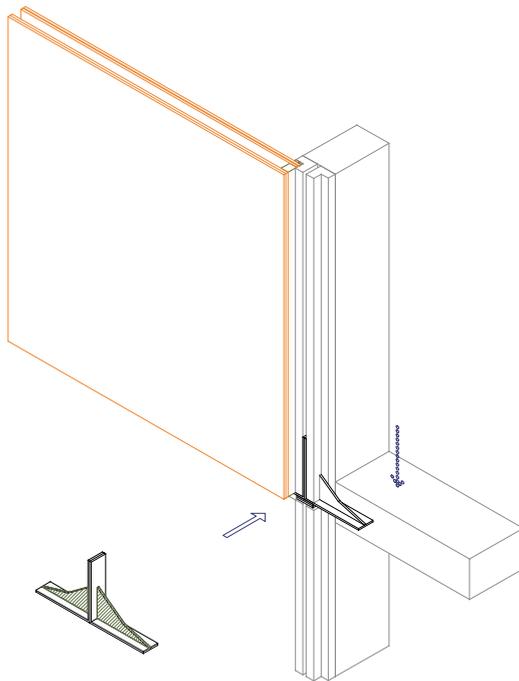
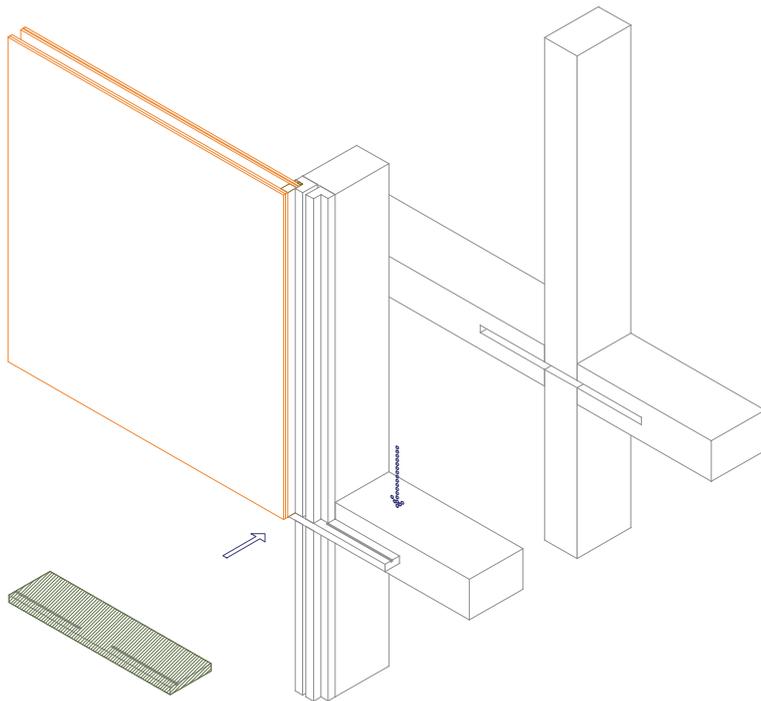


Abb. 227 Auslassung der horizontalen Leiste Entgegenwirken der Kondensatproblematik Vertikallasten über erweiterte Unterkonstruktion mögliche Übertragung von Horizontallasten



- Einflüsse
- Schlagregen
- Luftkonvektion
- ⋯⋯⋯ Kondensation
- Modifikationen

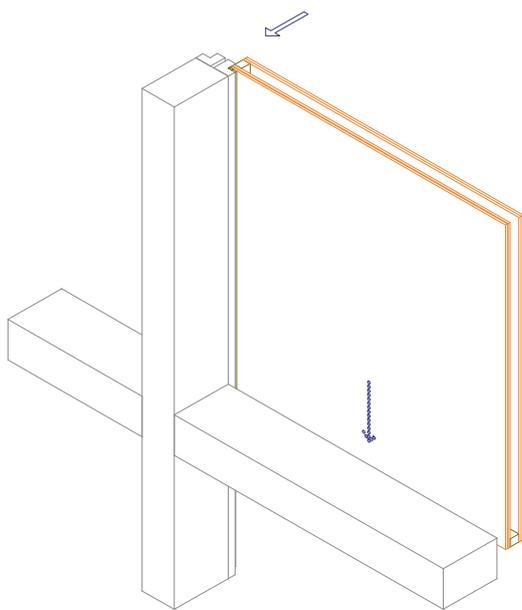


Abb. 228 Kreuzungspunkt aus FSH Abtragung der Vertikallasten mittels Holzschwert Luftzirkulation im Falzraum Verdunstungsrinne gegen Kondensatproblematik konstruktiv variable Schwertstärke

### Eingelassener Kreuzungspunkt aus FSH

Aus den vorangegangenen Überlegungen und den Ergebnissen dieser Arbeit wird hier eine Lösung angestrebt, die die weitere Reduktion metallischer Konstruktionsanteile erwägt. Die zuvor bewährten Abdichtungsmaßnahmen gegen das Eindringen von Schlagregen und für die Luftdichtheit werden weiter fortgeführt.

Diese Variante sieht ein Einlassen einer hölzernen Hilfskonstruktion zur Lastabtragung der entstehenden Vertikallasten vor. Die Dimensionierung dieses Furnierschichtholzschwertes kann je nach Verglasungstyp variieren, da durch den Verzicht auf die horizontale Koppelleiste keine Einschränkungen gegeben sind. Durch den Einsatz des Schwertes wird wiederum ein gewisser Bereich einer horizontalen Holzfläche ausgebildet, die möglichen Kondensaten eine Angriffsfläche bietet. Durch die gute Durchlüftung des Falzraumes wird dieser Problematik allerings entgegengewirkt. Zudem könnte im Bereich der Scheibeninnenseite eine Art Verdunstungsrinne eingelassen werden, die das Eindringen in das Holzschwert und die Übertragung in die Hauptkonstruktion verhindert. Eine denkbare Weiterentwicklung dieses Ansatzes könnte die Erweite-

zung des Schwertes zu einem Kreuzungspunkt sein. Das zusätzliche vertikale Schwert unterstützt den horizontalen Teil dabei als Auflager und verbessert die Einleitung der Eigenlasten in die Pfostenstruktur. Je nach Verglasungart könnte die Tiefe der Unterkonstruktion variieren, um die Lasten einer äußeren oder mehrerer äußerer Gasscheiben stützen zu können.

Analog zur vorangegangenen Variante wäre der nächste Schritt die Übertragung der Horizontalkräfte unter den Holz-Glas-Verbundelementen.

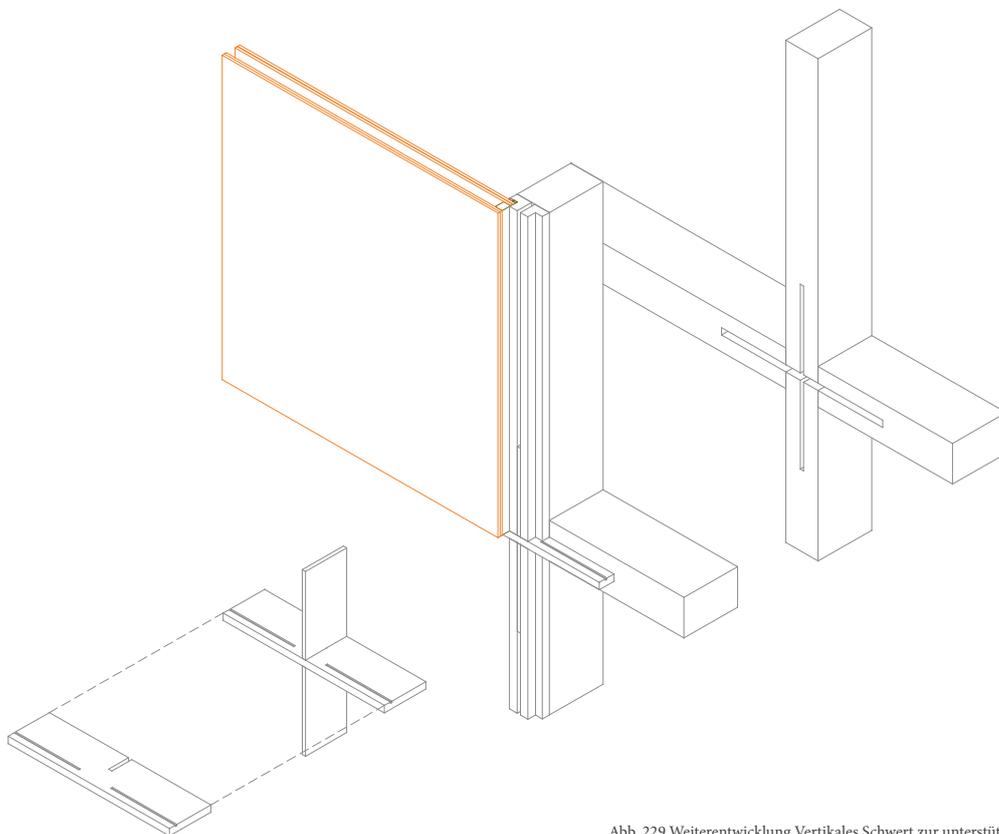
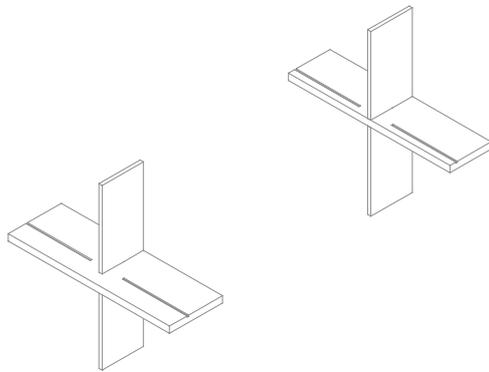


Abb. 229 Weiterentwicklung Vertikales Schwert zur unterstützenden Lastabtragung Erweiterung je nach Verglasungstyp mögliche Übertragung von Horizontalkräften

## 4.6 Großflächige Glasfassaden im Kontext der Gebäudeökobilanz

Im Sinne der ökologischen Gebäudeplanung rücken Aufgabenstellungen in den Vordergrund, die sich unmittelbar auf die Bewertung innerhalb der Lebenszyklusanalyse auswirken. Gerade im Bereich der großflächigen Glasfassaden spielt die konzeptuelle Umsetzung der Gebäudehülle eine gewichtige Rolle. Gewisse Teilaspekte werden in dieser Hinsicht häufig in den Fokus gerückt:

- die thermische Behaglichkeit der Innenräume bezüglich der Überhitzung im Sommer. Gerade bei Gebäuden mit inneren Wärmequellen wie sie in Bürogebäuden durch elektronische Geräte auftreten.
- Blendung und Reflexionen bei der Tageslichtnutzung, die ohne geeignete Kontrollmaßnahmen auftreten
- hohe Aufwendungen der Errichtungsenergie

Vor dem Hintergrund der komplexen Aufgabe der Planung einer großflächigen Glasfassade und zum Erreichen bestimmter Energiestandards werden so alternative Konzepte etwa mit Lochfassaden entwickelt, die auch in Bürogebäuden Anwendung finden. Das hier abgebildete Beispiel der 'green offices' von 'lutz architectes' in Givisiez zeigt so ein stringentes Konzept der Umsetzung nachhaltiger Überlegungen über den gesamten Lebenszyklus. Das dreigeschossige Bürohaus in Holzbauweise wurde mit einer Fassade ausgeführt, deren Öffnungsanteil im Verhältnis eher gering ist. Diese konzeptuelle Ausrichtung verzichtet bewusst auf Teile der solaren Einträge, die mit einem größeren Verglasungsanteil erzielt würden. Durch den hohen konstruktiven Standard und die präzise Auswahl ökologisch hochwertiger Materialien wird ein äußerst geringer Energieverbrauch während der Errichtung und der Nutzung des Gebäudes erreicht. Die Fassadenöffnungen wurden in Holzfenstern mit Dreifachverglasung ausgeführt, für die geschlossenen Bereiche wurde eine unbeschichtete vorgegraute Holzbeplankung gewählt. Die vorproduzierten Außen-



Abb. 230 green offices - Fassadenansicht



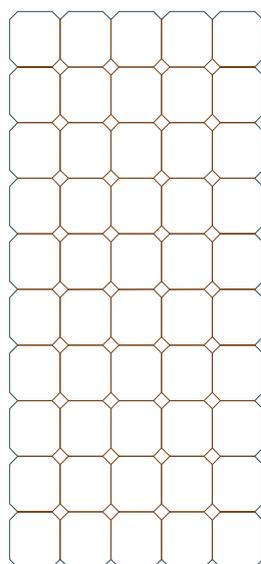
Abb. 231 green offices - Materialien

wände wurden auf der Baustelle mit Zelluloseflocken ausgedämmt. Die anfallenden Heizlasten im Winter bedient ein Pelletofen, der eine Fußbodenheizung mit warmen Wasser versorgt. Betrachtet man die strategische Ausrichtung dieses oder vergleichbarer Gebäude wird deutlich, dass die Entscheidung über das Fassadenprinzip immer nur ein Teil eines Gesamtkonstruktes ist. So wie die Lebenszyklusanalyse in der zeitlichen Dimension ist auch die ökologische Sinnhaftigkeit immer im übergeordneten Kontext eines Energiekonzeptes zu betrachten. Der Ansatz und Beweggrund dieser Arbeit, alternative Ausführungsmöglichkeiten großflächiger Glasfassaden bereitzustellen, kann Teil einer solchen Umsetzung sein. Die im Hauptteil erzielten Ergebnisse der ökologischen Kriterien und die weitere Entwicklung konstruktiver und statischer Zusammenhänge untermalen diese Ausrichtung.

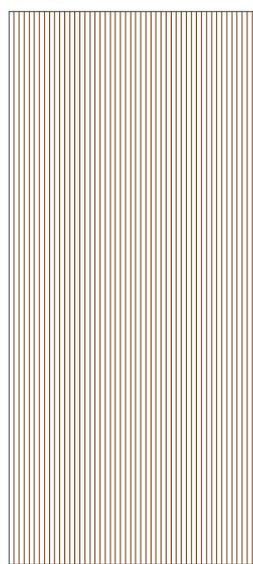
Um auf die einleitend aufgezeigten Anforderungen an die Planung einer großflächigen Glasfassade zurückzukommen, kann der hohe Anteil der solaren Einträge zu einem Potenzial umgedreht werden. Gewisse Gewinne, die sich nur mittels einer verglasten Oberfläche erwirken lassen, können ebenso Teil einer energetischen Gesamtkonzeption sein. Die Anwendungsmöglichkeiten sind dabei äußerst vielseitig und umfassen unterschiedliche Bereiche der Energieerzeugung. Die bereits gut etablierte Form zeigt die Stromerzeugung mittels Photovoltaikzellen in der Fassade. Die Effizienz der Zellen wird fortlaufend gesteigert und deren Nutzung trägt zur Vergrößerung des g-Wertes der Verglasung bei. Auch das Konzept der Wärmekollektoren hinter einer Einfachverglasung nutzt die Einstrahlung der Sonnenergie zur Wärmeerzeugung. Die variable Einstellung ermöglicht das Einleiten der Warmluft im Winter und das Abführen im Sommer. Einen weiteren Ansatz zeigt die Umsetzung in Photosyntheseprozessen. Algenpaneele zur Erzeugung von Biogasen wurden beispielsweise in einem Gebäude der IFA Hamburg 2013 realisiert. Ein Hotelbau am Wiener Gürtel mit dieser Fassadenbekleidung ist in Planung. Damit können Heizungsanlagen aber auch die Warmwasseraufbereitung betrieben werden.

Diese Ausführungsmöglichkeiten nutzen allesamt die solaren Einträge auf unterschiedliche Art und Weise und können ein wichtiger Aspekt des energetischen Gesamtkonzeptes eines Gebäudes sein.

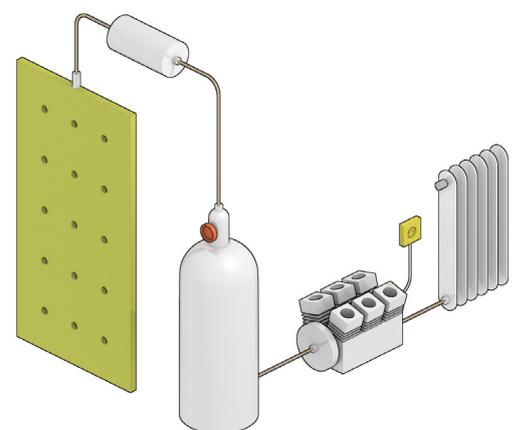
Abb. 232 solare Nutzung in der großflächigen Glasfassade



Skizze Photovoltaikpaneel zur Stromerzeugung



Wärmekollektor Absorberplatte als Speichermaterial



Funktionsweise einer Biogasanlage

## 5. Literaturverzeichnis

Arnim von Gleich, Martin Brahmer-Lohss, Manuel Gottschick, Dirk Jepsen, Knut Sander (2004)

**Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg - Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg.** Hamburg

BKI Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Hrsg. (2010) **BKI Baukosten 2010 - Teil 1 Statistische Kostenkennwerte für Gebäude.** Köln: Rudolf Müller GmbH & Co. KG

BKI Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Hrsg. (2010) **BKI Baukosten 2010 - Teil 3 Statistische Kostenkennwerte für Positionen.** Köln: Rudolf Müller GmbH & Co. KG

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Hrsg. (2011) **Praxisinformation - Waldinventur 2007/09.** Wien

Christina Radlbeck (2006) **Ganzheitliche Analyse und Bewertung von tragenden Aluminiumkonstruktionen.** unv. Diss., Technische Universität München

Dipl.Ing. Georg Neubauer (2011) **Entwicklung und Bemessung von statisch wirksamen Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zum Einsatz im Fassadenbereich.** unv. Diss., Technische Universität Wien

Dipl.Ing. Thomas Edl (2008) **Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe.** unv. Diss., Technische Universität Wien

Dipl.Ing. Werner Hochhauser (2011) **Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben.** unv. Diss., Technische Universität Wien

Holger König, Niklaus Kohler, Johannes Kreißig, Thomas Lützkendorf (2009) **Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung - Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge.** München: Institut für Internationale Architektur

Holzforschung Austria, Hrsg. (2011) **Holz und Glas im tragenden Verbund - Seminarband.** Wien: Holzforschung Austria

Institut Bauen und Umwelt e.V., Hrsg. (2010) **Umweltproduktdeklaration Brettschichtholz (BS-Holz).** Königswinter: Institut Bauen und Umwelt e.V.

Institut Bauen und Umwelt e.V., Hrsg. (2010) **Umweltproduktdeklaration Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche.** Königswinter: Institut Bauen und Umwelt e.V.

Institut für Internationale Architektur (2010) **Detail - Serie 2010, Architektur + Recycling.** München: Institut für Internationale Architektur

J. Kreißig, J. Kümmel (1999) **Baustoff-Ökobilanzen. Wirkungsabschätzung und Auswertung in der Steine-Erde-Industrie.** Berlin: Bundesverband Baustoffe Steine + Erden e.V.

proHolz Austria - Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft zur Förderung der Anwendung von Holz (2006) **Zuschnitt 23.2006.** Wien: proHolz Austria

proHolz Austria - Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft zur Förderung der Anwendung von Holz (2012) **Zuschnitt 48.2006.** Wien: proHolz Austria

Prof. DDI Wolfgang Winter, K. Hollisnky, T. Weinlinger (2007) **Holzbau: Bausysteme Holzbau für Architekten.** Wien: Institut für Architekturwissenschaften - Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

Thilo Ebert, Natalie Eßig, Gerd Hauser (2010) **Zertifizierungssysteme für Gebäude - Nachhaltigkeit bewerten, Internationaler Systemvergleich, Zertifizierung und Ökonomie.** München: Institut für Internationale Architektur

# Vorträge und Berichte

Lehrstuhl für Baukonstruktion III, Hrsg. (2007) **Scriptum: Bauphysik**. RWTH Aachen Lehrstuhl für Baukonstruktion III

Conrad Lutz architecte Sàrl (2013) **Broschüre: green offices - Bauen anders**. Givisiez: Green-Offices, In: <http://www.greenoffices.ch/data/content/document/202.pdf>, 19.05.2013

Dipl.Ing. Vitalija Rosliakova (2013) **Winter garden for Haas GmbH & Co KG**. Wien: Institut für Architekturwissenschaften - Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

Dipl.Ing. Werner Hochhauser, Prof. DDI Wolfgang Winter, Prof. Dr.-Ing. Klaus Kreher (2011) **Holz-Glas-Verbundkonstruktionen - Band 1: Berechnungs- und Bemessungskonzepte, Abschlußbericht eines FFG geförderten Forschungsprojekts**. Wien: Institut für Architekturwissenschaften - Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

Prof. DDI Wolfgang Winter, Dipl.Ing. Vitalija Rosliakova (2012) **Vortrag: Wood wisdom - Load bearing timber-glass composites**. Maribor

Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011) Vortrag: **Green Building - Einflüsse aufs Planen und Bauen**. Dresden

Umweltbundesamt GmbH, Hrsg. (2011) **Klimaschutzbericht 2011**. In: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0334.pdf>, 07.05.2013

# Datenbanken und Normen

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung und Bayerische Architektenkammer (2013) **wecobis - Ökologisches Baustoffinformationssystem**. In: [www.wecobis.de](http://www.wecobis.de). Berlin, München

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg. (2011) **Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)**. Berlin

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2013) **Ökobau.dat - Baustoffdatenbank für die Bestimmung globaler ökologischer Wirkungen**. In: <http://www.nachhaltigesbauen.de/oekobaudat>. Leinfelden-Echterdingen

IBO - Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (2013) **baubook deklarationszentrale**. In: <http://www.baubook.at/zentrale>

International Organization for Standardization, Hrsg. (2006) **ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**. Genf

Österreichische Gesellschaft für Holzforschung (2013) **dataholz.com - Katalog bauphysikalisch und ökologisch geprüfter Holzbauteile**. Wien, In: <http://dataholz.com>

# Internetquellen

GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2013) **Produktion von Rohaluminium**. In: <http://www.aluinfo.de/index.php/produktion.html>, 08.04.2013

# 6. Abbildungsverzeichnis

Alle hier nicht eigens nachgewiesenen Abbildungen stammen vom Autor

## 1. Einleitung

- Abb. 1 Primärenergieverbrauch nach Nutzung Österreich 2011 Seite 8 -  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Umweltbundesamt GmbH, Hrsg. (2011)
- Abb. 2 Bau- und Rohstoffeinsatz in Mitteleuropa Seite 9 - Winter (2007)
- Abb. 3 physikalische Eigenschaften Verbundmaterialien Seite 10
- Abb. 4 Verzahnte Koppelleiste aus Edl, Thomas Seite 11 - Dipl.Ing. Thomas Edl (2008)
- Abb. 5 Detail Eichgraben, aus Neubauer Seite 11 - Dipl.Ing. Neubauer (2011)
- Abb. 6 Verklebung und Verklotzung, Hochhauser Seite 12 - Dipl.Ing. Hochhauser (2011)
- Abb. 7 Schattenbox Außenansicht Seite 13 - Holzforschung Austria (2011)
- Abb. 8 Schattenbox Innenansicht Seite 13 - Holzforschung Austria (2011)
- Abb. 9 Schattenbox Detailanschluss Öffnungselemente Seite 13 - Dipl.Ing. Neubauer (2011)
- Abb. 10 Pfosten-Riegel-Konstruktion als Haupttragstruktur Seite 14
- Abb. 11 Einlegen der Stahlwinkel als Auflager der vertikalen Lastabtragung des  
Verglasungseigengewichts Seite 14
- Abb. 12 Koppelleiste aus Furnierschichtholz mit Randverstärkungen Stahlwinkel und  
FSH-Profilerverweiterung für Vertikallasten Seite 15
- Abb. 13 Die Erweiterung zur Fügung aus Klebung und Klotzung -  
Vergrößerung des Aussteifungspotenzials Seite 15
- Abb. 14 Isolierverglasung in möglicher Zwei- oder Dreischiebenausführung Seite 15
- Abb. 15 Gesamtaufbau Seite 15
- Abb. 16 Skizze Wintergarten Haus Haas mit unterschiedlichen konstruktiven Lösungsansätzen Seite 16  
Dipl.Ing. Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 17 Anschlussdetail der im weiteren Verlauf bezeichneten Variante Holz-Glas-Verbund A Seite 17  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Dipl.Ing. Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 18 Anschlussdetail Einfachverglasung Seite 17  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Dipl.Ing. Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 19 Anschlussdetail Wärmekollektor Seite 17  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Dipl.Ing. Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 20 Physikalische Eigenschaften Metalle Seite 18
- Abb. 21 Heroal C50<sup>7</sup> Aluminium Seite 19 - © heroal (2013) [http://www2.heroal.de/www/sites/default/files/styles/large/public/medien\\_managed/produkte/-heroal\\_C\\_50/heroal\\_C\\_50/C\\_50\\_0.jpg?itok=i45Jo9pN](http://www2.heroal.de/www/sites/default/files/styles/large/public/medien_managed/produkte/-heroal_C_50/heroal_C_50/C_50_0.jpg?itok=i45Jo9pN), 25.04.2013
- Abb. 22 Heroal C50\_HI Seite 19 - © heroal (2013) [http://www2.heroal.de/www/sites/default/files/styles/large/public/medien\\_managed/produkte/-heroal\\_C\\_50/heroal\\_C\\_50\\_HI/C\\_50\\_HI\\_0.jpg?itok=PIFwJkPk](http://www2.heroal.de/www/sites/default/files/styles/large/public/medien_managed/produkte/-heroal_C_50/heroal_C_50_HI/C_50_HI_0.jpg?itok=PIFwJkPk), 25.04.2013
- Abb. 23 Schüco SFC 85 Seite 19 - © muharski (2009) <http://muharski.com/wp-content/uploads/2010/10/SFC-85-3.jpg>, 25.04.2013
- Abb. 24 Schüco FW50+ SI Green Seite 19 - © Schüco Deutschland (2013) [http://www.schueco.com/web/web/cropScaleableImage/w495/h463/images\\_produkseitenmaster\\_de\\_en/fassaden/green\\_1.jpg](http://www.schueco.com/web/web/cropScaleableImage/w495/h463/images_produkseitenmaster_de_en/fassaden/green_1.jpg), 25.04.2013

## 2. Methodik der Ökobilanzierung (LCA) im Hochbau

- Abb. 25 Einflusszugriff der lebenszyklischen Betrachtung Seite 21 - Holger König (2009)
- Abb. 26 P.ne - Gewinnung fossiler Energieträger Seite 22 - Fclcelloguy - <http://www.klima-wandel.com/wp-content/uploads/2011/08/oelfoerderung.jpg>
- Abb. 27 Pern - Stromerzeugung durch die Nutzung der Windkraft Seite 22 - © iStockphoto.com/TebNard  
[http://www.green-jobs.at/wp-content/uploads/2011/05/ACT\\_110502\\_Wind\\_TebNad.jpg](http://www.green-jobs.at/wp-content/uploads/2011/05/ACT_110502_Wind_TebNad.jpg)
- Abb. 28 Schematische Zeichnung GWP Seite 23 - J. Kreißig (1999)
- Abb. 29 Schematische Zeichnung ODP Seite 23 - J. Kreißig (1999)
- Abb. 30 Schematische Zeichnung AP Seite 24 - J. Kreißig (1999)
- Abb. 31 Schematische Zeichnung EP Seite 24 - J. Kreißig (1999)
- Abb. 32 Schematische Zeichnung POCP Seite 24 - J. Kreißig (1999)
- Abb. 33 Investitionskosten und Nutzungskosten im Lebenszyklus Seite 26

### 3.1 Lebenszyklusbetrachtung Baumaterialien

- Abb. 34 Übersicht über die im Lebenszyklus betrachteten Materialien Seite 27

Abb. 35 Symbol Schnittholz Fichte Seite 28  
Abb. 36 Bestandteile Schnittholz Fichte Seite 28  
Abb. 37 Skizze Lebenszyklus Schnittholz Fichte Seite 29  
Abb. 38 Teilprozesse Schnittholz Fichte Seite 30  
Abb. 39 Primärenergieverbrauch Schnittholz Fichte Seite 31  
Abb. 40 Umweltindikatoren Schnittholz Fichte Seite 31

Abb. 41 Symbol Brettschichtholz Seite 32  
Abb. 42 Bestandteile Brettschichtholz Seite 32  
Abb. 43 Skizze Lebenszyklus Brettschichtholz Seite 33  
Abb. 44 Teilprozesse Brettschichtholz Seite 34  
Abb. 46 Umweltindikatoren Brettschichtholz Seite 35  
Abb. 45 Primärenergieverbrauch Brettschichtholz Seite 35

Abb. 47 Symbol Dreischichtplatten Seite 36  
Abb. 48 Bestandteile Dreischichtplatten Seite 36  
Abb. 49 Skizze Lebenszyklus Dreischichtplatten Seite 37  
Abb. 50 Teilprozesse Dreischichtplatten Seite 38  
Abb. 51 Primärenergieverbrauch Dreischichtplatten Seite 39  
Abb. 52 Umweltindikatoren Dreischichtplatten Seite 39

Abb. 53 Symbol Furnierschichtholz Seite 40  
Abb. 54 Bestandteile Furnierschichtholz Seite 40  
Abb. 55 Skizze Lebenszyklus Furnierschichtholz Seite 41  
Abb. 56 Teilprozesse Furnierschichtholz Seite 42  
Abb. 57 Primärenergieverbrauch Furnierschichtholz Seite 43  
Abb. 58 Umweltindikatoren Furnierschichtholz Seite 43

Abb. 59 Symbol Einfachverglasung Seite 44  
Abb. 60 Bestandteile Einfachverglasung Seite 44  
Abb. 61 Skizze Lebenszyklus Einfachverglasung Seite 45  
Abb. 62 Teilprozesse Einfachverglasung Seite 46  
Abb. 63 Primärenergieverbrauch Einfachverglasung Seite 47  
Abb. 64 Umweltindikatoren Einfachverglasung Seite 47

Abb. 65 Symbol Isolierverglasung Seite 48  
Abb. 66 Bestandteile Isolierverglasung Seite 48  
Abb. 67 Skizze Lebenszyklus Isolierverglasung Seite 49  
Abb. 68 Teilprozesse Isolierverglasung Seite 50  
Abb. 69 Primärenergieverbrauch Isolierverglasung Seite 51  
Abb. 70 Umweltindikatoren Isolierverglasung Seite 51

Abb. 71 Symbol Silikondichtmassen Seite 52  
Abb. 72 Bestandteile Silikondichtmassen Seite 52  
Abb. 73 Skizze Lebenszyklus Silikondichtmassen Seite 53  
Abb. 74 Teilprozesse Silikondichtmassen Seite 54  
Abb. 75 Primärenergieverbrauch Silikondichtmassen Seite 55  
Abb. 76 Umweltindikatoren Silikondichtmassen Seite 55

Abb. 77 Symbol Aluminiumprofil Seite 56  
Abb. 78 Bestandteile Aluminiumprofil Seite 56  
Abb. 79 Skizze Lebenszyklus Aluminiumprofil Seite 57  
Abb. 80 Teilprozesse Aluminiumprofil Seite 58  
Abb. 81 Primärenergieverbrauch Aluminiumprofil Seite 59  
Abb. 82 Umweltindikatoren Aluminiumprofil Seite 59

Abb. 83 Symbol Baustahl Seite 60  
Abb. 84 Bestandteile Baustahl S235JR Seite 60  
Abb. 85 Skizze Lebenszyklus Baustahl Seite 61  
Abb. 86 Teilprozesse Baustahl Seite 62  
Abb. 87 Primärenergieverbrauch Baustahl Seite 63  
Abb. 88 Umweltindikatoren Baustahl Seite 63

### 3.2 Ökologischer Fassadenvergleich - Fassadenausschnitt Verlagsgebäude Hamburg 'Ericusspitze'

Abb. 89 Nordostfassade Verlagsgebäude Ericusspitze, Hamburg Seite 64 - Foto: Klaus Frahm, © Klaus Frahm / arturimages

Abb. 90 Südfassade Verlagsgebäude Ericusspitze, Hamburg Seite 64 - Foto: Klaus Frahm, © Klaus Frahm / arturimages

Abb. 91 Skizze Lebenszyklus Aluminiumfassade Seite 66

Abb. 92 Skizze Lebenszyklus Holz-Glas-Verbundfassade Seite 68

Abb. 93 Referenzelement in Grundriss und Ansicht Aluminiumfassade Maßstab 1:25 Seite 70

Abbildung durch Autor nach Vorlage Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011)

Abb. 94 Grundriss Profildetail Aluminiumfassade Maßstab 1:1 Seite 71

Abbildung durch Autor nach Vorlage Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011)

Abb. 95 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Aluminiumfassade Seite 72

Abb. 96 Skizze Massenerhebung Aluminiumfassade Seite 72

Abb. 97 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung nach Konstruktionsanteilen Aluminiumfassade Seite 73

Abb. 98 Aluminiumprofil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben Seite 73

Abb. 99 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Aluminiumfassade Standardraster Seite 73

Abb. 100 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen Aluminiumfassade Seite 74

Abb. 101 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung Aluminiumfassade Seite 74

Abb. 102 Fassadenraster Alternative I Aluminiumfassade Seite 75

Abb. 103 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Aluminiumfassade Rasteralternative I Seite 75

Abb. 104 Fassadenraster Alternative II Aluminiumfassade Seite 75

Abb. 105 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Aluminiumfassade Rasteralternative II Seite 75

Abb. 106 Referenzelement in Grundriss und Ansicht BSH-Fassade Maßstab 1:25 Seite 76

Abbildung durch Autor nach Vorlage Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011)

Abb. 107 Grundriss Profildetail BSH-Fassade Maßstab 1:1 Seite 77

Abbildung durch Autor nach Vorlage Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011)

Abb. 108 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung BSH-Fassade Seite 78

Abb. 109 Skizze Massenerhebung BSH-Fassade Seite 78

Abb. 110 BSH-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben Seite 79

Abb. 111 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung nach Konstruktionsanteilen BSH-Fassade Seite 79

Abb. 112 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten BSH-Fassade Standardraster Seite 79

Abb. 113 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen BSH-Fassade Seite 80

Abb. 114 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq BSH-Fassade Seite 80

Abb. 115 Fassadenraster Alternative I BSH-Fassade Seite 81

Abb. 116 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten BSH-Fassade Rasteralternative I Seite 81

Abb. 117 Fassadenraster Alternative II BSH-Fassade Seite 81

Abb. 118 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten BSH-Fassade Rasteralternative II Seite 81

Abb. 119 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Remodellierung Aluminium Seite 82

Abb. 120 Skizze Massenerhebung Remodellierung Aluminium Seite 82

Abb. 121 Aluminiumprofil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben Remodellierung Aluminium Seite 83

Abb. 122 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung nach Konstruktionsanteilen Remodellierung Aluminium Seite 83

Abb. 123 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Remodellierung Aluminium Standardraster Seite 83

Abb. 124 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen Remodellierung Aluminium Seite 84

Abb. 125 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung Remodellierung Aluminium Seite 84

Abb. 126 Indikatoren Lebenszyklus nach % Remodellierung Aluminium Seite 84

Abb. 127 Fassadenraster Alternative I Remodellierung Aluminium Seite 85

Abb. 128 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Remodellierung Aluminium Rasteralternative I Seite 85

Abb. 129 Fassadenraster Alternative II Remodellierung Aluminium Seite 85

Abb. 130 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Remodellierung Aluminiumfassade Rasteralternative II Seite 85

Abb. 131 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Remodellierung BSH Seite 86

Abb. 132 Skizze Massenerhebung Remodellierung BSH Seite 86

Abb. 133 Brettschichtholz-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben Remodellierung BSH Seite 87

Abb. 134 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung nach Konstruktionsanteilen Remodellierung BSH Seite 87

Abb. 135 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Remodellierung BSH Standardraster Seite 87

Abb. 136 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen Remodellierung BSH Seite 88

Abb. 137 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung Remodellierung BSH Seite 88

Abb. 138 Indikatoren Lebenszyklus Seite 88

Abb. 139 Fassadenraster Alternative I Remodellierung BSH Seite 89

Abb. 140 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Remodellierung BSH Rasteralternative I Seite 89

- Abb. 141 Fassadenraster Alternative II Remodellierung BSH Seite 89
- Abb. 142 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Remodellierung BSH Rasteralternative II Seite 89
- Abb. 143 Referenzelement in Grundriss und Ansicht HGV-A Maßstab 1:25 Seite 90  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 144 Grundriss Profildetail HGV-A Maßstab 1:1 Seite 91  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 145 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung HGV-A Seite 92
- Abb. 146 Skizze Massenerhebung HGV-A Seite 92
- Abb. 147 HGV-A-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben Seite 93
- Abb. 148 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung nach Konstruktionsanteilen HGV-A Seite 93
- Abb. 149 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten Standardraster HGV-A Seite 93
- Abb. 150 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen HGV-A Seite 94
- Abb. 151 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung HGV-A Seite 94
- Abb. 152 Indikatoren Lebenszyklus nach % HGV-A Seite 94
- Abb. 153 Fassadenraster Alternative I HGV-A Seite 95
- Abb. 154 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-A Rasteralternative I Seite 95
- Abb. 155 Fassadenraster Alternative II HGV-A Seite 95
- Abb. 156 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-A Rasteralternative II Seite 95
- Abb. 157 Referenzelement in Grundriss und Ansicht HGV-B Maßstab 1:25 Seite 96  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 158 Grundriss Profildetail HGV-B Maßstab 1:1 Seite 97  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 159 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung HGV-B Seite 98
- Abb. 160 Skizze Massenerhebung HGV-B Seite 98
- Abb. 161 HGV-B-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben Seite 99
- Abb. 162 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung nach Konstruktionsanteilen HGV-B Seite 99
- Abb. 163 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-B Standardraster Seite 99
- Abb. 164 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen HGV-B Seite 100
- Abb. 165 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung HGV-B Seite 100
- Abb. 166 Indikatoren Lebenszyklus nach % HGV-B Seite 100
- Abb. 167 Fassadenraster Alternative I HGV-B Seite 101
- Abb. 168 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-B Rasteralternative I Seite 101
- Abb. 169 Fassadenraster Alternative I HGV-B Seite 101
- Abb. 170 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-B Rasteralternative II Seite 101
- Abb. 171 Referenzelement in Grundriss und Ansicht HGV-C Maßstab 1:25 Seite 102  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 172 Grundriss Profildetail HGV-C Maßstab 1:1 Seite 103  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Vitalija Rosliakova (2013)
- Abb. 173 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung HGV-C Seite 104
- Abb. 174 Skizze Massenerhebung HGV-C Seite 104
- Abb. 175 HGV-C-Profil Explosionszeichnung nach Diagrammfarben Seite 105
- Abb. 176 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-C Standardraster Seite 105
- Abb. 177 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung nach Konstruktionsanteilen HGV-C Seite 105
- Abb. 178 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> nach Phasen HGV-C Seite 106
- Abb. 179 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung HGV-C Seite 106
- Abb. 180 Indikatoren Lebenszyklus nach % HGV-C Seite 106
- Abb. 181 Fassadenraster Alternative I HGV-C Seite 107
- Abb. 182 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-C Rasteralternative I Seite 107
- Abb. 183 Fassadenraster Alternative II HGV-C Seite 107
- Abb. 184 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Profilaufbauten HGV-C Rasteralternative II Seite 107
- Abb. 185 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Vergleich Seite 108
- Abb. 186 Pern in MJ/m<sup>2</sup> Herstellung Vergleich Seite 108
- Abb. 187 P.ne in MJ/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich Seite 108
- Abb. 188 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Herstellung Vergleich Seite 109
- Abb. 189 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq Lebenszyklus Vergleich Seite 109
- Abb. 190 ODP in kg R11 eq/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich Seite 110
- Abb. 191 AP in kg SO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich Seite 110
- Abb. 192 EP in kg PO<sub>4</sub> eq/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich Seite 110
- Abb. 193 POCP in kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq/m<sup>2</sup> Lebenszyklus Vergleich Seite 110

### *3.3 Einflüsse von Konstruktion, Prozessen in den Lebensabschnitten und der Szenarienbildung auf die ökologische Fassadenbewertung*

- Abb. 194 etablierte Aussteifungsmaßnahmen im Skelettbau Seite 112  
Abb. 195 Aussteifung mittels transparenter HGV-Elemente Seite 113  
Abb. 196 mittlere Bruchlasten Seite 113 - Dipl.Ing. Werner Hochhauser,  
Prof. DDI Wolfgang Winter, Prof. Dr.-Ing. Klaus Kreher (2011)  
Abb. 197 Wandscheibensteifigkeit Seite 113 - Dipl.Ing. Werner Hochhauser,  
Prof. DDI Wolfgang Winter, Prof. Dr.-Ing. Klaus Kreher (2011)  
Abb. 198 Skizze Trägheitsmomente im Vergleich Vertikalkräfte Seite 114  
Abb. 199 Skizze Trägheitsmomente im Vergleich Horizontalkräfte Seite 115
- Abb. 200 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> Fassadenfläche Lebenszyklus Seite 116  
Abb. 201 P<sub>ern</sub> in MJ/m<sup>2</sup> Fassadenfläche Lebenszyklus Seite 116  
Abb. 202 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> Fassadenfläche Lebenszyklus Seite 116  
Abb. 203 statische Reichweiten und Explorationsnotwendigkeit mineralischer Rohstoffe Seite 117  
Arnim von Gleich, Martin Brahmer-Lohss, Manuel Gottschick, Dirk Jepsen, Knut Sander (2004)  
Abb. 204 Globale Reserven, Reservebasis und Ressourcen für Aluminium und Kupfer Seite 117  
Arnim von Gleich, Martin Brahmer-Lohss, Manuel Gottschick, Dirk Jepsen, Knut Sander (2004)  
Abb. 205 Fassadenbekleidung aus Altglas - Folkwang Museum Essen Seite 118  
Abb. 206 Aluminiumbewertung in Relation zur Recyclingquote Seite 118  
Abb. 207 Primärenergiebedarf in Abhängigkeit der Beschichtung und des Materials Seite 118  
Christina Radlbeck (2006)  
Abb. 208 Recyclingquote Aluminium in Abhängigkeit der Beschichtung Seite 119  
Christina Radlbeck (2006)  
Abb. 209 End-of-Life-Alternativen der Holzprodukte Seite 119
- Abb. 210 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> in Zeitraum von 50 Jahren Seite 120  
Abb. 211 P<sub>ne</sub> in MJ/m<sup>2</sup> in Zeitraum von 100 Jahren Seite 120  
Abb. 212 P<sub>ges</sub> in MJ/m<sup>2</sup> in Zeitraum von 100 Jahren Seite 120  
Abb. 213 GWP in kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> in 50 und 100 Jahren Seite 121  
Abb. 214 ODP in kg R11 eq/m<sup>2</sup> in 50 und 100 Jahren Seite 121  
Abb. 215 symbolischer Wärmedurchgang HGV-Profil Seite 122  
Abb. 216 symbolischer Wärmedurchgang Aluminium-Profil Seite 122  
Abb. 217 beispielhafte Isothermengrafik eines HGV-Fassadenprofils Seite 122 - © 2013 by Knapp GmbH  
Knapp GmbH, Hrsg. (2013) Broschüre FASCO - Fassadensystem - Verklebte Glaselemente für  
den modernen Holz- und Metallbau, In: [http://www.knapp-verbinder.com/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&id=65%3Apfosten-riegel-holz-glasfassaden&download=1206%3Aknapp-produktbroschre-pfosten-riegel-holz-glasfassaden-2-2013-deutsch&Itemid=86&lang=de](http://www.knapp-verbinder.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=65%3Apfosten-riegel-holz-glasfassaden&download=1206%3Aknapp-produktbroschre-pfosten-riegel-holz-glasfassaden-2-2013-deutsch&Itemid=86&lang=de), 17.05.2013  
Abb. 218 I. lineare Planung mit Trendfortschreibung Seite 123  
Abb. 219 II. periodischer Ersatz mit Alternativentscheidung Seite 123  
Abb. 220 III. Lebenszyklusmodell mit Optionenbildung Seite 124

### *4. Schlussfolgerungen: Ökologische Gebäudebewertung und der Einfluss auf die architektonische Praxis*

- Abb. 221 Oberflächenstruktur Holz Seite 125 - © YuriTanima (2013)  
[http://www.yuritanima.de/graphics/texturen/Holz/textur\\_holz\\_001.jpg](http://www.yuritanima.de/graphics/texturen/Holz/textur_holz_001.jpg), 15.05.2013  
Abb. 222 Oberflächenstruktur Aluminium Seite 125  
Abb. 223 Bürotrennwand aus Zeitschriften Seite 129 - Institut für Internationale Architektur (2010)  
Abb. 224 Verzahnte Koppelleiste I Kondensatbildung Seite 130  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Dipl.Ing. Thomas Edl (2008)  
Abb. 225 Verzahnte Koppelleiste Modifikation veränderte Geometrie zur Wasserableitung Abdichtung zwischen Hauptkonstruktion und Koppelleiste Beschichtung und optimierte Eckausbildung der Leiste Seite 131  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Dipl.Ing. Georg Neubauer (2011)  
Abb. 226 L-förmige Koppelleiste kein stehendes Wasser in der vertikalen Leiste Seite 132  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Prof. DDI Wolfgang Winter, Dipl.Ing. Vitalija Rosliakova (2012)  
Abb. 227 Auslassung der horizontalen Leiste Entgegenwirken der Kondensatproblematik Vertikallasten über erweiterte Unterkonstruktion mögliche Übertragung von Horizontallasten Seite 133  
Abbildung durch Autor nach Vorlage Prof. DDI Wolfgang Winter, Dipl.Ing. Vitalija Rosliakova (2012)

- Abb. 228 Kreuzungspunkt aus FSH Abtragung der Vertikallasten mittels Holzschwert Seite 134  
Abb. 229 Weiterentwicklung Vertikales Schwert zur unterstützenden Lastabtragung  
Erweiterung je nach Verglasungstyp mögliche Übertragung von Horizontalkräften Seite 135  
Abb. 230 green offices - Fassadenansicht Seite 136 - Conrad Lutz architecte Sàrl (2013)  
Abb. 231 green offices - Materialien Seite 136 - Abbildung durch Autor nach Vorlage Conrad Lutz architecte Sàrl (2013)  
Abb. 232 solare Nutzung in der großflächigen Glasfassade Seite 137

## 7. Tabellenverzeichnis

### *3.2 Ökologischer Fassadenvergleich - Fassadenausschnitt Verlagsgebäude Hamburg 'Ericusspitze'*

- Tab.1 Massenerhebung Aluminiumfassade Seite 72  
Tabelle durch Autor nach Vorlage Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011)  
Tab.2 Errichtungskosten Aluminiumfassade Seite 74  
Tab.3 Massenerhebung Brettschichtholz-Fassade Seite 78  
Tabelle durch Autor nach Vorlage Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011)  
Tab.4 Errichtungskosten BSH-Fassade Seite 80  
Tab.5 Massenerhebung Aluminiumfassade Seite 82  
Tabelle durch Autor nach Vorlage Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011)  
Tab.6 Massenerhebung Brettschichtholz-Fassade Seite 86  
Tabelle durch Autor nach Vorlage Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer (2011)  
Tab.7 Massenerhebung HGV-Fassade Variante A Seite 92  
Tab.8 Massenerhebung HGV-Fassade Variante B Seite 98  
Tab.9 Massenerhebung HGV-Fassade Variante C Seite 104

### *3.3 Einflüsse von Konstruktion, Prozessen in den Lebensabschnitten und der Szenarienbildung auf die ökologische Fassadenbewertung*

- Tab.10 Vergleich der Datenbankenwerte Seite 124