

## Nachhaltigkeitsstudie



Ökobilanzen von  
Fassadenkonstruktionen  
mit Naturstein und Glas

## Inhaltsverzeichnis

Nachhaltig bauen mit Naturstein (Vorwort)	3
Nachhaltiges Bauen – die Sicht des Bundes	4
Einführung	5
<b>1 Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	6
<b>2 Angewandte Methodik</b>	9
2.1 Ökobilanz Methode	9
2.2 Vorgehen	10
2.3 Untersuchungsrahmen	10
<b>3 Ökobilanzen – Teil 1</b>	12
3.1 Systembeschreibung „Typische Natursteinfassade“	12
3.2 Systembeschreibung „Typisches Glasfassadenbauteil“	18
3.3 Auswertung „Typische Naturstein- und Glasfassaden“	21
<b>4 Ökobilanzen – Teil 2</b>	25
4.1 Systembeschreibung „Elementierte Natursteinfassade“	25
4.2 Systembeschreibung „Option Glasfassade“	29
4.3 Systembeschreibung „Option Natursteinfassade“	31
4.4 Auswertung: „Fassadenvarianten mit Naturstein und Glas am Beispiel des Frankfurter OpernTurms“	34
<b>5 Ökonomische Betrachtungen</b>	38
5.1 Grundlagen	38
5.2 Untersuchte Fassadenvarianten	39
5.3 Ergebnisse	39
5.4 Diskussion der Energiekosten	41
<b>6 Anhang</b>	40

## Nachhaltig bauen mit Naturstein

Naturstein steht für Werterhaltung und Solidität. Dies sind Aspekte, die auch in der aktuellen Architektur einen hohen Stellenwert haben. Naturstein ist nicht nur der bevorzugte Baustoff unserer Vorfahren, er ist auch ein wesentlicher Bestandteil der modernen Architektur. Neue Bearbeitungsmethoden und Entwicklungen in der Steintechnik lassen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, insbesondere ästhetisch anspruchsvolle Fassaden, entstehen.

Die Nachhaltigkeit von Gebäuden ist zu einem wichtigen Thema geworden und mit der Herausgabe des „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ hat die Bundesregierung klare baupolitische Ziele vorgegeben, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Deutschland in den kommenden Jahren merklich zu senken. Der Energieverbrauch von Gebäuden verursacht einen wesentlichen Anteil am CO<sub>2</sub>-Ausstoß, und zur Verringerung der Umweltbelastung sind nachhaltige und energieschonende Bauweisen erforderlich.

Natürliche Baustoffe wie Naturstein rücken damit wieder in den Vordergrund: Für die Herstellung des Natursteins ist keine Energie notwendig, er wird uns von der Natur zur Verfügung gestellt. Lediglich bei der Gewinnung und Bearbeitung wird Energie verbraucht. Bei heimischen Gesteinsvorkommen sind zudem die Transportwege kurz.

Aktuelle Berichte belegen, dass Massivbauweisen deutliche Vorteile gegenüber Glaskonstruktionen haben: So veröffentlichte der Bayerische Oberste Rechnungshof eine Empfehlung, die besagt, dass Glasfassaden in Planung, Bau und Betrieb aufwendiger und teurer sind und nur noch in begründeten Ausnahmefällen zur Ausführung kommen sollten. Das Institut Wohnen und Umwelt in Darmstadt stellte fest, dass Gebäude mit Glasfassaden im Energiebedarf lediglich das Niveau ungedämmter Altbauten erreichen.

Diese eindeutigen Fakten und das verstärkte Interesse an nachhaltigem Bauen haben uns bewogen, das renommierte Institut PE International mit einer Ökobilanzstudie zu Fassadenvarianten in Naturstein und Glas zu beauftragen.

In dem folgenden Bericht werden die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Natursteinfassade in einem Screening-Verfahren über den gesamten Lebenszyklus betrachtet und mit den Auswirkungen einer Glasfassade verglichen.

Mit dem Wunsch, die nachhaltige Bauweise zu fördern, empfehlen wir diese Dokumentation dem Interesse der Fachwelt und Öffentlichkeit.



Joachim Grüter  
Präsident des Deutschen Naturwerkstein-Verbands e.V.



## Nachhaltiges Bauen – die Sicht des Bundes



Im Koalitionsvertrag hat sich die Bundesregierung dazu verpflichtet, die nationale Nachhaltigkeitsstrategie im bewährten institutionellen Rahmen weiterzuentwickeln.

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) hat dabei die Aufgabe übernommen, die Qualität des Bauens durch eine stärkere Vernetzung mit Nachhaltigkeitsüberlegungen zu verbessern und bei den eignen Bauten mit gutem Beispiel voranzugehen. Dazu hat das BMVBS gemeinsam mit den interessierten Kreisen am runden Tisch Nachhaltiges Bauen und der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen die Grundlagen und Vorgaben zur Bewertung von nachhaltigen Gebäuden

fortentwickelt. Der Vorschlag erlaubt, die Gebäudequalität auf wissenschaftlicher Basis weitestgehend mit quantitativen Methoden umfassend zu beschreiben und zu bewerten. Seit Dezember 2009 ist das Bewertungssystem über die Internetseiten des Informationsportal Nachhaltiges Bauen des BMVBS [www.nachhaltigesbauen.de](http://www.nachhaltigesbauen.de) für Architekten, Planer, Bauherren und sonstige beruflich Interessierte frei zugänglich. Damit steht ein wissenschaftlich fundiertes, ganzheitliches und quantitatives Bewertungsverfahren für Büro- und Verwaltungsgebäude zur Verfügung, das eine ausgewogene Bewertung der verschiedenen Dimensionen und Aspekte der Nachhaltigkeit ermöglicht. Eine wesentliche Grundlage bildet dabei die Lebenszyklusanalyse, die Verfahren der Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenrechnung mit einbezieht. Aktuelle Bauvorhaben des Bundes nehmen bereits auf die Inhalte des Systems Bezug. Weiterhin arbeitet der Bund mit Trägern öffentlicher Belange und der Wohnungswirtschaft an der Übertragung der Nachhaltigkeitssysteme auch auf Wohngebäude, Schulen und Ingenieurbauwerke.

Transparente, überprüfbare sowie umwelt- und gesundheitsbezogene Informationen zu Bauprodukten sind die Voraussetzung für die Gebäudebewertung. Mit der gegenwärtig immer noch in der Diskussion befindlichen Bauproduktenverordnung der EU sollen darüber hinaus Bauprodukte hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit genauestens eingeschätzt werden können. Umweltproduktdeklarationen sind in diesem Zusammenhang ein wertvolles Mittel, um die Ressourceneffizienz nachweisbar zu machen. Sie beruhen auf einem international abgestimmten Deklarationsraster, das insbesondere gleiche Rand- und Rahmenbedingungen sowie Umwelt- und Gebrauchsindikatoren wie zum Beispiel den Beitrag eines Produktes zum Treibhauseffekt oder zum Abbau der Ozonschicht definiert.

Transparente Informationen zur Ökobilanz von Bauprodukten leisten einen maßgeblichen Beitrag zur Umsetzung der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Das verbindet die Bemühungen der Wirtschaft und des BMVBS.

Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hegner  
Ministerialrat

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Leiter des Referats B 13 „Bauingenieurwesen, Nachhaltiges Bauen, Bauforschung“

## Einführung

Das nachhaltige Bauen hat in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Unter nachhaltigem Bauen werden unter ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten durchgeführte Planungs- und Bauprozesse und Immobilienmanagement verstanden.

In Deutschland wird seit 2001 am eigens vom Bundesbauministerium gegründeten „runden Tisch Nachhaltiges Bauen“ an Grundlagen und Leitregeln gearbeitet. Ein Ergebnis der Arbeit ist beispielsweise der „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ des Bundesbauministeriums, der als Planungsleitfaden bei öffentlichen Bauvorhaben anzuwenden ist. Besonders durch die Aktivitäten der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen wurde ein Zertifizierungssystem für nachhaltig geplante und ausgeführte Gebäude entwickelt.

Das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen beinhaltet einen etwa 50 Kriterien umfassenden Kriterienkatalog, der eine Vielzahl von Themen für Planer, Architekten, Bauherren etc. quantifizierbar macht.

International wird nachhaltiges Bauen oftmals mit dem Begriff „Green Building“ gleichgesetzt. In England existiert ein solches Zertifizierungssystem bereits seit vielen Jahren. Das BREEAM-System bewertet ebenfalls die ökologische Gebäudeperformance und bezieht soziale und Gesundheitsthemen mit ein, jedoch wird die ökonomische Performance nicht bewertet. In den USA ist das LEED-System vom US Green Building Council entwickelt worden. Das System wird inzwischen auch außerhalb der Vereinigten Staaten für die Planung energieeffizienter und ökologischer Gebäude angewandt. Auch das LEED-System verwendet bislang keine Gesamt-Gebäude-Ökobilanz zur Bewertung der ökologischen Performance eines Gebäudes, sondern stützt die ökologisch motivierte Materialauswahl auf die Bewertung einzelner Eigenschaften. Beispielsweise wird im LEED-System eine Wertung für Materialien und Bauprodukte vergeben, die weniger als 800 km zur Baustelle transportiert werden.

		
<b>GOLD</b>	<b>PLATIN</b>	<b>OUTSTANDING EXCELLENT</b>
<b>SILBER</b>	<b>GOLD</b>	<b>VERY GOOD</b>
<b>BRONZE</b>	<b>SILBER</b>	<b>GOOD</b>

Die ökologische Qualität eines Gebäudes wird besonders über eine gute Ökobilanz des Gebäudes bestimmt. Die Fassade bestimmt einen wesentlichen Anteil der ökologischen Qualität und ist insbesondere für den Heizungs- und Kühlungsbedarf eines Gebäudes von entscheidender Bedeutung. Die Ökobilanz eines Gebäudes bezieht ökologische Auswirkungen während der Herstellung, Nutzung, Entsorgung und des Recyclings mit ein. Eine lebenszyklusbezogene Betrachtung und Bewertung der ausgeführten Bauwerke ist somit elementarer Bestandteil nachhaltiger Planung.

Im Rahmen der Planung und Ausführung des OpernTurm in Frankfurt am Main wurde eine Zertifizierung nach dem LEED-Standard angestrebt. Die Planung des OpernTurm sah ursprünglich eine Glasfassade vor. Im Verlauf von Variantenvergleichen hat man sich auf die nun ausgeführte Natursteinfassade geeinigt. Aufgrund der verwendeten Natursteinfassade erhielt der OpernTurm als eines der ersten Bürogebäude Europas den begehrten LEED-Standard des U.S. Green Building Council in Gold. Diese Fassade trägt laut Aussage der Fachplaner wesentlich zur guten Energiebilanz des Gebäudes bei.

## 1 Zusammenfassung der Ergebnisse

**Die Nachhaltigkeitsstudie zeigt, dass Fassadenkonstruktionen mit Naturstein erhebliche ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber Glaskonstruktionen aufweisen. Der Weg zu nachhaltigen Gebäuden mit den begehrten Zertifizierungen der DGNB oder LEED führt im Fassadenbau über geschlossene, wärme gedämmte Außenwände mit Bekleidungen aus Naturstein.**

### Teil 1 – „Fassadenvarianten in Naturstein und Glas“

Im ersten Teil der von PE International erstellten Studie wird eine typische Natursteinfassadenkonstruktion nach DIN 18516-3 mit einer Glasfassadenkonstruktion auf der Basis eines Quadratmeters Fassadenfläche verglichen.

Über den Zeitraum von 100 Jahren zeigt die Natursteinfassade deutliche ökologische Vorteile gegenüber einer Glasfassade. Zusammenfassend ist festzustellen, dass Natursteinfassaden sowohl in der Herstellung als auch in der Nutzungsphase wesentlich weniger Primärenergie benötigen als Glaselemente sodass über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, für Glasfassaden mehr als das Dreifache an Primärenergie aufgewendet werden muss.

Wird die Herstellung separat betrachtet, so zeigt sich, dass die Glasfassade einen etwa doppelt so hohen Bedarf an energetischen Ressourcen benötigt als die Natursteinfassade. Auch in weiteren Umweltkenngrößen (z. B. Treibhausgasemissionen) weist die Natursteinfassade deutliche ökologische Vorteile auf.

Die Nutzungsphase wird durch die Instandhaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit von Austauschzyklen der eingesetzten Bauteile dominiert. Während die Natursteinfassade mit ihren relativ langlebigen Bauteilen mit etwa 50 % der energetischen Ressourcen für diese Phase gegenüber der Herstellung auskommt, ist die austauschintensivere Instandhaltung der Glasfassade die relevanteste ökologische Phase während des gesamten Lebenszyklus. Über 100 Jahre gerechnet werden einzelne Bauteile bis zu dreimal komplett gewechselt. Die Reinigung mit Wasser ist insgesamt, obwohl wichtiger Aspekt ökonomischer Betrachtungen, vom ökologischen Standpunkt aus vernachlässigbar. Der für den Wärmeschutz bedeutende U-Wert ist bei der Natursteinfassade mit 0,32 W/m<sup>2</sup>K wesentlich geringer als bei der Glasfassade mit 1,25 W/m<sup>2</sup>K. Dies bedeutet, dass die Transmissionswärmeverluste und damit der Wärmebedarf des Gebäudes bei der Natursteinfassade deutlich geringer sind. Die ökonomischen Auswirkungen der Wärmeverluste im Winter sowie des im Sommer benötigten Kühlbedarfs sind in Kapitel 5 berücksichtigt.

Nach der Nutzungsphase zeigt sich, dass die Natursteinfassade bezogen auf den Gesamtlebenszyklus geringe ökologische Lasten (Ressourcenbedarf und Emissionen) bewirkt. Bei der Betrachtung des Lebensendes ist festzustellen, dass bei der Glasfassade die eingesetzten Materialien wie Aluminium und Kunststoff ökologische Gutschriften erhalten, da durch die Rückführung dieser Materialien in den Stoffkreislauf eine aufwendige Primärproduktion (GF) vermieden werden kann.

**Die betrachteten Umwelteinwirkungen der Glasfassade (GF) sind zwischen 60% und rund 360% höher als die der Natursteinfassade (NSTF):**

Umwelteinwirkungen	NSTF : GF
Treibhauspotenzial (CO <sub>2</sub> -Äquivalent; GWP)	1 : 2,5
Ozonabbaupotenzial (R11; ODP)	1 : 1,6
Versauerungspotenzial (SO <sub>2</sub> -Äquivalent; AP)	1 : 3,1
Eutrophierungspotenzial (PO <sub>4</sub> -Äquivalent; EP)	1 : 4,4
Sommersmogpotenzial (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquivalent; POCP)	1 : 4,3



Fassaden mit Glas- und Natursteinkonstruktionen

## Teil 2 – „Fassadenvarianten in Naturstein und Glas am Beispiel des Frankfurter OpernTurms“

Im zweiten Teil der Studie wird die ökologische Performance der ausgeführten Fassade (Fassadenvariante 1) am OpernTurm in Frankfurt mit zwei theoretischen Fassadenkonstruktionen (Fassadenvariante 2 und 3) verglichen:

- Fassadenvariante 1:  
Am OpernTurm in Frankfurt realisierte Fassade, bestehend aus einer elementierten, hinterlüfteten Natursteinfassade (17 %), einer hinterlüfteten Natursteinfassade nach DIN 18516-3 (33 %), sowie Glaselementen (50 %)
- Fassadenvariante 2:  
Hinterlüftete Natursteinfassade nach DIN 18516-3 mit einem Fensteranteil von 50 %.
- Fassadenvariante 3:  
Adäquate Glasfassade, bestehend aus Glaselementen (90 %) und hinterlüfteter Natursteinfassade nach DIN 18516-3 (10 %).

Die ökologische Analyse der in der Studie behandelten Fassadenvarianten ist auf der Basis von in der Studie beschriebenen Annahmen zu Methodik und Daten für einen Betrachtungszeitraum der Fassaden-Lebenszyklen von 50 Jahren durchgeführt, gemäß dem Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“. Über diesen Zeitraum weisen die beiden betrachteten Natursteinfassaden gegenüber der Glasfassade deutliche ökologische Vorteile in allen betrachteten Umweltkenngrößen auf. Abhängig von den Umweltkenngrößen betragen die Emissionen und energetischen Ressourcenverbräuche der Natursteinfassaden etwa ein Drittel bis zwei Drittel der Umwelteinwirkungen und Ressourcenverbräuche der Glasfassade.

Wird die Herstellungsphase separat betrachtet, so zeigt sich, dass die Glasfassade einen etwa doppelt so hohen Bedarf an energetischen Ressourcen benötigt als die Natursteinfassaden. Auch in weiteren Umweltkenngrößen (z. B. Treibhausgasemissionen) zeigt die Herstellungsphase der Natursteinfassaden deutliche ökologische Vorteile auf.

Die Nutzungsphase wird durch die Instandhaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit von Austauschzyklen der eingesetzten Bauteile dominiert. Während die Natursteinfassaden mit ihren relativ langlebigen Bauteilen mit etwa 50 % der energetischen Ressourcen für diese Phase gegenüber der Herstellung auskommen, beträgt der Anteil der Instandhaltung bei der Glasfassade etwa 80 % gegenüber der Herstellung. Während der betrachteten 50 Jahre werden einzelne Bauteile bis zu dreimal komplett gewechselt. Die Ergebnisse der Ökobilanz sind für die Reinigung mit Wasser insgesamt, obwohl ein wichtiger Aspekt ökonomischer Betrachtungen, vernachlässigbar.

Bei der Betrachtung des Lebensendes ist festzustellen, dass bei der Glasfassade die eingesetzten Materialien wie Aluminium und Kunststoff ökologische Gutschriften erhalten, da durch die Rückführung dieser Materialien in den Stoffkreislauf eine aufwendige Primärproduktion vermieden werden kann.

**Die betrachteten Umwelteinwirkungen der Glasfassade (GF) liegen zwischen 60 % und 175 % höher als die der ausgeführten Natursteinfassade (NSTF ausgef.):**

Umwelteinwirkungen	NSTF ausgef. : GF
Treibhauspotenzial (CO <sub>2</sub> -Äquivalent; GWP)	1 : 1,7
Ozonabbaupotenzial (R11; ODP)	1 : 2,8
Versauerungspotenzial (SO <sub>2</sub> -Äquivalent; AP)	1 : 1,6
Eutrophierungspotenzial (PO <sub>4</sub> -Äquivalent; EP)	1 : 1,6
Sommersmogpotenzial (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquivalent; POCP)	1 : 1,7

Der Frankfurter OpernTurm in der Bauphase.



## 2 Angewandte Methodik

### 2.1 Ökobilanz Methode

Die vorliegende Studie wurde auf der Grundlage der LCA-Methode (engl. LCA – Life Cycle Assessment) durchgeführt. Darunter versteht man eine systematische Analyse der Umwelteinwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges („von der Wiege bis zur Bahre“). Dazu gehören sämtliche Umwelteinwirkungen während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung des Produktes sowie die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (z. B. Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe).

Es wurden die Indikatoren der Sachbilanz (engl. LCI – Life Cycle Inventory) sowie der Wirkungsabschätzung (engl. LCIA – Life Cycle Impact Assessment) in der Studie berücksichtigt, die auch durch die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) als Kriterien der ökologischen Qualität bewertet werden. Die Wahl der Wirkkategorien stellt darüber hinaus eine Auswahl der in prEN 15804 vorgegebenen Wirkkategorien dar.

In der Sachbilanz wird der Primärenergiebedarf (gesamt) untersucht.

Sachbilanz	
Primärenergie, erneuerbar	MJ
Primärenergie, nicht erneuerbar	MJ
Primärenergie, total	MJ

**Tabelle 2-1:**  
LCI-Indikatoren

Um die Umweltauswirkungen des Lebenszyklus des betrachteten Systems zu ermitteln, wird die CML-Methodik der Universität Leiden mit den Charakterisierungsfaktoren von 2001 verwendet. Die Umweltwirkungskategorien Human- und Ökotoxizität wurden nicht untersucht, da sich die zugrunde liegenden Modelle noch in einem Entwicklungsstadium befinden und keine belastbare Grundlage darstellen. Es wurden folgende LCIA-Indikatoren betrachtet:

LCIA-Indikator*	Einheit
Treibhauspotenzial (GWP)	[kg CO <sub>2</sub> -Äqv.]
Ozonabbaupotenzial (ODP)	[kg R11-Äqv.]
Versauerungspotenzial (AP)	[kg SO <sub>2</sub> -Äqv.]
Eutrophierungspotenzial (EP)	[kg Phosphat-Äqv.]
Sommersmogpotenzial (POCP)	[kg Ethen-Äqv.]

**Tabelle 2-2:**  
LCIA-Indikatoren

\*Eine detailliertere Beschreibung zu den Wirkungskategorien befindet sich im Anhang.

Die vorliegende Ökobilanz wird mit der Ökobilanzsoftware GaBi 4 (/GaBI 4 2007/) nach den Vorgaben der ISO 14044 2006 ff. durchgeführt. Alle hierfür relevanten Hintergrund-Datensätze sind der Datenbank der Software GaBi 4 entnommen. Das Alter der verwendeten Daten liegt unter acht Jahren.

## 2.2 Vorgehen

Die Ökobilanz-Screening-Studie wurde in drei Hauptschritten durchgeführt:

- Datenermittlung für Natursteinfassade und Glasfassade für Herstellung und Nutzung (Reinigung und Instandhaltung).
- Für die Instandsetzungszyklen wurden die mittleren Lebenserwartungen aus dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen genutzt, der auch für eine Zertifizierung nach DGNB angewendet wird. Die gewählte Nutzungsdauer ist eine Konvention und schließt nicht aus, dass die tatsächliche Lebensdauer von Baumaterialien (z.B. Dämmung, Naturstein, Aluminiumelemente) viel länger sein kann.
- Berechnung der ökologischen Auswirkungen der Fassadenvarianten über den Lebensweg der Fassade, Qualitätssicherung, Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.

## 2.3 Untersuchungsrahmen

### 2.3.1 Funktionelle Einheit – Teil 1

Die funktionelle Einheit des ersten Teils der Ökobilanzstudie ist mit einem Quadratmeter nicht tragender Fassadenfläche definiert.

Dies bedeutet, dass keine statischen Eigenschaften wie Anpralllasten und Glasstatik beim Glaselement sowie die Unterkonstruktion beim Natursteinelement berücksichtigt wurden. Weitere bauphysikalische Unterschiede der beiden Elemente wurden in der Studie nicht berücksichtigt. Darunter fallen z.B. die Lichtdurchlässigkeit oder der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert), der bei dem Natursteinfassadenelement  $0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ , bei der Glasfassade nach Herstellerangaben inklusive Wärmebrücken  $1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$  beträgt. Andererseits erzielt das Glasfassadenelement solare Wärme Gewinne. Dies wirkt sich im Winter positiv auf den Heizwärmebedarf aus, kann aber im Sommer zu einem erhöhten Kühlbedarf führen.

Weitere bauphysikalische Unterschiede wie die Speichermasse und Schall- und Brandschutzeigenschaften wurden ebenfalls nicht betrachtet. Die unterschiedlichen Dicken und die Auswirkungen auf die Nutzfläche wurden nicht untersucht.

Die oben genannten bauphysikalischen Eigenschaften können nur auf der Gebäudeebene für ein spezifisches Bauobjekt in eine Umweltbetrachtung sinnvoll einbezogen werden.

### 2.3.2 Funktionelle Einheit – Teil 2

Die funktionelle Einheit des zweiten Teils der Ökobilanzstudie ist die Fassadenfläche des OpernTurms in Frankfurt. Diese beträgt laut Wärmeschutznachweis  $37.020 \text{ m}^2$ .

Bei den drei Varianten wurden die an den Gebäudeecken befindlichen Flächen als hinterlüftete Fassade definiert. Diese beträgt 10 % der betrachteten Gesamtfläche. Die übrige Fläche ist anteilig nach den Regelementen der drei Fassadentypen modelliert: der hinterlüfteten Fassade, der Glasfassade und der elementierten Fassade.

Statische Eigenschaften sowie weitere bauphysikalische Eigenschaften (U-Werte, solare Gewinne, Speichermassen etc.) oder der Einfluss der Fassaden auf die resultierende BGF-Fläche wurden bei dem Vergleich nicht berücksichtigt.

### 2.3.3 Systemgrenzen

Die ökologische Lebenszyklusanalyse umfasst die Lebenswegabschnitte „von der Wiege bis zur Bahre“ (cradle to grave). Wie in nachstehender Darstellung zu erkennen ist, besteht der Lebenszyklus aus der Herstellungsphase, der Nutzungsphase (ohne Einfluss auf den Energiebedarf während der Nutzungsphase) und dem Lebensende (EoL).



Die ökologische Lebenszyklusanalyse beginnt mit der Berücksichtigung der Rohstoffgewinnung und der Herstellung der eingesetzten Roh- und Hilfsstoffe (Naturstein, Aluminium, Stahl etc.). Die Verarbeitung der Rohstoffe zu Zwischen- und Endprodukten (Natursteinplatten, Fenstern etc.) wird ebenso betrachtet wie der Transport der Bauelemente zur Baustelle.

In der Nutzungsphase werden Reinigungs- und Instandhaltungsmaßnahmen im ersten Teil der Ökobilanzstudie über den Zeitraum von 100 Jahren betrachtet. Da im zweiten Teil der Studie ein komplettes Bürogebäude betrachtet wird, wird der Betrachtungszeitraum wie im Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen auf 50 Jahre definiert.

Die Reinigungszyklen werden den Vorgaben der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB 2009) entnommen. Für die Berechnung der Instandhaltungszyklen wird der „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ des BMVBS angewendet (BBR 2002).

Im End of Life (EoL) werden die Materialien unterschiedlich behandelt.

Mineralische Baustoffe wie Beton und Naturstein werden im End-of-Life-Szenario dieser Studie aufbereitet, Mineralwolle wird deponiert. Metalle wie Aluminiumrahmen oder -bleche können recycelt und in den Stoffkreislauf zurückgegeben werden.

### 2.3.4 Abschneidekriterien

Alle für die Aussage der Studie relevanten Bauteile sind in die Screening-Studie mit einbezogen. Investitionsgüter, wie Maschinen und Gebäude, die für die Herstellung der Vorprodukte (Naturstein, Beton etc.) benötigt wurden, sowie Verwaltungsgebäude wurden in den Datensätzen nicht berücksichtigt, da die Auswirkungen als nicht relevant betrachtet wurden.

Die komplette Vollständigkeit der verwendeten Materialien kann jedoch nicht gewährleistet werden. Besonders die Massenermittlung von kleinteiligen Elementen ist teilweise abgeschätzt, um Aufwand und Ergebnis in Verhältnis zu setzen. Die gelieferten Unterlagen sind detailliert untersucht, sodass alle für die Funktion der Fassade notwendigen Bauteile in der Studie berücksichtigt sind. Somit kann davon ausgegangen werden, dass auf der Inputseite alle Stoffströme berücksichtigt sind, die in das System eingehen und größer als 1 % ihrer gesamten Masse sind oder mehr als 1 % zum Primärenergiebedarf beitragen.

Die Baustoffe wurden mit Datensätzen von GaBi 4 modelliert, die nach der DIN 14040 erstellt wurden.

## 3 Ökobilanzen – Teil 1

### „Typische Naturstein- und Glasfassaden“

In diesem Abschnitt wird ein Quadratmeter einer hinterlüfteten Natursteinfassade sowie einer Glasfassade beschrieben. Dabei werden die Lebenszyklusphasen der Herstellung, der Instandhaltung und des Lebensendes betrachtet. Es wird von einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren ausgegangen.

#### 3.1 Systembeschreibung „Typische Natursteinfassade“

##### 3.1.1 Beschreibung Natursteinfassade

Wie in Abbildung 3-1 zu erkennen ist, besteht die hinterlüftete Fassade aus einer Betonwand mit anliegender Wärmedämmplatte aus Mineralwolle. An der Betonwand sind die Natursteinplatten mit Mörtelankern befestigt. Der Freiraum zwischen den Dämmplatten und dem Naturstein ermöglicht die Luftzirkulation.

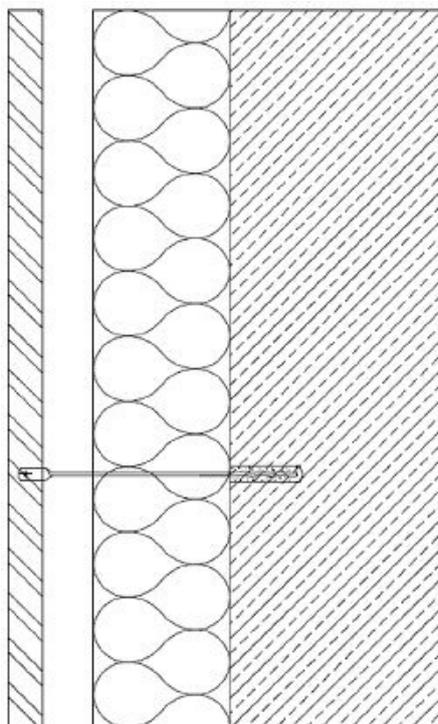


Abbildung 3-1: Schematischer Schnitt der hinterlüfteten Natursteinfassade



Hinterlüftete Natursteinfassade

### 3.1.2 Eingesetzte Materialien

In Tabelle 3-1 sind die Massen dargestellt, die bei der Herstellung von einem Quadratmeter hinterlüfteter Natursteinfassade benötigt werden.

Natursteinfassade – 1 m <sup>2</sup>		Herstellung			
Bauteil bzw. Schichten	Baubeschreibung / Material	Länge [m]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Dicke [m]	Masse [kg]
<b>Tragende Außenwände</b>					
Wand	Beton		1,00	0,20	470,40
Wand	Bewehrungsstahl		1,00	0,20	31,40
Dämmung	Mineralwolle		1,00	0,08	3,68
Verbindungselemente	Stahl				1,00
Außenwandbekleidung	Naturstein		1,00	0,04	80,00
	<b>Summe</b>				<b>586,48</b>

Tabelle 3-1: Massenermittlung und Materialien der Natursteinfassade (Herstellung)

Es ist zu erkennen, dass der Beton in der Stahlbetonwand mit 80 % den größten Massenanteil besitzt. Der Bewehrungsstahl trägt zu 5 % zu den Massen bei. Das Dämmsystem hat einen Anteil von 1 %. Die Stahlbefestigung hat einen Anteil von < 1 %. Der Naturstein trägt mit 14 % zu den Massen bei.

### 3.1.3 Herstellung Naturstein

Die Herstellung der verbaubaren Natursteinfassadenplatte kann im Wesentlichen in drei Schritte untergliedert werden: den eigentlichen Abbau im Steinbruch, die Bearbeitung des Rohblocks im Steinwerk und den Transport.

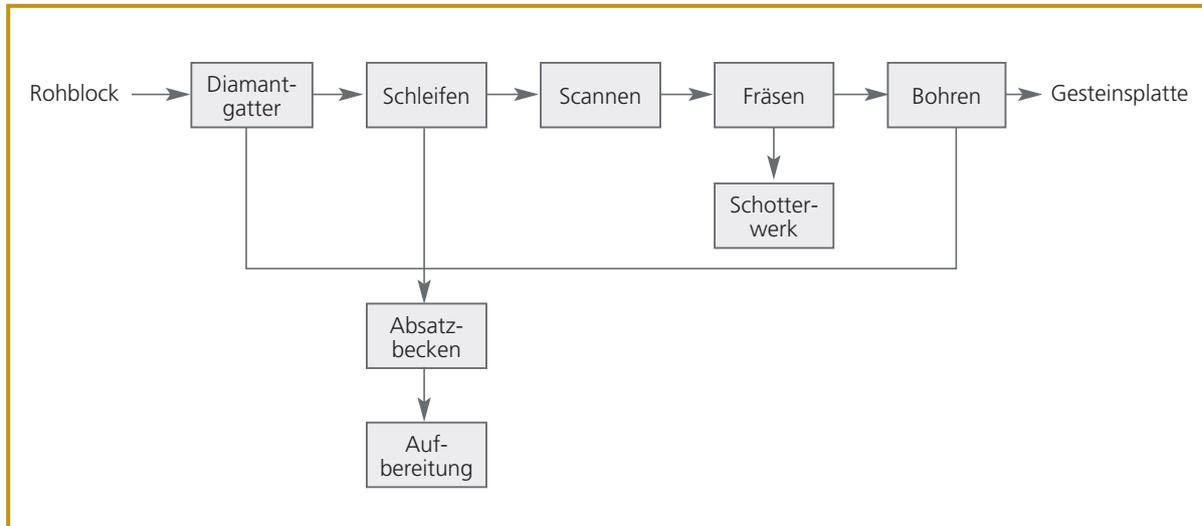
#### 3.1.3.1 Abbau des Rohblocks im Steinbruch

Der Abbau der Rohblöcke erfolgt ohne explosive Sprengung. In einem Abstand von 15 – 20 cm werden Löcher in das anstehende Gestein gebohrt. Im Anschluss werden Rohblöcke einer Größe von rund 3,5 m<sup>3</sup> entlang der Bohrlinie aus dem Gestein herausgekeilt. Die Rohblöcke werden auf dem Steinbruch mit Radladern befördert und für den weiteren Transport in das Steinwerk auf Lastkraftwagen verladen. Den im modellierten System berücksichtigten Prozessen *Abbau* und *Transport* zugrunde liegende Daten und Annahmen sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

#### 3.1.3.2 Bearbeitung des Rohblocks im Steinwerk

Im Steinwerk wird der Rohblock bearbeitet; Endprodukt der Prozesskette ist die bearbeitete Fassadenplatte, die unmittelbar verbaut werden kann. Auf dem Weg vom Rohblock zur bearbeiteten Gesteinsplatte werden im Werk verschiedene Prozesse durchlaufen, die in Abbildung 3-2 dargestellt und im Folgenden beschrieben werden.

Abbildung 3-2:  
Darstellung  
des Bearbeitungsprozesses  
im Steinwerk



Zunächst werden die im Steinbruch abgebauten Rohblöcke auf dem Diamantgatter mithilfe einer Gattersäge in 4 cm dicke Platten aufgesägt; die Geschwindigkeit liegt bei 20 – 40 cm/h. Die gesägten Platten werden auf der anschließenden Fertigungsstraße zunächst geschliffen, auf Unregelmäßigkeiten und Fehler gescannt, danach gefräst und abschließend gebohrt. Der bei den Prozessen *Diamantgatter*, *Schleifen*, *Fräsen* und *Bohren* anfallende Verschnitt beträgt für das betrachtete Modell 25 % des Endprodukts. Der Gesamtverschnitt fällt dabei in verschiedenen Körngrößen an: bei den Prozessen *Diamantgatter*, *Schleifen* und *Bohren* überwiegend als Steinschlamm, beim Prozess *Fräsen* hingegen in Form von größeren Gesteinsbruchstücken. Während der gröbere Verschnitt (20 % des Gesamtverschnitts) zu Schotter weiterverarbeitet wird, fließt der im Prozesswasser niedergeschlagene anfallende Steinschlamm (80 % des Gesamtverschnitts) mit diesem in ein Absatzbecken. In diesem wird der Feststoffanteil durch Sedimentation abgeschieden.

Bei der Naturwerksteinherstellung werden die im Steinbruch abgebauten Rohblöcke mit einer Gattersäge in 4 cm dicke Platten gesägt.



### 3.1.3.3 Modellierung der Produktherstellung in GaBi 4

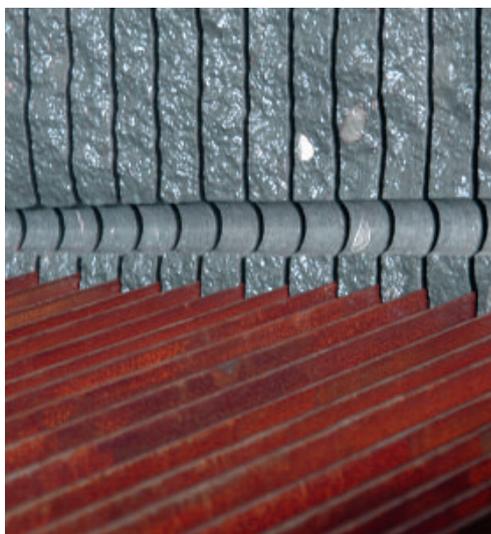
Für den Abbau der Rohblöcke werden im System der Dieserverbrauch für die eingesetzten Radlader sowie der Stromverbrauch für die eingesetzten Baumaschinen (Bohrmaschinen) berücksichtigt. Anschließend werden die abgebauten Rohblöcke mittels eines Lkw-Sattelzuges in das 200 km entfernte Steinwerk transportiert. Für den Prozess Transport werden dem System Dieserverbrauch sowie durchschnittliche Auslastung von 85 % zugrunde gelegt.

Prozesse	Daten	Datenquelle
Abbau (Steinbruch)	Dieserverbrauch: 12,5 l/m <sup>3</sup> Rohblock	GaBi (Natursteinmodell)
Transport (Abbau – Steinwerk)	Entfernung: 200 km Fahrzeugtyp: Lkw-Zug/Sattel-Zug; 34–40 t zGG; Euro 3 Auslastung: 85 %	Annahme Annahme Annahme (Spedition)
Steinwerk	Strombedarf: 0,01055 kWh/kg Endprodukt Strom Mix Deutschland Verschnitt: 25 % des Endproduktes Anteil Schotter am Verschnitt: 20 % Anteil Steinstaub am Verschnitt: 80 % Wasserbedarf: 0,278 l/kg Endprodukt	Natursteinwerk GaBi Natursteinwerk Natursteinwerk Natursteinwerk Natursteinwerk

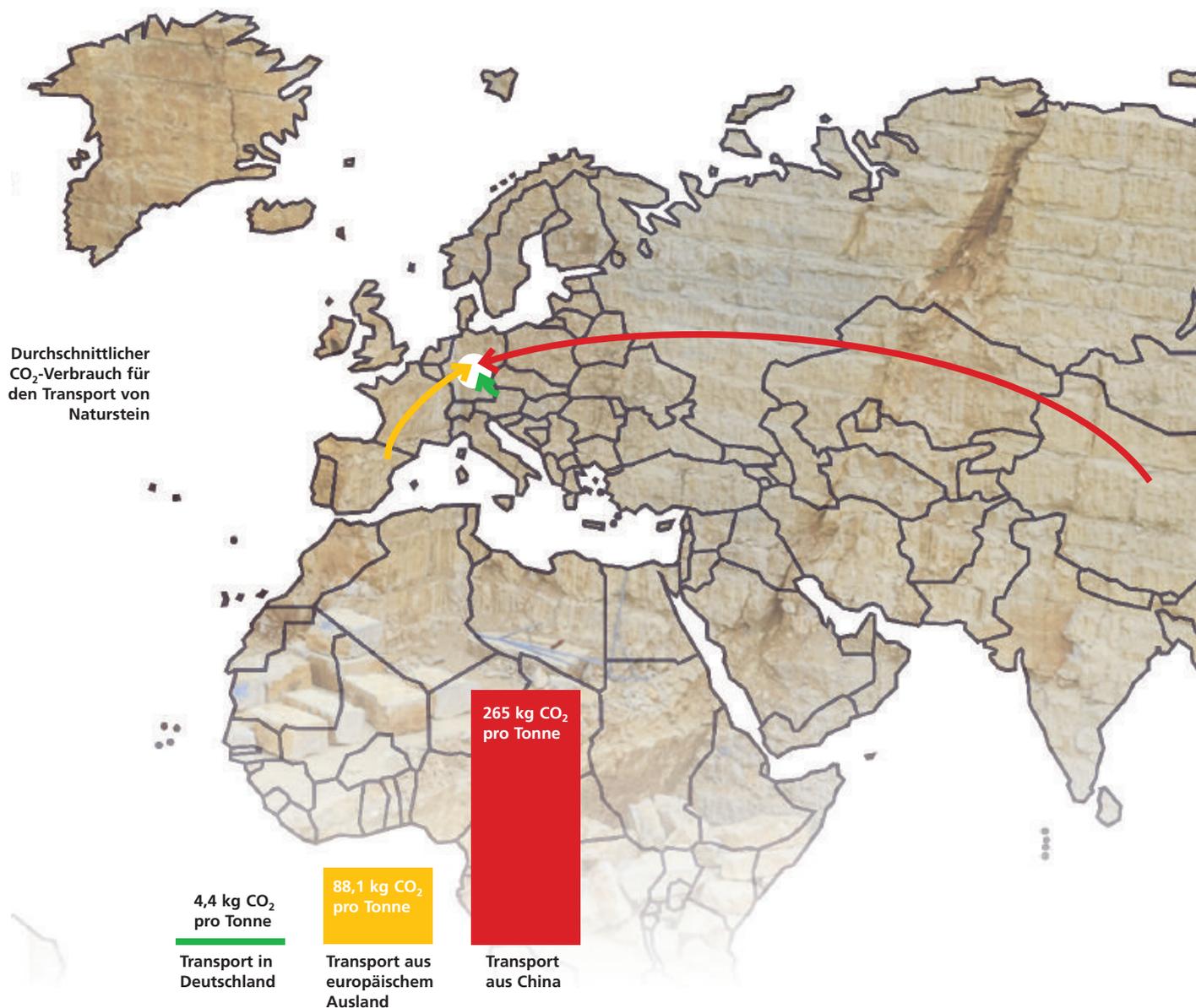
**Tabelle 3-2:**  
Natursteinplatte:  
Übersicht technische Annahmen

Im Modell wurden die einzelnen Prozesse des Steinwerks zusammenfassend als Prozess Steinwerk dargestellt. Nachteil einer rein prozessbezogenen Modellierung wäre, dass der nicht prozessspezifische Energiebedarf – z.B. für den Transport der Steinplatten im Werk – nicht berücksichtigt würde. Durch den im Modell gewählten Ansatz hingegen kann der gesamte Energiebedarf des Steinwerks auf die Bearbeitung der Fassadenplatte umgelegt werden.

Der anfallende Verschnitt wird wie in Tabelle 3-2 beschrieben im Verhältnis 8:2 in Steinschlamm und Schotter aufgeteilt. In der Modellrechnung wird der anfallende Steinschlamm nicht weiter verwertet und in einer Bauschutttaufbereitung verwertet. In Einzelfällen wird der Steinschlamm, der in seiner Zusammensetzung in etwa dem fruchtbaren Nilschlamm entspricht, auch als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt. Eine Verwertung der Steinschlämme in der Bauindustrie ist prinzipiell möglich, wird jedoch wegen der geringen anfallenden Mengen und dem hohen Feinkornanteil der Schleifschlämme nicht durchgeführt. Der anfallende gröbere Gesteinsverschnitt hingegen wird zu Schotter verarbeitet und ersetzt somit Primärschotter. Im System wird dies in Form einer Systemerweiterung (Gutschrift) gelöst.



**Zerteilung der Blöcke mit der Gattersäge und Weiterverarbeitung der Rohplatten**



### 3.1.4 Einfluss der Transportdistanzen des Natursteins auf das Treibhauspotenzial

Der Transport des Natursteins vom Natursteinwerk zur Baustelle ist hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umwelt nicht unbedeutend. Dies ist bei einem Vergleich verschiedener Produktionsstandorte ersichtlich. Im Folgenden wird der Natursteinbezug von den Produktionsstandorten China, dem europäischen Ausland und Deutschland zu einer Baustelle in Frankfurt/Main verglichen. Die Transportdistanzen werden mit 18.600 km, 2.000 km und 100 km angenommen. Für die Produktionsstandorte in Deutschland und im europäischen Ausland wird als Transportmittel ein Lkw mit einer Nutzlast von 27 Tonnen und der Abgasnorm Euro 3 verwendet. Der Transport des Natursteins aus einem chinesischen Werk wird mit einer Kombination von Lkw (150 km), Eisenbahn (200 km) und Containerschiff (18.600 km) berechnet. Es wurden die Umweltwirkungen durch den Transport von einer Tonne Naturstein berechnet.

Während für den aus Deutschland bezogenen Naturstein durch den Transport ein Treibhauspotenzial von 4,4 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Tonne entsteht, verursacht der Transport aus dem europäischen Ausland 88,1 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne, also in etwa das 20-Fache an klimawirksamen Emissionen. Der Bezug von Naturstein aus China verursacht mit 265 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne Stein ca. 60-mal so hohe Effekte wie der Bezug aus Deutschland.

### 3.1.5 Nutzung Naturstein

In der Nutzungsphase wird die Instandsetzung des Fassadenelements betrachtet (vgl. Tabelle 3-3). Für den Naturstein wird in dieser Studie mit einer technischen Nutzungsdauer laut Leitfaden Nachhaltiges Bauen (BBR) von 80 Jahren gerechnet. Die gewählte Nutzungsdauer ist eine Konvention und schließt nicht aus, dass die Lebensdauer sehr viel länger sein kann. Hochwertige Fassaden aus Naturstein werden in der Regel genauso lange wie das Gebäude genutzt. Die Dämmelemente werden laut Leitfaden Nachhaltiges Bauen mit einer Nutzungsdauer von 30 Jahren gerechnet und somit während der betrachteten 100 Jahre zweimal erneuert. Es wird davon ausgegangen, dass die Mörtelanker beim Austausch der Dämmung ebenfalls ausgetauscht werden. Der Naturstein wird während der Instandsetzung der Dämmung abmontiert und wieder auf die neue Dämmung montiert.

Natursteinfassade – 1 m <sup>2</sup>		Instandsetzung		
Bauteil bzw. Schichten	Baubeschreibung / Material	Zyklus [Jahre]	Masse [kg]	EoL Instandsetzung
<b>Tragende Außenwände</b>				
Wand	Beton	100		Entsorgung/Aufbereitung
Wand	Bewehrungsstahl	100		–
Dämmung	Mineralwolle	30	11,04	Entsorgung/Aufbereitung
Verbindungselemente	Stahl	60	1,00	Recycling
Außenwandbekleidung	Naturstein	80	80,00	Entsorgung/Aufbereitung
	<b>Summe</b>		<b>92,04</b>	

**Tabelle 3-3:**  
Massenermittlung  
Instandsetzungs-  
phase

Die Natursteinfassade benötigt im Gegensatz zur Glasfassade keine Reinigung. Damit wird kein Trinkwasser während der Nutzungsphase benötigt.

Für die energetische Betrachtung ist der Wärmedurchgangskoeffizient, auch U-Wert genannt, bedeutend. Bei der betrachteten hinterlüfteten Natursteinfassade beträgt der U-Wert inklusive Wärmebrücken 0,32 W/m<sup>2</sup>K. Durch den Einbau einer dickeren Dämmschicht kann der U-Wert weiter reduziert werden.

### 3.1.6 End of Life des Natursteins

Die Materialien der Natursteinfassade werden am Lebensende mehrheitlich in einer Bauschutttaufbereitung verarbeitet. Dazu gehören der Beton sowie der Naturstein. Nach der Behandlung in der Bauschuttufbereitungsanlage können die Materialien als Kiessubstitut, z. B. als Bodenverbesserung, im Bauwesen eingesetzt werden. Die Mineralwolle wird auf einer Inertstoffdeponie abgelagert. Die Verankerungen werden recycelt und anschließend verwertet.

### 3.2 Systembeschreibung „Typisches Glasfassadenbauteil“

#### 3.2.1 Beschreibung Glasfassadenbauteil

Das Glasfassadenbauteil entspricht einer Pfosten-Riegel-Konstruktion, die schematisch in Abbildung 3-3 dargestellt ist. Das Fassadenbauteil besteht aus einer 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, die mit Argon gefüllt ist und nach dem Sputterprozess beschichtet ist. Es enthält ein Sicherheitsband und wird von einem Aluminiumrahmen umgeben. Das Sicherheitsband aus Polyvinylbutyral verhindert Glassplitter beim Scheibeneinschlag. Die Fensterdichtungen bestehen aus EPDM-Dichtungen sowie Polyamid. Innen liegend ist ein Blendschutz angebracht. An einem Aluminiumrahmen befestigt befindet sich ein Rollo aus Polyestergewebe. Als statisches Element sind innenseitig Aluminiumprofile angeordnet. Die Konstruktion besitzt eine Dicke von 20 cm.

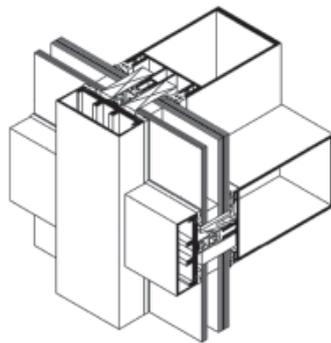


Abbildung 3-3:  
Schematische  
Darstellung des  
Glasfassaden-  
elements



#### 3.2.2 Herstellung der Glasfassade

In Tabelle 3-4 sind die Materialien der Glasfassade für einen Quadratmeter Fassadenfläche dargestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Fensterrahmen einen Flächenanteil von 7 % bezogen auf den Quadratmeter besitzt. Die Breite des Fensterrahmens wird mit 6 cm angenommen. Daraus resultiert ein Fensterrahmen mit der Länge 1,17 m.

Tabelle 3-4: Massen-  
ermittlung und  
Materialien der  
Glasfassade  
(Herstellung)

Glasfassade – 1 m <sup>2</sup>		Herstellung			
Bauteil bzw. Schichten	Baubeschreibung / Material	Länge [m]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Dicke [m]	Masse [kg]
<b>Tragende Außenwände</b>					
Unterkonstruktion	Aluminium	1,17			3,58
Druckplatte	Aluminium	1,17			0,58
Wärmeschutzverglastes Fenster-Sicherheitsband	Polyvinylbutyral		0,96		0,80
Wärmeschutzverglaste Fenster	Isolierglasverbund		0,96	0,02	43,20
Dichtung	EPDM	1,17			0,50
Dichtung	Polyamid	1,17			0,16
Blendschutz (innen liegend)	Polyestergewebe		0,96		1,34
Alurahmen (Blendschutz)	Aluminium	1,17			0,02
	<b>Summe</b>				<b>50,19</b>

Den größten Massenanteil besitzt der Isolierglasverbund mit 86 %. Der Fensterrahmen trägt mit 7 % zu den Massen bei.

Für die Modellierung der Herstellungsphase wurden die Ökobilanz-Datensätze der GaBi-Datenbank genutzt. Darin wurden die Vorketten entsprechend der DIN 14040 modelliert.

### 3.2.3 Nutzung der Glasfassade

Die Glasfläche wird von außen gereinigt. Der dafür notwendige Trinkwasserbedarf wurde nach Angaben der DGNB (DGNB 09) berechnet und entspricht 1,2 l/m<sup>2</sup> pro Jahr. Für den Betrachtungszeitraum von 100 Jahren entspricht dies einem Wasserverbrauch von 120 Litern pro m<sup>2</sup> Glasfläche. Die Materialien, die während des Betrachtungszeitraums von 100 Jahren instand gesetzt werden, sind in Tabelle 3-5 dargestellt.

Glasfassade – 1 m <sup>2</sup>		Instandsetzung		
Bauteil bzw. Schichten	Baubeschreibung / Material	Zyklus [Jahre]	Masse [kg]	End-of-Life (EoL) Instandsetzung
<b>Tragende Außenwände</b>				
Unterkonstruktion	Aluminium	50	<b>3,58</b>	Recycling
Druckplatte	Aluminium	50	<b>0,58</b>	Recycling
Wärmeschutzverglastes Fenster-Sicherheitsband	Polyvinylbutyral	25	<b>2,41</b>	Thermische Verwertung
Wärmeschutzverglaste Fenster	Isolierglasverbund	25	<b>129,60</b>	Entsorgung / Aufbereitung
Dichtung	EPDM	20	<b>2,01</b>	Thermische Verwertung
Dichtung	Polyamid	20	<b>0,64</b>	Thermische Verwertung
Blendschutz (innen liegend)	Polyestergewebe	15	<b>8,06</b>	Thermische Verwertung
Alurahmen (Blendschutz)	Aluminium	15	<b>0,12</b>	Recycling
	<b>Summe</b>		<b>147,00</b>	

**Tabelle 3-5:**  
Massenermittlung und Materialien der Glasfassade (Instandsetzung)

Nach dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen wird der innen liegende Sonnenschutz nach 15 Jahren ausgetauscht. Die Fensterdichtungen müssen nach 20 Jahren erneuert werden. Die Wärmeschutzverglasung hat wie die Sicherheitsfolie eine Lebensdauer von 25 Jahren. Nach 50 Jahren werden die Aluminiumprofile instand gesetzt.

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U) der Glasfassade beträgt nach Herstellerangaben inklusive der Wärmebrücken 1,25 W/m<sup>2</sup> K. Dabei wurde eine Zweischeibenverglasung betrachtet.

### 3.2.4 End of Life der Glasfassade

Während Glasflaschen in Glassammelbehältern gesammelt und recycelt werden, ist das Recycling von Fensterglas mit vielen Schwierigkeiten behaftet. Dies liegt vor allem an zwei Gründen:

1. Fensterglas ist ein komplexer und in Teilen kompliziert herzustellender Werkstoff, der neben weiteren Eigenschaften extrem rein von unerwünschten Beistoffen und außerdem farblich kontrollierbar sein muss.
2. Das für ein mögliches Recycling zur Verfügung stehende Fensterglas kann je nach ursprünglicher Verwendung beschichtet, bedruckt, emailliert, mit Gasen gefüllt, gefärbt usw. sein. Eine Reinigung dieser Glasreste und -scherben nach den Anforderungen an Fensterglas gemäß Punkt 1 ist derzeit verfahrenstechnisch aufwendig und damit wirtschaftlich kaum praktikierbar.

Soweit Fensterglas recycelt wird, wird es wie die oben genannten Glasflaschen gemahlen und geschmolzen, findet jedoch im Sinne eines unterbrochenen Recycling-Kreislaufs nicht wieder als Fensterglas Verwendung. Das Fensterglas wird auf einer Inertstoffdeponie abgelagert.

Die Dichtungen sowie der Blendschutz besitzen einen Heizwert. Daher werden diese Materialien in einer Müllverbrennungsanlage thermisch genutzt.

Die Aluminiumbauteile können recycelt und wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Aus diesem Grund wird im Systemmodell mit Recyclingpotenzialen gerechnet.

Bei einer Glasfassade fallen jährliche Reinigungskosten von 1,50 € pro Quadratmeter an.



### 3.3 Auswertung Teil 1 – „Typische Naturstein- und Glasfassaden“

#### 3.3.1 Sachbilanz

Die Natursteinfassade benötigt während des Lebenszyklus mit 1743 MJ/m<sup>2</sup> insgesamt deutlich weniger Primärenergie (gesamt) als die Glasfassade mit 5854 MJ/m<sup>2</sup>. Dabei ist sowohl der Anteil an erneuerbarer sowie an nicht erneuerbarer Primärenergie geringer als bei der Glasfassade. Der relative Anteil der erneuerbaren Primärenergie am Primärenergiebedarf gesamt ist bei der Natursteinfassade mit 4,5 % höher als bei der Glasfassade mit 2 %.

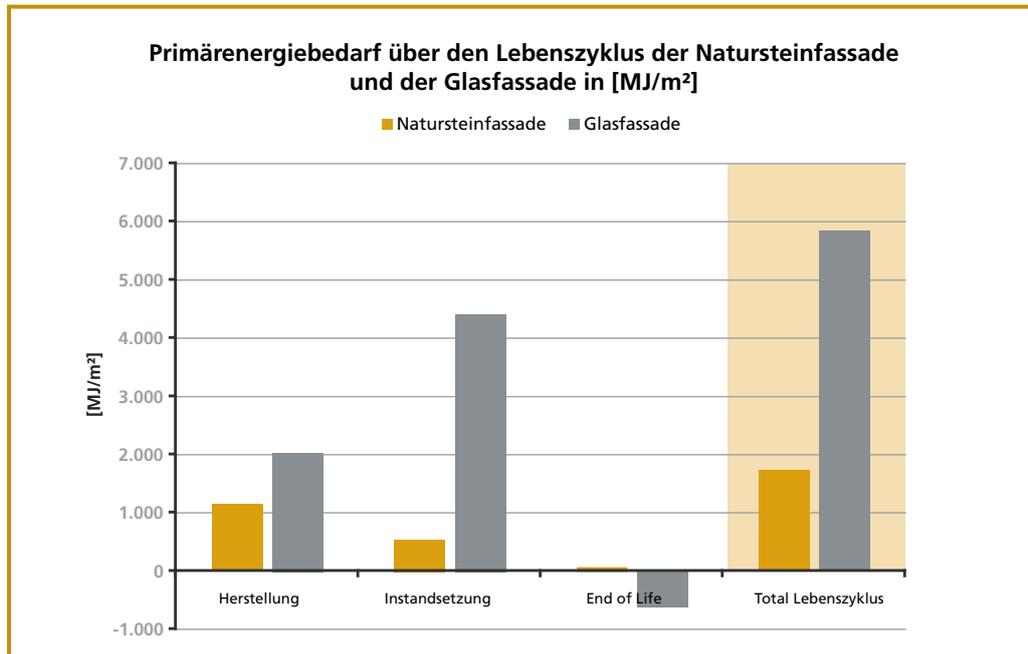
Größe	Einheit	Herstellung	Nutzung				Lebenszyklus
			Reinigung	Instandsetzung	Instandsetzung (EoL)	EoL	
<b>Natursteinfassade</b>							
Primärenergie, nicht erneuerbar	[MJ/m <sup>2</sup> ]	1107,72	0,00	539,11	-15,33	33,11	<b>1664,61</b>
Primärenergie, erneuerbar	[MJ/m <sup>2</sup> ]	55,88	0,00	27,31	-1,83	-3,08	<b>78,28</b>
Primärenergie, total	[MJ/m <sup>2</sup> ]	1163,60	0,00	566,42	-17,16	30,02	<b>1742,89</b>
<b>Glasfassade</b>							
Primärenergie, nicht erneuerbar	[MJ/m <sup>2</sup> ]	1832,66	0,09	4989,23	-635,55	-448,01	<b>5738,41</b>
Primärenergie, erneuerbar	[MJ/m <sup>2</sup> ]	206,55	0,00	253,24	-175,07	-169,41	<b>115,30</b>
Primärenergie, total	[MJ/m <sup>2</sup> ]	2039,21	0,09	5242,47	-810,63	-617,43	<b>5853,72</b>

**Tabelle 3-6:**  
Primärenergiebedarf über den Lebenszyklus der Natursteinfassade und der Glasfassade in [MJ/m<sup>2</sup>]

In der Herstellungsphase ist der Primärenergiebedarf (gesamt) der Natursteinfassade im Vergleich mit 1164 MJ/m<sup>2</sup> geringer als bei der Glasfassade mit 2039 MJ/m<sup>2</sup>. In der Nutzungsphase wirkt sich das Trinkwasser zum Reinigen der Glasfassade kaum aus. Am Lebensende benötigt die Natursteinfassade 30 MJ/m<sup>2</sup> Primärenergie, während die Glasfassade aufgrund des eingesetzten und recycelbaren Aluminiums Gutschriften erhält (-617 MJ/m<sup>2</sup>).

In der Instandhaltungsphase weicht der Primärenergiebedarf der Materialien in beiden Varianten stark voneinander ab. Die Glasfassade benötigt aufgrund der häufigen Austauschzyklen über 100 Jahre gerechnet mehr als achtmal so viel Primärenergie wie die Natursteinfassade: Der innen liegende Sonnenschutz wird nach 15 Jahren ausgetauscht, die Fensterdichtungen müssen nach 20 Jahren erneuert werden, die Wärmeschutzverglasung hat wie die Sicherheitsfolie eine Lebensdauer von 25 Jahren und nach 50 Jahren werden die Aluminiumprofile ausgetauscht.

Abbildung 3-3:  
Primärenergie-  
bedarf [MJ/m<sup>2</sup>]



### 3.3.2 Wirkungsabschätzung

Zusammenfassend sind in Tabelle 3-7 die Beiträge einzelner Kategorien zu den betrachteten Wirkungskategorien dargestellt. Dabei erfolgt eine Gliederung nach Herstellung, Nutzung und End of Life für die Natursteinfassade sowie die Glasfassade.

In der Herstellungsphase sind die Emissionen der Natursteinfassade in allen Wirkungskategorien deutlich niedriger als bei der Glasfassade. Am Lebensende besteht bei Glasfassaden die Möglichkeit, Gutschriften durch das Rezyklieren und Wiedereinsetzen der Materialien in den Stoffkreislauf zu erhalten.

In der Instandsetzungsphase, die über 100 Jahre gerechnet ist, verursacht die Glasfassade im Vergleich in allen Kategorien höhere Emissionen. Dies liegt hauptsächlich am dreimaligen Austausch der Wärmeschutzverglasung während des Betrachtungszeitraums. Im Gegensatz dazu wird die Stahlbetonwand der Natursteinfassade nicht ausgetauscht. Die Natursteinplatten sind ebenfalls sehr langlebig und werden rechnerisch während der 100 Jahre einmal nach 80 Jahren erneuert. Die End-of-Life Werte der Natursteinfassade sind eher unbedeutend. Während die Aufbereitung von Naturstein und Beton mit geringen Emissionen verbunden ist, bewirken die eingesetzten Aluminiumbauteile der Glasfassade durch das Recycling und Wiedereinsetzen im Stoffkreislauf Gutschriften.

Größe	Einheit pro m <sup>2</sup>	Herstellung	Nutzung				Total Lebenszyklus
			Reinigung	Instandsetzung	Instandsetzung (EoL)	EoL	
<b>Natursteinfassade</b>							
GWP	[kg CO <sub>2</sub> -Äqv.]	119,65	0,00	37,94	0,61	18,47	<b>176,66</b>
ODP	[kg R11-Äqv.]	6,40E-06	0,00E+00	3,52E-06	7,18E-08	-1,97E-07	<b>9,80E-06</b>
AP	[kg SO <sub>2</sub> -Äqv.]	0,2933	0,0000	0,1525	0,0102	0,0542	<b>0,5102</b>
EP	[kg PO <sub>4</sub> -Äqv.]	0,0471	0,0000	0,0274	-0,0158	-0,0088	<b>0,0498</b>
POCP	[kg Ethen-Äqv.]	0,0260	0,0000	0,0090	0,0003	0,0035	<b>0,0389</b>
<b>Glasfassade</b>							
GWP	[kg CO <sub>2</sub> -Äqv.]	141,29	0,01	359,87	-19,36	-32,95	<b>448,85</b>
ODP	[kg R11-Äqv.]	6,32E-06	3,10E-10	1,44E-05	-2,99E-06	-2,41 E-06	<b>1,53E-05</b>
AP	[kg SO <sub>2</sub> -Äqv.]	0,5794	0,0000	1,3794	-0,1880	-0,1828	<b>1,5881</b>
EP	[kg PO <sub>4</sub> -Äqv.]	0,0608	0,0000	0,1729	-0,0060	-0,0065	<b>0,2212</b>
POCP	[kg Ethen-Äqv.]	0,0537	0,0000	0,1397	-0,0162	-0,0161	<b>0,1611</b>

Tabelle 3-7: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung während des Lebenszyklus (pro m<sup>2</sup>)

Bezogen auf den Lebenszyklus verursacht die Natursteinfassade (NSTF) in allen Umweltwirkungskategorien deutlich geringere Emissionen als die Glasfassade (GF):

Umwelteinwirkungen	NSTF : GF
Treibhauspotenzial (CO <sub>2</sub> -Äquivalent; GWP)	1 : 2,5
Ozonabbaupotenzial (R11; ODP)	1 : 1,6
Versauerungspotenzial (SO <sub>2</sub> -Äquivalent; AP)	1 : 3,1
Eutrophierungspotenzial (PO <sub>4</sub> -Äquivalent; EP)	1 : 4,4
Sommersmogpotenzial (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquivalent; POCP)	1 : 4,3

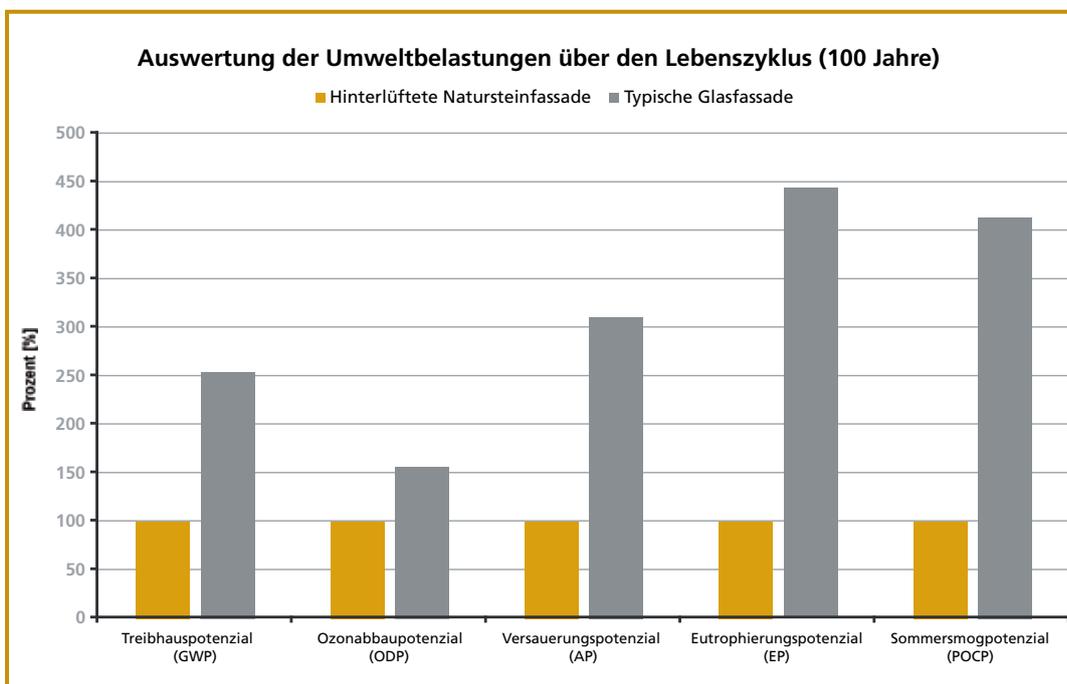


Abbildung 3-4: Auswertung der Umweltbelastungen

### 3.3.3 Zeitliche Betrachtung der Fassadenkomponenten

Während des Betrachtungszeitraums von 100 Jahren werden bei der Glasfassade mehr Materialien ausgetauscht als bei der Natursteinfassade. Insgesamt beträgt die Masse der ausgetauschten Materialien bei der Glasfassade 147 kg, bei der Natursteinfassade werden nur 92,04 kg benötigt.

Die Instandhaltung erfolgt bei der Natursteinfassade theoretisch in vier Phasen: Nach 30, sowie nach 60 und nach 90 Jahren wird die Dämmung ausgetauscht. Vor dem dritten Instandhaltungszyklus werden nach 80 Jahren die Natursteine erneuert. Die durchschnittliche Nutzungsdauer der Materialien wurden dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen BBR 2002 entnommen.

Reell würde der Austausch der Natursteine und der Dämmung zeitgleich geschehen. Da bei der zeitlichen Betrachtung jedoch eine Szenarienbetrachtung zur rechnerischen Ermittlung der Umweltwirkungen durchgeführt wird und hier der Materialverbrauch im Vordergrund steht, wirken sich die zeitlich unterschiedlichen Instandsetzungen nicht auf die Betrachtung aus.

Fassadenvarianten mit Glas und Naturstein



## 4 Ökobilanzen – Teil 2

### „Fassadenvarianten in Naturstein und Glas am Beispiel des Frankfurter OpernTurms“

**Der zweite Teil der von PE International erstellten Studie befasst sich mit dem Vergleich der realisierten, teilweise elementierten Natursteinfassade des Frankfurter OpernTurms mit zwei optionalen Fassaden aus Naturstein und Glas.**

Als „ausgeführte Natursteinfassade“ werden die Fassadenelemente bezeichnet, die in den Regelgeschossen (7. – 41. OG) des OpernTurms in Frankfurt eingesetzt werden. Die Quantifizierung der Umwelteffekte erfolgt für diesen Teil der am OpernTurm ausgeführten Fassadenbereiche.

Da sich Teil 2 der Studie mit einem Bürogebäude befasst, wird der Betrachtungszeitraum wie im Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen auf 50 Jahre definiert.



#### 4.1 Systembeschreibung „Elementierte Fassade“

##### 4.1.1 Beschreibung „ausgeführte Natursteinfassade“ (17% elementiert, 33% hinterlüftet, 50% Verglasung)

Das Regelement der Natursteinfassade des OpernTurms besitzt eine Höhe von 3,57 m und eine Breite von 2,72 m. Die Brüstung sowie die Verbindungsstücke zwischen den Fensterelementen sind als elementierte Natursteinfassade realisiert. Seitlich an den Fenstern befindet sich eine Lüftungsklappe aus Aluminium. An den Gebäudeecken befindet sich eine hinterlüftete Natursteinfassade.

Diese Fassadenvariante besteht somit aus 17% elementierter Natursteinfassade, 33% Natursteinfassade nach DIN 18516-3 und 50 % Verglasung.

##### 4.1.2 Eingesetzte Materialien

Die elementierte, hinterlüftete Fassade ist auf Aluminiumprofilen befestigt, die für eine schnelle Erstellung der Fassade in der Herstellungsphase dienen. Auf dem Aluminiumprofil befindet sich die Wärmedämmung. Diese besteht aus Mineralwolle, die innenseitig durch ein Stahlblech und außenseitig durch ein Aluminiumblech geschützt wird. An dem Aluminiumblech sind horizontale und vertikale Aluminiumprofile befestigt, an denen die Natursteinplatten durch Metallstifte verankert sind. Das Fensterelement besteht aus einer 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit einem Aluminiumrahmen und innen liegendem Blendschutz. Dieser besteht aus Polyestergerewebe mit einem Aluminiumrahmen.

### 4.1.3 Herstellung des Fassadenelements mit appliziertem Naturstein

Wie Tabelle 4-1 zu entnehmen ist, besitzt der Beton mit ca. 74 % den größten Anteil der Massen an der Herstellung. Auch der Naturstein besitzt mit 13 % einen hohen Anteil. Die Isolierscheibenverglasung trägt mit 7 % zu den Massen bei.

**Tabelle 4-1: Massenermittlung und Materialien der Natursteinfassade (Herstellung)**

<b>Ausgeführte Natursteinfassade</b>					
		<b>Herstellung</b>			
<b>Bauteil bzw. Schichten</b>	<b>Baubeschreibung / Material</b>	<b>Länge [m]</b>	<b>Fläche [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Dicke [m]</b>	<b>Masse [kg]</b>
<b>Tragende Außenwände</b>					
Hinterlüftete Fassade – Wand	Beton		12.340	0,196	<b>5.804.845</b>
Hinterlüftete Fassade – Wand	Bewehrungsstahl		12.340	0,004	<b>387.483</b>
Hinterlüftete Fassade – Dämmung	Mineralwolle		12.340	0,080	<b>45.412</b>
Hinterlüftete Fassade – Verbindungselemente	Stahl				<b>12.340</b>
Hinterlüftete Fassade – Außenwandbekleidung	Naturstein		12.340	0,040	<b>987.219</b>
Elementierte F. – Wand	Beton		6.170	0,196	<b>2.902.423</b>
Elementierte F. – Unterkonstruktion	Aluminium			0,040	<b>1.011</b>
Elementierte F. – Schutzschicht (innen)	Stahl		898	0,002	<b>10.573</b>
Elementierte F. – Dämmung	Mineralwolle (WDVS)		6.170	0,084	<b>23.841</b>
Elementierte F. – Dämmung (je 4. Stock)	Mineralwolle (WDVS)		123	0,100	<b>565</b>
Elementierte F. – Schutzschicht (außen)	Aluminium		4.156	0,002	<b>22.444</b>
Elementierte F. – Befestigungen	Stahl				<b>6.170</b>
Elementierte F. – Außenwandbekleidung	Naturstein		6.170	0,040	<b>493.609</b>
<b>Außenfenster/-türen</b>					
Fensterrahmen	Aluminium	25.973			<b>26.753</b>
Wärmeschutzverglaste Fenster – Sicherheitsband	Polyvinylbutyral		18.510	0,001	<b>15.475</b>
Wärmeschutzverglaste Fenster – Glas	Isolierglasverbund		18.510	0,018	<b>832.966</b>
Dichtung	EPDM	25.973			<b>11.169</b>
Dichtung	Polyamid	33.144	795	0,005	<b>4.534</b>
Blendschutz (innen liegend) – Gewebe	Polyestergewebe		6.993	0,001	<b>9.791</b>
Blendschutz (innen liegend) – Alurahmen	Aluminium	18.803			<b>335</b>
Fensterbank	Naturstein		275	0,070	<b>38.510</b>
	<b>Summe</b>				<b>11.831.209</b>

#### 4.1.4 Nutzung

In der Nutzungsphase fällt keine Reinigung der Natursteinfassade an. Die Fensterfläche benötigt bei einem flächenbezogenen Wasserverbrauch von 1,2 l Wasser/m<sup>2</sup>a (DGNB NBV09) insgesamt 22,2 m<sup>3</sup>

Ausgeführte Natursteinfassade				
		Instandsetzung		
Bauteil bzw. Schichten	Baubeschreibung / Material	Zyklus [Jahre]	Masse [kg]	EoL Instandsetzung
<b>Tragende Außenwände</b>				
Hinterlüftete Fassade – Wand	Beton	100	0	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
Hinterlüftete Fassade – Wand	Bewehrungsstahl	100	0	–
Hinterlüftete Fassade – Dämmung	Mineralwolle	30	45.412	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
Hinterlüftete Fassade – Außenwandbekleidung	Naturstein	80	0	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
Elementierte F. – Wand	Beton	100	0	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
Elementierte F. – Unterkonstruktion	Aluminium	60	0	Recycling
Elementierte F. – Schutzschicht (innen)	Stahl	30	10.573	Recycling
Elementierte F. – Dämmung	Mineralwolle (WDVS)	30	23.841	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
Elementierte F. – Dämmung (je 4. Stock)	Mineralwolle (WDVS)	30	565	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
Elementierte F. – Schutzschicht (außen)	Aluminium	60	0	Recycling
Elementierte F. – Befestigungen	Stahl	45	0	Recycling
Elementierte F. – Außenwandbekleidung	Naturstein	80	0	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
<b>Außenfenster/-türen</b>				
Fensterrahmen	Aluminium	50	0	Recycling
Wärmeschutzverglaste Fenster – Sicherheitsband	Polyvinylbutyral	25	15.475	Thermische Verwertung
Wärmeschutzverglaste Fenster – Glas	Isolierglasverbund	25	832.966	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
Dichtung	EPDM	20	22.337	Thermische Verwertung
Dichtung	Polyamid	20	9.068	Thermische Verwertung
Blendschutz (innen liegend) – Gewebe	Polyestergewebe	15	19.581	Thermische Verwertung
Blendschutz (innen liegend) – Alurahmen	Aluminium	15	670	Recycling
Fensterbank	Naturstein	80	0	Entsorgung/Deponie
	<b>Summe</b>		<b>980.488</b>	

Tabelle 4-2: Instandsetzungsphase der ausgeführten Natursteinfassade

Der Frankfurter  
OpernTurm während  
der Bauphase



Wasser pro Jahr. Als Instandhaltungsmaßnahmen werden einige Materialien während des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren ausgetauscht.

Nach dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen des Bundesbauministeriums wird der innen liegende Sonnenschutz nach 15 Jahren ausgetauscht. Die Fensterdichtungen müssen nach 20 Jahren erneuert werden. Die Wärmeschutzverglasung hat wie die Sicherheitsfolie, eine Nutzungsdauer von 25 Jahren. Die Dämmelemente werden nach 30 Jahren ausgetauscht. Der Naturstein sowie die Stahlbetonwand müssen laut Leitfaden Nachhaltiges Bauen während der Betrachtungszeit nicht erneuert werden.

#### 4.1.5 End of Life

Am Lebensende werden die eingebauten Materialien je nach Materialart aufbereitet, deponiert, recycelt oder thermisch verwertet. Während das Isolierglas aufgrund der aufwendigen Aufbereitung auf einer Deponie gelagert wird, ist beim Beton und Naturstein eine Aufbereitung üblich.

#### 4.1.6 Transporte

Bei allen drei betrachteten Fassadenvarianten sind Transporte der Rohstoffe mit dem Lkw zum Werk und der Entsorgungsmaterialien zum Entsorgungsort mit 100 km berücksichtigt.

## 4.2 Systembeschreibung „Option Glasfassade“

### 4.2.1 Beschreibung der Glasfassade (90 % Verglasung)

Die zu vergleichende Glasfassade besteht zu 90 % aus Glaselementen und zu 10 % aus einer hinterlüfteten Natursteinfassade.

Zwischen den Stahlbetonstützen und den Glaselementen ist eine Abdeckung des Betons berücksichtigt. Diese Abdeckung ist auch vor den Decken vorgesehen. Damit wird von außen ein einheitliches Bild der Glasfassade gewährleistet. Diese Praxis ist bei Glasfassaden gängig. Die Fensterelemente besitzen eine Länge von 3,9 m und eine Höhe von 3,1 m. Diese Angaben sind der Leistungsbeschreibung einer Regelfassade aus Glas entnommen.

Diese Fensterelemente sind durch einen glasteilenden Pfosten in der Breite und in der Höhe durch einen glasteilenden Riegel unterteilt. Diese Elemente bestehen aus Aluminiumprofilen, die auch der Abtragung von statischen Lasten der Glasfassade dienen.

### 4.2.2 Herstellung des Glasfassadenelements

Bei der hinterlüfteten Fassade an den Gebäudeecken sind die Natursteine durch Mörtelanker direkt an der Stahlbetonwand befestigt. Dazwischen befindet sich eine Dämmschicht aus Mineralwolle.

Die Glasfassade besteht aus einer Pfosten-Riegel-Konstruktion: Die Abdeckung der Decken und Stüt-

Option Glasfassade					
		Herstellung			
Bauteil bzw. Schichten	Baubeschreibung / Material	Länge [m]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Dicke [m]	Masse [kg]
<b>Tragende Außenwände</b>					
Hinterlüftete Fassade – Wand	Beton		3.702	0,196	<b>1.741.454</b>
Hinterlüftete Fassade – Wand	Bewehrungsstahl		3.702	0,004	<b>116.245</b>
Hinterlüftete Fassade – Dämmung	Mineralwolle		3.702	0,080	<b>13.624</b>
Hinterlüftete Fassade – Verbindungselemente	Stahl		0,000	0,000	<b>3.702</b>
Hinterlüftete Fassade – Außenwandbekleidung	Naturstein		3.702	0,040	<b>296.166</b>
Unterkonstruktion	Aluminium	21.959			<b>114.685</b>
Abdeckung vor Decken und Stützen	Stahl		8.187	0,002	<b>164.713</b>
Abdeckung vor Decken und Stützen	Mineralwolle		8.187	0,062	<b>39.895</b>
Abdeckung vor Decken und Stützen	Aluminium		8.187	0,004	<b>151.074</b>
<b>Außenfenster/-türen</b>					
Druckplatte	Aluminium	37.519			<b>18.760</b>
Wärmeschutzverglaste Fenster – Sicherheitsband	Polyvinylbutyral		31.067	0,001	<b>25.972</b>
Wärmeschutzverglaste Fenster	Isolierglasverbund		31.067	0,018	<b>1.398.036</b>
Dichtung	EPDM	37.519			<b>16.133</b>
Dichtung	Polyamid		900	0,005	<b>5.133</b>
Blendschutz (innen liegend)	Polyestergewebe		17.079	0,001	<b>23.911</b>
Alurahmen (Blendschutz)	Aluminium	37.519			<b>669</b>
	<b>Summe</b>				<b>4.130.171</b>

Tabelle 4-3: Massenermittlung, Beschreibung der Glasfassadenelemente (Herstellung)

zen erfolgt durch eine Dämmkassette, die durch ein Stahlblech und ein Aluminiumblech geschützt wird. Die Fensterelemente bestehen aus 2-Scheiben-Isolierverglasung mit einer Sicherheitsfolie aus Polyvinylbutyral. Diese Folie beugt Glasscherben beim Scheibeneinschlag vor. Die Aluminiumrahmen sind durch EPDM und Polyamid thermisch getrennt. Innenseitig befindet sich ein Blendschutz aus Polyestergerewebe, der in einem Aluminiumrahmen gefasst ist.

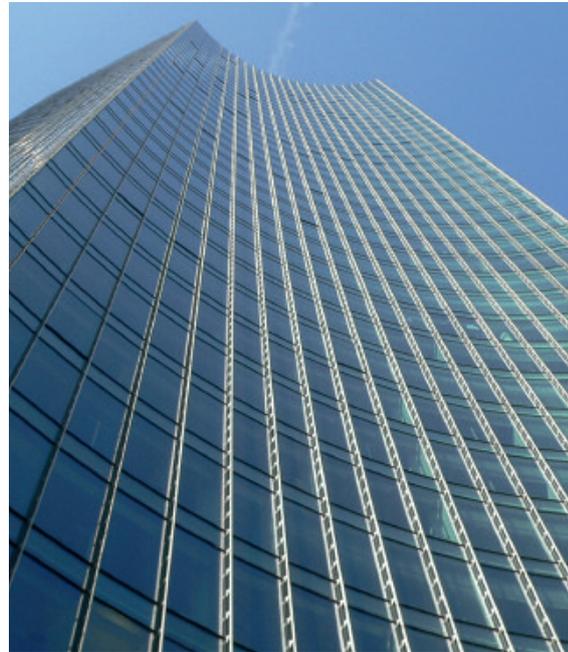
Die Massen der Glasfassade werden durch die Stahlbetonwand mit insgesamt ca. 45 % sowie die Wärmeschutzverglasung mit ca. 34 % dominiert. Der Naturstein besitzt einen Massenanteil von 7 %. Die übrigen Materialien spielen auf die Masse bezogen eine untergeordnete Bedeutung (vgl. Tabelle 4-3).

#### 4.2.3 Nutzung der Glasfassadenelemente

Die Fensterfläche der Glasfassade benötigt bei einem flächenbezogenen Wasserverbrauch von 1,2 l/m<sup>2</sup>a (DGNB NBV09) insgesamt ca. 40 m<sup>3</sup> Trinkwasser pro Jahr. Als Instandhaltungsmaßnahmen werden einige Materialien während des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren ausgetauscht. Wie in Tabelle 4-4 zu erkennen ist, werden die Fenstergläser nach dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen des Bundesbauministeriums einmal nach 25 Jahren ausgetauscht. Die Dämmung wird nach 30 Jahren,

Tabelle 4-4: Massenermittlung, Austauschzyklen und EoL-Optionen der Instandsetzung der „Option: Glasfassade“

Option Glasfassade				
Bauteil bzw. Schichten	Baubeschreibung / Material	Instandsetzung		
		Zyklus [Jahre]	Masse [kg]	EoL Instandsetzung
<b>Tragende Außenwände</b>				
Hinterlüftete Fassade – Wand	Beton	100	0	
Hinterlüftete Fassade – Wand	Bewehrungsstahl	100	0	
Hinterlüftete Fassade – Dämmung	Mineralwolle	30	13.624	Entsorgung/Aufbereitung
Hinterlüftete Fassade – Außenwandbekleidung	Naturstein	80	0	
Unterkonstruktion	Aluminium	50	0	
Abdeckung vor Decken und Stützen	Stahl	30	164.713	Recycling
Abdeckung vor Decken und Stützen	Mineralwolle	30	39.895	Entsorgung/Aufbereitung
Abdeckung vor Decken und Stützen	Aluminium	30	151.074	Recycling
<b>Außenfenster/-türen</b>				
Druckplatte	Aluminium	50	0	
Wärmeschutzverglaste Fenster – Sicherheitsband	Polyvinylbutyral	25	25.972	Entsorgung/Aufbereitung
Wärmeschutzverglaste Fenster	Isolierglasverbund	25	1.398.036	Entsorgung/Aufbereitung
Dichtung	EPDM	20	32.267	Thermische Verwertung
Dichtung	Polyamid	20	10.265	Thermische Verwertung
Blendschutz (innen liegend)	Polyestergerewebe	15	47.822	Thermische Verwertung
Alurahmen (Blendschutz)	Aluminium	15	1.337	Recycling
	<b>Summe</b>		<b>1.885.005</b>	



Natursteinfassaden und Glasfassaden im Vergleich

die Dichtungen nach 20 Jahren und der innen liegende Sonnenschutz nach 15 Jahren auswechselt. Aufgrund des Instandhaltungszyklus von mindestens 50 Jahren werden die Aluminiumkonstruktion sowie die Stahlbetonwand während des Betrachtungszeitraums nicht erneuert.

#### 4.2.4 End of Life

Am Lebensende werden die Mineralwolle, der Isolierglasverbund und das damit verbundene Polyvinylbutyral auf der Deponie abgelagert. Die Metallelemente werden recycelt und das Polyestergerüst sowie die Materialien zur thermischen Trennung der Aluminiumrahmen thermisch verwendet. Es zeigt sich, dass ca. 75 % der Materialien deponiert und 22 % recycelt werden.

### 4.3 Systembeschreibung „Option Natursteinfassade“

#### 4.3.1 Beschreibung der Option Natursteinfassade (50% Natursteinfassade nach DIN 18516-3, 50% Verglasung)

Bei dieser Option besitzt die Fassade die gleiche Ansicht wie bei der ausgeführten Fassade mit einer Höhe von 3,57 m und einer Breite von 2,72 m. Die Fassade ist jedoch ausschließlich nicht elementiert. Dies bedeutet, dass Brüstung sowie Verbindungsstücke zwischen den Fensterelementen als hinterlüftete Natursteinfassade realisiert sind. Im Unterschied zur elementierten Natursteinfassade ist die Natursteinbekleidung direkt an der Stahlbetonwand befestigt.

#### 4.3.2 Eingesetzte Materialien

An der Stahlbetonwand liegt die Dämmung an. Diese besteht aus Mineralwolle. Vor der Dämmung befindet sich die Natursteinbekleidung, die durch einen Zwischenraum getrennt ist, in dem Luft zirkulieren kann.

Das Fensterelement besteht aus einer 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit innen liegendem Blendschutz. Dieser besteht aus Polyestergerüst mit einem Aluminiumrahmen. An das Fensterelement angrenzend befindet sich ein Aluminiumrahmen.

### 4.3.3 Herstellung des Natursteinfassadenelements

Wie in Tabelle 4-5 zu erkennen ist, besitzt der Stahlbeton mit ca. 79 % den größten Anteil der Massen an der Herstellung. Auch der Naturstein besitzt mit 13 % einen hohen Anteil. Die Isolierscheibenverglasung trägt mit 7 % zu den Massen bei.

**Tabelle 4-5: Massenermittlung und Materialien der hinterlüfteten Natursteinfassade (Herstellung)**

Option Natursteinfassade					
		Herstellung			
Bauteil bzw. Schichten	Baubeschreibung / Material	Länge [m]	Fläche [m²]	Dicke [m]	Masse [kg]
<b>Tragende Außenwände</b>					
Hinterlüftete Fassade – Wand	Beton		18.510	0,196	<b>8.707.269</b>
Hinterlüftete Fassade – Wand	Bewehrungsstahl		18.510	0,004	<b>581.225</b>
Hinterlüftete Fassade – Dämmung	Mineralwolle		18.510	0,080	<b>68.118</b>
Hinterlüftete Fassade – Verbindungselemente	Stahl		0,000	0,000	<b>18.510</b>
Hinterlüftete Fassade – Außenwandbekleidung	Naturstein		18.510	0,040	<b>1.480.828</b>
<b>Außenfenster/-türen</b>					
Fensterrahmen	Aluminium	25.973			<b>26.753</b>
Wärmeschutzverglaste Fenster – Sicherheitsband	Polyvinylbutyral		18.510	0,001	<b>15.475</b>
Wärmeschutzverglaste Fenster – Glas	Isolierglasverbund		18.510	0,018	<b>832.966</b>
Dichtung	EPDM	25.973			<b>11.169</b>
Dichtung	Polyamid	33.144	795	0,005	<b>4.534</b>
Blendschutz (innen liegend) – Gewebe	Polyestergewebe		6.993	0,001	<b>9.791</b>
Blendschutz (innen liegend) – Alurahmen	Aluminium	18.803			<b>335</b>
Fensterbank	Naturstein		275	0,070	<b>38.510</b>
	<b>Summe</b>				<b>11.795.481</b>

#### 4.3.4 Nutzung der Regelemente

In der Nutzungsphase fällt keine Reinigung der Natursteinfassade an. Die Fensterfläche benötigt bei einem flächenbezogenen Wasserverbrauch von 1,2 l/m<sup>2</sup>a (DGNB NBV09), insgesamt 22,2 m<sup>3</sup> Trinkwasser pro Jahr. Als Instandhaltungsmaßnahmen werden einige Materialien während des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren ausgetauscht.

Option Natursteinfassade				
Bauteil bzw. Schichten	Baubeschreibung / Material	Instandsetzung		
		Zyklus [Jahre]	Masse [kg]	Eol. Instandsetzung
<b>Tragende Außenwände</b>				
Hinterlüftete Fassade – Wand	Beton	100	0	
Hinterlüftete Fassade – Wand	Bewehrungsstahl	100	0	
Hinterlüftete Fassade – Dämmung	Mineralwolle	30	68.118	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
Hinterlüftete Fassade – Außenwandbekleidung	Naturstein	80	0	–
<b>Außenfenster/-türen</b>				
Fensterrahmen	Aluminium	50	0	–
Wärmeschutzverglaste Fenster – Sicherheitsband	Polyvinylbutyral	25	15.475	Thermische Verwertung
Wärmeschutzverglaste Fenster – Glas	Isolierglasverbund	25	832.966	Stoffe zur Entsorgung/Aufbereitung
Dichtung	EPDM	20	22.337	Thermische Verwertung
Dichtung	Polyamid	20	9.068	Thermische Verwertung
Blendschutz (innen liegend) – Gewebe	Polyestergewebe	15	19.581	Thermische Verwertung
Blendschutz (innen liegend) – Alurahmen	Aluminium	15	670	Recycling
Fensterbank	Naturstein	80	0	
	<b>Summe</b>		<b>968.215</b>	

Tabelle 4-6: Massenermittlung, Austauschzyklen und EoL-Optionen der hinterlüfteten Natursteinfassade

Nach dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen des Bundesbauministeriums wird der innen liegende Sonnenschutz nach 15 Jahren ausgetauscht. Die Fensterdichtungen müssen nach 20 Jahren erneuert werden. Die Wärmeschutzverglasung hat wie die Sicherheitsfolie eine Lebensdauer von 25 Jahren. Die Dämmung wird nach 30 Jahren ausgetauscht. Der Naturstein sowie die Stahlbetonwand müssen laut Leitfaden Nachhaltiges Bauen während der Betrachtungszeit nicht erneuert werden.

#### 4.3.5 End of Life

Am Lebensende werden die Materialien deponiert, recycelt oder thermisch verwertet. Während das Isolierglas aufgrund der aufwendigen Aufbereitung auf einer Deponie gelagert wird, ist beim Beton und Naturstein eine Aufbereitung üblich.

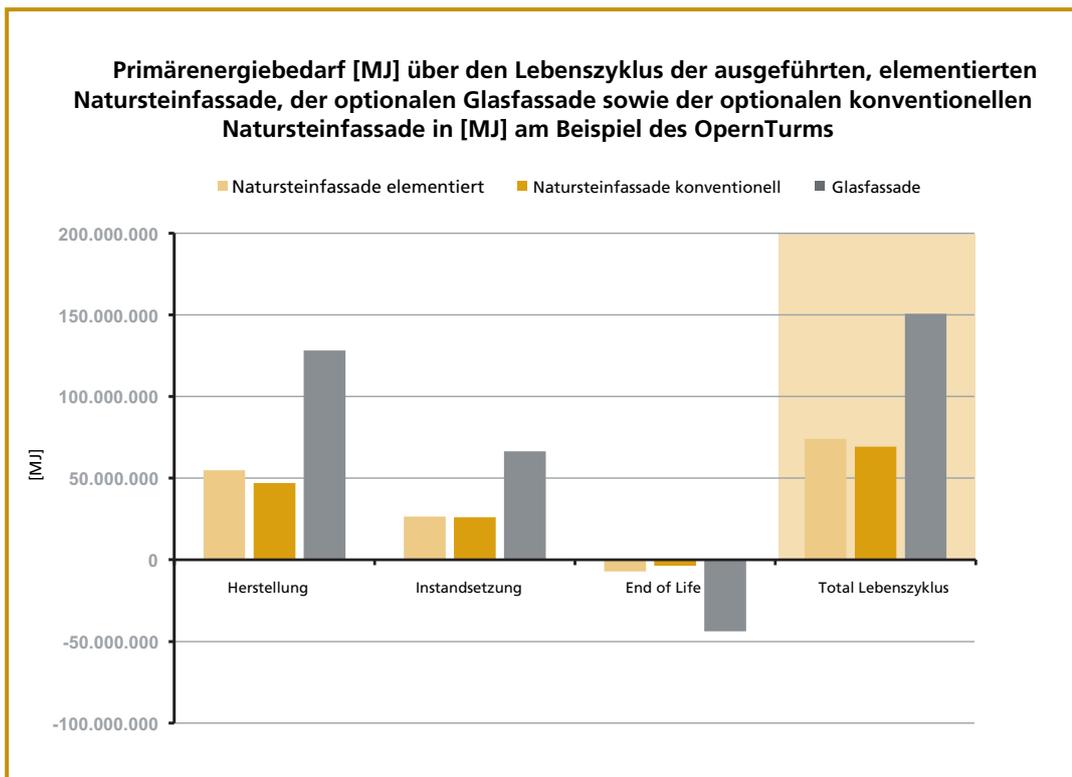
## 4.4 Auswertung – Teil 2: „Fassadenvarianten in Naturstein und Glas am Beispiel des Frankfurter OpernTurms“

### 4.4.1 Sachbilanz

#### 4.4.1.1 Gesamter Primärenergiebedarf der Fassadenvarianten

In Abbildung 4-1 ist der Primärenergiebedarf über den Lebenszyklus der drei Fassadenvarianten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die ausgeführte Natursteinfassade ca. 50 % weniger Primärenergiebedarf benötigt als die betrachtete Glasfassade.

Abbildung 4-1:  
Primär-  
energiebedarf



In der Instandhaltungsphase wird die Langlebigkeit der Materialien der Natursteinfassade deutlich. Der Primärenergiebedarf der Glasfassade während dieser Lebenszyklusphase ist ca. dreimal so hoch wie bei der Natursteinfassade. Hierbei schlägt sich besonders der Austausch der Glasfassade nieder. Die Gutschriften am Lebensende sind größtenteils auf das Recycling der Aluminiumprofile zurückzuführen.

		Herstellung	Nutzung	EoL Herstellung	Instandsetzung	EoL Instandsetzung	Lebenszyklus
<b>Ausgeführte Natursteinfassade (17% elementiert, 33% nicht elementiert, 50% Fensteranteil)</b>							
Primärenergie, nicht erneuerbar	[MJ]	51.666.929	839	-5.029.416	27.333.660	-1.287.960	72.684.052
Primärenergie, erneuerbar	[MJ]	3.147.188	7	-2.121.051	445.216	-50.690	1.420.670
<b>Glasfassade</b>							
Primärenergie, nicht erneuerbar	[MJ]	113.483.177	1.510	-32.243.963	84.666.046	-20.287.661	145.619.109
Primärenergie, erneuerbar	[MJ]	14.568.013 MJ	12	-11.607.106	8.331.070	-6.231.313	5.060.676
<b>Natursteinfassade (50% nicht elementiert, 50% Fensteranteil)</b>							
Primärenergie, nicht erneuerbar	[MJ]	45.027.880	839	-2.430.861	26.667.887 MJ	-1.006.500	68.249.245
Primärenergie, erneuerbar	[MJ]	1.889.697	7	-1.152.585	363.272	-32.223	1.068.169

**Tabelle 4-7: Einsatz von Primärenergieträgern über den gesamten Lebenszyklus der Natursteinfassaden und der Glasfassade in [MJ]**

#### 4.4.1.2 Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar) der Konstruktionsmaterialien

In der Herstellung der ausgeführten Natursteinfassade (17 % elementiert, 33 % nicht elementiert und 50 % Verglasung) spielt das Isolierglas bezogen auf die Materialien mit 33 % die größte Rolle. Das Aluminium besitzt mit 17 % ebenso eine hohe Relevanz, danach der Bewehrungsstahl (13 %), der Beton (12 %) sowie der Naturstein (10 %). Die Instandhaltung wird zum größten Teil durch das Isolierglas dominiert. Im EoL der Natursteinfassade weist das Aluminiumrecycling Vorteile aus.

Die Konstruktion betreffend wird der Primärenergiebedarf der Glasfassade (90 % Verglasung) hingegen stärker durch die Instandhaltungsmaßnahmen bestimmt. Durch die Austauschzyklen der Bauteile wird insgesamt sogar über die 50 Jahre gerechnet mehr Primärenergie für die Instandhaltung benötigt als für die Erstellung. Aluminium und Glas dominieren die Ergebnisse.

#### 4.4.2 Wirkungsabschätzung

Zusammenfassend sind in der nachfolgenden Tabelle die Beiträge einzelner Kategorien zu den betrachteten Umweltwirkungskategorien dargestellt. Dabei erfolgt eine Gliederung nach Herstellung, Nutzung, EoL, Instandsetzung, Instandsetzung EoL jeweils für die ausgeführte Natursteinfassade, die Glasfassade sowie die alternative Natursteinfassade (Tabelle 4-8). Dies veranschaulicht die Beiträge der Lebenszyklusphasen zu den Umweltwirkungskategorien.

Die betrachteten Umwelteinwirkungen der Glasfassade (GF) liegen zwischen 60 % und 175 % höher als die der ausgeführten Natursteinfassade (NSTF ausg.):

Umwelteinwirkungen	NSTF ausg. : GF
Treibhauspotenzial (CO <sub>2</sub> -Äquivalent; GWP)	1 : 1,7
Ozonabbaupotenzial (R11; ODP)	1 : 2,8
Versauerungspotenzial (SO <sub>2</sub> -Äquivalent; AP)	1 : 1,6
Eutrophierungspotenzial (PO <sub>4</sub> -Äquivalent; EP)	1 : 1,6
Sommersmogpotenzial (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquivalent; POCP)	1 : 1,7

Tabelle 4-8: Ergebnisse für die Umweltwirkungskategorien über den gesamten Lebenszyklus der Fassadenvarianten

Größe	Einheit	Herstellung	Nutzung	EoL Herstellung	Instandsetzung	EoL Instandsetzung	Lebenszyklus
<b>Ausgeführte Natursteinfassade (17% elementiert, 33% nicht elementiert, 50% Fensteranteil)</b>							
GWP	[kg CO <sub>2</sub> -Äqv.]	4.525.364	59	-61.621	1.951.331	89.575	6.504.707
ODP	[kg R11-Äqv.]	0,221	2.9E-06	-0,033	0,060	-0,003	0,245
AP	[kg SO <sub>2</sub> -Äqv.]	14.603	0,10	-1.216	7.668	16	21.070
EP	[kg PO <sub>4</sub> -Äqv.]	1.990	0,01	-240	1.090	10	2.849
POCP	[kg Ethen-Äqv.]	1.239	0,01	-131	683	6	1.796
<b>Glasfassade</b>							
GWP	[kg CO <sub>2</sub> -Äqv.]	8.591.938	107	-2.607.918	6.174.757	-1.440.568	10.718.316
ODP	[kg R11-Äqv.]	0,551	5,2E-0,6	-0,157	0,359	-0,086	0,678
AP	[kg SO <sub>2</sub> -Äqv.]	31.299	0,17	-13.121	22.686	-7.487	33.378
EP	[kg PO <sub>4</sub> -Äqv.]	3.004	0,02	-565	2.400	-313	4.527
POCP	[kg Ethen-Äqv.]	2.810	0,02	-1.212	2.137	-704	3.031
<b>Natursteinfassade (50% nicht elementiert, 50% Fensteranteil)</b>							
GWP	[kg CO <sub>2</sub> -Äqv.]	4.074.466	59	162.148 MJ	1.938.641 MJ	-0,003 MJ	6.264.844
ODP	[kg R11-Äqv.]	0,182	2.9E-06	-0.020	0,059	-0,003 MJ	0,218
AP	[kg SO <sub>2</sub> -Äqv.]	13.011	0,10	-125	7.636	15	20.537
EP	[kg PO <sub>4</sub> -Äqv.]	1.892	0,01	-196	1.087	10	2.792
POCP	[kg Ethen-Äqv.]	1.089	0,01	-31	679	6	1.743

Gegenüber der ausgeführten Fassade würden durch die nicht elementierte Natursteinfassade (Option: Natursteinfassade) über die 50 Jahre also über 230 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente, gegenüber der nicht ausgeführten Glasfassade über 4.200 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart.

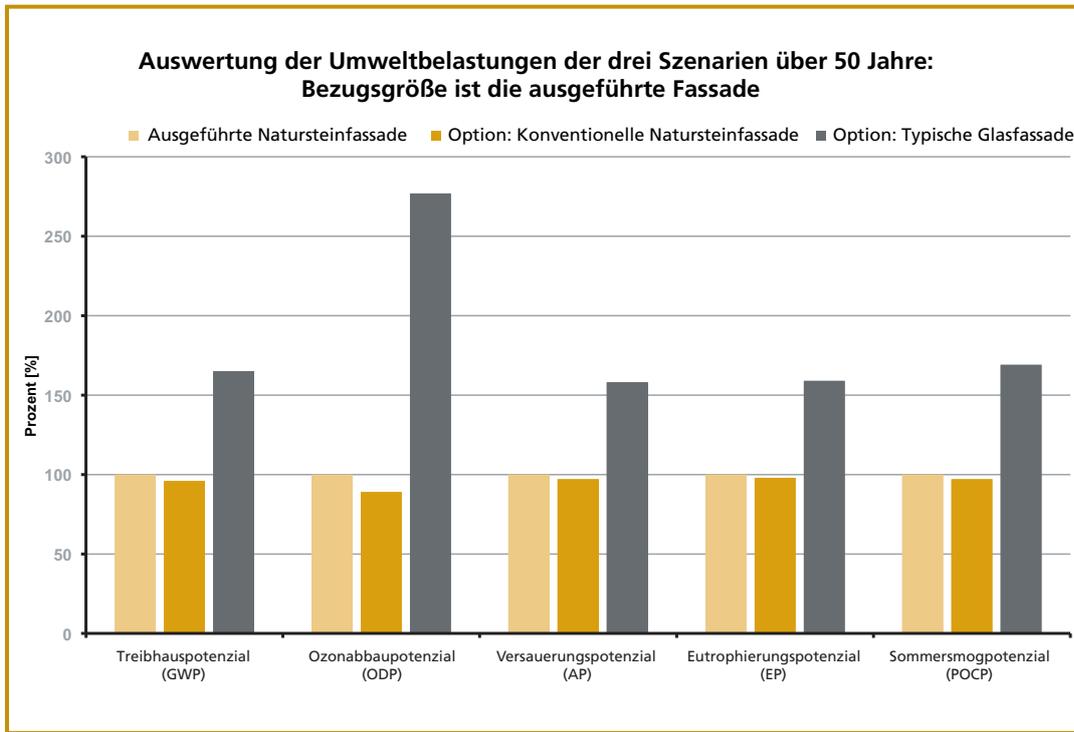
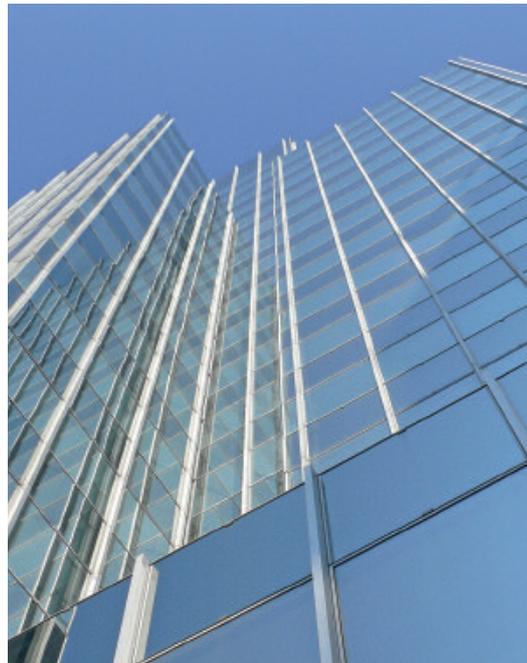


Abbildung 4-2: Auswertung der Umweltwirkungskategorien der drei Szenarien: Bezugsgröße ist die ausgeführte Fassade (100 %).



Natursteinfassaden erweisen sich als nachhaltiger als Glasfassaden.

## 5 Ökonomische Betrachtungen

### 5.1 Grundlagen

Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt von PE International in Zusammenarbeit mit der Drees & Sommer AG nach den Vorgaben der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Die Lebenszykluskosten werden als Teil der Zertifizierung von nachhaltigen Gebäuden für die Bewertung der ökonomischen Performance berechnet.

Die Berechnungsgrundlagen der Lebenszykluskostenberechnung können dem Kriterium 16 „Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus“ der DGNB Systemvariante Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude (NBV09) entnommen werden.

Die gebäudebezogenen Nutzungskosten werden als Barwert über den vorgegebenen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ermittelt. Dabei werden den Nutzungskosten Preissteigerungsfaktoren zugewiesen. Zur Ermittlung des Barwertes werden der vorgegebene Diskontierungszinssatz und der Betrachtungszeitraum verwendet.

Folgende Annahmen liegen der Berechnung nach der Barwertmethode zugrunde:

Allgemeine Preissteigerungen	2 % p.a.
Kosten Heizenergie	0,09 €/kWh
Kosten Strom	0,17 €/kWh
Reinigung Glasflächen	2,25 €/m <sup>2</sup>
Reinigung Außenwandbekleidung	3,75 €/m <sup>2</sup>
Reinigung Sonnenschutz (außen)	2,81 €/m <sup>2</sup>
Preissteigerung Energiekosten	4 % p.a.
Instandsetzungskosten	1 % p.a.
Inspektions- und Wartungskosten	0,1% p.a.
Kapitalzins	5,5 % p.a.

Die Herstellungskosten beider Varianten wurden einer Studie des Bayerischen Obersten Gerichtshofes (ORH Bericht 2007 TNr. 19) entnommen. Der Energiebedarf während der Nutzungsphase wurde der Energiesimulation durch TRNSYS von Drees & Sommer entnommen. Die darin beschriebene Natursteinfassade sowie die Glasfassade mit außen liegendem Sonnenschutz wurden als Basis für die Lebenszykluskostenbetrachtung herangezogen. Dabei wurden folgende Fassadenflächen definiert:

	Natursteinfassade	Glasfassade
Fensterfläche [m <sup>2</sup> ]	8,4	12,6
Opake Fassadenflächen [m <sup>2</sup> ] (inkl. Sturz und Stirn)	6,3	2,1

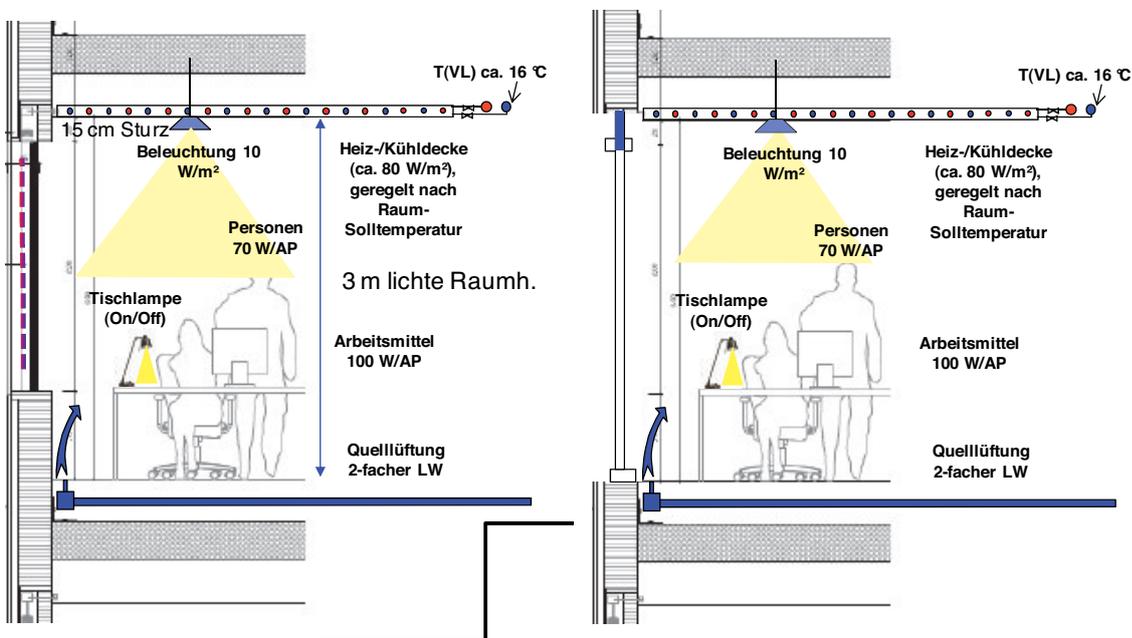
Die Kosten für Anlagentechnik, Baustelle, Trinkwasser, Abwasser, Demontage sowie Rückbau und Entsorgung werden als kostenneutral bewertet und gehen daher nicht in die Vergleichsbewertung ein.

## 5.2 Untersuchte Fassadenvarianten

Die in dieser Studie untersuchten Fassadenvarianten unterscheiden sich hinsichtlich der Glasfläche (raumhohe Verglasung und Fassade mit Brüstung aus Naturstein) und der Sonnenschutzsysteme (außen liegender und innen liegender Sonnenschutz).

Bei den Fassadenvarianten handelt es sich um nach den heutigen Regeln der Technik ausführbare Systeme mit innen liegendem und außen liegendem Sonnenschutz. Dies erfordert den Einsatz von thermisch und optisch hochwertigen Verglasungen (Sonnenschutzglas bei innen liegendem Sonnenschutz und Wärmeschutzglas bei außen liegendem Sonnenschutz).

Die Natursteinfassade hat im Gegensatz zur Glasfassade eine Brüstung mit einer Höhe von 0,85 m über dem Fußboden. Damit unterscheiden sich die Tageslichtqualitäten in Bezug auf die DIN 5034 (Tageslicht in Innenräumen) nur sehr geringfügig, da der Tageslichtquotient ebenfalls in 0,85 m Höhe gemessen wird.



Li.: Abbildung 5-1: Schnitt durch den betrachteten Büro- raum, mit Brüstung (Naturstein-Fassade)

Re.: Abbildung 5-2: Schnitt durch den betrachteten Büro- raum, Ganz-Glasfassa- de (mit opakem Glas- element anstelle des massiven Sturzes).

Bei gleicher Nutzung und gleichem Raumkomfort und einer Brüstungshöhe von 85 cm unterscheiden sich die Energien für Lüftung (hygienisch erforderlicher Grundluftwechsel) und Beleuchtung nur unwesentlich. Bei der raumweisen Betrachtung der Energiebedarfswerte für den Betrieb unterscheiden sich die Varianten mit Natursteinfassade und Glasfassade hauptsächlich beim Heizen und Kühlen.

## 5.3 Ergebnisse

Betrachtet man nur den Energiebedarf während der Nutzungsphase, so zeigt die Natursteinfassade mit einem Fensteranteil von 50 % der Fassadenfläche enorme Kosteneinsparungen gegenüber der Ganzglasfassade. Der spezifische Endenergiebedarf und damit auch die spezifischen Energiekosten pro m<sup>2</sup> Nettogeschossfläche sind bei der Natursteinfassade deutlich geringer. Mit der Natursteinfassade werden Energiekosten von 10 €/m<sup>2</sup>/a, mit der Ganzglasfassade 11,8 €/m<sup>2</sup>/a und somit ca. 18 % mehr verursacht.

Diese Kostenvorteile der Natursteinfassade werden bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus und bezogen auf das betrachtete Fassadenelement mit 14,7 m<sup>2</sup> Außenfläche noch deutlicher. Die Ganzglasfassadenkonstruktion verursacht mit ca. 37.500 € ca. 76% Mehrkosten im Vergleich zu der hinterlüfteten Lochfassade mit Natursteinbekleidung.

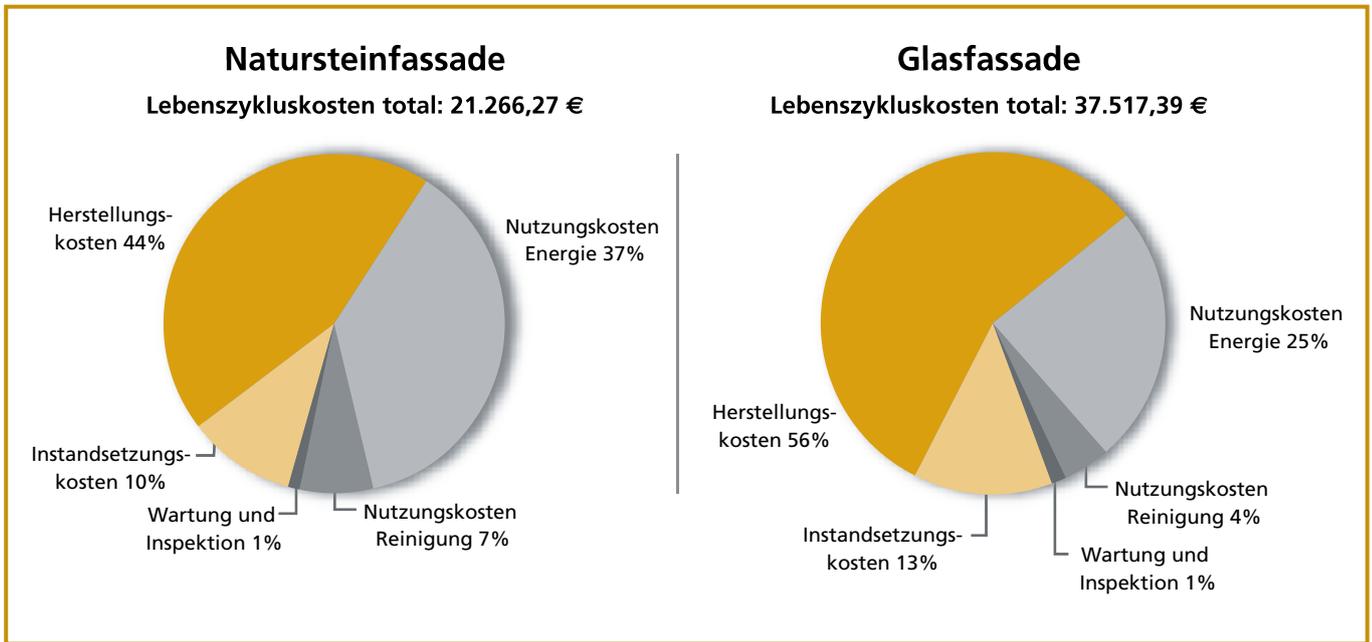


Abb. 5-3: Prozentuale Aufteilung der Lebenszykluskosten bezogen auf 14,7 m<sup>2</sup> Fassadenfläche über 50 Jahre

Die Kosten der Natursteinfassade bestehen zu 44 % aus den Herstellungskosten, zu 37 % aus dem Energiebedarf während der Nutzungsphase und zu 10 % aus Instandsetzungskosten. Reinigung, Wartung und Inspektion verursachten 8 %.

Bei der Ganzglasfassade entstehen 56 % der Kosten in der Herstellungsphase und 25 % durch die Energiekosten der Nutzungsphase. Auf die Instandsetzungskosten entfallen 13 % der Kosten und 5 % auf Reinigung, Wartung und Inspektion.

Die Kostenunterschiede liegen besonders in den günstigeren Herstellungskosten begründet, da die Natursteinfassade mit 650 €/m<sup>2</sup> Fassadenfläche in etwa halb so hohe Kosten verursacht als die Ganzglasfassade mit 1440 €/m<sup>2</sup>. Auch während der Nutzungsphase zeigen sich Vorteile der hinterlüfteten Fassade. Bei einer Büronutzung und gleichem Raumkomfort ergeben sich Energiekostenunterschiede zugunsten der Natursteinfassade von 16% sowie Reinigungskostenunterschiede von 12 %.

Tabelle 5-1: Aufteilung der Lebenszykluskosten bezogen auf 14,7 m<sup>2</sup> Fassadenfläche

	Kosten Natursteinfassade [€]	Kosten Glasfassade [€]	Differenz [€]	Differenz [%]
Barwert Nutzungskosten Energie	7.959,71	9.232,38	1.272,67	16
Barwert Nutzungskosten Reinigung	1.458,27	1.626,34	168,07	12
Barwert Wartung und Inspektion	223,43	502,71	279,29	125
Barwert Instandsetzung	2.216,87	4.987,96	2.771,09	125
Herstellkosten	9.408,00	21.168,00	11.760,00	125
<b>Lebenszykluskosten (total)</b>	<b>21.266,27</b>	<b>37.517,39</b>	<b>16.251,11</b>	<b>76</b>

Insgesamt besitzt eine hinterlüftete Lochfassade aus Natursteinfassade neben den ökologischen Vorteilen, die bei den Studien zur Ökobilanzbetrachtung erkennbar sind, auch einen ökonomischen Vorteil gegenüber einer Ganzglasfassade.

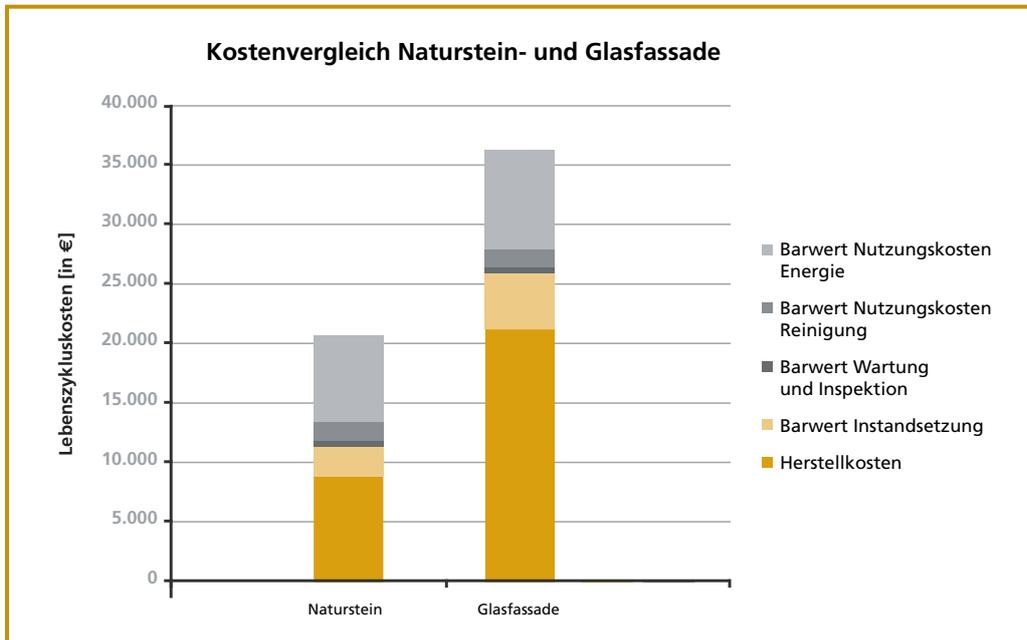


Abbildung 5-4: Lebenszykluskosten bezogen auf 14,7 m<sup>2</sup> Fassadenfläche mit außen liegendem Sonnenschutz (Energiepreissteigerung von 4 %)

### 5.4 Diskussion der Energiekosten

Bei der Berechnung der Energiekosten wurde eine Preissteigerung von 4 % pro Jahr entsprechend den Vorgaben der DGNB angenommen. Nach einer Studie des Statistischen Bundesamts (Energie in Deutschland, Pressestelle Wiesbaden 2006) ergibt sich eine Steigerungsrate von ca. 6 % pro Jahr. Berechnet man die Lebenszykluskosten mit dieser Rate, so erhöht sich der Kostenvorteil der Natursteinfassade.

In der Simulation werden die Wärmeverluste der Fassaden und die solaren Wärmegewinne der Fenster berücksichtigt. Öffnbare Fenster sorgen für eine wirksame Wärmeabfuhr in der Übergangsperiode, die aktive Kühlung ist im Wesentlichen nur im Hochsommer notwendig. Es wird eine typische Büronutzung zugrunde gelegt. Die Nutzung der Räume (Computer, Ventilatoren, Zubereitung von Speisen etc.) und die individuelle Einflussnahme der Nutzer auf das Raumklima (Heizen, Lüften, Sonnenschutz) haben einen großen Einfluss auf den Energiebedarf, sodass in manchen Fällen Gebäude mit Glasfassaden über 500 kWh/m<sup>2</sup>/a an Primärenergie verbrauchen.

Der Sonnenschutz wird in der Simulation bei direkter Einstrahlung und in Abhängigkeit der Nutzungszeiten automatisch geschlossen. Eine hochwertige Gebäudetechnik wurde in der Energiebedarfsrechnung vorausgesetzt. Die Kühlung erfolgt mit Kühldecken mit Einzelraumregelung. Dies stellt ein entscheidendes Kriterium in Bezug auf den Energieaufwand für Kühlung dar. Technikkonzepte mit Luftkühlung bedingen sehr hohe Volumenströme und führen damit zu sehr hohen Primärenergiekennzahlen für die Luftförderung. Die Unterschiede in den Energiebedarfszahlen wären bei solchen Systemen höher als bei den hier betrachteten Varianten.

## 6 Anhang

### Anhang A 1 Primärenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf kann durch unterschiedliche Arten an Energiequellen gedeckt werden. Der Primärenergiebedarf ist das Quantum an direkt aus der Hydrosphäre, Atmosphäre oder Geosphäre entnommener Energie oder Energieträger, die noch keiner anthropogenen Umwandlung unterworfen wurde. Bei fossilen Energieträgern und Uran ist dies z.B. die Menge entnommener Ressourcen ausgedrückt in Energieäquivalent (Energieinhalt der Energierohstoffe). Bei nachwachsenden Energieträgern wird z.B. die energetisch charakterisierte Menge eingesetzter Biomasse beschrieben. Bei Wasserkraft handelt es sich um die Energiemenge, die aus der Änderung der potenziellen Energie (aus der Höhendifferenz) des Wassers gewonnen wird. Als aggregierte Werte werden folgende Primärenergien ausgewiesen:

Der Summenwert **„Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar“**, angegeben in MJ, charakterisiert im Wesentlichen den Einsatz der Energieträger Erdgas, Erdöl, Braunkohle, Steinkohle und Uran. Erdgas und Erdöl werden sowohl zur Energieerzeugung als auch stofflich als Bestandteil, z.B. von Kunststoffen, eingesetzt. Kohle wird im Wesentlichen zur Energieerzeugung genutzt. Uran wird ausschließlich zur Stromgewinnung in Kernkraftwerken eingesetzt.

Der Summenwert **„Primärenergiebedarf erneuerbar“**, angegeben in MJ, wird in der Regel separat ausgewiesen und umfasst Wind- und Wasserkraft, Solarenergie und Biomasse.

Es ist in jedem Fall wichtig, dass genutzte Endenergie (z.B. 1 kWh Strom) und eingesetzte Primärenergie nicht miteinander verrechnet werden, da sonst der Wirkungsgrad zur Herstellung bzw. Bereitstellung der Endenergie nicht berücksichtigt wird.

Der Energieinhalt der hergestellten Produkte wird als stoffgebundener Energieinhalt ausgewiesen. Er wird durch den unteren Heizwert des Produkts charakterisiert. Es stellt den noch nutzbaren Energieinhalt dar.

### Anhang A 2 Treibhauseffekt (GWP)

Der Wirkungsmechanismus des Treibhauseffektes kann im kleineren Maßstab, wie der Name schon sagt, in Gewächs- oder Treibhäusern beobachtet werden. Dieser Effekt findet auch im globalen Maßstab statt. Die eintreffende kurzweilige Sonnenstrahlung trifft auf die Erdoberfläche und wird dort teilweise absorbiert (was zu einer direkten Erwärmung führt) und teilweise als Infrarotstrahlung reflektiert. Der reflektierte Anteil wird in der Troposphäre durch sogenannte Treibhausgase absorbiert und richtungsunabhängig wieder abgestrahlt, sodass er teilweise wieder zur Erde zurückgestrahlt wird. Dies führt zu einer weiteren Erwärmung.

**Das Treibhauspotenzial wird in Kohlendioxid-Äquivalent (CO<sub>2</sub>-Äq.) angegeben.** Dies bedeutet, dass alle Emissionen bezüglich ihres potenziellen Treibhauseffekts zu CO<sub>2</sub> ins Verhältnis gesetzt werden.

### Anhang A 3 Versauerungspotenzial (AP)

Die Versauerung von Böden und Gewässern entsteht überwiegend durch die Umwandlung von Luftschadstoffen in Säuren. Daraus resultiert eine Verringerung des pH-Werts von Regenwasser und Nebel von 5,6 auf 4 und darunter. Relevante Beiträge hierzu liefern Schwefeldioxid und Stickoxide mit ihren Säuren (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und HNO<sub>3</sub>). Schäden entstehen an Ökosystemen, wobei an erster Stelle das Waldsterben zu nennen ist.

**Das Versauerungspotenzial wird in Schwefeldioxid-Äquivalent (SO<sub>2</sub>-Äq.) angegeben.**

## Anhang A 4 Eutrophierungspotenzial (EP)

Unter Eutrophierung bzw. Nährstoffeintrag versteht man eine Anreicherung von Nährstoffen an einem bestimmten Standort. Man unterscheidet dabei zwischen aquatischem und terrestrischem Nährstoffeintrag. Beiträge zur Eutrophierung stammen aus Luftschadstoffen, Abwässern und der Düngung in der Landwirtschaft.

**Das Eutrophierungspotenzial geht als Phosphat-Äquivalent ( $PO_4$ -Äq.) in die Bilanz ein.**

## Anhang A 5 Photooxidantienbildung (POCP)

Im Gegensatz zur Schutzfunktion in der Stratosphäre ist bodennahes Ozon als schädliches Spurengas einzuordnen. Photochemische Ozonbildung in der Troposphäre, auch als Sommersmog bezeichnet, steht im Verdacht, zu Vegetations- und Materialschäden zu führen. Höhere Konzentrationen von Ozon sind humantoxisch.

**Das Photooxidantienpotenzial (POCP) wird in der Ökobilanz als Ethen-Äquivalent ( $C_2H_4$ -Äq.) angegeben.**

## Anhang A 6 Ozonabbaupotenzial (ODP)

Ozon entsteht in großen Höhen durch die Bestrahlung von Sauerstoff-Molekülen mit kurzwelligem UV-Licht. Dies führt zur Bildung der sogenannten Ozonschicht in der Stratosphäre (15 – 50 km Höhe). Rund 10 % des Ozons gelangen durch Vermischungsvorgänge in die Troposphäre. Trotz seiner geringen Konzentration ist die Wirkung des Ozons wichtig für das Leben auf der Erde. Ozon absorbiert die kurzwellige UV-Strahlung und gibt diese richtungsunabhängig mit größerer Wellenlänge wieder ab. Nur ein Teil der UV-Strahlung gelangt auf die Erde. Durch anthropogene Emissionen kommt es zum Abbau der Ozonschicht.

**Das Ozonabbaupotenzial wird für die jeweilige Substanz als R11-Äquivalent angegeben.**

### Impressum

Herausgeber:  
DNV  
Deutscher Naturwerkstein-Verband e.V.  
Sanderstraße 4  
97070 Würzburg  
Telefon 09 31/1 20 61  
Telefax 09 31/1 45 49  
www.natursteinverband.de

Gestaltung:  
allegria I design – Oppermann  
München  
www.allegriadesign.de

Redaktion:  
Reiner Krug, Beate Ullrich

Copyright: Printed in Germany 2010

Druck: bonitasprint, Würzburg

### Fotonachweis:

fotolia.de, Titel, S. 16, S. 37, S. 44;  
Hofmann Naturstein GmbH & Co.KG,  
Fotografie Wiederhold, Titel, S. 7,  
Tishman Speyer, S. 8, 25; Hubert Kil-  
ling GmbH, S. 14, 15; Johann Stiegler  
KG, S.15; Lenny222 – wikipedia.de,  
S. 7; Frank Radel – pixelio.de, S. 18;  
Gabi Schoenemann, pixelio.de, S. 20;  
Gizmo23 - wikipedia.de, S. 28.

Wir danken dem Bauherren Tishman  
Speyer sowie unseren Mitgliedsbetrieben  
für das Bereitstellen des Bildmaterials.

Alle Rechte, auch die des auszugswei-  
sen Nachdrucks, der fotomechanischen  
Wiedergabe und der Übersetzung  
behält sich der Herausgeber vor.

### Ein zusätzlicher Beitrag, Ressourcen zu schonen:

Die Nachhaltigkeitsstudie des DNV wurde auf Recyclingpapier (Enviro Top), das mit dem Blauen Engel ausgezeichnet ist, gedruckt. Dieses Papier wird klimaneutral und ohne Zusatz von optischen Aufhellern und Chlorbleiche aus Altpapier hergestellt. Der Blaue Engel gilt als eines der weltweit strengsten Umweltzeichen. Die bei der Herstellung für diese Studie entstandenen  $CO_2$ -Emissionen bei Druck und Produktion hat der DNV neutralisiert. Dazu wurde am 25.10.2010 mit der Transaktionskennung DE-204-069044 die entsprechende Menge an  $CO_2$ -Emission ausgeglichen..





Herausgegeben vom  
Deutschen Naturwerkstein-  
Verband e. V. (DNV)  
Sanderstraße 4  
97070 Würzburg  
Telefon 09 31 / 1 20 61  
Telefax 09 31 / 1 45 49  
[www.natursteinverband.de](http://www.natursteinverband.de)

Überreicht durch: