



---

**MASTER-/DIPLOMARBEIT**

**Lebenszykluskosten und Ökobilanzierung  
von Fassadensystemen im Industriebau**

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

**Univ.Prof.Arch.Dipl.-Ing. Christoph Achammer**

und als verantwortlich mitwirkende Univ.Assistentin

**Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Iva Kovacic**

E234

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement

**eingereicht an der Technischen Universität Wien**

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

**Linus Waltenberger**

0526154

Gfrornergasse 6/14  
1060 Wien

## Abstract

Da die Gebäudehülle eine wesentliche Rolle für die Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes spielt, werden im Zuge dieser Arbeit gängige Fassaden-Varianten bezüglich ihrer Lebenszykluskosten (LCC) und Umweltwirkungen (LCA) untersucht. Eine Analyse derzeit anerkannter LCC und LCA - Methodiken beschreibt deren Kompetenz im Umgang mit einer einzelnen Bauteilgruppe. Darauf aufbauend wurde ein Evaluierungs-Tool namens EEFA entwickelt, das Nutzern die Möglichkeit gibt drei konfigurierbare Fassaden auf deren Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen vergleichend zu analysieren. Mit EEFA, *Ecological Economic Facade Analysis*, werden für das Forschungsprojekt *INFO* exemplarisch die ökonomischen und ökologischen Lebenszyklus-Analysen durchgeführt und ausgewertet. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Aspekt für Fassaden im Industriebau detaillierter beleuchtet, und das dafür entwickelte EEFA Tool näher beschrieben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Kurzfassung . . . . .	3
1.2	Problemstellung . . . . .	6
1.3	Stand der Technik . . . . .	7
1.4	Methodik . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Lebenszykluskosten</b>	<b>12</b>
2.1	Discounted Cash Flow und der Kapitalwert . . . . .	12
2.2	Die Problematik mit dem korrekten Diskontzinssatz . . . . .	17
2.3	Normen und Richtlinien . . . . .	19
2.4	Daten für LCC . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Lebenszyklusanalyse</b>	<b>27</b>
3.1	Ziele und Untersuchungsrahmen . . . . .	28
3.2	Umweltindikatoren . . . . .	31
3.3	Daten für LCA . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Fassadensysteme</b>	<b>36</b>
4.1	Metall-Wandkassetten Fassade . . . . .	38
4.2	PU-Sandwichpaneel Fassade . . . . .	40
4.3	KLH-Holzfassade . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Gebäudesimulation</b>	<b>46</b>
5.1	Daten und Kennwerte für die Simulation . . . . .	48
5.2	Vorgaben für das Simulationsmodell . . . . .	51
<b>6</b>	<b>EEFA - Evaluierungstool</b>	<b>54</b>
6.1	Steuerung und Menüleiste . . . . .	57
6.2	Resultate und Auswertungen . . . . .	59
6.3	Detaillierte Einzelauswertung . . . . .	61

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	2
<b>7 Evaluierung und Ergebnisse</b>	<b>63</b>
7.1 Simulationsergebnisse . . . . .	63
7.2 Variantenvergleich . . . . .	67
<b>8 Conclusio und Ausblick</b>	<b>78</b>
<b>Index</b>	<b>84</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Kurzfassung

Laut König, Kohler, Kreißig & Lützkendorf (2009) macht die Kostengruppe *Außenwände/Fassade* im deutschen Bundesdurchschnitt 2009 rund 24% der Bauwerkskosten von Büro und Verwaltungsgebäude aus. Nun wird im Industriebau dieser Anteil wesentlich geringer ausfallen, da das Verhältnis ‘Volumen zu Hüllfläche’ ganz anders ausfällt, und die technische Gebäudeausstattung ein prozentual größerer Kostentreiber ist. Jedoch ist die Relevanz der Fassade für Herstellungs- und Errichtungskosten, allein wegen der Masse, auch im Industriebau ein entscheidender Faktor. Abgesehen davon ist die thermische Gebäudehülle ein wesentlicher Parameter für den Energiebedarf eines Gebäudes, und daher zu einem großen Teil für die Objekt-Folgekosten mitverantwortlich. In die Folgekosten fallen auch Reinigungsaufwendungen, die vor allem durch große Fensterflächen ausschlagen, sowie Wartung und Instandsetzung von beweglichen Bauteilen. Die Erneuerung von Bauteilen, welche das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben macht eine weitere, große Folgekostengruppe aus. Um diesen Zusammenhang von Herstellungskosten und Objektfolgekosten entlang der gesamten Lebensdauer von Objekten fassen zu können, wendet man die Methodik der Lebenszykluskosten-Berechnung<sup>1</sup> an. Um im holistischen<sup>2</sup> Sinne einer Ökobilanzierung, neben der lebenszyklusbezogenen Wirtschaftlichkeit von Bauaufwendungen (LCC), auch die lebenszyklusrelevanten Umweltwirkungen von Baukomponenten und -konstruktionen berücksichtigen zu können, ist es notwendig die Methode des Life-Cycle-Assessments<sup>3</sup> (LCA) anzuwenden.

Unter Anwendung dieser beiden Methoden war die Frage: Wie performen un-

---

<sup>1</sup>siehe Kapitel 2 Lebenszykluskosten

<sup>2</sup>Dem *holistischen* Ansatz folgend müssen auch Problemverlagerungen an andere Orte oder Umweltmedien (Stichwort *CO<sub>2</sub>-footprint*) berücksichtigt werden (König et al. 2009).

<sup>3</sup>siehe Kapitel 3 Lebenszyklusanalyse

terschiedliche Fassaden, die im Industriebau Anwendung finden? Und welche Unterschiede sind hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Qualität zu erkennen?

Für das Forschungsprojekt *INFO*, das als Case Study für die LCC und LCA Untersuchung von Fassaden herangezogen wurde, wurden drei gängige Fassadensysteme gewählt und in den architektonischen Vorentwurf eines Betriebsgebäudes integriert<sup>4</sup>. Die untersuchten Fassadenvarianten sind:

- Ⓐ Stahlkassetten Wandkonstruktion mit Holz oder Blechverkleidung
- Ⓑ PUR-Sandwich Paneele
- Ⓒ Kreuzlagenholz (KLH) mit Blechverkleidung

Da gezielt nur die Fassadenkonstruktion des Gebäudes auf LCC und LCA untersucht wurden, war es im Vorfeld wichtig die Auswirkungen der thermischen Hüllvarianten auf den Energiebedarf dahinter liegende Nutzflächen zu berücksichtigen.

Eine durchgeführte, thermische Gebäudesimulation<sup>5</sup> hat ergeben, dass die im untersuchten Referenzgebäude (Projekt *INFO*) vorhandenen, internen Wärmegewinne<sup>6</sup> dermaßen hoch sind, dass die Wärmeschutzstandards der verschiedenen Fassaden-Aufbauten an Einfluss verlieren. Energieoptimierungen bezüglich Heizung und Kühlung werden mehrheitlich durch die gesteuerte Be- und Entlüftung, sowie ein gesteuertes Sonnenschutzsystem bestimmt. Die drei Fassaden nehmen selbst bei einer U-Wert-Differenz von 100%<sup>7</sup> eine vernachlässigbar geringe Rolle im Einflussbereich auf den Energiebedarf des Gebäudes ein: die Heiz- und Kühllasten unterscheiden sich, egal welche der untersuchten Fassaden gewählt wurde, um nur 3%. Natürlich nur, sofern ein entsprechendes BAS<sup>8</sup> integriert ist.

In weiterer Folge wurde ein Excel-Tool (EEFA)<sup>9</sup> entwickelt, welches eine parametrische LCA und LCC-Auswertung von konfigurierbaren Fassadenkonstruktionen ermöglicht. Dabei hat der Nutzer die Möglichkeit alle Rahmenbedingungen (Zinsrate, Preissteigerungen, Betrachtungszeitraum, etc...) und projektspezifischen Massen (Fassadenfläche, Fensteranzahl, etc...) frei zu wählen. Zusätzlich kann der Nutzer aus einer Vielzahl an Fassaden-Aufbauten und Beschattungssystemen ein Set an zu vergleichenden Konstruktionen zusammenzu-

---

<sup>4</sup>siehe Kapitel 4 Fassadensysteme

<sup>5</sup>siehe Kapitel 5 Gebäudesimulation.

<sup>6</sup>Abwärme von Produktions- und Betriebsprozessen.

<sup>7</sup>PU Paneel 200mm: 0, 14W/m<sup>2</sup>K; Wandkassette 160mm WD: 0, 32W/m<sup>2</sup>K

siehe Kapitel 7.1 *Simulationsergebnisse*.

<sup>8</sup>Building Automation System

<sup>9</sup>ecological economic facade analysis



Abbildung 1.1: LCC-LCA Tool *EEFA*

stellen. Für das gewählte Szenario werden, simultan zur Eingabe, die LCC und LCA Analysen des gewählten Szenarios ausgewertet und visuell aufbereitet.

In Abbildung 1.1 ist die erste Seite von *EEFA* abgebildet - linker Hand die Eingabe-Menuleiste, rechter Hand die vergleichende LCC/LCA-Evaluierung.

	Investkosten	$\Delta$	$LCC_{36}$	$\Delta$
Variante <b>A</b>	921.300 €	+24,6%	1.435.300 €	+3%
Variante <b>B</b>	694.400 €		1.389.200 €	
Variante <b>C</b>	948.900 €	+26,8%	1.388.700 €	

Tabelle 1.1: Investitionskosten im Jahr 2012, Lebenszykluskosten nach 36 Jahren

Um das *EEFA* Tool in der Anwendung zu testen wurden drei Fassaden gewählt, und ein für das Projekt *INFO* relevantes Szenario mit entsprechenden Rahmenbedingungen und Massenangaben in das Tool eingegeben. Tabelle 1.1 zeigt eine Zusammenfassung der Resultate der Lebenszykluskosten-Prognose. Tabelle 1.2 zeigt ein Teilergebnis der Ökobilanz der 3 Varianten<sup>10</sup> gegenübergestellt.

Das in weiterer Folge detailliert beschriebene Beispiel zeigt sehr deutlich, dass die Kombination von ökonomischen und ökologischen Lebenszyklus-Analysemethoden ein wirkungsvolles Werkzeug ist, um Bauaufwendungen ganzheitlicher beurteilen zu können. Wie das Beispiel zeigt, können Herstellungskosten von Fassaden rund 30% divergieren und gleichzeitig die entsprechenden Lebenszykluskosten

<sup>10</sup>Die Details bezüglich Wahl der Aufbauten, additiven Bauteile, etc. sind in Kapitel 6.2 *Resultate und Auswertungen* detailliert beschrieben.

	$GW P_{H+I+E}$	$\Delta$
Variante A	$60,5 \text{ kg/m}^2$	
Variante B	$57,1 \text{ kg/m}^2$	$-5,6\%$
Variante C	$26,6 \text{ kg/m}^2$	$-56,1\%$

Tabelle 1.2: Treibhauspotential der drei Fassaden nach 36 Betriebsjahren

ein gänzlich unterschiedliches Resultat liefern (siehe Tabelle 1.1. Dies sollte in Verbindung mit einer Ökobilanzierung, beispielsweise dem  $CO_2$ -footprint (Tabelle 1.2), zu einer grundsätzlich differenzierten Bewertung von Baukonstruktionen und Planungsentscheidungen führen. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Aspekt für Fassaden im Industriebau detaillierter beleuchtet, und das dafür entwickelte EEFA Tool näher beschrieben.

## 1.2 Problemstellung

Dass bei Bauvorhaben die Investitionskosten nur einen Teil der Gesamtkosten, gemessen auf die Lebensdauer eines Gebäudes, ausmachen, ist von Bauträger bis Handwerker jedem geläufig. Jedoch verstehen es nur die Wenigsten mit dieser Problematik umzugehen und vorausschauend zu investieren, planen und handeln.

Dies hat mehrere Gründe. Zum einen ist es nicht leicht mit Unsicherheiten betreffend zukünftiger Ereignisse (Entwicklung von Energiekosten, Folgekosten oder Lebensdauern) zu kalkulieren. Andererseits haben es derzeit am Markt erhältliche Tools für die Berechnung von Lebenszykluskosten nicht geschafft, in den Büros von Fachplanern und Assetmanagern großflächig Gebrauch zu finden. Mit dieser Arbeit möchte ich die Thematik Lebenszykluskosten und Ökobilanzierung aufgreifen und deren Anwendungspotentiale anhand eines Industriebaus prüfen:

Wie gut eignet sich die LCC<sup>11</sup>Methodik für einzelne Baukomponenten? Wie könnte eine Verbindung von LCC und LCA<sup>12</sup> bei einer Evaluierung von einer Bauteilgruppe aussehen und was für Aussagen kann man auf Grund des entwickelten Modells treffen?

Im besonderen möchte ich hierfür konkret Fassadensysteme für den Industriebau unter die Lupe nehmen und für diese Anwendung ein eigenes, leicht modifizierbares Tool entwickeln. Mit diesem Tool sollen sowohl die Lebenszykluskosten, als auch die Umweltwirkung von unterschiedlichen Fassadenkonstruktionen ermittelt, und vergleichbar aufbereitet werden können. Als Fallstudie dient

<sup>11</sup>Life Cycle Costing, Beschreibung siehe Kapitel 2

<sup>12</sup>Life Cycle Assessment, siehe Kapitel 3

das Forschungsprojekt INFO<sup>13</sup>, für welches Fassadenvarianten für ein Betriebsgebäude konzipiert, und anschließend bezüglich deren Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen analysiert werden.

### 1.3 Stand der Technik

Die Idee ein Produkt, und in weiterer Folge ein Gebäude, als die Summe einer Vielzahl von Kosten zu betrachten ist alles andere als neu. Während sich bis Mitte des 20. Jahrhunderts das Konzept der Lebenszykluskosten hauptsächlich auf militärisch-technische Themenbereiche beschränkte, fand es vor allem in den neunziger Jahren Anklang in interdisziplinären Branchen, die auf Systemwirtschaftlichkeit und -effizienz Wert legten (Franzeck 1997). Für die Bauindustrie relevant, zeigte sich die oft zitierte Arbeit von Taylor, *The Use of Life Cycle Costing in Acquiring Physical Assets. Long Range Planning* aus dem Jahr 1981, welcher die Methodik der LCC auf Gebäudeplanung übertrug. Dadurch, dass LCC seinen Ursprung praxisnahe in der Wirtschaft hat, gibt es keinen einheitlichen, genormten Ansatz. Je nach Bedürfnis und Überlegungen wurden unterschiedlichen Herangehensweisen für die Berechnung entwickelt. Prinzipiell lassen sich die Rechnungsverfahren in zweimal zwei Bereiche gliedern (Heitel, Koriath, Herzog & Specht 2008):

- Statisch oder Dynamisch
- Deterministisches oder probabilistisches Verfahren

Bei einem statischen Rechnungsverfahren wird die Summe aus mehreren Kostengruppen (Investition, Instandsetzung, Abbruch, etc.) gebildet. Es stellt eine vereinfachte Rechenmethode dar, welche vor allem bei Anwendungen für den Massenmarkt verwendet wird. Simple Tools für eine schnelle Vergleichbarkeit von Gebäuden bedienen sich dieses Verfahrens. Einige der auf Punkten basierenden Zertifizierungssysteme wie DGNB, ÖGNI, TQB, LEED, BREEAM, u.a. setzen auf solche Minimalrechenmethoden.

Im dynamischen Verfahren wird, aus dem Finanzbereich bekannt, die Kapitalwertmethode angewandt, bei der die Variable Zeit mit Hilfe eines Diskontsatzes (Discount rate) in die Berechnung eingebracht wird. Dies führt zu einem auf das aktuelle Jahr gerechneten Barwert (Net Present Value) des Gegenstandes. Wie Ellingham und Fawcett in *New Generation Whole-Life Costing* (Ellingham & Fawcett 2006) beschreiben, ist das Ergebnis dieses Verfahrens äußerst sensibel bezüglich eines korrekten Diskontsatzes. In der Praxis hat dieser Umstand

<sup>13</sup>Interdisziplinäre Forschung zur Energieoptimierung in Fertigungsbetrieben

dazu geführt dass verschiedene Modelle<sup>14</sup> für die Berechnung des Diskontsatzes entwickelt wurden(Herzog 2005):

- WACC – Weighted Average Cost of Capital  
Der vom Kapitalmarkt stammende Ansatz
- CAPM – Capital Asset Pricing Model  
Den statistische Risikoprämien des Marktes betrachtenden Ansatz
- Kalkulationszinssatz auf Basis der Nettoanfangsrendite (NAR)  
Der Immobilienmarkt-orientierte Ansatz

Auf Grund der relativ langen Lebenszeit von Immobilien und Baukomponenten sind Annahmen und Berechnungen von zukünftigen Parametern (wie Zinssatz, Rendite, Energiekosten, etc. . . ) stark fehleranfällig. Darum gibt es die Bestrebung der Problematik mit stochastischen Mitteln Herr zu werden. Dies führt zu probabilistischen Verfahren. Ein Beispiel hierzu ist das LC-NPV Modell. Das am Institut für Bauplanung und Baubetrieb (IBB) der ETH Zürich entwickelte LC-NPV Modell basiert auf dem ökonomischen Minimalprinzip und ist ein risikobasiertes, probabilistisches Modell (Girmscheid 2006). Diesem ähnliche Modelle versuchen durch die Miteinbeziehung von Wahrscheinlichkeiten Szenarien zu erstellen, welche trotz teilweiser Ungewissheit eine gute Entscheidungsgrundlage sein können.

[. . .] the new approach takes account of future uncertainty surrounding activities, prices, the durability of components, etc. ‘New generation’ whole-life costing argues that an important method of managing uncertainty is acquiring lifecycle options that allow a building owner to respond in different ways, depending on the outcome of uncertain future events. The value of a lifecycle option goes up when there is more uncertainty.

*David Fisk, Imperial College, London*

Mit der Relevanz von zukünftigen Werten/Ereignissen befasst sich auch D.Hubbard, welcher in seinem Werk *How to Measure Anything: Finding the Value of ‘Intangibles’ in Business* argumentiert, dass Alles quantifizierbar ist. Die Frage wie viel eine Option zum Zeitpunkt ‘t’ kosten wird ist laut Hubbard nicht unmöglich zu messen, sondern nur eine Frage des Aufwandes. Folglich präsentiert er Methoden, welche den Wert von Information an sich ermitteln können. Im Bereich LCC wird die Informationswertmethode noch nicht angewandt. Jedoch könnte dies neben dem Wert einer Option ein zusätzlicher Punkt

<sup>14</sup>Auf die erwähnten betriebswirtschaftlichen Methoden wird im Zuge dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Für interessierte Leser empfehle ich das umfangreiche Lehrbuch *Corporate Finance* von Berk & DeMarzo (2007).

in der Erstellung eines umfangreicheren Modells sein. Rechenprogramme sind für Lebenszykluskostenberechnungen eine logische Konsequenz. Hierbei kann leicht auf große Datenbanken zugegriffen werden – Input Daten entscheiden maßgeblich über die Qualität der Ergebnisse. Andererseits kann eine Software leicht komplexe Rechnungsvorgänge, mit einer Vielzahl an Daten, managen. Bei Softwarelösungen kann man zwei Strömungen differenzieren:

- LCC Implementierung in nD modelling Tools via IFC
- Stand-alone Software

Speziell an Britischen Universitäten wurde viel im Bereich des nD modelling entwickelt. *‘nD modelling aims to integrate a number of design dimensions into a holistic model, which would enable users to portray and visually project the building design over its complete lifecycle’* (Fua, Tah & Aouad 2007). Ein möglicher Grund warum sich die Implementierung von LCC in vorhandene Plattformen wie AutoDesk, Graphisoft ArchiCad u.a. nicht etabliert hat, könnte die Diskrepanz zwischen Anwender und Verantwortungsträger sein. CAD Software wird hauptsächlich von Fachplanern und Ingenieurbüros verwendet. Wenn mittels eines Building Information Models (BIM<sup>15</sup>) schon die gesammelte Dateninformation (Material, Massenermittlung, etc.) zur Verfügung steht, wäre es sinnvoll eine LCC-Analyse direkt im Planungsstadium zu vollziehen. Dies ist bisher noch mit keiner bekannten, kommerziellen CAD Software möglich. Die LCC Bewertung findet mehr Anklang bei Großinvestoren und im Bereich Facility Management (FM), sowie im projektbezogenem Consulting. Hierzu haben sich eigene Software-Lösungen am Markt etabliert:

- LEGEP  
Arbeitet mit der Baudatenbank von sirAdos und Rechenkern von Fraunhofer Institut IBP
- Baulocc  
Ehem. Bauloop, entwickelt vom Institut für Massivbau, TU Darmstadt
- LZK Tool<sup>16</sup>  
Top Down Ansatz von M.O.O.CON und e7

Abgesehen von LEGEP sind die meisten Tools eigens entwickelte Programme von Consulting-Unternehmen oder akademischen Instituten. Diese sind nur für die firmen- oder institutsinterne Anwendung gedacht und werden nicht am freien Markt vertrieben. Im Falle von baulocc wendet das Institut für Massivbau (TU

<sup>15</sup>Building Information Modeling

<sup>16</sup>Für nähere Informationen siehe (Herzog & Friedl 2010)

Darmstadt) das Tool rein für Forschungsprojekte an. Ähnlich bei M.O.O.CON oder Life Cycle Engineering Experts GmbH<sup>17</sup>, welche ihre Tools projektbezogen für Aufträge von Kunden verwenden.

## 1.4 Methodik

Nach Untersuchung der gängigen Konzepte zur Berechnung von Lebenszykluskosten sowie Ökobilanzen, wurden die für diese Case Study relevanten Rahmenbedingungen festgesetzt und mit der Konzeption von drei Fassadensystemen begonnen. Die Ausarbeitung der Fassaden, beschrieben in Kapitel 4, geschah in Zusammenarbeit mit dem Projektteam des Forschungsprojekts INFO. Die erarbeiteten Fassadenkonstruktionen wurden anschließend in das thermische Gebäudesimulationsmodell des BPI Instituts<sup>18</sup> eingebracht, um die einzelnen Fassaden bezüglich deren Auswirkungen auf den Energiebedarf des Produktionsgebäudes zu untersuchen. Ergebnisorientiert wurden in Folge die am besten performenden Varianten als Grundlage für die Wahl der zu untersuchenden Planungselemente (zum Beispiel: Beschattungssysteme, Fensteröffnungsflügel) gewählt. Diese Auswahl an Planungselementen, mit all ihren ökonomischen und ökologischen Kennwerten, sollte die Grundlage der anschließenden LCC und LCA Analyse sein.

Um die erwähnte Analyse auf einer gewünschten Detaillierung durchzuführen, und die Stärken und Schwächen der etablierten Methodiken genauer unter die Lupe zu nehmen, habe ich mich entschlossen, nicht die in Kapitel 1.3 erwähnten Software-Tools zu verwenden, sondern eine eigene, auf den Bedarf zugeschnittene Lösung zu entwickeln. Da dieses Tool einerseits sehr simpel in der Anwendung, und andererseits leicht für den Nutzer modifizierbar sein soll, wurde ein auf Microsoft Excel basierendes Evaluierungstool für Fassaden erstellt. Die Anforderungen an dieses Tool waren:

- Bedienungsfreundlichkeit
- Großer Umfang an Analyseszenarien
- Schnell durchzuführender Variantenvergleich
- Relevanz und Akkuratess der Ergebnisse
- Einfaches Aktualisieren/Ergänzen von Daten (Import/Export)
- Vergleichbarkeit ökonomischer und ökologischer Faktoren

---

<sup>17</sup> [www.lcee.de](http://www.lcee.de)

<sup>18</sup> Institut für Bauphysik und Bauökologie, TU WIEN

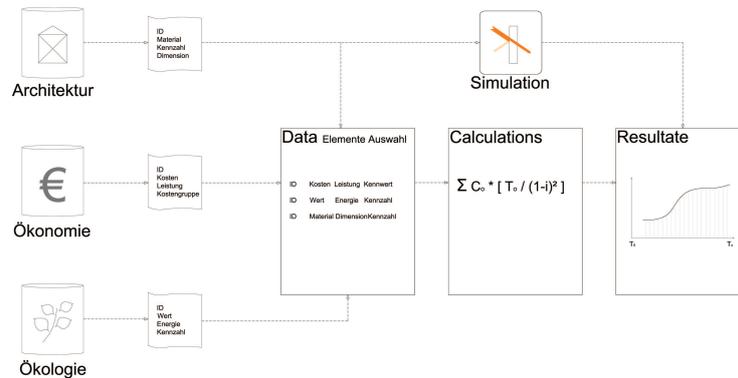


Abbildung 1.2: Excel-Tool Schemata

In Abbildung 1.2 ist der Aufbau des Exceltools zu sehen. Die Grafik zeigt welche Daten für die Berechnung und welche für die Simulation notwendig sind. In dem Tool werden die entsprechenden Planungselemente mit den architektonischen (konstruktiven), ökonomischen, und ökologischen Daten verknüpft und für eine parametrische Berechnung<sup>19</sup> aufbereitet. Die Ergebnisse sollten in aller erster Linie den Vergleich von Varianten hinsichtlich LLC und LCA ermöglichen und zeigen dahingehend die relativen Unterschiede innerhalb der betrachteten Systeme auf.

<sup>19</sup>Unter *parametrischer* Berechnung wird hier die Art einer Kalkulationsmethodik verstanden, die dem Nutzer ein großes Maß an Bedienungsflexibilität lässt, da zu jedem Zeitpunkt die ursprünglichen Parameter verändert werden können und sich die Berechnung entsprechend der aktualisierten Vorgaben verändert. So können leicht die Auswirkungen unterschiedlicher Parameter auf das Ergebnis untersucht werden.

## Kapitel 2

# Lebenszykluskosten

### 2.1 Discounted Cash Flow und der Kapitalwert

Üblicherweise sind Investitionen stark an die Komponente Zeit gekoppelt. Ein Euro ist heute mehr wert als ein Euro in einem Jahr. Bankkunden merken das, wenn sie Geld auf ihr Konto oder Sparbuch einzahlen. Entsprechend dem angesetzten Zinssatz erhält der Kunde nach einem Jahr einen Euro + Zinsen. Ähnlich, wie wir mittels Wechselkurses Geld von einer Währung in eine Andere wandeln können, erlaubt uns der Zinssatz Geld von einem Zeitpunkt zu einem anderen zu konvertieren. Das gibt uns die Möglichkeit von einem Marktpreis des Geldes in der Zukunft zu sprechen (Berk & DeMarzo 2007). Dies heißt in logischer Folge, dass ein Gewinn, den ich erst in der Zukunft erhalte, einen geringeren Wert hat als der selbe Gewinn, welchen ich in der Gegenwart halte. Da zukünftiges Geld heute weniger wert ist, reflektiert dessen Preis einen Diskontsatz. Mit dieser Diskontrate berechnet man den aktuellen Geldwert, den sogenannte *Barwert*<sup>1</sup>.

Um den Barwert ( $v_0$ ) zu berechnen, nimmt man den zukünftigen Gewinn ( $v_i$ ), welcher zum Zeitpunkt  $i$  mit dem Diskontsatz  $r$  reduziert wird.

$$v_0 = \frac{v_1}{(1+r)^i} \quad (2.1)$$

Analog dazu werden nicht nur zu erwartende, zukünftige Gewinne, sondern auch Kosten und Verluste mittels der Kapitalwertmethode auf deren Barwert berechnet. Damit kann man Kosten-Nutzen einer Investition auf einen Zeitpunkt umrechnen, und so leicht vergleichbar machen. Als Zeitpunkt wird meist die

---

<sup>1</sup>Mit Barwert wird auch oft auf den NPV (engl.: Net present value) Bezug genommen. Der Kapitalwert ist die Summe aller Barwerte: zukünftige Gewinne und Verluste. Dafür verwenden wir im Deutschen das Wort *Kapitalwert*.

Gegenwart präferiert - der heutigen Barwert von zukünftigen Erträgen oder Ausgaben.

Um eine Investition zu bewerten, stellt man die Investitionskosten den zukünftigen Erträgen gegenüber. Zukünftige Kosten schmälern den Ertrag. Je weiter ein Ertrag oder Kostenpunkt in der Zukunft liegt, desto niedriger ist, dem Diskontsatz entsprechend, sein Barwert. Um also die Overall-Performance der Investition zu bewerten wird der gesamte Cashflow ( $v_0, v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ ) mit der entsprechenden Diskontrate ( $r$ ) diskontiert, und anschließend summiert. Dies nennt man Kapitalwert oder NPV, englisch für *net present value*. (Ellingham & Fawcett 2006)

$$NPV = \text{Barwert}(\text{Gewinne}) - \text{Barwert}(\text{Kosten})$$

Da wir mit einem positiven cash flow Gewinne, und mit einem negativen cash flow Kosten definieren, und den Kapitalwert als die Summe von Barwerten einzelner cash flows berechnen, können wir oben genannte Gleichung auch wie Berk & DeMarzo (2007) formulieren:

$$NPV = \sum \text{Barwerte}_{\text{gesamter cash flow des Projekts}}$$

Entsprechend der Finanztheorie sollten bei alternativen Projekten die Investition mit dem höheren NPV getätigt werden. Beispiel mit Investition ( $v_0$ ) zu Zeitpunkt  $t=0$  und cash flow in den Folgejahren mit Diskontsatz ( $r$ ):

$$NPV = v_0 + \frac{v_1}{(1+r)} + \frac{v_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{v_n}{(1+r)^n} \quad (2.2)$$

Wenn wir die Kapitalwertmethode nun verwenden um die Lebenszykluskosten bei einem Bauprojekt zu beschreiben, das sich aus Investitionskosten ( $I$ ), Betriebskosten ( $U$ ) und Abbruchkosten ( $A$ ) mit dem Zinssatz ( $i$ ) zusammensetzt, erhalten wir folgender Formel (Heitel et al. 2008):

$$LCC = I + \sum_{t=0}^n \frac{U_t}{(1+i)^t} + \frac{A}{(1+i)^n} \quad (2.3)$$

Bei den in Gleichung 2.3 erwähnten Parameter handelt es sich um eine simplifizierte Form der Anwendung. Hierbei wird angenommen, dass der Diskontsatz über die gesamte Periode gleich bleibt und die Geldentwertung, Löhne, Materialkosten, etc. in selber Höhe betroffen sind. Die monetären Zahlungen erfolgen immer am Ende des betrachteten Zeitraumes  $t = max$ ; Finanzierungskosten werden vernachlässigt; die Investitionskosten erfolgen zu Beginn und berücksichtigen nicht die Herkunft des Kapitals (Eigen-, Fremdmittel). Die Kapitalwertmethode hat den Nachteil, dass unterschiedliche Nutzungsdauern sich drastisch

auf das Ergebnis auswirken. Da zukünftige Einnahmen und Ausgaben auf einen Investitionszeitpunkt abgezinst werden, folgen bei divergierenden Betrachtungshorizonten gänzlich unterschiedliche Kapitalwerte (Riegel 2004). Deshalb ist bei Vergleichen von Planungs- und Bauprojekten auf eine zeitlich einheitliche Kalkulationsdauer zu achten.

### **Einflussparameter auf den Discounted Cash Flow**

Wie man sieht wird bei der DCF (Discounted Cash Flow) Methode versucht ein vereinfachtes Modell für einen in der Realität sehr komplexen Vorgang, der sich über einen langen Zeitraum erstreckt, zu erstellen. DCF scheint trotz, oder vielleicht gerade wegen, seiner eleganten Vereinfachung ein hilfreiches Werkzeug bei der Evaluierung von Bauprojekten zu sein. Und gerade weil über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks sehr viele Parameter eine eingreifende Rolle spielen, muss hier erwähnt werden, dass der Schlüssel zu einem brauchbaren Ergebnis folgende zwei Faktoren sind: gute Daten für den Cash flow und Wahl eines realistischen Diskontsatzes. Folgend möchte ich auf Parameter eingehen, die nicht, nur bedingt, oder in jedem Fall in den DCF mit einbezogen gehören. Die folgende Liste beruht auf Empfehlungen von Ellingham und Fawcett (Ellingham & Fawcett 2006):

**Inkrementelle Kosten:** Es sollten nur neue Kosten berücksichtigt werden. Kosten die in jedem Fall angefallen wären, sollten exkludiert werden. Dies gilt vor allem bei Sanierungen und Modernisierungen. Als Beispiel lassen sich hierfür die Reparaturkosten eines undichten Daches bei der Wohnungsmodernisierung im Altbau nennen.

**Getätigte Investitionen:** Bei DCF sollen nur aktuelle und zukünftige Daten betrachtet werden: zukünftige Geldbeträge, welche als Ertrag oder Kostenpunkt im Cashflow aufscheinen. Bisherige Kosten sind irrelevant.

**Wertverlust:** Auch wenn der Wertverlust einer Immobilie oder eines Bauteils mit der Zeit zunimmt, und für die Buchhaltung eine wichtige Kenngröße ist, soll sie im discounted Cashflow nicht berücksichtigt werden. Nur Geldein-, und Ausgänge sind relevant.

**Steuern:** Steuern werden bei Investitionen in die NPV Berechnung einbezogen, da die Steuerabgaben Teil des Cashflows sind. Sie fallen in Deutschland, laut DIN 18960, in die Kostengruppe 200 Verwaltungskosten, sowie in die Unterkostengruppe 370 Abgaben und Beiträge. In Österreich entspricht dies der ÖNORM B 1801-2 (2011), welche auch entsprechend andere Folgekosten<sup>2</sup> regelt.

**Allgemeinkosten:** Kosten, die dem Unternehmen durch das entsprechende Projekt in Bezug auf Verwaltung und Organisation entstehen, sind zu vernachlässigen. Allgemeinkosten (overhead expenses) sollten nicht berücksichtigt werden, da sie nicht einem spezifischen Projekt zugeordnet werden, sondern mehrere verschiedene Bereiche eines Unternehmens beeinflussen, und damit investitionsunabhängige Sowiekosten sind (Berk & DeMarzo 2007).

**Finanzierungskosten:** Die Kosten für Eigen- und/oder Fremdkapital fallen in Deutschland in die Kostengruppe 100, DIN 18960. Jedoch sollte einem klar sein, dass mit dem Einbezug von unterschiedlichen Finanzierungsmethoden in die Lebenszykluskostenermittlung große Resultatsunterschiede möglich sind. Die Beeinflussung von z.B. Zinssatz/Laufzeit von Krediten auf eine DCF Berechnung von Bauwerken sind enorm. Auch wenn diese Ausgaben definitiv in eine Cashflow-Listung gehören, muss der LCC-Ermittler sich über seine Zielsetzung im klaren sein. Denn wenn es das Ziel ist, Alternativen von Baukonstruktionen, Gebäudetypen oder Funktionsvarianten auf ihre Kosten über den gesamten Lebenszyklus zu vergleichen, dann ist es legitim nicht alle mit der Realisierung verbundenen Faktoren zu berücksichtigen:

Durch die vielen Konditionen und Formen der Finanzierung, die zum einen vom Kapitalmarkt und zum anderen vom Investor (Bauherrn) selbst abhängen, kann der Einfluss der Finanzierung auf die Vorteilhaftigkeit der Alternativen sehr unterschiedlich sein. [...] Konzentriert man sich darauf, die verschiedenen Konstruktionsalternativen hinsichtlich ihrer Kostenwirtschaftlichkeit miteinander zu vergleichen, verwässert die Wahl der Finanzierung die Aussage über die Vorteilhaftigkeit der reinen Planungsalternative.

Herzog (2005, S.67)

---

<sup>2</sup>Unter anderem Verwaltungskosten, Betriebskosten, Erhaltungskosten und Versicherungen.

Als Lösung werden Finanzierungskosten üblicherweise im Diskontsatz (siehe Gleichung 2.2) berücksichtigt, wenn man als Grundlage zum Beispiel das Modell CAPM oder WACC anwendet. Die Österreichischer ÖNORM B 1801-2 (2011) hat sich bezüglich Kapitalkosten folgendermaßen entschieden vorzugehen:

Aus der lebenszyklischen Betrachtung eines Objekts und aufgrund der großen Vielfalt der Finanzierungsmöglichkeiten sowie der je nach Objekt bzw. Objektbestand unterschiedlich möglichen Beteiligten (Eigentümer, Investor, Nutzer, Betreiber) werden Kapitalkosten und die Abschreibungen der ÖNORM B 1801-2:1997 nicht mehr als Teil der Folgekosten betrachtet.

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass eine sinnvolle Betrachtung der Lebenszykluskosten immer entsprechend dem jeweiligen Projekt angepasst werden muss. Laut DGNB Richtlinien werden zum Beispiel Finanzierungskosten nicht in den *Grundlagen der Gebäudedaten* erfasst, welche sich nur auf die Kostengruppen 300 und 400 (nach DIN 276)<sup>3</sup> konzentrieren. Allerdings wird darauf verwiesen, dass die Ergänzung anderer Kostengruppen jederzeit möglich ist (DGNB 2009).

**Inflation** Bei der DCF Methode rechnet man mit Leistungen und Preisen zu unterschiedlichen Zeiten. Da zum Beispiel Reinigungsarbeiten, mit hoher Wahrscheinlichkeit, in 10 Jahren nicht gleich viel kosten werden wie Reinigungsarbeiten heute, muss man Preissteigerungen bei der Kalkulation berücksichtigen. Dabei ist wichtig anzumerken, dass Güter und Leistungen durch Inflation ihren inhärenten Wert nicht verändern. Durch Inflation steigen die Barpreise in der Regel von Jahr zu Jahr stetig. Die Höhe und der Trend dieser Preissteigerung wird im Inflationsindex eines Landes abgebildet. In Österreich betrug die Inflationsrate im Februar 2011 nach Berechnung von Statistik Austria 3,0%<sup>4</sup>.

Folglich können Preise inflationsbereinigt werden in dem sie mit Hilfe des Inflationsindex auf Realpreise umgerechnet werden. In derzeit in Anwendung befindlichen Softwarelösungen<sup>5</sup> für LCC kann der Nutzer üblicherweise unter "Finanzielle Rahmenbedingungen" die jährlichen, prozentuale Baupreissteigerungen angeben, um so den Einfluss von Inflation auf die Lebenszykluskosten zu berücksichtigen. Dies folgt der Empfehlung der DGNB (2009) jährliche Preissteigerungen, auf Basis vorgegebener Steigerungsraten, in der KG 300 sowie KG 400 zu berücksichtigen. Hier kann es auch sinnvoll sein auf unterschiedliche

<sup>3</sup>DIN 276 behandelt die Kostenermittlung im Bauwesen. Das österreichische Pendant ist die ÖNORM B 1801-1 Bauprojekt- und Objektmanagement - Objektterrichtung.

<sup>4</sup>Dieser Anstieg, von 2,4% noch im Jänner des selben Jahres, ist auf den erhöhten Preis von Treibstoff und Heizöl zurückzuführen. Vgl. Statistik Austria Pressemitteilung 9.917-063/11.

<sup>5</sup>z.B. LEGEP, LZK-Tool

Preissteigerungsraten einzelner Leistungen oder Kostengruppen Rücksicht zu nehmen. Zum Beispiel: Energiekosten, Dienstleistungskosten, Baukosten, etc. . . .

Wenn wir, der Einfachheit halber, von einer stetigen Inflationsrate ( $h$ ) in der Bauindustrie ausgehen, dann stehen der inflationsbereinigte Barpreis ( $v$ ) und der Nominalpreis im Jahr  $i$  ( $n_i$ ) in folgendem Verhältnis (Ellingham & Fawcett 2006):

$$v = \frac{n_i}{(1+h)^i} \quad (2.4)$$

Wenn wir den Einfluss von Inflation nun in die Berechnung des NPV, Gleichung 2.2, mit einbeziehen um den Kapitalwert des nominalen Cash Flows ( $n_0, n_1, n_2, \dots, n_n$ ) mit der Inflationsrate ( $h$ ) und dem Diskontsatz ( $r$ ) zu berücksichtigen, sieht dies wie folgt aus:

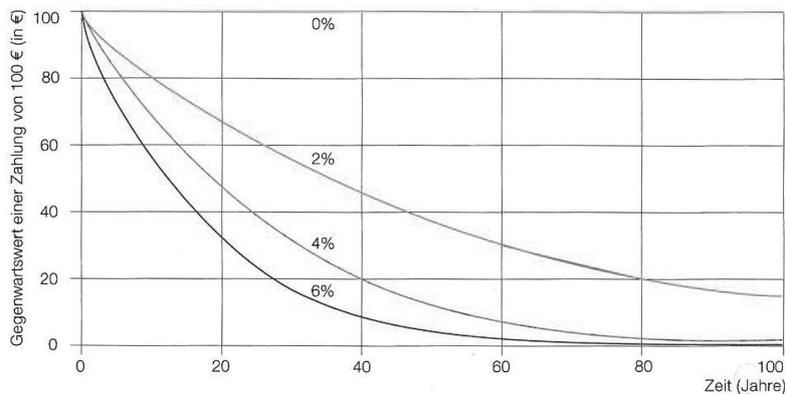
$$NPV = n_0 + \frac{n_1}{(1+r)(1+h)} + \frac{n_2}{[(1+r)(1+h)]^2} + \dots + \frac{n_i}{[(1+r)(1+h)]^i} \quad (2.5)$$

Auf Grund der Inflation wird bei großen Bauprojekten meist das Datum der Investition, in Form von Jahreszahl plus Quartal, beigefügt. Dies schafft Vergleichbarkeit von zeitlich differierenden Projekten.

## 2.2 Die Problematik mit dem korrekten Diskontzinsatz

Die Discounted Cash Flow Methode ist in ihrer Einfachheit sehr elegant und erscheint schnell brauchbare Ergebnisse und Entscheidungshilfen zu liefern. Dabei ist es simpel den Wert von Geld entlang der Zeitachse umzurechnen. Aber schon bei kürzesten Beispielen fällt schnell auf, wie hoch der Einfluss des Diskontzinsatzes auf das NPV Ergebnis ist. Ein hoher Diskontsatz misst kurzfristigen Einträgen im Cash Flow mehr Gewicht zu, als Einträge die in weiter Zukunft liegen und mit hohem Diskontsatz an Wert verlieren. Dies führt oft zu Minimalinvestitionen, um in den ersten Jahren die entsprechenden Renditen einzufahren. Ein niedriger Diskontsatz, im Gegensatz, lässt zukünftige Gewinne oder Kosten ebenfalls sehr relevant erscheinen und bewertet langfristige Investitionen dementsprechend attraktiver (Ellingham & Fawcett 2006).

Dieser Zusammenhang wird von Heitel et al. (2008) sehr aussagekräftig bei der LCC-Analyse einer Fußgängerbrücke veranschaulicht. Dabei wurden die Lebenszykluskosten für die Ausführung einer Brücke in unterschiedlichen Materialien (Aluminium, Holz, Stahl, Stahlbeton) berechnet. Bei Annahme eines Dis-



Abbildungung 2.1: Auswirkungen der Wahl des Diskontierungszinssatzes auf den Barwert, König et al.(2009)

kontsatzes von 3% scheint die Aluminium Brücke die wirtschaftlichste, und die Holzbrücke die unwirtschaftlichste Lösung zu sein. Dies sei besonders auf die hohen Unterhaltungskosten von Holz in der Nutzungsphase zurückzuführen. Wählt man jedoch einen Diskontsatz  $\geq 4\%$  wird die Holzvariante wirtschaftlicher als die Stahlbrücke, bei ca. 10% wird sie wirtschaftlicher als die Stahlbetonbrücke (Heitel et al. 2008, S.9).

In principle, the discount rate is a consequence of the inherent characteristics of the project and the investor: if you fully understand the project and the investor, then you have the necessary information to determine the right discount rate.

Ellingham & Fawcett (2006, p.22)

Der springende Punkt bei der Wahl des richtigen Diskontzinssatzes ist das Level an Ungewissheit bezüglich zukünftiger Gegebenheiten. Bisher wurde in Kapitel 2.1 immer von einem risikofreien Diskontsatz gesprochen. Wenn wir bei einem Bauprojekt die zukünftigen Mieteinnahmen, Energie- und folglich Betriebskosten sowie Wartungskosten nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit voraussagen können, gehen wir ein gewisses Risiko ein. Nehmen wir als Beispiel an, ein deutscher Bauherr möchte großflächig Photovoltaik verwenden, um Energiekosten zu sparen. Wie wirtschaftlich diese Variante ist, hängt unter anderem sehr stark von den staatlichen Subventionen, der Einspeisvergütung, ab. Da die Subventionen in Deutschland in den letzten Jahren gesunken sind, ist es fraglich wie die Entwicklung in den kommenden Jahren aussehen wird<sup>6</sup>. Dieses Risiko schmälert, in Relation zu seiner Eintrittswahrscheinlichkeit, die zukünfti-

<sup>6</sup>BCG hat hierzu eine spannende Analyse erstellt: Gerbert & Rubel (2009).

gen Erträge und hat somit Einfluss auf die auf heutigen Zeitpunkt gerechneten Barwerte der Investition.

Wir können festhalten, dass folgende Parameter Einfluss auf den Diskontsatz haben (Ellingham & Fawcett 2006):

- Zeitpräferenz<sup>7</sup>
- Inflation
- Risiko

Auf das Thema Inflation wurde auf Seite 16 eingegangen. Wenn eine Variante risikoreicher ist als eine Vergleichbare, wird dessen Diskontrate mit einem Risikoaufschlag versehen.

## 2.3 Normen und Richtlinien

### Objekterrichtung

Bei dieser Arbeit handelt es sich um eine Betrachtung von Lebenszykluskosten von Hochbauten in einer sehr frühen Projektphase, in der es zum größten Teil erst einen Vorentwurf oder Projektstudien gibt. Hierbei sollen vorweg plausible Alternativen verglichen, und auf ihre Effizienz überprüft werden. Aus diesem Grund sind die kalkulierten Kosten für projektrelevante Positionen nach ÖNORM B 1801-1 (2009), Objekterrichtung nach den neun Kostengruppen, zu gliedern.

Baugliederung	Abk.	Bauwerkskosten BWK	Baukosten BAK	Errichtungskosten ERK	Gesamtkosten GEK
0 Grund	GRD				
1 Aufschließung	AUF				
2 Bauwerk-Rohbau	BWR	100 %			
3 Bauwerk-Technik	BWT				
4 Bauwerk-Ausbau	BWA				
5 Einrichtung	EIR				
6 Außenanlagen	AAN				
7 Planungsleistungen	PLL				
8 Nebenleistungen	NBL				
9 Reserven	RES				

Abbildung 2.2: Kostengruppen lt. Önorm 1801-1

Unter KG 4 *Bauwerk Ausbau* fallen neben allen Positionen betreffend Dachverkleidung und Innenausbau auch die Fassadenhülle (*KG 4C*). Diese Kosten-

<sup>7</sup>Wie wir in Kapitel 2.1 gesehen haben, variieren Zinsen stark mit dem Zeithorizont. Aus der Finanztheorie stammt der Begriff *Zeitpräferenz*, welcher besagt dass ein Investor/Konsument einem heutigen Ertrag mehr Wert zusagt, als ein Zukünftiger. Vice versa heißt dies auch, dass ein zukünftiger Verlust einem heutigen Verlust bevorzugt wird.

gruppe beinhaltet alle für die Fassadenherstellung notwendigen Bauteile und Bauelemente:

- 4C.01 Fassadenverkleidung
- 4C.02 Fassadenöffnung
- 4C.03 Sonnenschutz (einschließlich Antriebe)
- 4C.04 Feste Einbauteile
- 4C.05 Außenhülle Erdberührt

(ÖNORM B 1801-1 2009)

Bei einer Betrachtung der Lebenszykluskosten für ein komplettes Bauvorhaben müssen natürlich alle Kostengruppen miteinbezogen werden. Dies ist meist in Verbindung mit Investitionsentscheidungen (siehe Kapitel 1.2 Problemstellung) für Developer ausschlaggebend, da hierfür zum Beispiel auch die Grunderwerbskosten (*Kostengruppe 0*) relevant sind. Für die vorliegende Arbeit, den Vergleich unterschiedlicher Fassadensysteme im Industriebau, sind auf Seiten der Investitionskosten nur die erwähnte Kostengruppe 4 - Bauwerk Ausbau, sowie die entsprechenden Folgekosten, notwendig. Da bei einer lebenszyklischen Prognose von Kosten vor allem die Folgekosten interessant sind, hat das Österreichische Normen Institut mit der ÖNORM B 1801-2 (2011) *Objektfolgekosten* reagiert und eine Beschreibung und Strukturierung von Lebenszykluskosten erstellt.

## Objekt-Folgekosten

Neben den Investitionskosten sind bei Immobilien im Besonderen die Objektfolgekosten ein enormer Kostentreiber. Im Zuge einer Beispielrechnung von GEFMA 220 (2006) beträgt der Anteil der Objektfolgekosten an den gesamten Lebenszykluskosten eines Gebäudes zwischen 40% und 83%, stark abhängig von Gebäudeart (Verwaltung/Industrie), Betrachtungszeitraum und Berechnungsart (statisch/dynamisch). Laut Schulte & Bone-Winkel (2008) werden 80%–85% der gesamten Lebenszykluskosten durch Entscheidungen im Planungsprozess definiert. Das heißt, dass frühzeitig entworfene Baustrukturen und gewählte Bauteile vor allem durch ihre vorzeitig definierten Auswirkungen auf Betrieb, Wartung und Instandsetzung die Lebenszykluskosten drastisch beeinflussen. Die Nutzungskosten eines Objektes können daher schon nach wenigen Jahren die Baukosten übersteigen (Stocker, Gollner, Schrag & Neugebauer 2009).

Da der Begriff *Lebenszykluskosten* in den letzten Jahren auch stark in Fachkreisen an Popularität gewonnen hat und Zertifizierungssysteme wie DGNB

und ÖGNI Steckbriefe diesbezüglich stellen, hat auch das Institut für Normung darauf reagiert und eine entsprechende Gliederung der Errichtungs- und Folgekosten beschrieben.

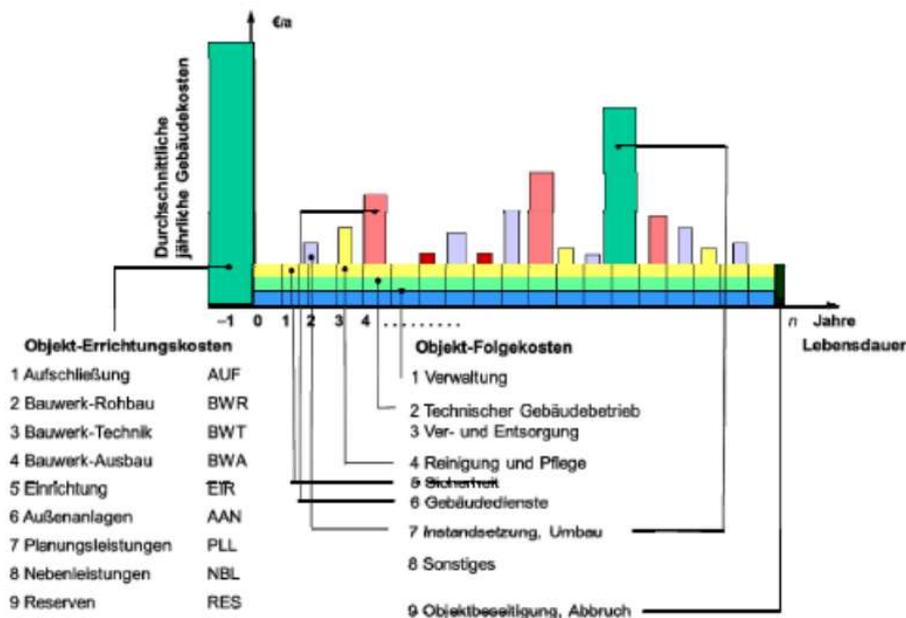


Abbildung 2.3: Errichtungs- und Folgekosten lt. Önorm 1801-2

Das Austrian Standards Institut behandelt diese Thematik in der ÖNORM B 1801-2 (2011) *Objekt-Folgekosten*. Abbildung 2.3 stellt die anfallenden Errichtungs- und Folgekosten eines Gebäudes entlang seines gesamten Objektlebenszyklus<sup>8</sup> dar. Man erkennt sehr deutlich, wie entlang der Zeitachse unterschiedliche Folgekosten mit variierenden Amplituden als Kostenfaktoren anfallen. Neben regelmäßigen Positionen, die Betrieb und Wartung abdecken, fallen jene Kostengruppen auf, die unregelmäßig mit hoher Intensität zu Buche schlagen. Diese fallen meist in die Kategorie Umbau/Modernisierung oder Instandsetzung, wenn Bauteile oder auch ganze Bauteilgruppen am Ende ihrer Lebensdauer angekommen sind und erneuert werden müssen. In Bezug auf die in Kapitel 4 betrachteten Systeme, wird dies ein entscheidender Faktor bezüglich der ökonomischen Qualität einer Fassade. Wenn ein Fassadensystem auf Grund seiner geringen Lebensdauer vor Nutzungsende des Gebäudes erneuert werden muss, wird dies in der LZK-Betrachtung deutlich ablesbar sein. Außerdem wird

<sup>8</sup>Zeitabschnitt, der alle Phasen der Lebensdauer eines Objekts umfasst und sich in die Phasen Objektplanung und -errichtung, Objektnutzung, und Abbruch und Objektbeseitigung gliedert (ÖNORM B 1801-2 2011).

auch der Anteil von transparenten Fassadenflächen zu erhöhten Reinigungskosten führen. Zusätzlich werden, auf Grund des höheren Sonnenenergieeintrages durch größere Glasflächen und den daraus resultierenden Kühllasten, die Betriebskosten steigen.

In Abbildung 2.4 wird der Zusammenhang von Gesamtkosten der Errichtung und Folgekosten laut ÖNORM B 1801-2 (2011) *Objekt-Folgekosten* aufgezeigt. Im Vergleich zur vorhergehenden ÖNORM B 1801-2 aus dem Jahre 1997 sind die Kapitalkosten, welche auch in Kapitel 2.1 beschrieben sind, nicht mehr Teil der aktuellen Ausgabe. Als Begründung meldet das Austrian Standards Institut:

aufgrund der großen Vielfalt der Finanzierungsmöglichkeiten sowie der je nach Objekt bzw. Objektstand unterschiedlich möglichen Beteiligten (Eigentümer, Investor, Nutzer, Betreiber) werden Kapitalkosten und die Abschreibung der ÖNORM B 1801-2:1997 nicht mehr als Teil der Folgekosten betrachtet.

(ÖNORM B 1801-2 2011, Vorwort S.3)

Jedoch ist festzuhalten, dass in Deutschland Kapitalkosten in der entsprechenden Norm, DIN-18960 (2008) - Nutzungskosten im Hochbau, als Kostengruppe 100 gelistet sind. Im Zuge dieser Arbeit, welche für das Projekt INFO formal als Case Study zu werten ist, möchte ich nicht auf Kapitalkosten eingehen. Dies ist für die reine Gegenüberstellung unterschiedlicher Fassadensysteme nicht relevant<sup>9</sup>. Die nachstehenden Folgekostengruppen der ÖNORM 1801-2 sind für die in Kapitel 7 durchgeführten Berechnungen heran zu ziehen:

- KG 2 Technischer Gebäudebetrieb
- KG 3 Ver- und Entsorgung
- KG 4 Reinigung und Pflege
- KG 7 Instandsetzung, Umbau
- KG 8 Objektbeseitigung, Abbruch<sup>10</sup>

ÖNORM B 1801-2 (2011)

---

<sup>9</sup>Für interessierte Leser verweise ich hierfür auf das exzellente Lehrbuch *Corporate Finance* von Berk & DeMarzo (2007), sowie zu dem Ansatz des Risk-Managements bei Bauinvestitionen von Ellingham & Fawcett (2006) in *New Generation Whole-Life Costing*

<sup>10</sup>Sofern eine Fassade auf Grund ihrer kurzen Lebensdauer im Zuge einer Erneuerung abgebrochen, entsorgt, und erneuert werden muss.

Da diese Arbeit sich jedoch nur auf den kleinen Teil des Gesamtgebäudes bezieht, sollten wir nur jene Folgekosten betrachten die bei der Betrachtung einer regulären Industriebaufassade anfallen.

- Technischer Gebäudebetrieb
- Reinigung
- Wartung
- Instandsetzung
- Erneuerung<sup>11</sup>

Der technische Gebäudebetrieb, in welchen unter anderem auch der Energieverbrauch von Motoren für die Steuerung von Beschattungselementen (Jalousie, bewegliche Lamellen), beziehungsweise elektrisch öffnbaren Fensterelementen fällt, wird hier trotz seines vernachlässigbaren Einflusses berücksichtigt.

Die Kosten für Erneuerung sind in *ÖNORM 1801-2* in *KG 7 Instandsetzung* angeführt. Gemeint sind große Instandsetzungs-, Umbau- und Erneuerungsarbeiten. Diese Nomenklatur empfinde ich als verwirrend, da in *KG 2 Technischer Gebäudebetrieb* die *Unterkostengruppe 2.4 - Kleine Instandsetzung, Reparaturen* gelistet ist. Aus diesem Grund trenne ich in dieser Arbeit *KG - Instandsetzung*, welche in der *ÖNORM* der *UKG 2.4 - Kleine Instandsetzungsarbeiten, Reparaturen* entspricht; und *KG - Erneuerung*, welche in der *ÖNORM* der *UKG 7.1 - Große Instandsetzung* entspricht.

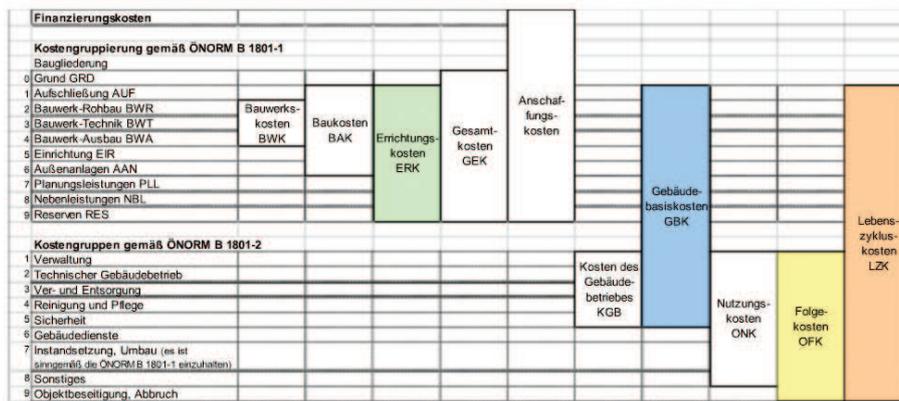


Abbildung 2.4: Zusammenhang Gesamtkosten der Errichtung und Folgekosten lt. Önorm 1801-2

<sup>11</sup> Wird in *Önorm 1801-2* als *KG 7 Instandsetzung* bezeichnet.

## 2.4 Daten für LCC

Die Kalkulation von Lebenszykluskosten basiert auf einer simplen Berechnung des Discounted Cashflows (siehe Kapitel 2.1) und hat neben den Rahmenbedingungen (Index, Zinssatz, Betrachtungshorizont) als Eingabewerte nur die Kosten/Gewinne einzelner Positionen, sowie deren Lebensdauer und zeitliche Veranschlagung.

Die Rahmenbedingungen werden für alle Fassadenvarianten als globale Vorgaben definiert, um eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Die Qualität der Kostenwerte ist somit das Herzstück jeder LZK Berechnung. Dabei konnte mir großzügigerweise die Forschung& Entwicklungsabteilung von M.O.O.CON<sup>12</sup>, sowie ATP Innsbruck<sup>13</sup> unterstützend zur Seite stehen. M.O.O.CON hat in seiner Datenbank für ihr LZK-Tool derzeit über 1100 Planungselemente mit entsprechenden Errichtungs- und Folgekosten.. Diese Daten wurden in enger Abstimmung mit Partnern aus der Bauindustrie, Gebäudetechnik und -betreuung erarbeitet. Manche dieser bestehenden Daten wurden für die in dieser Arbeit erstellten Berechnungen verwendet. Außerdem wurden viele Kostenkennwerte in Zusammenarbeit mit unterschiedlichsten Herstellern speziell für die Thematik *Lebenszykluskosten von Betriebsgebäuden* erstellt. Für die Ökobilanzierung wurden die Daten, sofern nicht von den Herstellern angegeben, aus der vom Deutschen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung erstellten Datenbank *Ökobilanzbasierte Umweltindikatoren im Bauwesen* (Ökobau.dat 2011) verwendet. Sofern es grobe Abweichungen innerhalb der Quellen gab, wurde unter anderem der *Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile* des Gerichtssachverständigerverband (2006) herangezogen und die Werte sinngemäß gemittelt.

### Baukostenindex und Baupreisindex

Über Preissteigerungen in der Baubranche gibt die Bundesanstalt Statistik Austria regelmäßige, detaillierte Auskünfte. Als anschauliche Werkzeuge werden hier meistens der Baukostenindex (BKI) und der Baupreisindex (BPI) als Deflator<sup>14</sup> herangezogen. Der **Baukostenindex** verfolgt die Entwicklung der Preissteigerungen für Bauunternehmer bei der Ausführung in Folge von Kostengrundlagenveränderungen, wie Material oder Arbeit. Der **Baupreisindex** ist für die Bauherrenseite interessanter, da er jedes Quartal das Preisniveau von Bauunternehmungen in definierten Regionen erfasst, und somit über tatsächliche für den

<sup>12</sup>M.O.O.CON GmbH, [www.moo-con.com](http://www.moo-con.com)

<sup>13</sup>ATP Innsbruck Planungs GmbH, [www.atp.ag](http://www.atp.ag)

<sup>14</sup>Deflator ist ein Begriff aus der Statistik, der inflationäre Entwicklungen auf leicht zu vergleichende Werte umrechnet. Dabei werden Daten über Zeit mit Hilfe eines Basiswertes (Jahr) vergleichbar gemacht.

Bauherren anfallende Kostensteigerungen Auskunft gibt. Der BPI beinhaltet dementsprechend nicht nur die Faktoren Material und Lohn, sondern in weiterer Folge auch unternehmensspezifische Produktionsfaktoren der am Bauprozess Beteiligten (Statistik-Austria 2011).

Jahr	ØIndex	Δin%
2011 (Q2)	120,2	+2,7%
2010	116,9	+1,7%
2009	114,9	+2,1%
2008	112,5	+4,6%
2007	107,3	+4,1%
2006	102,9	+2,8%
2005	100	

Tabelle 2.1: Baupreisindex für Hochbau in Österreich Jahresentwicklung, Basisjahreswert 2005 (*Statistik Austria*)

In Tabelle 2.1 ist die Entwicklung der Preisindizes der letzten sechs Jahre (Jahresdurchschnitt) aufgeschlüsselt. Alle Baupreisindizes werden auf der Basis *Jahresdurchschnitt* 2005 = 100 für ganz Österreich berechnet. Die jährlichen Datenpunkte können aber auch auf einzelne Regionen beziehungsweise Leistungsgruppen aufgegliedert werden, um so eine etwaige regionale oder Gewerkeabhängige Varianz zu verfolgen. In Tabelle 2.2 sind einige Leistungsgruppen, welche für den Fassadenbau notwendig sind, gelistet.

BPI Entwicklung 2011 (2.Q) zu Basis Ø2010	
Mauerarbeiten	+2,0%
Putzarbeiten	+1,7%
Abdichtungen bei Böden und Wänden	+2,6%
Dachdeckerarbeiten	+4,1%
Vorgehängte Fassaden	+0,8%
Außenwand- Wärmedämmverbundsysteme	+1,6%
Fenster und Fenstertüren	+2,1%

Tabelle 2.2: BPI nach Leistungsgruppen, Basisjahreswert 2010 (*Statistik Austria*)

Gerade wegen einer hohen Varianz innerhalb einzelner Leistungsgruppen<sup>15</sup> sowie regionalen Tendenzen muss man sich im klaren sein, dass über zukünftige Werte und Entwicklungen nur Annahmen gemacht werden können. Im Sinne einer übersichtlichen Vergleichbarkeit einzelner Fassadenvarianten gehe ich von einer einheitlichen Preissteigerung aus; ein einheitlicher Preissteigerungsindex wird auch von ÖGNI vorgegeben: lt. ÖGNI Steckbrief 16 ist die allgemeine Preissteigerung mit einem Mittelwert von 2% anzunehmen, und die Preissteigerung für Heiz- und Elektroenergie mit einem Mittelwert von 4% (ÖGNI 2009, Anlage 16\_05).

---

<sup>15</sup>siehe Tabelle 2.2.

# Kapitel 3

## Lebenszyklusanalyse

Äquivalent zu der ökonomischen Betrachtung von Produkten und Gebäuden entlang des gesamten Lebenszyklus drängt sich seit den ersten Theorien einer industriellen Ökologie das Konzept einer ökologischen Modernisierung<sup>1</sup> von Produkten und Prozessen in den Vordergrund. Dabei geht es um eine Betrachtung von ökonomischen und ökologischen Wirkungsfaktoren. Ähnlich einer kaufmännischen Buchhaltung, werden in der Ökobilanz die “Ressourcenentnahmen aus der Natur und die Umweltwirkungen während ihres gesamten Lebenszyklus (von der Wiege bis zur Bahre)” verbucht und analysiert (König et al. 2009).

Während eine Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) alle anfallenden Kosten für Herstellung, Gebäudebetrieb, Abbruch und Entsorgung<sup>2</sup> auf einen definierten Zeithorizont bilanziert, ist der modulare Aufbau einer Ökobilanzierung ähnlich gestrickt. Die europäische Norm DIN EN ISO 14040 (2009) *Umweltmanagement - Ökobilanz* klärt die Grundsätze und Rahmenbedingungen von Ökobilanzen und beschreibt diese wie folgt: Umweltaspekte und deren potentielle Umweltwirkung von Rohstoffgewinnung, Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling und Beseitigung.

Die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe, sowie deren Definition, orientieren sich an der oben erwähnten Europäischen Norm, sowie den Anforderungen und Anleitungen der DIN EN ISO 14044 (2006) sofern nicht gesonderte Vorgehensweisen<sup>3</sup> mit entsprechender Nomenklatur angegeben sind. Ausgenommen hiervon ist die Gewichtung nach OI3 Leitfaden für die Berechnung von Ökokenn-

---

<sup>1</sup>Näher Beschrieben von Fischer-Kowalski und Haberl in *Gesellschaftlicher Stoffwechsel und Kolonisierung von Natur* (1997)

<sup>2</sup>Natürlich ist die Festlegung der Systemgrenze für Lebenszykluskosten hier nicht klar definiert. Etwaige Adaptierungen sind je nach Aufgabe und Zweck der Analyse zu tätigen. Zum Beispiel ziehen Immobilienentwickler Finanzierungskosten und Wertverluste in ihre Kalkulation mit ein. *siehe Kapitel 2*

<sup>3</sup>zum Beispiel der OI3 Basisindikatoren

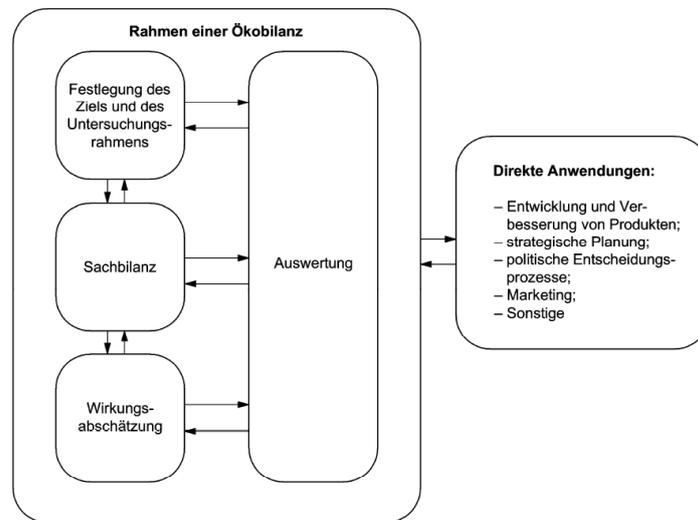


Abbildung 3.1: Phasen einer Ökobilanz, ISO 14040

zahlen (IBO 2010). Denn laut DIN EN ISO 14044 (2006) darf in vergleichenden Studien keine Gewichtung durchgeführt werden; es müssen die Einzelkriterien analysiert werden.

Der iterative Prozess einer Ökobilanzierungsanwendung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Phase *Auswertung* ist in drei Sub-Phasen geteilt: ‘Identifizierung der signifikanten Parameter’, ‘Beurteilung durch Vollständigkeitsprüfung; Sensitivitätsprüfung; Konsistenzprüfung; sonstige Prüfungen’ und ‘Schlussfolgerungen, Einschränkungen, Empfehlungen’. In den folgenden Kapiteln wird die Funktion und der Aufbau der im Zuge dieser Arbeit entstandenen Ökobilanzfunktion des EEFA-Tools für die Evaluierung der in Kapitel 4 beschriebenen Fassadensysteme erläutert.

### 3.1 Ziele und Untersuchungsrahmen

Die vorliegende Arbeit ist Bestandteil des in der Einleitung beschriebenen Forschungsprojekts *INFO*<sup>4</sup>, welches Optimierungspotentiale hinsichtlich Energieeinsatz und -verbrauch des Gebäudes untersucht, ist es nur eine logische Konsequenz auch die eingesetzten Rohstoffe hinsichtlich deren benötigter Energie für Förderung, Herstellung und Entsorgung zu betrachten. Deshalb stellt diese Arbeit die Lebenszykluskosten von drei untersuchten Fassadensystemen einer Lebenszyklusanalyse gegenüber.

<sup>4</sup>siehe Dorn, Kovacic, Orehounig, Oberwinter, Bleicher & Mahdavi (2011)

Dies soll aufzeigen: *Wie hoch sind die Kosten einer energetisch, lebenszyklus-optimierten Fassade im Vergleich zu einer Standard Variante? Und wie sind diese bezüglich ihrer Umweltwirkungen zu beurteilen?*

Die in Kapitel 4 *Fassadensysteme* beschriebenen Fassaden werden mit Hilfe eines entwickelten Excel-Tools<sup>5</sup> auf Lebenszykluskosten und Ökobilanz evaluiert. Die entsprechenden Daten sind an entsprechende Fassadenelemente gekoppelt, welche im Tool beliebig zusammengestellt, und untereinander verglichen werden können. Die Anwendung richtet sich an erfahrene Baubeteiligte, welche die Resultate einer Ökobilanzierung interpretieren können und, in Zusammenhang mit den entsprechenden Lebenszykluskosten, Empfehlungen für die in der Praxis Entscheidungen treffenden Akteure abgeben können.

**Funktionale Einheit** Um Fassadenvarianten untereinander vergleichbar zu machen, ist die Festsetzung einer funktionalen Einheit notwendig. In der Bau- und Immobilienbranche ist der Bezug auf eine Flächenkonstante üblich. Ein Quadratmeter [ $1m^2$ ] ist auch für den Laien, sofern dieser durch seine Herkunft dem metrischen System zugeneigt ist, eine simpel zu fassende Größe. Derzeit wird der Bekanntheitsgrad von Ökobilanzen in der Baubranche durch den Einsatz von Zertifizierungsprozessen gesteigert. Diese betrachten, als eines von vielen weiteren Kriterien, die ökologische Wirkung des gesamten Gebäudes auf die Umwelt. Daher ist zum Beispiel laut ÖGNI (2009) die übliche Einheit<sup>6</sup> für *GWP* - *Treibhauspotential*<sup>7</sup>  $\frac{[ME]}{m_{NGF}^2 \times a}$ .

**Bilanzgrenze und Abschneidekriterien** Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Vergleich von Fassadensystemen liegt, ist die LCA-Bilanzierungsgrenze sehr eng um die ausschlaggebenden Bauteile gelegt. In Abbildung 2.4 sind die Betrachtungsgrenzen von Lebenszykluskosten, Ökobilanz und Gebäudesimulation abgebildet. Wie man sieht, ist die Tragkonstruktion weder in der Analyse zu LCC noch LCA enthalten. Dies ist darauf zurück zu führen, dass für jede der drei Fassadenvarianten eine Vielzahl an statischen Unterkonstruktionen (Stahl, STB, Holz) im Hallen-Skelettbau möglich wären, und auf Grund einer willkürlichen Wahl des Unterkonstruktionssystems die Resultate von LCC und LCA für die opake und transparente Fassadenflächenkonstruktion zu sehr verzerren.

Eine Bauteilgruppe, die zwar in die Lebenszykluskostenbetrachtung einfließt, aber nicht in der Ökobilanz aufscheint, ist der Sonnenschutz. Auf Grund der im

<sup>5</sup>siehe Kapitel 6 EEFA - Evaluierungstool

<sup>6</sup>[ME] steht für *Masseneinheit*. In diesem Fall [kg]. Dementsprechend ist die Einheit für *GWP* 'Kilogramm pro Quadratmeter und Jahr'

<sup>7</sup>ÖGNI Steckbrief 01

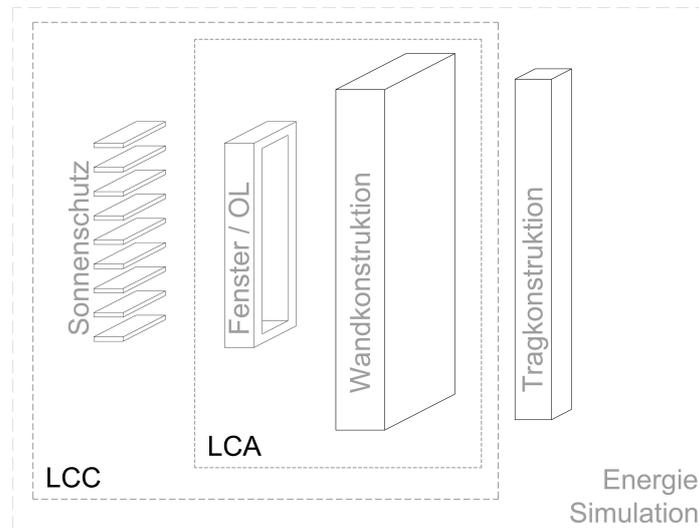


Abbildung 3.2: Bilanzgrenzen LCA, LCC, Simulation

Projekt *INFO* ermittelten Zwischenergebnisse der Gebäudesimulation<sup>8</sup> wird ein motorisierter, beweglicher Sonnenschutz für jede der drei Varianten gewählt. Zur Auswahl stehen *außenliegende Jalousien*, *Lamellen horizontal* und *Lamellen vertikal*, die alle motorisiert an Building Automation System<sup>9</sup> gekoppelt sind. Da die derzeitige Ökodatenverfügbarkeit für oben erwähnte Sonnenschutzsysteme sehr schlecht ist (weder EPD noch ökobau.dat Daten), wird der Sonnenschutz nicht in der Ökobilanz berücksichtigt. Dadurch, dass bei jeder der drei Fassadenvarianten ein ähnliches oder gleiches Sonnenschutzsystem (metallische Lamellenelemente mit Motorisierung) gewählt wird, soll dieser systemübergreifend vernachlässigte Faktor die Aussagekraft der Ergebnisse nicht schmälern. Es ist anzumerken, dass das Ziel ein Systemvergleich von Fassaden ist, und sich somit das Ergebnis aus relativen Werten zusammensetzt. Eine "System-Umwelt-Deklaration" ist nicht das Ziel. Die Abschneidekriterien auf Systemebene sind sehr pragmatisch gehalten und orientieren sich entlang der Richtlinien von deutschsprachigen Gebäude-Zertifizierungen wie *DGNB* beziehungsweise Leitfäden für nachhaltiges Bauen:

Die Summe der vernachlässigten Materialien darf 5% der Masse, der Primärenergie oder der Äquivalenten GWP, AP und EP nicht übersteigen.

(BMVBS 2011)

<sup>8</sup>siehe dazu die Simulation und Evaluierung von automatisierten Sonnenschutz- und Fensterlüftungssystemen durch das *Institute for Building Physics and Building Ecology*, näher beschrieben in Kapitel 5 Gebäudesimulation

<sup>9</sup>siehe Kapitel 5.2 Vorgaben für das Simulationsmodell

## 3.2 Umweltindikatoren

Um im Rahmen dieser Arbeit eine einfache Vergleichbarkeit und Übersicht zu gewährleisten, folge ich bei der Wahl der zu betrachtenden Umweltindikatoren dem *Leitfaden für die Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude* von IBO (2010), welche nach einem gewichteten Bewertungssystem eine ökologische Gesamtkennzahl ( $OI3_{Kon}$ <sup>10</sup>) für Konstruktionen ausweist. Dies bedeutet, dass von der Vielzahl an Umweltkategorien drei Ausschlaggebende für den ökologischen Vergleich der drei Fassadensysteme herangezogen werden ( $GWP$ ,  $AP$ ,  $PEne$ ). Ein vierter Indikator ( $PEe$ ) wird aus Gründen der Gegenüberstellung von  $PEe \Leftrightarrow PEne$  hinzugezogen:

**GWP** Globale Erwärmung durch Treibhausgase

Die Menge an freigesetzten Treibhausgasen<sup>11</sup>, welche die globale Erwärmung beschleunigen, wird als Kohlendioxid-Äquivalent ( $CO_2$ -Äq.) angegeben.

**AP** Versauerungspotential

Die Menge an freigesetzten Luftschadstoffen<sup>12</sup>, welche durch die Reduktion des pH-Wertes von Regenwasser zu Versauerung von Böden und Seen, und in weiterer Folge zu Waldsterben und Dezimierung des Fischbestandes beitragen. Die Angabe erfolgt als Schwefeldioxid-Äquivalent ( $SO_2$ -Äq.).

**PEne** Primärenergiebedarf an nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen

Die Menge an aufzubringender Energie<sup>13</sup>, welche sich aus folgenden endlichen Ressourcen zusammensetzt: Erdöl, Erdgas, Braunkohle, Steinkohle, Uran. Die Angabe erfolgt bei der Summenbildung der Energieträger auf deren Energiegehalt/Heizwert [ $MJ$ ] *MegaJoule* bezogen.

**PEe** Primärenergiebedarf an erneuerbaren energetischen Ressourcen

Die Menge an aufzubringender Energie, welche sich aus folgenden erneuerbaren Ressourcen zusammensetzt: Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie, Biomasse. Die Angabe erfolgt bei der Summenbildung der Energieträger auf deren Energiegehalt/Heizwert [ $MJ$ ] *MegaJoule* bezogen.

<sup>10</sup>Auf die Angabe des  $OI3_{Kon}$ -Kennwertes wird im Zuge dieser Arbeit verzichtet.

<sup>11</sup>z.B. Kohlendioxid, Methan, FCKW, etc.,...

<sup>12</sup>z.B. Schwefeldioxid und Stickoxide

<sup>13</sup>Sofern die Produktion eines Produktes den direkten Einsatz der erwähnten Ressourcen benötigt, wird dies auch in den Indikator aufgenommen. Zum Beispiel wird Erdöl auch als stofflicher Bestandteil bei der Kunststoffproduktion eingesetzt (König et al. 2009).

### 3.3 Daten für LCA

Die Frage, wie die verschiedenen (Umwelt-)Indikatoren im Verhältnis zueinander zu gewichten sind, ist damit noch nicht beantwortet. Diese Gewichtung kann nicht mit naturwissenschaftlichen Methoden ermittelt werden, da sie subjektive Werthaltungen beinhalten. Daher ist eine Gewichtung oder Priorisierung auch nicht ‘richtig’ oder ‘falsch’. Sie sollte jedoch eine gesellschaftliche Akzeptanz aufweisen, da ansonsten die errechneten Ergebnisse nicht anerkannt werden. (König et al. 2009, S.48)

Entsprechend den formulierten Zielen wurden zu betrachtende Indikatoren ausgewählt. Ähnlich ist die Vorgehensweise bei den Daten für die Ökobilanz: Notwendigerweise sind bei einer Betrachtung über den Lebenszyklus eines Gebäudes nicht nur die Umweltwirkungen der Herstellung zu betrachten, sondern ebenso die der Instandsetzung<sup>14</sup> (Erneuerung) und Entsorgung (siehe Formel 3.1).

$$GWP = GWP_{H+I} + GWP_E \quad (3.1)$$

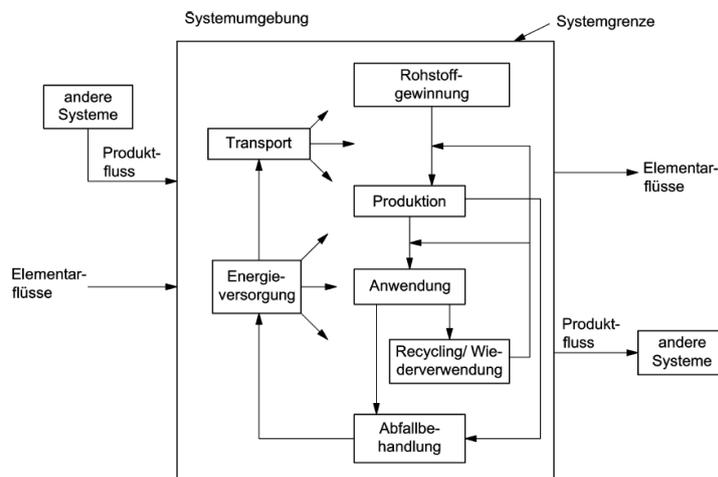


Abbildung 3.3: Beispiel eines Produktsystems, EN ISO 14040

Wie in Abbildung 3.3 (*Beispiel eines Produktsystems EN ISO 14040*) deutlich aufgezeigt wird, sind die für eine Ökobilanzierung notwendigen Daten das Resultat von einer aufwendigen Betrachtung eines ganzheitlichen Lebenszyklus einer Produktgruppe. Schon auf Grund der enormen

<sup>14</sup>In diesem Fall gleich zu setzen mit *Nutzung*

Datenmengen und stark variierenden Einzelparameter (zB.: Herstellungsort-Produktionsstätte, Art des Transports, etc.,...) können in einer Europäischen Produktdeklaration (EPD) nur statistische Werte wiedergeben werden. So zeigen Fischer & Hauke (2010) in ihrem Vergleich von Daten aus der EPD von Baustahl und den entsprechenden Daten aus der *ökobau.dat*, dass die Bilanzierungsergebnisse für Profilstähle teilweise um mehr als 20% auseinander liegen. Weiter ist zu kritisieren, dass ein exaktes Ziehen von Bilanzierungsgrenzen selten möglich ist. Während manche *ökobau.dat* oder EPD Daten Transportwege zur Baustelle miteinbeziehen, tun dies andere nicht. Ein Mix aus *cradle to gate*<sup>15</sup> und *cradle to grave*<sup>16</sup> ist sehr schwer zu vermeiden, da etwaige Transportwege und Transportsysteme für Produkte, welche erst in 40 Jahren entsorgt werden, zu einem derzeitigen Zeitpunkt nicht bekannt sind. Diese können jedoch einen erheblichen Anteil an der gesamten Wirkungsbilanz eines Produktes ausmachen, denn...

verglichen mit dem in der EPD angegebenen Primärenergiebedarf von 12.350 *MJ/Tonne* und dem Treibhauspotenzial von 800 *kg/Tonne* können bei langen Transportwegen von Stahlprodukten zusätzliche Umweltbelastungen von über 30% entstehen.  
(Fischer & Hauke 2010, S.18)

**Datenquellen** Die für diese Arbeit herangezogenen Daten stammen zu überwiegendem Teil aus der *Ökobau.dat* (2011). Dabei orientierte ich mich an dem von DGNB (2009) vorgeschlagenen Rechenverfahren bezüglich End-of-Life Szenario und den vorgeschlagenen Einteilungen in Materialgruppen. Für Produkte, für die es eine Umwelt-Produktdeklaration (*EPD*<sup>17</sup>) gibt, wurden die entsprechenden Werte aus der EPD übernommen. In Tabelle 3.1 *Datensätze für LCA* sind die verwendeten Datensätze<sup>18</sup> und deren Quelle notiert.

---

<sup>15</sup>Die Systemgrenze bildet hierbei das fertige Produkt am Werkstor. Transporte vom Werk zur Baustelle sind nicht berücksichtigt und müssen bei Systembetrachtungen eingerechnet werden.

<sup>16</sup>Die Systemgrenze bildet das entsorgte Produkt. Alle Inputs und Outputs sollten hier betrachtet werden.

<sup>17</sup>siehe EPD TKS 2011311-D (2011)

<sup>18</sup>Auf Grund der großen Datenmenge wird verzichtet die einzelnen Werte der Sach- und Wirkungsbilanz zu listen. Die Angabe von Quelle und Name des Datensatzes führt Interessierte schnell und leicht zu erwähnten Werten.

Tabelle 3.1: Datensätze für LCA

Bauteil/Material	Quelle	Datensatz
<b>Metallverkleidung</b>		
Stahltrapezblechverkleidung	ökobau.dat	4.1.4_Stahl_Feinblech_(0,3-3,0mm).xml
EOL - Recycling	ökobau.dat	4.8_Recyclingpotenzial_Stahl_Feinblech.xml
<b>PU Sandwichpaneel</b>		
Sandwichelement mit PUR-Kern	EPD	EPD-TKS-2011311-D (2011)
EOL - Recycling	EPD	EPD-TKS-2011311-D (2011)
<b>Holzverkleidung</b>		
Schalungsbretter Lärche	ökobau.dat	3.1.1_Schmittholz_Laerche_(12%_Feuchte_10,7%_H2O).xml
3 Schichtplatte	ökobau.dat	3.2.1_Drei-Schichtholzplatte.xml
EOL - thermische Verwertung	ökobau.dat	3.4_EOL_Holz,_naturbelassen_in_MVA.xml
<b>Winddichte Bahn</b>		
Unterspannbahn PP	ökobau.dat	6.6.1_Unterspannbahn_PP.xml
EOL - Deponierung	ökobau.dat	9.5_Bauschutt-Deponierung.xml
<b>Unterkonstruktion</b>		
UK Stahlprofile	ökobau.dat	4.1.3_Stahlprofil.xml
EOL - Recycling	ökobau.dat	4.8_Recyclingpotential_Stahlprofil.xml
<b>Lattung</b>		
UK Holzattung	ökobau.dat	3.1.2_Konstruktionsvollholz.xml
EOL - thermische Verwertung	ökobau.dat	3.4_EOL_Holz,_naturbelassen_in_MVA.xml
<b>Wärmedämmung für WK</b>		
Mineralwolleämmung	ökobau.dat	2.01_Mineralwolle_(Fassaden-Daemmung).xml
EOL - Dponierung	ökobau.dat	9.5_Bauschutt-Deponierung.xml
<b>Wärmedämmung für KLH</b>		
Holzfaserdämmplatte	ökobau.dat	2.10_Holzfaserdämmplatte_FG_(Trockenverfahren).xml
EOL - thermische Verwertung	ökobau.dat	2.22_EOL_Holzfaserdämmplatte.xml

Tabelle 3.2: Datensätze für LCA

Bauteil/Material	Quelle	Datensatz
<b>Kreuzlagenholz</b>		
KLH 5s	ökobau.dat	3.1.4_Brettschichtholz_Nadelholz.xml
EOL - thermische Verwertung	ökobau.dat	3.4_EOL_Holz_naturbelassen_in_MVA.xml
<b>Wandkassetten</b>		
Stahlblech-Kassette 0,72mm	ökobau.dat	4.1.4_Stahl_Feinblech_(0,3-3,0mm).xml
EOL - Recycling	ökobau.dat	4.8_Recyclingpotenzial_Stahl_Feinblech.xml
<b>Fugendichtung</b>		
PE Folienbänder	ökobau.dat	7.3.4_Fugendichtungsbaender_PE_PP-Folie.xml
EOL - Daponierung mit WD	ökobau.dat	9.5_Bauschutt-Deponierung.xml
<b>Fenster</b>		
Fensterahmen Alu FSI	ökobau.dat	7.1.6_Aluminium-Rahmenprofil_thermisch_getrennt_pulverbeschichtet.xml
EOL - Recyclingpotential	ökobau.dat	4.8_Recyclingpotential_Aluminium_(Blech_und_Profil).xml
Fensterdichtung für Aluprofil	ökobau.dat	7.3.1_EPDM-Dichtungen_fuer_Aluminiumprofil.xml
Fensterglas 2Scheiben Iso	ökobau.dat	7.2_Isolierglas_2-Scheiben.xml
EOL - Aufbereitung	ökobau.dat	9.5_Bauschutttaufbereitung.xml
<b>öffnbare Fensterflügel</b>		
Drehkippfenster	ökobau.dat	7.4_Fenster-Beschlag_fuer_Drehkippfenster.xml
EOL - Recycling	ökobau.dat	4.8_Recyclingpotential_Stahlprofil.xml
<b>Polycarbonat Oberlicht</b>		
PC Hohlkammerpaneel	ökobau.dat	6.5.2_Transparente_Platten_PC.xml
EOL - thermische Verwertung	ökobau.dat	6.8_Verbrennung_Kunststoff_in_MVA_incl_Gutschrift.xml
<b>Motorenbetrieb</b>		
Stromnutzung für Sonnenschutz	ökobau.dat	8.6.4_Nutzung_Verbrauch_1_kWh_Strom.xml

## Kapitel 4

# Fassadensysteme

Bevor mit dem Entwurf, beziehungsweise der Wahl von Fassadensystemen begonnen werden kann, muss mittels Grundlagenermittlung ein für die spezielle Bauaufgabe geeignetes Konzeptgerüst aufgestellt werden. Dies soll noch vor den ersten Skizzen ein Regelwerk festlegen, das als Orientierungshilfe für Planer und Bauherren agiert. Vor allem wenn Nachhaltigkeit eine zentrale Rolle spielt, empfiehlt es sich die relevanten Kriterien vorab festzusetzen. In diesem Stadium werden sehr viele Dinge entschieden, die Möglichkeiten zur Kosten- und Konzeptsteuerung bieten.

Oftmals wird Nachhaltigkeit noch immer als additiver Zusatz von Entwurfskonzepten aufgefasst, der sich im weiteren Planungsverlauf im Haustechnikeller lösen lässt. Fuchs (2010)

Um die Wünsche des Bauherren (in diesem Fall die projektbeteiligten Industriepartner des Forschungsprojekts INFO), ebenso wie die Vorgaben der Fachplaner und -techniker zu berücksichtigen, wird in dieser Sektion die Erstellung eines Pflichtenheftes beschrieben. In Zertifizierungssystemen, die auf einer Punktevergabe basieren, sind solche qualitativen (weichen) Parameter, die sich nicht leicht quantifizieren lassen, schwer zu fassen. Es wird in der DGNB trotzdem versucht mit *Kunst am Bau*<sup>1</sup> einen gewichteten Kennwert für die Zertifizierung zu erhalten. Ich möchte aus offensichtlichen Problemen dieses Zugangs nicht die architektonische Qualität in der Fassadenvarianten-Evaluierung mit einfließen lassen. Jedoch sind nutzerseitige Anforderungen und Leitkriterien eine notwendige Startkonstante für den Konzept- und Entwurfsprozess. Dementsprechend

---

<sup>1</sup>Im DGNB Zertifizierungssystem wird das Kriterium 'Architektonische Qualität' im Kapitel 'Kunst am Bau' gelistet. Es hat Anteil an der Gesamtbewertung des Gebäudes von 2,4%(Fuchs 2010).

habe ich mich an den gängigen Praktiken für die Erstellung von Kriterienkatalogen entlang den Beschreibungen von Matthias Fuchs<sup>2</sup> orientiert.

Thema	Priorität
Erweiterbarkeit	sehr hoch
Wiederverwendbarkeit	sehr hoch
Mehrkosten für Nachhaltigkeit	mittel
Repräsentanz	niedrig
Corporate Identity	sehr hoch
Wartung/Instandsetzung	hoch
Einsatz lokaler Produkte	niedrig
Erhöhter Sichtschutz	mittel
Erhöhter Vandalismusschutz	mittel

Tabelle 4.1: Leitkriterien der ‘*Bauherren*’

Im Zuge der Wahl geeigneter Fassadensysteme steht anfangs eine Bedarfsplanung, welche in Absprache mit dem Bauherren stattfindet. Für das Projekt INFO standen auf Bauherrenseite Ansprechpersonen der Industriepartner zu Verfügung (siehe Kapitel 5). Mit einer Web-basierten Umfrage wurden die für die Gebäudeplanung verantwortlichen Mitarbeiter zu dem Thema *Kriterienkatalog - Fassade Betriebsgebäude* zu den Themen *Wirtschaftlichkeit, Gestaltung und Ökologie* befragt. Hierbei sind die Ergebnisse in vereinfachter<sup>3</sup> Form in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Auf Grund der geringen sample size ( $n = 3$ ) soll dies keine statistisch relevante Umfrage im Industriebereich sein, sondern ein pragmatisches Werkzeug als Ersatz zu Experten-Interviews, welche auf Grund von geografischen und zeitlichen Problemen nicht durchgeführt werden konnten. Die online-Abfrage der Leitkriterien hat dies ersetzt. Mit den in Tabelle 4.1 präsentierten Prioritäten wurden die in Kapitel 4 in Absprache mit dem INFO-Projektteam betrachteten Fassaden konzipiert.

<sup>2</sup>Matthias Fuchs ist geschäftsführender Gesellschafter der ee concept GmbH und Vorsitzender des Ausbildungsrates der DGNB

<sup>3</sup>Insgesamt waren elf Aussagen betreffend Ökonomie, Ökologie, und Gestaltung mit Punkten zu bewerten. Die Punkteskala reichte von 0 – *Unwichtig* bis 10 – *SehrWichtig*.

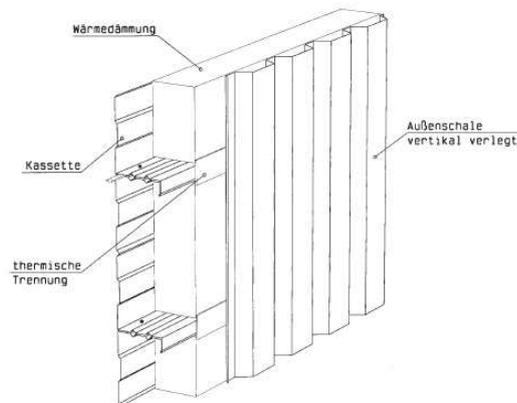


Abbildung 4.1: Metall Wandkassettenkonstruktion (Hoesch Cassette)

## 4.1 Metall-Wandkassetten Fassade

Eine der gängigsten Fassadenkonstruktionen im Industriebau ist die *Stahlkassetten*-Konstruktion. Sie löste den bis dato im Industriebau üblichen Standard des Mauerwerksbaus ab. Zuerst wurden zweischalige Trapezprofil-Wände ausgeführt, die ab den Siebzigerjahren durch innen liegende Kassettenprofilen ersetzt wurden. Diese, horizontal zwischen den Stützen spannde Konstruktion, besteht aus gewalzten Stahlblechprofilen, die eine einfach montierbare, beschichtete Leichtbauwand bildet. Die Kassettenprofile werden eingesetzt, wenn große Spannweiten zu überbrücken sind, entsprechende Brandschutzauflagen zu erfüllen sind, oder eine leicht adaptierbare Variante gefordert wird (Koschade 2004). Für die mehrschichtige Kassettenkonstruktion wurden mehrere Produkte und Systeme für den Wärmeschutz entwickelt. Eine häufig angewandte Wärmedämmung besteht aus Mineralwolleplatten, welche auf die Kassettenprofile zugeschnitten sind und die nach oben, sowie die nach unten gerichteten Kassettenurte gleichermaßen dämmen (Abbildung 4.1). Dabei erkennt man jedoch auch einen großen Nachteil der Konstruktionsvariante: Auf Grund des selbsttragenden Aufbaus entstehen eine Vielzahl an Wärmebrücken, die den thermischen Schutz der Hülle enorm reduzieren. So unterscheidet sich laut Herstellerangaben<sup>4</sup>, bei einer Kassettenkonstruktion mit 100mm Mineralwolle-Dämmung, der theoretische U-Wert vom effektiv zu erreichenden U-Wert um 29%. Auf der Folgeseite findet sich der exemplarische Fassadenentwurf für das Projekt *INFO* abgebildet.

---

<sup>4</sup>Isover Metac WS

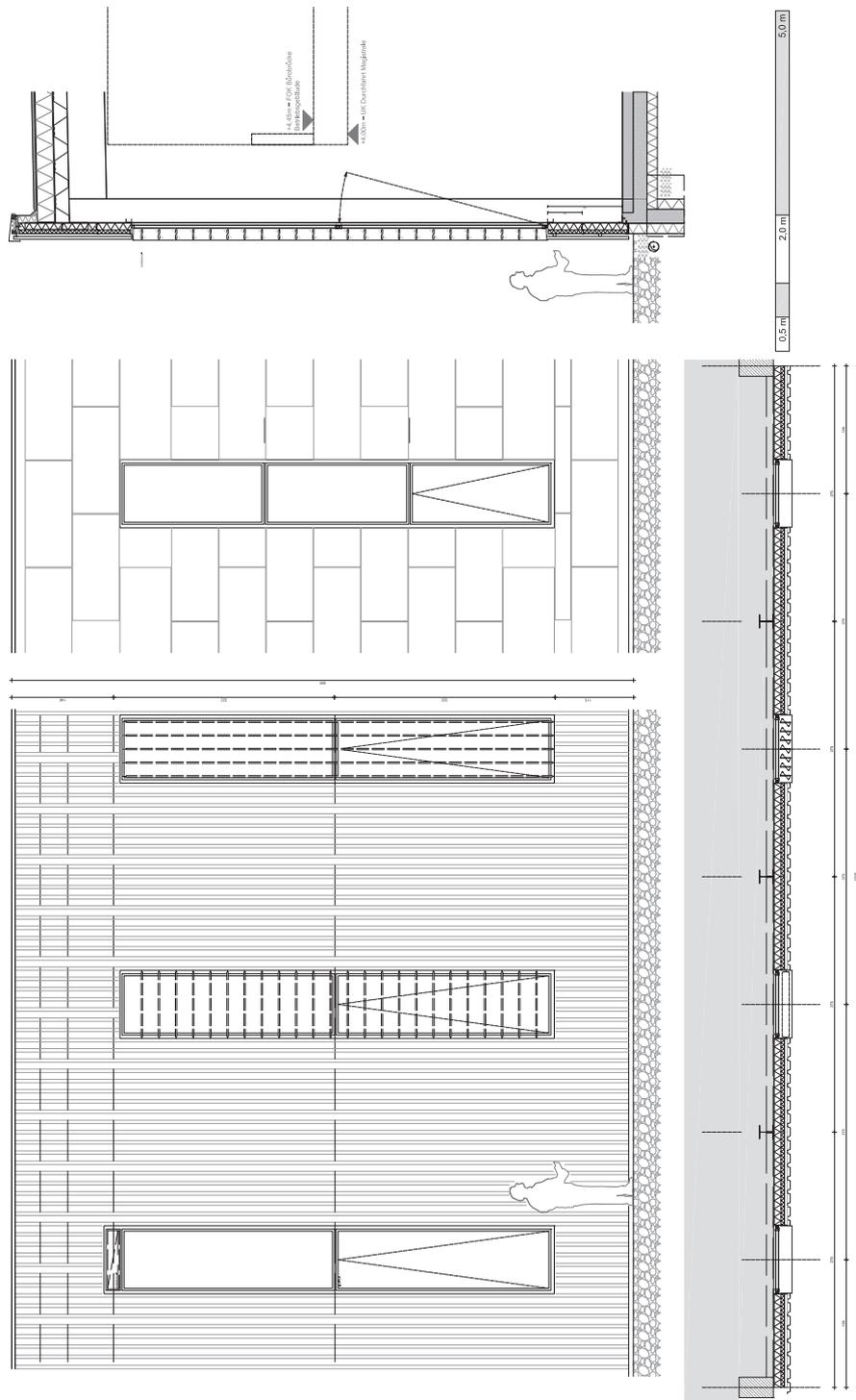


Abbildung 4.2: Metall Wandkassettenkonstruktion

## 4.2 PU-Sandwichpaneel Fassade



Abbildung 4.3: PU-Panel: Trevision Betriebsgebäude, querkraft Architekten; Brucha Systemschnitt

Besonders die Industrie- und Gewerbearchitektur hat in den letzten Jahrzehnten die Sandwichbauweise für sich entdeckt. Liegen die Vorteile der Sandwich-Paneele doch auf der Hand: Wirtschaftlichkeit, Montagezeit, Reversibilität, Dämmeigenschaften, Form- und Farbgestaltung. Die Paneele bestehen aus zwei beschichteten Stahlblechen mit unterschiedlich dimensionierten Polyurethan-Hartschaumkernen (PU/PUR). Es ist möglich die Paneele in einer Länge von bis zu 21m, und einer Breite von bis zu 1,20m fertigen zu lassen. Dies hat bei der Gestaltung der Hüllfläche enorme Vorteile, da keine Kleinteiligkeit gegeben ist. Polyurethan in Verbindung mit beschichteten Stahlblechen kann sehr hohen Anforderungen bezüglich Wärmeschutz<sup>5</sup>, Schallschutz, und Brandschutz erfüllen und wird daher sehr oft in Betriebsgebäuden eingesetzt. Die Montage erfolgt mit einem simplen Nut-Feder System (siehe Abbildung 4.3 rechts) - dies kann sichtbar oder verdeckt sein. Mit entsprechenden Formteilen sind eine Vielzahl an Form- und Konstruktionsmöglichkeiten denkbar. Querkraft Architekten haben zum Beispiel PU Paneele gewählt, um bei dem Trevision Betriebsgebäude eine homogene Fassade, die zusätzlich wartungsarm ist, zu kreieren. In Abbildung 4.4 ist ein Anwendungsbeispiel planerisch präsentiert, wie es im Tool für die LCC und LCA Evaluierung gewählt werden kann.

<sup>5</sup>PU-Paneele mit großen Dämmdicken kommen besonders bei Kühlgebäuden zum Einsatz (Koschade 2004).

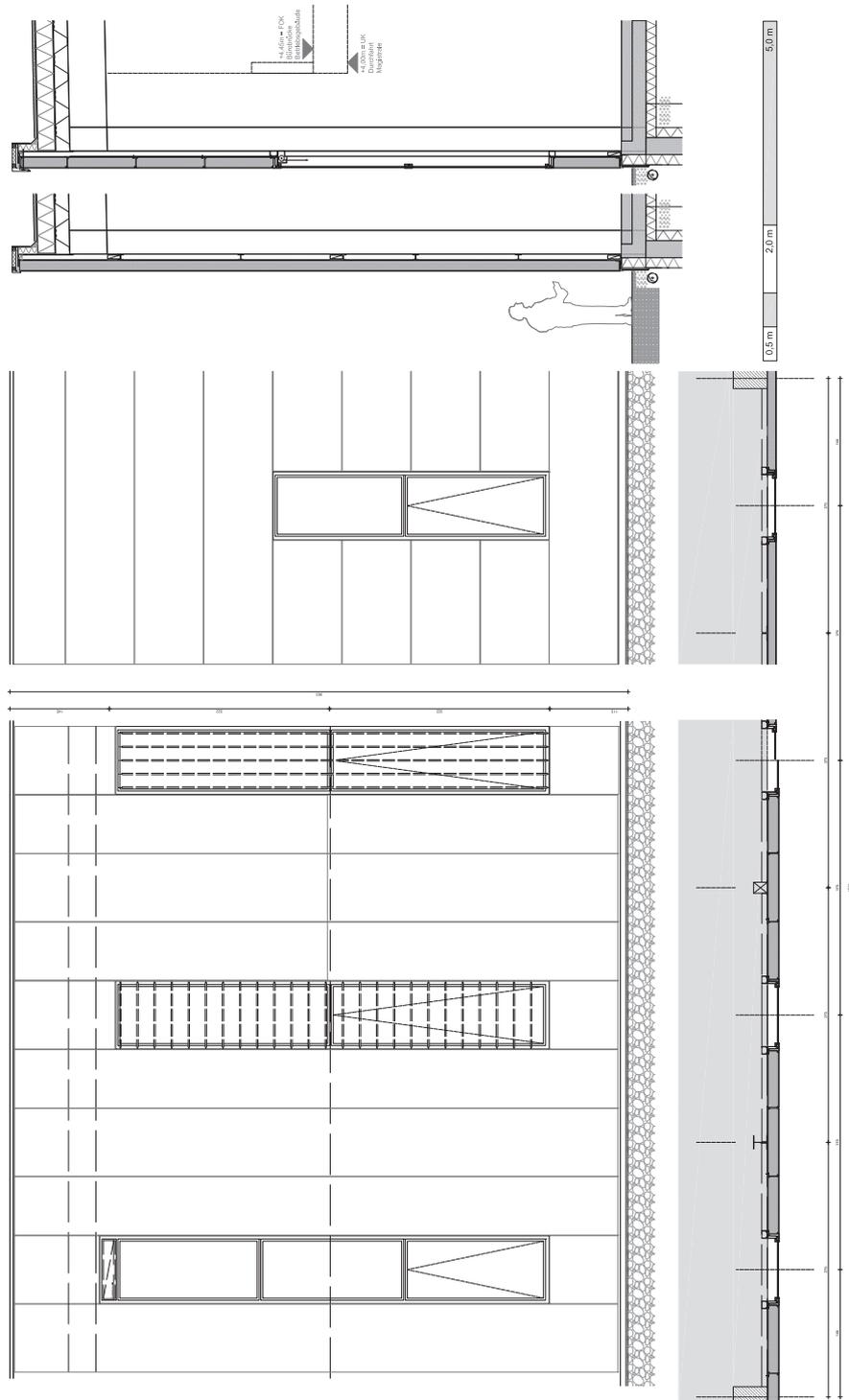


Abbildung 4.4: PU-Panel System



(a) Elementfertigungshalle Obermayr, F2-  
Architekten



(b) Eco2Building für Eine Welt Handel AG,  
Poppe\*Prehal

Abbildung 4.5: Industriebaufassaden aus Mehrschichtholzplatten und Fertigelementen

### 4.3 KLH-Holzfassade

Holz zählt zu den ersten Baumaterialien, welche die Menschheit universell für ein breites Spektrum an Konstruktionen und Hüllen angewandt hat. Neben einer breiten Verfügbarkeit und leichten Bearbeitungsmethoden, machen vor allem folgende Materialeigenschaften Holz zu einem interessanten Fassadenbaustoff (Herzog, Krippner & Lang 2004):

- hohe Festigkeit bei geringem Gewicht
- hoher Wärmedurchlasswiderstand
- hygroskopisches Verhalten für Feuchtereulation
- Hölzer mit hoher Resistenz sind ohne Beschichtung für Außenverkleidung geeignet
- Maserung und entstehende Patina bieten gestalterische Reize

Der Holzbau erlebt, auch auf Grund seiner ökologischen Vorzüge gegenüber anderen Bauweisen, ein stetiges Wachstum im österreichischen Industriebau. Besonders Industriehallen, Lager und Fertigungsgebäude werden oft mit einer Holzkonstruktion ausgestattet, auch wenn deren Holzbauweise oft von Außen nicht erkennbar ist. Von 1997 bis 2007 stieg der Anteil an industriellen Holzbauten in Niederösterreich laut Teischinger, Stingl & Stanek (2008, S.37) zwi-

schen 7% und 9%<sup>6</sup>. Mischformen (Holztragkonstruktion mit Verkleidungen aus Metall-Elementen) sind dabei die gängigsten Lösungen. Im Gewerbebau jedoch, wo auch gestalterische Kriterien wichtig sind, werden des öfteren Holzkonstruktionen hervorgehoben, oder die Fassade zum ökologischen Identitätsstifter.

Dementsprechend gibt es auch im Industriebau repräsentative Beispiele von Bauten mit Holzfassaden. Die von *f2-architekten* geplante *Fertigungshalle Obermayr*<sup>7</sup> in Schwanenstadt erhielt 2007 den Oberösterreichischen Holzbaupreis. Neben einer imposanten Brettschichtholzkonstruktion ist die Halle des Holzkonstruktionsunternehmens insbesondere auf Grund der Fassade interessant. Diese ist entlang des Faltsystems aus braun lasierten Dreischichtplatten sogar geneigt, und muss daher erhöhter Witterung Widerstand leisten. Da bei dem Projekt der Passivhausstandard erreicht werden sollte, besteht die Fassade aus "[...] hochwärmegeämmte Holzsandwich-elemente mit einer Gesamtkonstruktionsstärke von 44cm. Aufgrund der beidseitigen Beplankung mit Holzwerkstoffplatten (innenseitig Livingboard face, aussenseitig OSB) sind die Elemente in sich so stabil, dass trotz der komplexen zueinander gegenläufigen Dachlandschaft keine zusätzlichen Konstruktionselemente zur horizontalen Aussteifung erforderlich wird" (F2-Architekten 2006).

Die in Abbildung 4.6 planerisch dargestellte Variante zeigt eine Holzkonstruktion mit KLH auf: KLH steht für Kreuzlagenholz und ist ein Holzwerkstoff bei dem Holzbretter mit einem Polyurethankleber kreuzweise zu einer Massivwand miteinander verbunden werden. Diese können werkseitig in alle erwünschten Formen zugeschnitten werden. Der bauseitige Aufwand ist sehr gering.

**Add-on Polycarbonat-Paneel** Die als Add-on wählbare Variante eines horizontalen Oberlichts aus Polycarbonat (PC) -Hohlkammerpaneelen wird im Hallenbau gerne eingesetzt um einerseits für natürliche Belichtung mit diffusem Licht im Innenraum zu sorgen; und andererseits bei einem hohen Anteil an transluzenter Fassadenfläche, auf Grund seiner passablen, thermischen Eigenschaften den Wärmeschutz der Hüllfläche nicht all zu sehr zu mindern. Das Nut/Feder Paneelsystem erreicht in der 12-Kammerausführung einen U-Wert von  $0,71W/m^2K$ . Die Angaben zu solaren Transmissionswerten ergeben sich aus gemittelten Herstellerangaben. Da die Paneele mit verschiedenen Beschichtungen verfügbar sind, können mit etwaigen *heatblock*-Layers, das sind außen-

<sup>6</sup>Im Vergleichszeitraum stieg der gesamte Holzbauanteil in Niederösterreich um über 25%. Dabei sind im Speziellen Zu- und Umbauten bei Wohnhäusern große Treiber im Holzbauzuwachs. Eine detaillierte Aufschlüsselung zum Holzbau in Niederösterreich bieten Teischinger et al. (2008).

<sup>7</sup>[www.hallederzukunft.at](http://www.hallederzukunft.at)

seitig, coextrodierte UV Schutzschichten mit wärmereflektierender Eigenschaft, sehr niedere g-Werte erzielt werden. Genauere, bauphysikalische Angaben sind in Kapitel 5.1 *Daten und Kennwerte für die Simulation* zu finden. In Abbildung 4.6 ist eine Planungsvariante mit PC-Oberlicht dargestellt.

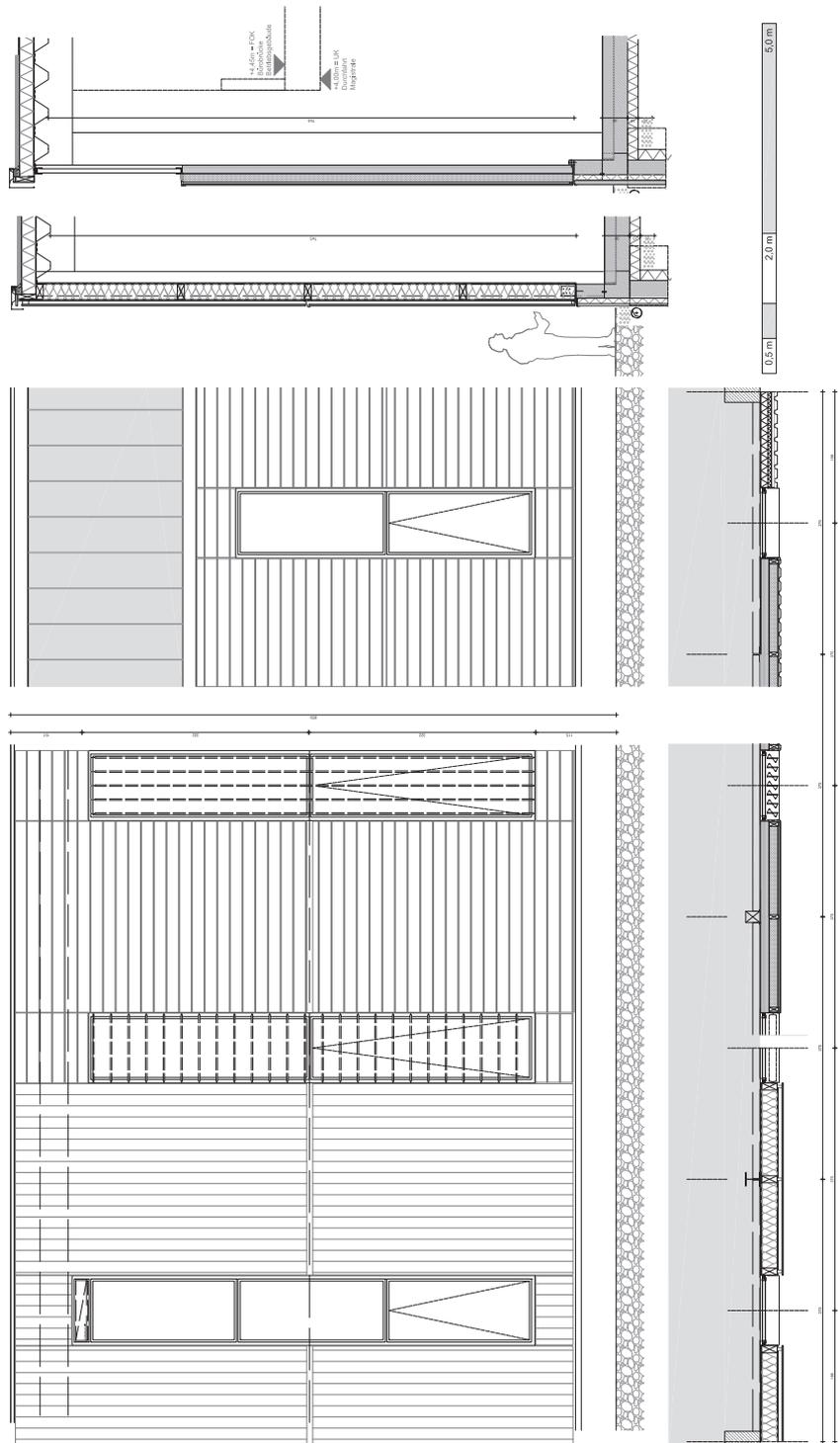


Abbildung 4.6: Holzmassivbauwand mit PC Oberlichtwand

## Kapitel 5

# Gebäudesimulation

Im Zuge des Projekts INFO<sup>1</sup> soll mit Hilfe umfassender Simulationen das Potential von Energieoptimierung in industrielle Fertigungsbetrieben erforscht werden.

Mit Hilfe prominenter Industriebetriebe und sieben Instituten der TU Wien soll es, im Zuge interdisziplinärer Zusammenarbeit, zu einem niederen Energieverbrauch entlang der gesamten Wertschöpfungskette eines Fertigungsbetriebes kommen (Dorn et al. 2011). Dabei werden Simulationsmodelle für folgende Gebiete erstellt:

- Maschinen und Produktionssysteme
- TGA
- Nutzerverhalten und Gebäudesteuerung, sowie -automation
- Gebäudehülle und Innenraumklima

Schlussendlich werden alle Simulationsmodelle zusammengeführt, um mit den Resultaten des optimierten, ganzheitlichen Modells Empfehlungen für einen energetisch effizienteren Fertigungsprozess zu beschreiben.

---

<sup>1</sup>*Interdisziplinäre Forschung zur Energieoptimierung in Fertigungsbetrieben* ist ein Forschungsprojekt der TU Wien. Die Projektkoordination liegt bei dem *Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik*. Projektpartner sind u.a.: *Institut für Rechnergestützte Automation*, *Institut für Hochbau und Technologie*, *Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement*, *Industriebau und interdisziplinäre Bauplanung*, *Institut für Architekturwissenschaften*, *Institut für Städtebau, Landschaftsarchitektur und Entwerfen*, *Institut für Thermodynamik und Energiewandlung*, *AMS Engineering GmbH*, *ANGER MACHINING GmbH*, *CNC Profi Maschinen-Handels-Ges.m.b.H.*, *Drahtwarenhandlung Simulation Services*, *EMCO Maier Ges.m.b.H.*, *ENGEL AUSTRIA GmbH*, *Hoerbiger Ventilwerke GmbH & Co KG*, *Krauseco Werkzeugmaschinen GmbH&Co*, *Pink Energie und Speichertechnik GmbH*, *Siemens AG Österreich*.

Für detaillierte Information verweise ich auf Publikationen der einzelnen Projektpartner. Als Einstieg empfehle ich das Paper von Dorn et al. (2011).

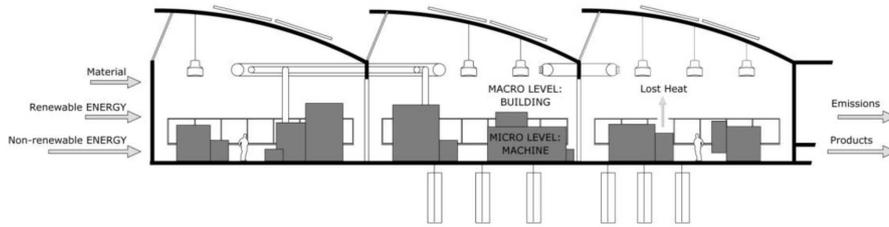


Abbildung 5.1: Schema: integrales Simulationsmodell Projekt INFO

Da sich diese Arbeit im speziellen mit der Gebäudehülle befasst, möchte ich näher auf die diesbezüglichen Simulationen eingehen. Die von mir in Kapitel 4 skizzierten Systeme sind hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Eigenschaften sehr unterschiedlich. Diese produktimmanenten Differenzen, sowie unterschiedliche Ausführung und Zusammenstellung der einzelnen Bauteilkomponenten, ergeben eine Vielzahl möglicher Fassadenvarianten. Diese bezüglich ihrer bauphysikalischen Performance zu untersuchen war das Ziel der Simulation. Die Ergebnisse helfen einerseits bei der Optimierung des Gebäudeentwurfs, andererseits bei der Berücksichtigung der entsprechenden Folgekosten (z.B.: Heizkosten zu Folge eines schlecht gedämmten Fassadenteils) für die Lebenszykluskostenberechnung.

	Anteil transparente Fassadenfläche					
	WD	U-Wert	10%	15%	20%	10%+20%PC
A)Wandkassette	185mm	0,32	X	X	X	X
B)PU-Paneel	160mm	0,14		X		
C)Holz	140mm	0,21		X		

Tabelle 5.1: Variantenzusammenstellung: Fassadensysteme mit unterschiedlichen Aufbauten, U-Werten und Anteilen an transparenter Fassadenfläche

Somit konnte ich im Zuge des Forschungsprojektes, in Absprache mit dem

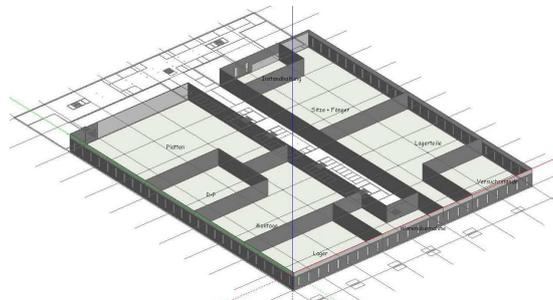


Abbildung 5.2: Zonenmodell der thermischen Simulation

Institut für Bauphysik, mehrere Fassadenvarianten in das angefertigte Simulationsmodell einbringen, und mit den entsprechenden Parametern simulieren lassen.

## 5.1 Daten und Kennwerte für die Simulation

Es war wichtig von jedem der in Tabelle 5.1 gelisteten Fassadensysteme zu mindestens eine Variante zu simulieren. Außerdem sollten entsprechend thermische Kennwerte gewählt werden, welche ein breites Spektrum der in Realität verbauten Fassaden abdeckt: von technisch höchst effizienten Systemen mit U-Werten von  $\sim 0,14\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  bis äußerst bescheiden ausgelegten Systemen mit einem U-Wert von  $\sim 0,39\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ . In Tabelle 5.1 ist eine Übersicht der simulierten Varianten ersichtlich. Für die Variante *Metall-Wandkassette* wurden gleich mehrere Modelle simuliert, mit jeweils unterschiedlich großen Anteilen an transparenter Fassadenfläche.

Die Grafik 5.1<sup>2</sup> visualisiert die in Tabelle 5.1 ersichtlichen Verhältnisse von transparenter zu opaker Fassadenfläche. Dies soll den Einfluss solarer Gewinne auf die Energiebilanz berücksichtigen und Auskunft über ein effizientes Verhältnis von opaker zu transparenter Hüllfläche geben.

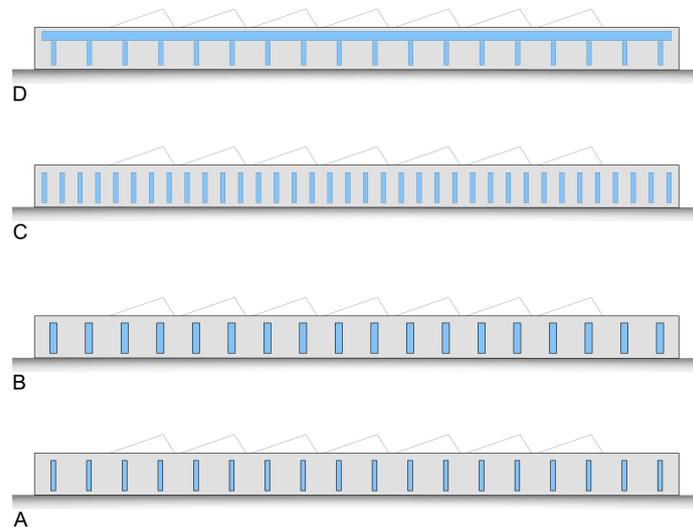


Abbildung 5.3: Anteil an transparenter Fassadenfläche  
A=10%, B=15%, C=20%, D=30%

<sup>2</sup>Bei der in Grafik 5.1 variierende Gebäudeansicht handelt es sich um eine Westansicht der Fertigungshalle mit nördlich orientierten Sheds. Das nördlich angrenzende Verwaltungsgebäude ist nicht dargestellt.

Die Angaben bauphysikalischer Kennwerte stammen entweder von technischen Datenblättern der Hersteller einzelner Produkte, oder aus einschlägiger Literatur wie *Energy Simulation in Building Design* von Clarke (2001) und wurden in Absprache mit K.Orehounig<sup>3</sup> für die Simulation festgelegt und sind in den Tabellen 5.2 und 5.3 zusammengefasst.

PU-Paneel Sandwich Fassade				
	Einheit	Stahlblech	PUR <sup>4</sup> Kern	Stahlblech
Dicke	$m$	0,0006	0,16	0,0006
Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \times K)$	42	0,025	42
Wärmekapazität	$J/(kg \times K)$	500	1300	500
Dichte	$kg/m^3$	7750	35	7750
Thermal absorptance		0,25		0,25
Solar absorptance		0,35		0,35
Visible absorptance		0,4		0,4
		Stalblech	Holzfaserd.	KLH_5s
Dicke	$m$	0,0006	0,14	0,12
Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \times K)$	42	0,039	0,13
Wärmekapazität	$J/(kg \times K)$	500	2100	1600
Dichte	$kg/m^3$	7750	135	500
Th. absorptance		0,25		0,8
Solar absorptance		0,35		0,7
Visible absor.		0,4		0,6
Polycarbonat Oberlicht (12 Kammern)				
Paneeldicke	$m$	0,06		
Wärmeleitfähigkeit (PC)	$W/(m \times K)$	0,21		
U-Wert (Paneel)	$W/(m^2 \times K)$	0,71		
Wärmekapazität	$J/(kg \times K)$	1170		
Dichte	$kg/m^3$	1200		
Solar transmittance		0,37		
Visible transmittance		0,31		
Infrared transmittance		0		

Tabelle 5.2: Daten für das Simulationsmodell mit PU-Paneele, KLH Holzfassade und PC-Paneele

<sup>3</sup>Abteilung Bauphysik und Bauökologie, Institut für Architekturwissenschaften - TU Wien.

Metallfassade auf Wandkassettenkonstruktion					
	Einheit	Trapezblech	Hinterlüftung	MW	Wandkassette
Dicke	$m$	0,00088	0,04	0,14	0,001
Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \times K)$	42	0,024	0,04	42
Wärmekapazität	$J/(kg \times K)$	500	1005	900	500
Dichte	$kg/m^3$	7750	1,2	20	7750
Thermal absorptance		0,25			0,25
Solar absorptance		0,35			0,35
Visible absorptance		0,4			0,4

Tabelle 5.3: Daten für das Simulationsmodell mit Metallfassade auf Wandkassettenkonstruktion

## 5.2 Vorgaben für das Simulationsmodell

Das Simulationsmodell der Fertigungshalle wurde in drei Zonen geteilt. Diese fordern durch ihre unterschiedliche Nutzung verschiedene Eingabeparameter für das Simulationsmodell. Dabei unterscheiden sich die Zonen vor allem durch die Anzahl der Arbeiter, die Betriebszeiten, sowie die durch Maschinen und Gebäudetechnik erzeugten internen Energiegewinne<sup>5</sup>. An Werktagen wird in der Produktionshalle, im Vergleich zu dem Verwaltungsgebäude, von einer Betriebszeit von  $24\frac{h}{d}$  ausgegangen:

Zone 1 [ $9095m^2$ ] im Süden, Montage und Lagerbereiche für 1 Arbeiter pro  $100m^2$  und interner Wärmegewinne von  $10W/m^2$  sowohl an Werktagen, als auch an Wochenenden.

Zone 2 [ $3026m^2$ ] im Nordosten, Arbeitsbereich der Lasermaschinen für 1 Arbeiter pro  $1000m^2$  und interner Wärmegewinne von  $37W/m^2$  an Werktagen, und  $0W/m^2$  an Wochenenden.

Zone 3 [ $2252m^2$ ] im Nordwesten, Produktionsbereich mit Maschinen für 1 Arbeiter pro  $100m^2$  und interner Wärmegewinne von  $49W/m^2$  an Werktagen, und  $5W/m^2$  an Wochenenden.

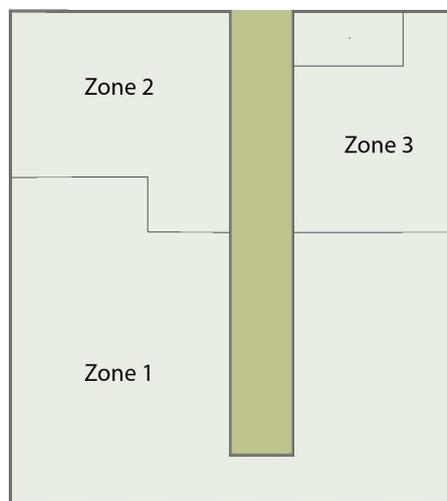


Abbildung 5.4: Zonen im Simulationsmodell, Projekt INFO

Man erkennt sehr deutlich, dass es auf Grund der unterschiedlichen Nutzungen, und damit verbundenen Ausstattungsstandards zu einem erhöhten Aufwand für die Regulierung des Innenraumklimas kommt. Einerseits ist ein sehr

<sup>5</sup>Die Kennwerte stammen aus Erfahrungswerten und Angaben der Projektpartner aus der Industrie, sowie berechnete Daten von Maschinenbauern und Haustechnikern.

Sommer	1	$h^{-1}$
Winter	0.2	$h^{-1}$
Beleuchtungskontrolle	ja	mind. $500lx$
Beschattungskontrolle	ja	wenn $\geq 120W/m^2$

Tabelle 5.4: Nach Simulation gewählte Parameter

großes Volumen (Zone 1) mit geringen internen Gewinnen im Winter zu klimatisieren. Andererseits gilt es Bereiche mit sehr hohen internen Gewinnen, wie Zone 3, im Sommer vor Überhitzung zu schützen. Da der Auftraggeber und Bauherr sich ein sehr flexibles und variables Raumprogramm wünscht, welches eine Neubelegung einzelner Nutzungszonen vorsieht, muss das Gebäude in allen Bereichen mit den bauphysikalischen Extrema umzugehen wissen.

Dies lässt vermuten, dass neben Optimierung der Gebäudehülle vor allem Bereiche der TGA und Gebäudeautomation, welche Belüftung, Beschattung und Beleuchtungskontrolle steuern, einen wesentlichen Hebel zur Energieeffizienz stellen. Aus diesem Grund hat das Bauphysik Institut der TU Wien in einer ersten Simulation die Auswirkungen verschiedener Luftwechselraten<sup>6</sup> in Sommer- und Winterperioden, sowie die Auswirkungen von Beschattungs- und Beleuchtungskontrolle untersucht.

Die Beschattungskontrolle steuert außenliegende Beschattungselemente, die vor transparenten Fassadenflächen montiert auf Sonnenstand und solare Bestrahlungsstärke<sup>7</sup> reagieren. Die Beschattungselemente werden von dem System (BAS) an der jeweiligen Fassade arretiert, sobald die Bestrahlungsstärke an der Fassade  $\geq 120W/m^2$  erreicht. Die Beleuchtungskontrolle steuert die künstliche Beleuchtung in Abhängigkeit von der Tageslichtverfügbarkeit. Dabei wird ein Mindestwert von  $500lx$ <sup>8</sup> für Arbeitsplätze vorgeschrieben.

Die in Tabelle 5.4 gelisteten Werte sind das Ergebnis einer Gegenüberstellung von neun Szenarien. Dabei wurde ermittelt, dass im Vergleich zu einem Szenario ohne Beleuchtungs- und Beschattungskontrolle sowie standardisierten Luftwechselraten von  $0,5h^{-1}$ , eine Reduktion der Heizlast um rund 50% und eine Reduktion der Kühllast um rund 20% möglich sind.

Die erhöhte Luftwechselrate im Sommer (sowohl unter Tags als auch Nachts) hilft mit der großen Abwärme der Maschinen besser umzugehen. Im Umkehrschluss wird durch eine niedrigere Luftwechselrate im Winter die Wärmeabgabe der Pro-

<sup>6</sup> Die Luftwechselrate ist ein Kennwert der aufzeigt wie oft das Nettoraumvolumen an Luft innerhalb einer Stunde ausgewechselt wird. Dies kann über mechanische oder natürliche Belüftungssysteme erfolgen. Die Einheit ist  $[h^{-1}]$ .

<sup>7</sup> engl.: *irradiance*

<sup>8</sup> Gibt Auskunft über die Beleuchtungsstärke. Die Einheit ist *lux*,  $1lx = 1lm/m^2$ .

duktionsketten für die Aufrechterhaltung eines komfortablen Innenraumklimas in der Heizperiode genutzt. Dass dabei eine ganzheitliche Belichtungssteuerung für Kunst- als auch Tageslicht in Kombination mit einer optimierten Belüftung zu geringeren Heiz- und Kühllasten führt, erscheint logisch. Für detaillierte Ergebnisse der Simulation, und die nun weiterverwendeten Vorgabewerte, verweise ich auf das entsprechende Paper (Dorn et al. 2011, Tabelle 1-3).

Für die weitere Arbeit halte ich fest, dass auf Grund der oben beschriebenen Simulationsergebnisse folgende Punkte zu beachten sind:

1. Die Werte aus Tabelle 5.4 werden für zukünftige Simulationen und Berechnungen als Soll-Parameter vorgegeben. Bei gleichen Vorgabewerten werden unterschiedliche Fassadenvarianten untereinander vergleichbar und bilden gleichzeitig ein optimales Szenario ab.
2. Steuerbare Beschattungselemente werden für jede Fassadenvariante als Optionalposition miteinbezogen.
3. Steuerbare Kippflügel werden für eine natürliche Belüftung in jeder Fassadenvariante miteinbezogen.

## Kapitel 6

# EEFA - Evaluierungstool für LCC und LCA von Fassaden

Im folgenden Abschnitt soll das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Tool **EEFA-ecological economic facade analysis**- vorgestellt werden, mit dessen Hilfe die in Kapitel 4 beschriebenen Systeme auf ihre Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen verglichen werden können. Abbildung 6.1 zeigt den Aufbau dieser Arbeit und den Funktionsablauf der Fassadenevaluierung. Dem in diesem Kapitel beschriebenen Tool EEFA liegen drei Datenbanken zu Grunde, um Fassadenaufbauten in unterschiedlichster Zusammenstellung ökonomisch und ökologisch miteinander vergleichen zu können.

Bei der Konzeption von EEFA war es wichtig dem Nutzer ein hohes Maß an Freiheit zu geben, um Einstellungen und Parameter der Bilanzierungen selbst zu wählen. Eine dynamische Umsetzung der Variantenauswahl, bis zu der Ergebnisvisualisierung sollte dem Betrachter sehr schnell und einfach Auskunft über

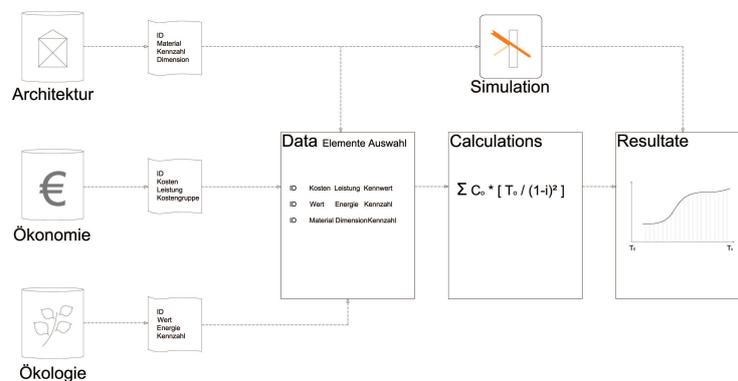


Abbildung 6.1: Excel-Tool EEFA Schemata

Vor- und Nachteile einzelner Fassadensysteme im Vergleich zu den Alternativen, liefern. Ziel war es in einem sehr simplen Menü Fassadenaufbauten inklusive Beschattungssystem in Anbetracht von modifizierbaren Globalparametern untereinander zu vergleichen und einer simultanen Ergebnisübersicht zuzuführen. Die globalen Parameter fassen die für die Kapitalwertmethode notwendigen Daten, sowie die projektbezogenen Daten zusammen und gelten für alle drei verglichenen Fassadensysteme.

Wichtige, vom Tool-Nutzer modifizierbare, Parameter sind unter anderem:

Ökonomie: Rahmenbedingungen

- [%] Preissteigerung Allgemeinkosten (BKI)
- [%] Preissteigerung Dienstleistungskosten (Reinigung, etc.)
- [%] Preissteigerung Energiekosten

Ökonomie: Projektbezogen

- [a] Betrachtungszeitraum
- [%] Zinsrate
- [a] Baubeginn
- [a] Gebäudebetriebsbeginn

Geometrie: Dimensionen

- [[m<sup>2</sup>]] Fassadenfläche gesamt
- [[m<sup>2</sup>]] Fassadenfläche opak
- [%] Fassadenfläche Polycarbonat
- [%] Fassadenfläche transparent
- [Stk.] öffentbare Fensterflügel pro Fenster

Konstruktiv: Bauteil

- [m] Aufbauten
- [Art] Materialwahl
- [Art] Standard
- [Art] additive Bauteile

Auf Grund der geforderten Flexibilität und Nutzerfreundlichkeit wurde *Microsoft Excel 2007* gewählt um ein simples Rechen- und Visualisierungstool zu erstellen. Nutzer können EEFA leicht für spezielle Nutzungen adaptieren oder weiterentwickeln. Die Excel-Datei gliedert sich in vier Evaluierungsbögen. Zu Be-



Abbildung 6.2: Excel-Tool Seite *Resultate Gesamt*

ginn der Bogen<sup>1</sup> *Resultate gesamt*: Hier werden Rahmenbedingungen eingetragen, die sowohl projektspezifisch, beispielsweise Objektdimensionen, als auch übergeordneter Natur sind, zum Beispiel allgemeine Preissteigerungen. Außerdem listet diese Tool-Seite eine Übersicht mit allen Fassadenvarianten und den unterschiedlich zu wählenden Aufbauten, Materialien, Standards und additiven Bauteilen. Hier kann der Nutzer die zu berechnenden Variantenkonfigurationen zusammenstellen. Die vergleichenden Resultate werden neben der Menüleiste dargestellt und stellen die gewählten Systeme gleich in ein ökonomisches und ökologisches Verhältnis zueinander.

Auf den Folgeblättern *Resultate A-C* werden die detaillierteren Ergebnisdarstellungen der einzelnen Varianten angezeigt. Ebenso werden hier die Kennwerte für die jeweilige Fassade abgebildet: der gewählte Aufbau und additive Bauteile, die globalen Rahmenbedingungen. Auf den folgenden Seiten soll das Tool EEFA vorgestellt werden, und dessen Funktionalität beschrieben. In Kapitel 7 *Evaluierung und Ergebnisse* werden die Ergebnisse einer beispielhaft gewählten Variantenkonstellation detailliert für jedes Fassadensystem beschrieben.

<sup>1</sup>Dabei handelt es sich um die für den Nutzer zugänglichen Tabreiter für den Vergleich von Fassaden. Im Hintergrund liegen unzählige Tabreiter mit den notwendigen Daten, Berechnungen und Übergaben.

## 6.1 Steuerung und Menüleiste

**Globale Parameter** ①

Baubeginn	2012
Betriebsnahme	2014
Betrachtungszeitraum	36
Zinssatz	5.0%
Preissteigerung Allgmeinkosten	2.5%
Preissteigerung Dienstleistungskosten (Reinigung, etc.)	3.0%
Preissteigerung Energie	4.0%

**Control Gebäudehülle-Daten** ②

	Süden	Osten	Westen	
Fassadenfläche	1200	1350	1350	3900
Opake Fassadenfläche	1020	1148	1147.5	3315
Transparente Fassadenfläche	15%	15%	15%	15%
Transparente Fassadenfläche	180	202.5	202.5	585
Anzahl Fenster	[Stk.]			97.5
öffnbare Flügel / Fenster	[Stk.]			0.5
Oberlicht PC	20%	20%	20%	
Oberlicht PC	240	270	270	780

**Variante A - Wandkassetten** ③

LCC €	1.310.855	3%
€/m <sup>2</sup>	336,12	

- Holz Schalungsbretterverkleidung lüftet mit 100mm WD
- Holz Schalungsbretterverkleidung lüftet mit 180mm WD
- 3-Schichtplatten hinterlüftet mit 100mm WD
- 3-Schichtplatten hinterlüftet mit 180mm WD
- Trapezblech hinterlüftet mit 120mm WD
- Trapezblech hinterlüftet mit 140mm WD
- Trapezblech hinterlüftet mit 180mm WD
- Trapezblech hinterlüftet mit 200mm WD
- Jalousien Außenlegend, motorbetrieben
- Lamellen horizontal, motorbetrieben
- Lamellen vertikal, motorbetrieben
- Motor für Sonnenschutz/öffnbares Fenster

**Variante B - PUR Sandwichpaneele** ④

LCC €	1.278.263	124%
€/m <sup>2</sup>	327,76	

- PUR Fassadenpaneel 80mm
- PUR Fassadenpaneel 100mm
- PUR Fassadenpaneel 140mm
- PUR Fassadenpaneel 180mm
- PUR Fassadenpaneel 200mm
- Jalousien Außenlegend, motorbetrieben
- Lamellen horizontal, motorbetrieben
- Lamellen vertikal, motorbetrieben
- Motor für Sonnenschutz/öffnbares Fenster

**Variante C - KLH** ⑤

LCC €	1.526.865	19%
€/m <sup>2</sup>	391,50	

- 120mm Holzfaserdämmplatte auf KLH-5s 100mm
- 160mm Holzfaserdämmplatte auf KLH-5s 100mm
- Jalousien Außenlegend, motorbetrieben
- Lamellen horizontal, motorbetrieben
- Lamellen vertikal, motorbetrieben
- Motor für Sonnenschutz/öffnbares Fenster
- 60mm Polycarbonat Hohlkammerplatten Oberlicht

Abbildung 6.3: EEFA-Menüleiste

Die im vorherigen Kapitel 6 erwähnte, erste EEFA Tool-Seite *Results Gesamt* ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Sie gibt mit der linker Hand angeordneten Menüleiste (Punkte ① bis ⑤) Kontrolle über die zu vergleichenden Szenarien. Simultan werden die resultierenden ökonomischen und ökologischen Auswertungen der Fassaden rechts (Punkten ⑥ bis ⑩) präsentiert.

In Abbildung 6.3 ist die Menüleiste deutlicher dargestellt, sowie die einzelnen Auswahlbereiche näher beschrieben:

① Die globalen Parameter setzen Rahmenbedingungen für die *Discounted Cash Flow* Berechnung für Investitions- und Folgekosten. Wird zum Beispiel ein späterer ‘Baubeginn’ gewählt, werden die in EEFA hinterlegten Kostendaten auf das Jahr des Baubeginns indiziert. Erst mit Wahl eines Zeitpunktes für ‘Betriebsnahme’ werden die Objekt-Folgekosten in der Kalkulation entsprechend indiziert und abgezinst berücksichtigt. Die Angabe von ‘Zinssatz’ und ‘Preissteigerungsindizes’<sup>2</sup> ermöglicht das korrekte Umrechnen von Geldwerten entlang der Zeitachse beziehungsweise des Lebenszyklus eines Gebäudes.

② Hier hat der Nutzer Kontrolle über alle Eingaben betreffend die Gebäudehülle, Mengen und Verhältnisse. Die Anzahl an Fenstern wird vom Tool automatisch anhand des getroffenen Anteils transparenter Fassadenfläche errechnet. Nachfolgend ist vom Nutzer noch festzusetzen, ob öffnbare Fensterflügel

<sup>2</sup>Inflation Allgmeinkosten, Inflation Dienstleistungskosten, Inflation Energiekosten.

vorgesehen sind, und wenn ja, wie viele öffenbare Fensterflügel pro Fenster zu kalkulieren sind. Für das Projekt *INFO* waren nur die drei Fassadenseiten Osten, Süden, Westen relevant (im Bilanzierungsrahmen), die Angaben für weitere Himmelsrichtungen können aber ohne größere Umbauten schnell im EEFA-Tool ergänzt werden.

③ Variante A mit Aufbauten:

Der Nutzer kann zwischen drei verschiedenen Verkleidungsarten mit unterschiedlicher Wärmedämmung wählen, sowie zwischen drei unterschiedlichen Sonnenschutzsystemen (motorbetrieben oder konventionell).

④ Variante B mit Aufbauten:

Der Nutzer kann zwischen PU-Sandwichpaneelen mit verschiedenen Dämmstärken wählen, sowie zwischen drei unterschiedlichen Sonnenschutzsystemen (motorbetrieben oder konventionell).

⑤ Variante C mit Aufbauten:

Der Nutzer kann zwischen KLH-Fassaden mit verschiedenen Dämmstärken wählen, sowie zwischen drei unterschiedlichen Sonnenschutzsystemen (motorbetrieben oder konventionell).

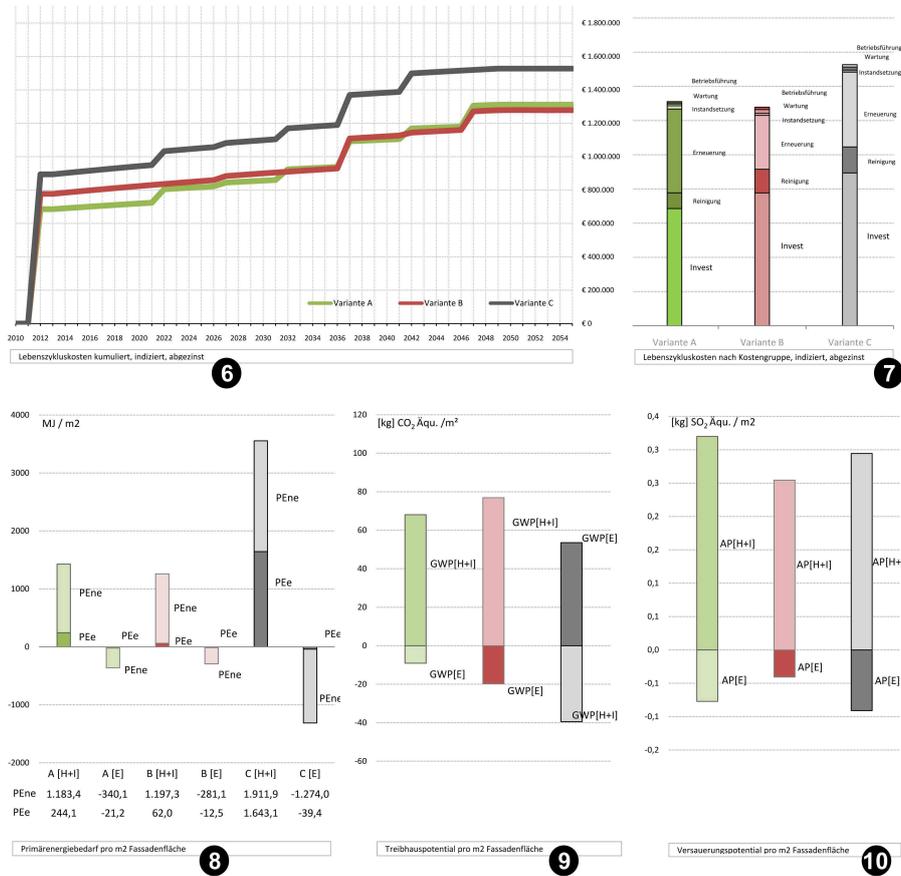


Abbildung 6.4: EEFA-Tool *Resultate Gesamt* - Ergebnisaufbereitung

## 6.2 Resultate und Auswertungen

Sofern in der Menüleiste (Abbildung 6.3) globale Parameter und Gebäudehülle-Daten eingegeben wurden, und gewünschte Fassadenvarianten (A-C) für einen Vergleich ausgewählt sind, werden auf den in Abbildung 6.2 dargestellten Grafiken und Diagrammen (Punkte ⑥ bis ⑩) die entsprechenden Ergebnisse eines ökonomischen und ökologischen Vergleichs aufbereitet.

In Abbildung 6.4 wurde versucht die große Fülle an Daten und Information des ökonomisch-ökologischen Vergleichs von drei Fassadenvarianten<sup>3</sup> detailliert und übersichtlich zu präsentieren. Die fünf Diagramme (Abbildung 6.4) zeigen folgende Ergebnisse:

⑥ LCC-Kurve mit Zeitpräferenz

<sup>3</sup> Farbschema: Variante A grün, Variante B rot, Variante C grau.

Es werden die Barwerte aller Kostengruppen kumuliert als Funktionsgraph entlang der Zeitachse visualisiert. Während auf der x-Achse die Jahreszahlen anzeigen in welchem Jahr Kosten anfallen, wird auf der y-Achse deren monetärer Wert angegeben. Die Kurven steigen<sup>4</sup> auf Grund der Objekt-Folgekosten: hier kann man die kumulierten Lebenszykluskosten nach betrachteten Jahren ablesen. In dem Beispiel in Abbildung 6.4 beginnt die Investition (Baubeginn) im Jahr 2012. In den folgenden 36 Jahren Betrachtungsdauer ergeben die Folgekosten, wie zum Beispiel durch Reinigung und Erneuerung verursacht, die dargestellte LCC-Kurve.

- ⑦ Hier werden analog zur LCC-Kurve die gesamten Lebenszykluskosten nach Kostengruppe kumuliert am Ende des Betrachtungszeitraumes dargestellt. Dabei ist zum Beispiel das Verhältnis von Investitionskosten zu Reinigungs- oder Erneuerungskosten, über 36 Jahre betrachtet, für jede Variante abzulesen. Es wird außerdem offensichtlich wie geringe Kostentreiber die Gruppen ‘Wartung’, ‘Instandsetzung’ und ‘technische Betriebsführung’ sind.

- ⑧ Primärenergiebedarf [ $MJ/m^2$  Fassadenfläche]

Die Grafik zeigt für alle drei Varianten den Primärenergiebedarf an erneuerbarer  $PEe$  und nicht erneuerbarer  $PEne$  Energie. Für jede Fassadenvariante sind zwei Balken repräsentativ: der Erste Balken [ $H+I$ ] zeigt den Bedarf an  $PEe$  und  $PEne$ , welcher für die Herstellung und Instandsetzung notwendig ist. Der zweite Balken [ $E$ ] zeigt den Bedarf an  $PEe$  und  $PEne$ , welcher für die Entsorgung notwendig ist.

Dabei fällt auf, dass auf Grund von Gutschriften<sup>5</sup> die meisten Varianten bei der Entsorgung einen negativen Wert an  $PEne$  erhalten, abhängig von Material und Masse.

- ⑨ Treibhauspotential GWP [ $kg CO_2/m^2$  Fassadenfläche]

Die Grafik zeigt für alle drei Varianten die Menge an  $CO_2$ -Äqv. Emissionen. Auch hier wird unterschieden zwischen  $GWP_{H+I}$  und  $GWP_E$ , das je nach Recyclierbarkeit zu einer Gutschrift führt. Auffallend ist hier auch die Holz-Variante C (grau hinterlegt). Da Holz in seiner Wachstumsphase als Kohlenstoffspeicher der Atmosphäre  $CO_2$  entzieht, ist die GWP Wirkungsbilanz für Herstellung und Instandsetzung negativ. Die gewonnene Gutschrift wird erst bei thermischer Verwertung in einer MVA egalisiert.

<sup>4</sup> In dem Fall von Gewinnen durch Einspeisung von Strom, welcher durch PV Anlagen erzeugt wurde, können die Lebenszykluskosten logischerweise auch sinken.

<sup>5</sup> Eine Gutschrift kann zum Beispiel durch erzeugte Heizenergie in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) entstehen; oder wenn ein Material recycelt werden kann.

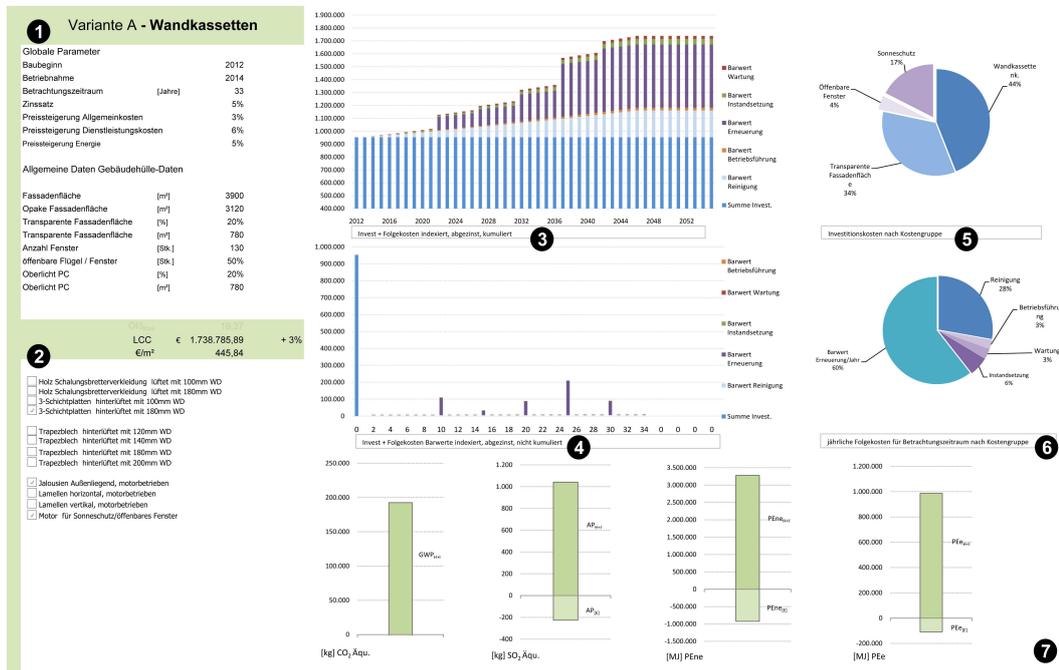


Abbildung 6.5: EEFA Seite Results A Einzelergebnisaufbereitung

⑩ Versauerungspotential AP [kg SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>Fassadenfläche]

Die Grafik zeigt für alle drei Varianten die Menge an SO<sub>2</sub>-Äqv. Emissionen. Auch hier wird unterschieden zwischen AP<sub>H+I</sub> und AP<sub>E</sub>, das je nach End-of-Life (EOL)-Szenario zu Gutschriften führen kann.

### 6.3 Detaillierte Einzelauswertung

Wie in Kapitel 6.2 beschrieben, und in Abbildung 6.2 dargestellt, lassen sich die drei gewählten Fassadensysteme auf der EEFA Tool-Seite Results Gesamt sehr schnell mit einander vergleichen. Möchte der Nutzer aber über die grobe Gesamtansicht hinaus weitere, detaillierte Ergebnisaufschlüsselungen, so kann er sich auf weiteren drei Tool-Seiten (Results A - C) zu jeder Variante näher beschriebene Einzelergebnisse anzeigen lassen (Abbildung 6.5). In diesem Kapitel werden die detaillierten Einzelauswertungssseiten für jede Fassadenvariante beschrieben.

① Übersicht globale Parameter

Eine Übersicht der gewählten Rahmenbedingungen sowie Gebäudedaten.

- ② Übersicht Planungselemente  
Zeigt auf, welche Aufbauten und Planungselemente gewählt wurden. Lässt nachträgliche Modifikationen auch zu.
  
- ③ LCC Histogramm kumuliert nach Kostengruppe  
Es werden die Barwerte aller Kostengruppen kumuliert als Histogramm visualisiert. Während auf der x-Achse die Jahreszahlen anzeigen in welchem Jahr Kosten anfallen, wird auf der y-Achse deren monetärer Wert angegeben. Die Balken wachsen auf Grund der Objekt-Folgekosten, so lange wie es der Betrachtungszeitraum vorgibt – hier können die kumulierten Lebenszykluskosten nach Kostengruppe und betrachtetem Jahr ablesen werden.
  
- ④ LCC Histogramm nicht kumuliert  
Alle Barwerte der verschiedenen Kostengruppen werden entsprechend ihres jährlichen Eintretens und ihres monetären Gewichts in dem Diagramm dargestellt.
  
- ⑤ Aufschlüsselung der Investitionskosten nach Bauteilgruppe  
In dem Tortendiagramm werden die einzelnen Fassadenbauteile anteilmäßig aufgeschlüsselt. Es ist abzulesen, wie viel Prozent der Investitionskosten die unterschiedlichen Bauteilgruppen ausmachen.
  
- ⑥ Aufschlüsselung der Folgekosten nach Kostengruppe  
In dem Tortendiagramm werden die einzelnen Folgekostengruppen anteilmäßig aufgeschlüsselt. Es ist abzulesen, wie viel Prozent der jährlichen Folgekosten die unterschiedlichen Kostengruppen ausmachen. Dabei ist anzumerken dass es sich dabei um einen Durchschnittswert handelt und die Kapitalwerte durch die betrachteten Jahre (Betrachtungszeitraum) dividiert werden. Folglich bildet das Diagramm kein bestimmtes Bemessungsjahr ab, sondern stellt die in Zukunft durchschnittlich aufzuwendenden Kosten in ein Verhältnis.
  
- ⑦ Umweltwirkungen der Herstellung, Instandsetzung und EOL  
Dargestellt werden Treibhauspotential, Versauerungspotential, Primärenergiebedarf erneuerbar und Primärenergiebedarf nicht erneuerbar für die gewählte Fassadenkonstruktion. Dabei sind Herstellung und Instandhaltung *H+I* dem End of Life *EOL* Szenario gegenübergestellt.

# Kapitel 7

## Evaluierung und Ergebnisse

### 7.1 Simulationsergebnisse

Bei der in Kapitel 5 beschriebenen Simulation sind die in Tabelle 5.1 gelisteten Varianten als Hüllflächen für die Produktionshalle simuliert worden. Die dynamische Simulation resultierte in spezifischen Heizlasten und Kühllasten für jede der in Abbildung 5.4 dargestellten Gebäudezonen. Bei Wahl unterschiedlicher Hüllflächen (variiere Wandaufbauten und variiere Anteile an transparenter Fassadenfläche) zeigt sich in den folgenden Tabellen die Auswirkung von Wandaufbau und transparenter Fassadenfläche auf den flächenbezogenen Energiekennwert für Heizen und Kühlen.

Zusätzlich zu den beschriebenen Variantenunterschieden konnte auch noch eine zweite Reihe an Simulationen mit veränderten Vorgabewerten für das Simulationsmodell erstellt werden. Während die in Tabelle 7.1 aufgezeigten Daten auf einem Simulationsmodell mit automatisierter Beschattung und Fensterlüftung basieren, liegt den Resultaten der in Tabelle 7.2 ein Simulationsmodell ohne automatisierter Beschattung und Fensterlüftung zu Grunde.

Betrachten wir zuerst die Ergebnisse der Simulationen mit automatisierter Beschattung und Fensterlüftung. Wenn wir die Resultate von Tabelle 7.1 nun näher betrachten, kann man ein paar interessante Erkenntnisse daraus ableiten. Während zwischen den Varianten<sup>1</sup> ①WK, ②PU und ③Holz gravierende Unterschiede bezüglich deren *U-Werte* bestehen, differenzieren die Heiz- und Kühllasten für das simulierte Gebäude um weniger als 4%! Die Szenarien ohne automatisierter Beschattungs- und Fensterlüftungssteuerung liegen rund 23% über den Szenarien mit entsprechendem building automation system.

---

<sup>1</sup> Mit einem Anteil von 15% transparenter Fassadenfläche.

Wenn nun die simulierten Varianten mit unterschiedlich großer, transparenter Fassadenfläche mit einander verglichen werden, ist eine verblüffend geringe, aber erkennbare Tendenz abzulesen:  $\textcircled{A}$ WK (10% tFF)<sup>2</sup>,  $\textcircled{A}$ WK (15% tFF),  $\textcircled{A}$ WK (20% tFF) und  $\textcircled{A}$ WK (30% inkl PC tFF) besitzen alle den gleichen Fassadenaufbau und variieren nur in dem Anteil an transparenter Fassadenfläche. Obwohl die Variante mit 10% tFF. gesamt die niedrigsten, flächenbezogenen Energielasten hat, steigen diese bei Erhöhung des Anteils an transparenter Fassadenfläche nur geringfügig, bei 20% tFF. in einem Maße von rund +3,14% H& K-Lasten gegenüber der am besten abschneidenden Variante. Erst die Wahl von 30% tFF. in Verbindung mit einem Polycarbonat-Oberlichtband<sup>3</sup> steigert die H & K-Lasten um ca. 7% gegenüber der ersten Variante.

---

<sup>2</sup> Abkürzung tFF. . . transparente Fassadenfläche.

<sup>3</sup> Der U-Wert des mit 20% der Fassadenfläche einnehmenden PC Hohlkammerpaneel Oberlichtbandes beträgt  $0,71\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ .

Tabelle 7.1: Simulationsergebnisse für Fassadenvarianten mit automatisierter Beschattung und Fensterlüftung

	Ⓐ WK	Ⓐ WK	Ⓐ WK	Ⓐ WK	Ⓐ WK	Ⓐ WK	Ⓐ WK	Ⓐ WK	Ⓑ PU	Ⓒ Holz
Fensterfläche	10%	15%	20%	30% inkl.PC	15%				15%	15%
U-Wert	$W/m^2K$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,14	0,21
H&K-Lasten	$kWh/a$	<b>617.446</b>	<b>639.602</b>	<b>636.819</b>	<b>661.525</b>	<b>619.666</b>	<b>617.668</b>	<b>617.666</b>	<b>619.666</b>	<b>617.668</b>
$\Delta$			<b>+3,59%</b>	<b>+3,14%</b>	<b>+7,14%</b>	<b>+0,36%</b>	<b>+0,04%</b>			
Heizlast	$kWh/m^2a$	9,99	10,57	11,09	9,97	9,75	9,97	9,75	9,97	9,97
$\Delta$		<b>+2,5%</b>	<b>+8,4%</b>	<b>+13,8%</b>	<b>+2,3%</b>				<b>+2,2%</b>	
Zone 1	$kWh/m^2a$	15,51	16,41	17,22	15,47	15,13	15,49	15,13	15,49	15,49
Zone 2	$kWh/m^2a$	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Zone 3	$kWh/m^2a$	0,69	0,72	0,77	0,72	0,66	0,6	0,66	0,66	0,6
Kühllast	$kWh/m^2a$	32,96	33,93	33,22	36,05	33,37	33,01	33,37	33,37	33,01
$\Delta$			<b>+2,9%</b>	<b>+0,8%</b>	<b>+9,4%</b>	<b>+1,2%</b>	<b>+0,1%</b>	<b>+1,2%</b>	<b>+1,2%</b>	<b>+0,1%</b>
Zone 1	$kWh/m^2a$	8,46	8,97	9,08	11,91	8,71	8,54	8,71	8,71	8,54
Zone 2	$kWh/m^2a$	46,07	49,34	45,99	47,83	46,46	46,01	46,46	46,46	46,01
Zone 3	$kWh/m^2a$	114,32	114,04	113,54	117,74	115,35	114,36	115,35	115,35	114,36

Tabelle 7.2: Simulationsergebnisse für Fassadenvarianten ohne automatisierter Beschattung und Fensterlüftung

		Ⓐ WK	Ⓐ WK	Ⓑ PU	Ⓒ Holz					
Fensterfläche		10%	15%	20%	30% inkl.PC	15%				
U-Wert	$W/m^2K$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,14	0,21			
H&K-Lasten	$kWh/a$	<b>799.204</b>	<b>821.079</b>	<b>839.351</b>	<b>865.267</b>	<b>822.640</b>	<b>815.441</b>			
	$\Delta$		<b>+2,74%</b>	<b>+5,02%</b>	<b>+8,27%</b>	<b>+2,93%</b>	<b>+2,03%</b>			
Heizlast	$kWh/m^2a$	4,5	4,6	4,7	4,5	4,1	4,3			
	$\Delta$	<b>+9,1%</b>	<b>+11,7%</b>	<b>+14,5%</b>	<b>+10,2%</b>		<b>+3,6%</b>			
Zone 1	$kWh/m^2a$	6,96	7,12	7,30	7,02	6,37	6,61			
Zone 2	$kWh/m^2a$	0,28	0,28	0,29	0,28	0,28	0,27			
Zone 3	$kWh/m^2a$	0,18	0,20	0,21	0,21	0,16	0,14			
Kühllast	$kWh/m^2a$	51,1	52,5	53,7	55,7	53,1	52,5			
	$\Delta$		<b>+2,8%</b>	<b>+5,0%</b>	<b>+8,9%</b>	<b>+3,9%</b>	<b>+2,7%</b>			
Zone 1	$kWh/m^2a$	22,4	24,27	25,80	28,11	24,59	23,98			
Zone 2	$kWh/m^2a$	66,5	67,01	67,40	68,34	67,62	67,07			
Zone 3	$kWh/m^2a$	146,4	147,21	147,87	149,93	148,86	147,93			

## 7.2 Variantenvergleich

Wie im Laufe dieser Arbeit erklärt wurde, ist das Ergebnis dieser Arbeit ein erweiterbares Tool für den Vergleich von Industriebaufassaden betreffend deren Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen. Das in Kapitel 6 *EEFA - Evaluierungstool* beschriebene Excel-Tool lässt, auf Grund der Vielzahl der einstellbaren Parameter, eine unbegrenzte Menge an berechenbaren Szenarien zu. Beispielfähig soll in diesem letzten Kapitel ein plakativer Vergleich von drei möglichen Fassadenkonstruktionen für das *Projekt INFO* von drei möglichen Fassadenkonstruktionen ermittelt werden.

Die drei zu vergleichenden Fassadensysteme aus Holz, Metallkassetten, und Sandwichpaneelen sind in Abbildung 4.2, 4.4 und 4.6 dargestellt und in Kapitel 4 Fassadensysteme beschrieben. Folgende globale Rahmenbedingungen (Tabelle 7.3) werden für die Analyse festgesetzt:

Globale Parameter	
Baubeginn	2012
Betriebnahme	2014
Betrachtungszeitraum	36 <i>Jahre</i>
Zinssatz	5,0%
Preissteigerung Allgemeinkosten	2,5%
Preissteigerung Dienstleistungskosten	3,0%
Preissteigerung Energie	4,0%

Tabelle 7.3: Globale Parameter

Der Betrachtungszeitraum scheint mit 36 Jahren sehr hoch gewählt für ein Betriebsgebäude. Jedoch zeigt die Praxis, dass es gerade bei Industriebauten üblich ist, den Gebäudebetrieb und die Lebensdauer des Gebäudes so weit wie möglich in zu strecken. Außerdem ist bei der Kalkulation von Lebenszykluskosten vor allem der Zeitraum interessant, in den wichtige Erneuerungen fallen. Der Diskontzinssatz ist mit 5,0% knapp unter dem von ÖGNI (2009) vorgeschlagenen Wert von 5,5%. Dieser wird im Normalfall mit dem Bauherren und dessen Controlling festgesetzt.

In Tabelle 7.4 sind die Kennwerte der Fassade des *INFO*-Betriebsgebäudes, welches im Kapitel Gebäudesimulation beschrieben wird, dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass die Nordfassade nicht Teil der Analyse ist, da an das nördliche Ende des Betriebsgebäudes ein Atrium des Verwaltungsgebäudes grenzt und somit ein Fassaden- und Gebäudeteilwechsel statt findet. Diese Arbeit befasst sich nur mit den Fassaden der Produktionshalle und beschränkt sich in diesem Sinne auf die drei angegebenen Orientierungen des Projekt *INFO*.

		Süden	Osten	Westen	Gesamt
Fassadenfläche	$m^2$	1200	1350	1350	3900
Opake Fassadenfläche	$m^2$	1020	1148	1148	3315
Transp. Fassadenfläche	%	15%	15%	15%	15%
	$m^2$	180	203	203	585
Anzahl Fenster	<i>Stk.</i>				98
öffnbare Fensterflügel	<i>Stk.</i>				49

Tabelle 7.4: Daten der Hüllfläche

Variante A	Stahlkassettenwand
Fassade	Holz 3-S Platten, 180mm Mineralfaser WD hinterlüftet
Fenster	Alu-Kunststoff, Kippflügel elektrisch
Beschattung	Alu-Lamellen horizontal, motorbetrieben
Variante B	PU Sandwich
Fassade	PU Fassadenpaneel 100mm
Fenster	Alu-Kunststoff, Kippflügel elektrisch
Beschattung	Jalousien außenliegende, motorbetrieben
Variante C	Holz - KLH
Fassade	Wellblech, 120mm Holzfaser WD auf 100mm KLH
Fenster	Alu-Kunststoff, Kippflügel elektrisch
Beschattung	Alu-Lamellen vertikal, motorbetrieben
Zusatz	Polycarbonat Oberlichtband, Hohlkammerpaneelen

Tabelle 7.5: Gewählte Aufbauten für LCC und LCA

In Tabelle 7.5 sind die gewählten Fassadenaufbauten inklusive des gewählten Beschattungssystems gelistet. Um einen sinnvollen Vergleich zu erstellen, wurde von jeder Variante ein Aufbau gewählt der circa einen U-Wert  $0,27 - 0,32 \frac{W}{m^2K}$  hat. Die Stahlkassetten-Konstruktion sticht mit 180mm Mineralwolleddämmung etwas heraus. Dieser Aufbau erreicht jedoch laut Herstellerangaben von ISO-VER (2010) auf Grund der konstruktiv bedingten Wärmebrücken nur mit so großen Dämmstärken einen effektiven U-Wert von  $0,32 \frac{W}{m^2K}$ . Für die Variante B, *PUR Sandwich Paneel*, wurde ein Fassadenprofil mit 100mm Kerndicke gewählt. Obwohl die Herstellerangaben<sup>4</sup> teilweise deutlich unter dem angestrebten U-Wert von 0,32 liegen, ist auch hier auf Grund der Befestigung, sowie der Fuge<sup>5</sup> zwischen den Paneelen in der Praxis ein effektiv höherer U-Wert

<sup>4</sup>Zum Beispiel Brucha PU Fassade FP-W 100 oder Hoesch Isowand Vario 104.

<sup>5</sup>Variable Fugengeometrie von Sandwichelementen: schmale Schattenfuge mit sichtbarer/verdeckter Befestigung; ohne Fuge im Rhythmus der Trapezprofilierung - mit sichtbarer Befestigung; ohne Fuge, durch Überlappung der Hochsicke (Koschade 2002)

für die opake Fassade zu wählen (Koschade 2004).

Variante C, *Kreuzlagenholz mit Holzfaserdämmplatten*<sup>6</sup>, erreicht bei oben genannten Bauteildimensionen einen U-Wert von circa  $0,3 \frac{W}{m^2K}$ .

Da alle drei Varianten vergleichbare, thermische Eigenschaften besitzen, lässt sich auch mit den selben Annahmen betreffend Energiebedarf des Gebäudes kalkulieren. Die in Kapitel 5 *Gebäudesimulation* ermittelten Vorgaben gelten auch bezüglich gebäudeinterner und solarer Wärmegewinne. Deshalb wurde für jede der drei Varianten ein motorisiertes Beschattungssystem gewählt. Trotz der durch die gesteuerte Fensterlüftung und Verschattung erreichten Energieoptimierung<sup>7</sup> im Gesamtgebäude, ist ein Wermutstropfen, dass sowohl die für die Nachtlüftung eingesetzten öffnbaren Fensterflügel, als auch die automatisch gesteuerten Beschattungselemente elektronisch betrieben werden müssen. Außerdem sind bewegliche Elemente und deren Antrieb (Motor) aufwendiger was die Wartung und Instandsetzung betrifft. Um die Vor- und Nachteile verschiedener Verschattungssysteme zu analysieren, wurde jede der drei Fassaden mit unterschiedlichen Sonnenschutzelementen bestückt.

## Resultate

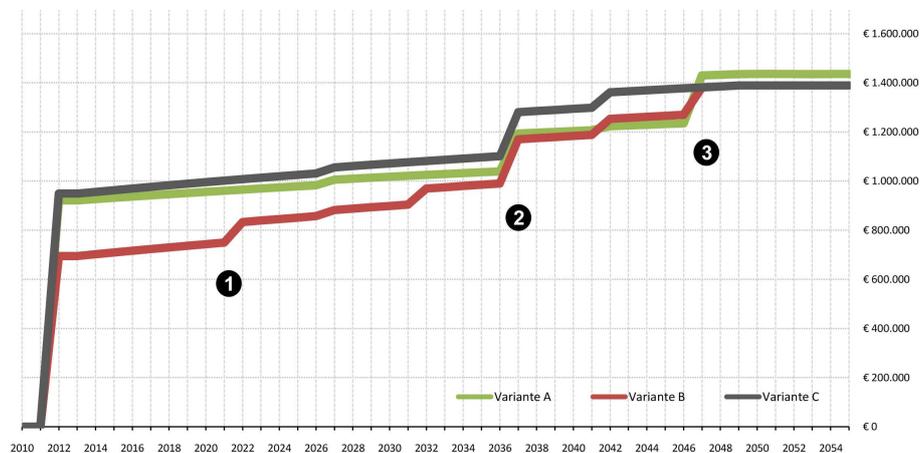


Abbildung 7.1: LCC Kurven kumuliert; Betrachtungszeitraum: 36 Jahre

In Abbildung 7.1 sind die Lebenszykluskosten der drei Fassaden als zeitliche Funktion kumuliert aufgetragen. Während die PU-Paneelfassade, **B**, mit knapp 694.400 € Investitionskosten deutlich billiger als die Varianten **A** und **C** ist,

<sup>6</sup>mit  $\lambda = 0,0045 \frac{W}{mK}$

<sup>7</sup>Siehe Ergebnisse in Kapitel 7.1.

sind die Holz- und Stahlkassettenvarianten mit 921.300 € und 948.900 € um rund 25% – 27% teurer bei den Herstellungskosten im Jahr 2012 (Tabelle 7.6).

	Investitionskosten	Δ
Variante ① Stahlkassetten	921.300 €	+24,6%
Variante ② PU-Paneel	694.400 €	
Variante ③ KLH	948.900 €	+26,8%

Tabelle 7.6: Investitionskosten im Jahr 2012

Dabei machen die einzelnen Bauteilgruppen einen unterschiedlich hohen Anteil an den unterschiedlichen Investitionskosten aus. In Abbildung 7.2 sind von allen drei Varianten die Investitionskosten entsprechend ihrer Bauteilgruppen und deren Anteile aufgesplittet. Bei Variante ② macht die opake Fassadenfläche aus PU-Paneelen nur 36% der Invest-Kosten aus. Im Vergleich dazu: die Wandkassettenkonstruktion von Variante ① macht 48% der Investitionskosten aus. Da die Fensterfläche und die Anzahl an offenbaren Fensterflügeln global für die drei Varianten gleich hoch festgesetzt wurde, sieht man, dass die niederen Herstellungskosten der PU-Paneelfassade vor allem auf Grund der günstigen PU-Paneele, sowie der günstigeren Beschattungselemente (Außenjalousien) zu Stande kommen.

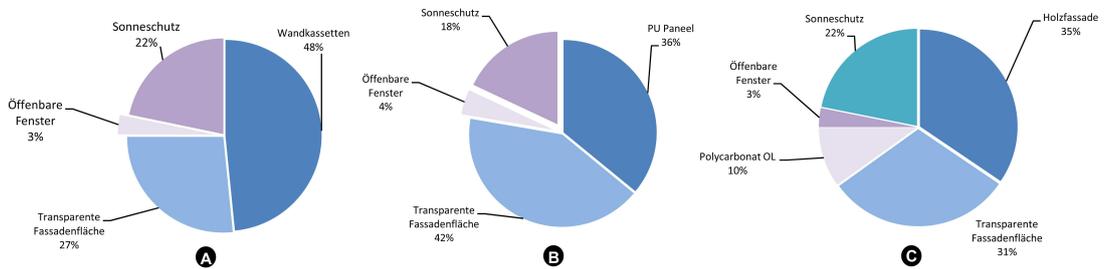


Abbildung 7.2: Anteile der Bauteilgruppen an den Herstellungskosten von Variante ①, ②, ③

### Gebäudebetrieb

Der Gebäudebetrieb startet im Jahr 2014. Ab diesem Zeitpunkt werden Folgekosten für Wartung, Instandsetzung, Reinigung, Betriebsführung und Erneuerung in Betracht gezogen. Die vier erstgenannten Kostengruppen fallen jährlich an; Erneuerungskosten nur bei Versagen einzelner Bauteile, wenn deren Lebensdauer endet. Wenn wir uns nun in Abbildung 7.1 die LCC-Entwicklung von Variante ① und Variante ③ ansehen, stellt man fest, dass für die graue Variante ③ mit zunehmender Betriebszeit höhere Folgekosten anfallen, als für die

ähnlich hohe Investitionskosten-tragende Variante ①. Obwohl beide Varianten die selbe Anzahl an Fenstern<sup>8</sup> besitzen, divergieren deren Lebenszykluskostenkurven.

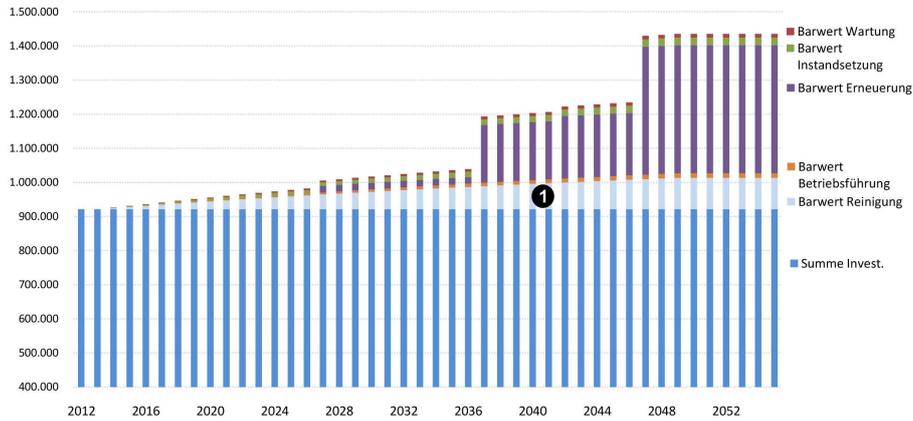


Abbildung 7.3: Variante A: LCC kumuliert nach Jahr und Kostengruppe

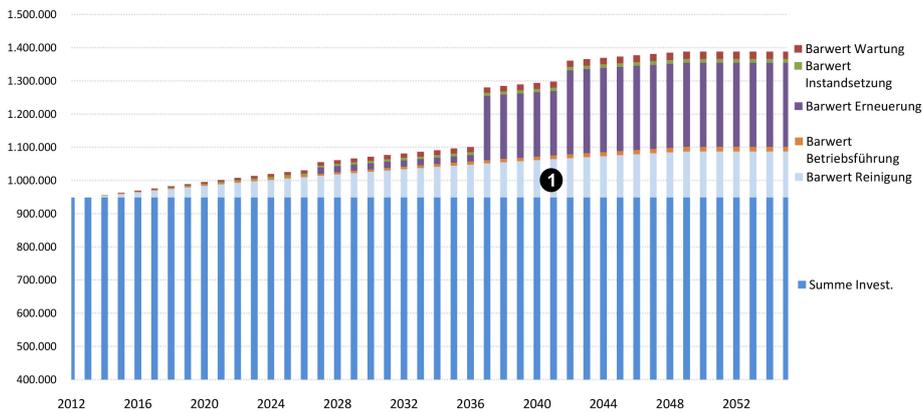


Abbildung 7.4: Variante C: LCC kumuliert nach Jahr und Kostengruppe

Den Grund dafür erkennt bei Betrachtung der detaillierten Darstellungen der Lebenszykluskosten nach Kostengruppe in Abbildung 7.3 und 7.4. Schon bevor im Jahr 2027 die ersten Erneuerungen anfallen, steigen die Kosten auf Grund von Reinigung bei Variante ③ deutlich schneller. Dies hat mit der Fassadenverkleidung der beiden Fassaden zu tun: Während Variante ① eine Holzverkleidung<sup>9</sup> besitzt, hat Variante ③ Wellblech als Verkleidung der hinterlüfteten Fassadenkonstruktion. Eine naturbelassene Holzverkleidung muss, sofern dem konstruktiven

<sup>8</sup>Die Glasreinigung ist ein erhebliche Kostenfaktor. Außerdem sind bewegliche Bauteile, wie elektronisch öffnere Fensterflügel und Beschattungselemente wartungsintensiv.

<sup>9</sup>Nadelholz 3-Schichtplatten

Holzschutz Gehör geschenkt wurde, laut Fitl, Gamerith, Grill, Höfler & Schober (2007) weder einer regelmäßigen Reinigung noch einer aufwendigen Wartung unterzogen werden. Eine Wellblechfassade muss in regelmäßigen Abständen von ansetzendem Staub und Verunreinigungen befreit werden - daher fallen zusätzlich zu der Glasreinigung der Fenster auch Reinigungskosten für die opake Fassadenfläche an.

Die in Abbildung 7.3 und 7.4 mit ① gekennzeichneten Reinigungskostenunterschiede entstehen trotz der unterschiedlichen Sonnenschutzsysteme. Während, wie in Tabelle 7.5 erläutert, Variante ① horizontale Lamellen als Sonnenschutz einsetzt, ist Variante ③ mit vertikalen Lamellen ausgestattet. Die Reinigungskosten für vertikale Lamellen liegen, auf Grund der geringeren Schmutzanhäufung, um 50% unter denen von horizontalen Lamellen. Die Reinigungskosten von opaken Fassadenverkleidungen machen dementsprechend einen beachtlichen Folgekostentreiber aus.

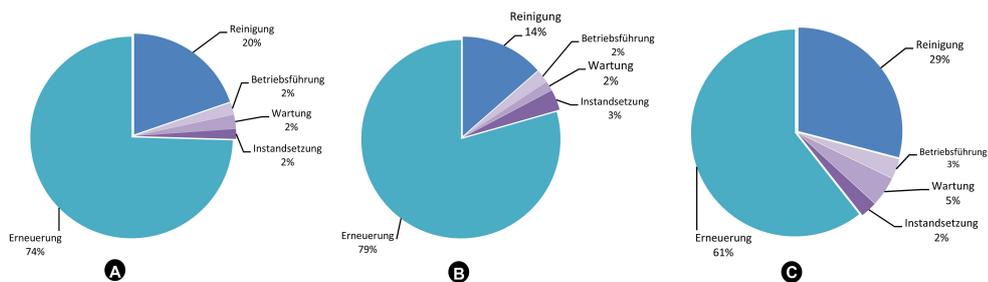


Abbildung 7.5: Nutzungskosten pro Jahr von Variante ①, ②, ③

### Jährliche Objekt-Folgekosten

In Abbildung 7.5 sind die jährlichen Folgekosten der drei Varianten anteilig dargestellt. Während die Kostengruppen *Wartung*, *Instandsetzung*, *Reinigung* und *Betriebsführung* tatsächlich flächenabhängig, jährlich anfallende Kosten sind, treten Erneuerungen azyklisch auf. Um diesen Kennwert auf eine jährliche Abschreibung umzurechnen, wurden die über den Betrachtungszeitraum anfallenden Erneuerungskosten<sup>10</sup> aufsummiert und durch die Anzahl der betrachteten Jahre dividiert. Damit spiegelt Abbildung 7.5 kein real auftretendes Jahr wieder, sondern einen jahresbezogenen Kennwert für die auftretenden Objektfolgekosten.

Bei einem Betrachtungszeitraum von 36 Jahren machen bei der PU-Paneel Fassade ② die Erneuerungen mit jährlich rund 79% der Folgekosten den größten Anteil aus. Im Vergleich zu den anderen zwei Varianten ist hier der Wert so

<sup>10</sup>Dabei handelt es sich um die indizierten, diskontierten Erneuerungskosten.

hoch, da der gewählte Sonnenschutz (außenliegende Jalousien) eine Lebensdauer von 10 Jahren hat, während die vertikalen und horizontalen Alu-Lamellen von Variante ① und ② eine Lebensdauer besitzen, welche den LCC Betrachtungszeitraum übersteigen. Dies bedeutet für Variante ③, dass der Sonnenschutz eine Ersatzhäufigkeit von 3 hat. Folglich sind die Erneuerungskosten proportional höher als bei den verglichenen Systemen. Dies wird in Abbildung 7.6 sehr deutlich<sup>11</sup>.

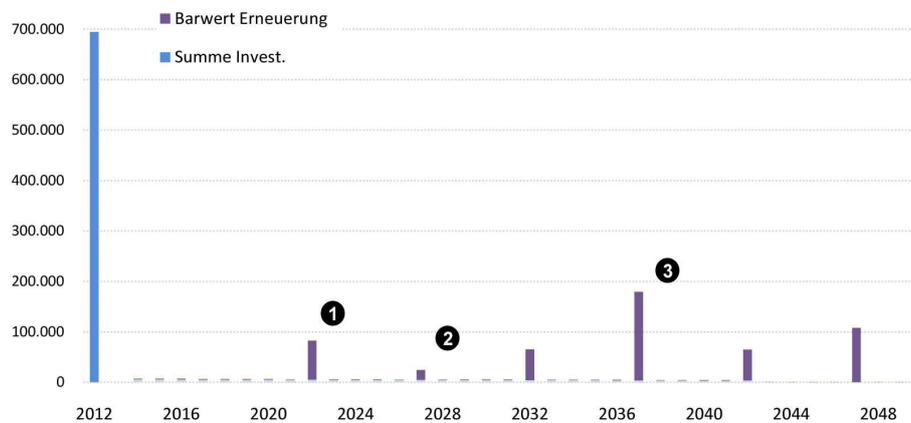


Abbildung 7.6: Variante ③ LCC, nicht kumuliert

Punkt ① zeigt nach 10 Betriebsjahren die Erneuerung der Außenjalousien. Diese tritt nach weiteren 10 Jahren im Jahr 2032 wieder auf, diesmal auf Grund der Zeitpräferenz mit einem geringeren Barwert.

Punkt ② spiegelt die Erneuerungskosten (alle 15 Jahre) der elektrischen Motoren für die automatisch gesteuerten Beschattungselemente und öffnbaren Fensterflügel wieder. Diese treten ebenfalls im Jahr 2042 auf.

Punkt ③ illustriert, dass im Jahr 2037, nach 25 Betriebsjahren, die Erneuerungen von Fenstern sowie öffnbaren Fensterflügel zusammenfallen. Dies macht zeitlich umgelegt, mit einem Barwert von 175.000 €, die größte Erneuerungsinvestition der Variante ③ aus.

### Zusammenfassung des exemplarischen LCC-Vergleichs

Obwohl die Investitionskosten der gewählten Fassaden sehr unterschiedlich ( $\Delta 26\%$ ) ausfallen, liegen die Lebenszykluskosten nach 36 Jahren innerhalb von circa 3%.

Die unterschiedlichen Objekt-Folgekosten egalisieren, besonders auf Grund von Reinigung und Erneuerung, die ursprünglichen Differenzen bei den Herstel-

<sup>11</sup>Die proportionale Gegenüberstellung von Invest- und Folgekosten zwischen den einzelnen Varianten ist in Abbildung 7.7 visualisiert.

	$LCC_{36}$	$\Delta$
Variante A) Stahlkassetten	1.435.300 €	+3%
Variante B) PU-Paneel	1.389.200 €	
Variante C) KLH	1.388.700 €	

Tabelle 7.7: Lebenszykluskosten nach 36 Jahren

lungskosten (Abbildung 7.7 *Lebenszykluskosten der Varianten nach 36 Jahren*). Dies zeigt äußerst plakativ auf, welch enormen Hebel Planer bei der Wahl von Komponenten und der Konzeption in der frühen Planungsphase haben.

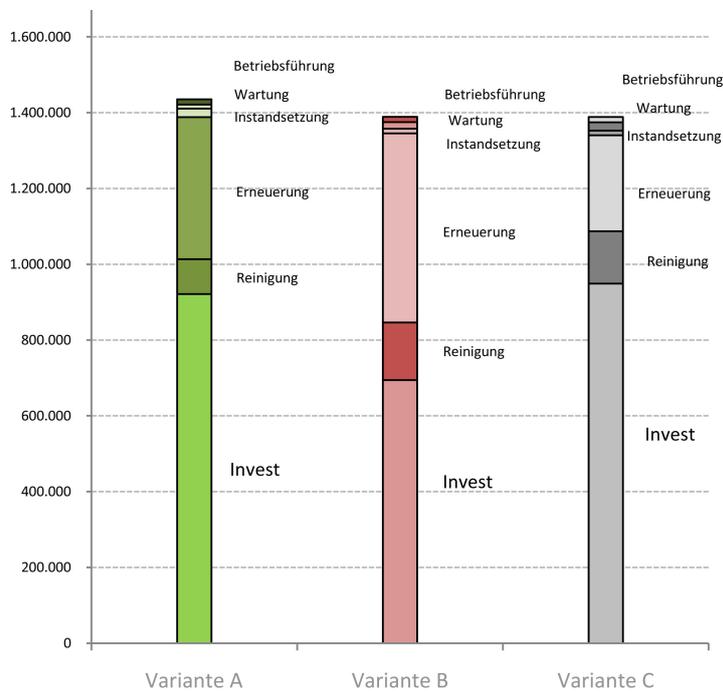


Abbildung 7.7: LCC nach 36 Jahren und Kostengruppen der Varianten

### Zusammenfassung des exemplarischen LCA-Vergleichs

Neben den in den vorherigen Kapiteln sehr ausführlich analysierten, ökonomischen Kennwerten sollten die ökologischen Umweltfaktoren auch eine Rolle bei der Betrachtung unterschiedlicher Fassadensysteme spielen<sup>12</sup>.

Für die Evaluierung wurden die Umweltindikatoren *Treibhauspotential* (GWP), *Versauerungspotential* (AP) und *Primärenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar* ( $PE_e$ ,  $PE_{ne}$ ) betrachtet. Wie in Tabelle 7.8 ersichtlich, hat die Stahlkassetten-

<sup>12</sup>siehe Kapitel 3 *Lebenszyklusanalyse*

Variante ① und die KLH-Variante ③ einen höheren Bedarf an Primärenergie was Herstellung und Instandsetzung betrifft. Jedoch wird die Gesamtbilanz auf Grund des Anteils erneuerbarer Energie, sowie die EOL-Gutschriften, deutlich verändert. Wie Tabelle 7.8 aufzeigt, besitzt die Holzvariante ③ die beste PE-Bilanz, gefolgt von der Stahlkassettenvariante, und der PU-Paneel-Variante.

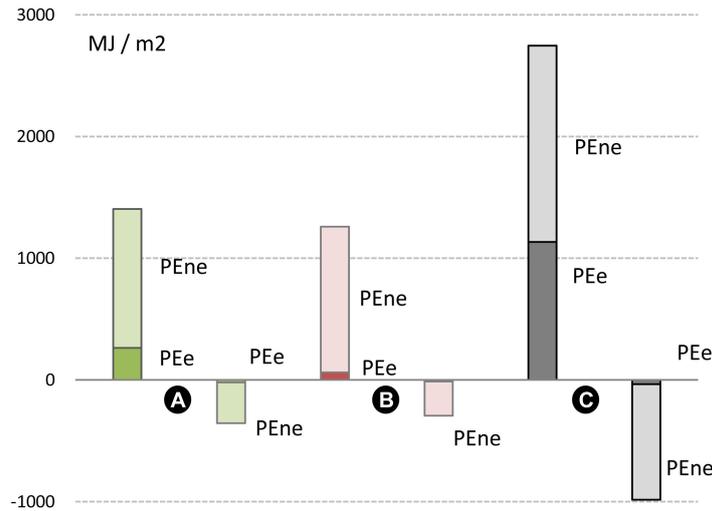


Abbildung 7.8: Primärenergiebedarf für Herstellung & Instandsetzung (linker Balken) und EOL-Szenario (rechter Balken) über 36 Jahre

In Abbildung 7.8 ist für jede Fassade der entsprechende Bedarf an nicht erneuerbarer und erneuerbarer Primärenergie dargestellt. Dabei repräsentieren jeweils zwei Balken die Primärenergiebilanz einer Fassade<sup>13</sup>: der erste, kumulierte Balken zeigt den Primärenergiebedarf für Herstellung und Instandsetzung, der zweite, kumulierte Balken zeigt den Primärenergiebedarf für Entsorgung. Dass alle drei Varianten einen negativen PE-Bedarf für die Entsorgung erhalten, liegt daran, dass bei End-of-Life Szenarien wie Recycling oder thermischer Verwertung Gutschriften entstehen. Die Holzvariante ③ erhält auf Grund ihres hohen Heizwertes eine rund drei mal so große Gutschrift bei der Entsorgung, verglichen mit den beiden anderen Fassadensystemen. Diese Gutschrift mindert in der Gesamtbilanz den  $PE_{ne}$  auf rund  $664 MJ/m^2$ , was um 27,5% niedriger als der vergleichbare Wert der PU-Paneel-Variante ist.

Der populäre *carbon footprint*, der das Treibhauspotential (GWP) beschreibt, fällt wie zu erwarten deutlich für die Holzvariante aus. Diese erzeugt weniger als die Hälfte an  $CO_2$ -Äquivalenten Emissionen während ihres gesamten Lebenszyklus (Abbildung 7.9a). Das Interessante an der Holzvariante ist, dass konträr zu anderen Materialien ein negativer GWP-Wert für die Herstellung entsteht, da

<sup>13</sup>Die Farbgebung entspricht den vorherigen Kapiteln.

	$PE_{ne}/m^2$	Anteil $PE_e$ an $PE$
Variante ① Stahlkassetten	$807MJ/m^2$	+23%
Variante ② PU-Paneel	$916MJ/m^2$	+5%
Variante ③ KLH	$664MJ/m^2$	+62%

Tabelle 7.8: Primärenergiebedarf der drei Fassaden

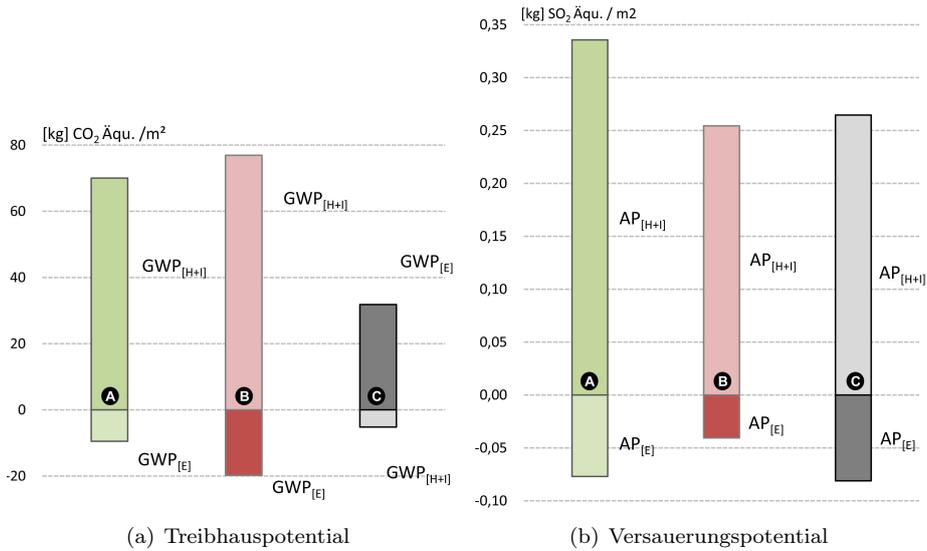


Abbildung 7.9: Vergleich der Umweltwirkungen GWP und AP für Herstellung & Instandsetzung sowie EOL-Szenario, Betrachtungszeitraum: 36 Jahre

die Menge an  $CO_2$ , welche von Bäumen im Laufe ihres Lebens aufgenommen wird, bei der Ökobilanzierung als Gutschrift notiert wird. Erst bei der thermischen Verwertung (EOL) wird ein Teil wieder freigesetzt - das erzeugt das charakteristische Bilanzbild der Holzkonstruktion.

Spannend ist auch die Umweltwirkung der PU-Sandwichfassade: Obwohl das Paneel aus Polyurethan und Stahlblech bei der Herstellung das größte Treibhauspotential liefert, hilft die Entsorgung der Paneele die Gesamtbilanz der Fassade zu reduzieren. Damit besitzt die PU-Sandwich-Variante ② eine ökologisch geringfügig bessere GWP-Bilanz als die vergleichbare Stahlkassettenkonstruktion (Tabelle 7.9).

Bezüglich des Versauerungspotentials (AP) scheint die Wirkungsbilanz der einzelnen Fassaden auf den ersten Blick relativ ausgeglichen (Abbildung 7.9b). Jedoch zeigt die Gegenüberstellung der Wirkungsbilanzen in Tabelle 7.10, dass sowohl Variante ② als auch Variante ③ ein deutlich geringeres Versauerungspotential besitzen, als es die Stahlkassettenkonstruktion bieten kann. Dabei muss

	$GW P_{gesamt}$	$GW P_E / GW P_{H+I}$
Variante ① Stahlkassetten	$60,5 kg/m^2$	+13%
Variante ② PU-Paneel	$57,1 kg/m^2$	+26%
Variante ③ KLH	$26,6 kg/m^2$	+612%

Tabelle 7.9: Treibhauspotential der drei Fassaden

man fairerweise auf die unterschiedlichen Massen der unterschiedlichen Fassadenaufbauten hinweisen. Während Variante ① 180mm Mineralfaserdämmung besitzt, ist der Dämmkern der PU-Sandwichpaneelle nur 100mm stark. Prinzipiell besitzt ein 100mm dickes PU-Paneel mit  $0,086 kg SO_2 - qv./m^2$  in der Herstellung eine deutlich schlechtere Wirkungsbilanz als ähnlich dimensionierte Kassettenkonstruktionen. Allerdings erreicht eine Sandwichbauweise mit wesentlich geringeren Aufbauten den selben Wärmeschutzstandard wie eine Stahlkassettenkonstruktion. Mineralfaserdämmung hat zusätzlich keine positive Wirkungsbilanz betreffend der Entsorgung. Hier bekommen die PU-Paneelle rund 1/8 ihres Versauerungspotentials gutgeschrieben.

	$AP_{gesamt}$	$\Delta$
Variante ① Stahlkassetten	$0,26 kg/m^2$	
Variante ② PU-Paneel	$0,21 kg/m^2$	-17%
Variante ③ KLH	$0,18 kg/m^2$	-29%

Tabelle 7.10: Versauerungspotential der drei Fassaden

## Kapitel 8

# Conclusio und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurden die gängigen Methoden zur Ermittlung von Lebenszykluskosten und Ökobilanzen erläutert, und in der Anwendung präsentiert. Dabei dienten drei für den Industriebau bedeutende Fassadensysteme als Grundlage für eine ökonomische und ökologische Analyse. Als Case Study hat das von Klima- und Energiefonds, sowie dem FFG geförderte Forschungsprojekt *INFO* gedient, für welches die drei Fassadensysteme in einem Betriebsgebäudeentwurf implementiert<sup>1</sup> wurden. Um die Auswirkungen der entworfenen Fassaden auf den Energiebedarf des Betriebsgebäudes zu ermitteln, wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauphysik und Bauökologie der TU Wien die entwickelten Gebäudehüllen auf ein Gebäudesimulationsmodell umgelegt, und mittels dynamischer, thermischer Gebäudesimulation untersucht<sup>2</sup>. Dabei wurde folgende Erkenntnis gewonnen:

- Die Gebäudehülle hat bei Produktionsbetrieben mit sehr hohen internen Wärmegewinnen einen sehr geringen Einfluss auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf. Die am schlechtesten performende Fassadenvariante lag, betreffend Heizenergie- und Kühlenergiebedarf, 7% über der am besten abschneidenden Variante<sup>3</sup>.
- Um die Auswirkung unterschiedlicher Fassaden auf den Energiebedarf von Betriebsgebäuden differenzierter untersuchen zu können, sollten auch abseits des Projekts *INFO* Betriebsgebäude mit geringeren, internen Wärmegewinnen simuliert werden. Die dabei zu erwartenden Differenzen bezüglich des Energiebedarfs wären ein sehr spannender Ausgangspunkt für eine LCC/LCA-Analyse, die den Energiebedarf des Gesamtgebäudes berücksichtigt.

---

<sup>1</sup>siehe Kapitel 4 Fassadensysteme

<sup>2</sup>siehe Kapitel 5 Gebäudesimulation

<sup>3</sup>siehe Kapitel 7.1 Simulationsergebnisse

In weiterer Folge wurde ein Excel-Tool (EEFA) entwickelt<sup>4</sup>, welchem eine Datenbank mit konstruktiven, ökonomischen und ökologischen Informationen der betrachteten Fassadensysteme zu Grunde gelegt wurde. Dabei ist festzuhalten:

- Mit überschaubarem Aufwand lässt sich ein potentes, adaptierbares Excel-Tool aufbauen, mit dessen Hilfe sich parametrische Lebenszykluskosten-Prognosen und Ökobilanzierungen durchführen lassen.
- Der Einsatz von LCC- und LCA-Analysen in der Baubranche ist dann am sinnvollsten, wenn er in einer der frühen Projektphasen statt findet. Dies kann in weiterer Folge als Werkzeug einer integralen Planung verstanden werden.
- Die Vergleichbarkeit von Baukonstruktionen benötigt für einen in der Praxis relevanten, pragmatischen Zugang ein gewisses Maß an sinnvoller Abstraktion. Diese ist vor allem in der frühen, planungslastigen Projektphase notwendig. In einer Konzeptfindungsphase oder in frühen Planungsphasen sind noch nicht alle Informationen betreffend detaillierter Aufbauten o.ä. vorhanden - dies kann nur durch Gruppierung und Benchmarking ausgewählter Kostentreiber, oder Schicksalsgemeinschaften erreicht werden. Eine Detaillierung macht nur bei ausgewählten Parametern Sinn, welche nach Festlegung des Bilanzierungsrahmens und der Betrachtungsgenauigkeit festgesetzt werden muss. Dies sollten iterative Prozesse sein, um innerhalb von Feedbackschleifen ein Adaptieren des Analysemodells zu ermöglichen.

Die Resultate des gewählten Analysebeispiels<sup>5</sup> zeigen vor allem, dass die Rahmenbedingungen einer Lebenszykluskosten-Analyse entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse haben. Herauszuheben sind besonders die Parameter *Betrachtungszeitraum* und *Diskontzinssatz*. Das in Kapitel 6.2 untersuchte Szenario zeigt wie stark eine Lebenszyklus-orientierte Betrachtung von Bau- oder Planungsaufwendungen von einer klassischen Herangehensweise divergieren kann: Tabelle 8.1 stellt die Herstellungskosten den Lebenszykluskosten nach 36 Jahren gegenüber. In Tabelle 8.2 ist das Treibhauspotential der betrachteten Fassaden gegenüber gestellt.

Der Vergleich der Konstruktionen gestaltet sich mit den neu gewonnen Informationen viel differenzierter. Es müssen auf einmal nicht mehr nur die Kosten der Herstellung ein Entscheidungskriterium sein, es können mit Hilfe der LCC

---

<sup>4</sup>siehe Kapitel 6 EEFA - Evaluierungstool

<sup>5</sup>siehe Kapitel 7.2 Variantenvergleich

und LCA Methodik nun Externalitäten und Folgewirkungen (ökonomisch und ökologisch) in den Vergleichs- und Entscheidungsprozess mit einfließen.

	Investkosten	$\Delta$	$LCC_{36}$	$\Delta$
Variante Ⓐ	921.300 €	+24,6%	1.435.300 €	+3%
Variante Ⓑ	694.400 €		1.389.200 €	
Variante Ⓒ	948.900 €	+26,8%	1.388.700 €	

Tabelle 8.1: Investitionskosten im Jahr 2012, Lebenszykluskosten nach 36 Jahren

	$GW P_{H+I+E}$	$\Delta$
Variante Ⓐ	60,5 kg/m <sup>2</sup>	
Variante Ⓑ	57,1 kg/m <sup>2</sup>	-5,6%
Variante Ⓒ	26,6 kg/m <sup>2</sup>	-56,1%

Tabelle 8.2: Treibhauspotential der drei Fassaden über 36 Betriebsjahren

Mit dem im Zuge dieser Arbeit entwickelten Tool können interessante Aspekte von unterschiedlichen Fassaden detailliert verglichen werden. Die Betrachtung einzelner Bauteilgruppen mit Scheuklappen wird als Einzelmaßnahme jedoch nicht sinnvoll in Planungsprozesse eingreifen können. Dazu benötigt es, im Sinne einer integralen Planung, Tools die ganze Gebäudemodelle in einer frühen Planungsphase<sup>6</sup> abbilden und berechnen. Eine zusätzlich funktionale Erweiterung, die Lebenszyklus-Optionen berechnen kann, wäre ein sehr spannendes Arbeitsfeld für LCC-LCA Programme. Mit einem ähnlichen Ansatz wie der von Ellingham & Fawcett (2006) könnte ein *option based*-Berechnungsmodul in einem LCC-LCA Tool ergänzt werden, um zukünftige Entscheidungsmöglichkeiten/Optionen probabilistisch in den Lebenszyklus aufzunehmen. Somit könnte man, beispielsweise für eine Option zur Sanierung oder Bestandserweiterung, die entsprechenden ökonomischen und ökologischen Wirkungen mit der entsprechenden Option “verknüpfen”. Damit ließen sich nicht nur Varianten miteinander vergleichen, sondern deren gesamter Anhang<sup>7</sup> zukünftiger Optionen.

<sup>6</sup>Top-down vs. bottom-up Ansatz, siehe Kapitel 1.3 *Stand der Technik*

<sup>7</sup>Umgangssprachlich oft als *Rattenschwanz* bezeichnet.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Excel-Tool . . . . .	5
1.2	Excel-Tool Schemata	
	Grafik erklärt den Aufbau des Excel Tools . . . . .	11
2.1	Auswirkungen der Wahl des Zinssatzes	
	König et al.(S.73, 2009) . . . . .	18
2.2	Kostengruppen lt. ÖNORM 1801-1	
	Austrian Standards Insitute . . . . .	19
2.3	Errichtungs- und Folgekosten lt. ÖNORM 1801-2	
	Austrian Standards Insitute . . . . .	21
2.4	Zusammenhang Gesamtkosten der Errichtung und Folgekosten lt.	
	Önorm 1801-2	
	Austrian Standards Insitute . . . . .	23
3.1	Phasen einer Ökobilanz	
	ISO 14040 . . . . .	28
3.2	Bilanzgrenzen der Ökobilanz . . . . .	30
3.3	Beispiel eines Produktsystems	
	EN ISO 14040 . . . . .	32
4.1	Metall Wandkassettenkonstruktion (Hoesch Kasette) . . . . .	38
4.2	Metall Wandkassettenkonstruktion	
	Schnitt, Grundriss, Ansicht . . . . .	39
4.3	Brucha PU-Paneel System	
	Trevision Betriebsgebäude, Foto: H.Hurnaus, nextroom.at . . . . .	40
4.4	PU-Paneel System	
	Grundriss, Schnitt, Ansicht . . . . .	41
4.5	Eco2Building, Foto: Lukas Schaller	
	Fertigungshalle Obermayr, Foto: Kerstin Hofstädter . . . . .	42
4.6	Holzmassivbauwand mit PC Oberlichtband	
	Grundriss, Schnitt, Ansicht . . . . .	45

5.1	Modell der integralen Simulation	
	Projekt INFO . . . . .	47
5.2	Zonenmodell der thermischen Simulation	
	Projekt INFO, K.Orehounig . . . . .	47
5.3	Anteile transparenter Fassadenfläche	
	Projekt INFO . . . . .	48
5.4	Zonenverteilung im Simulationsmodell	
	Projekt INFO . . . . .	51
6.1	Excel-Tool EEFA Schemata	
	Grafik erklärt den Aufbau des Excel Tools EEFA . . . . .	54
6.2	Resultate Gesamt - Tool Seite	
	Excel-Tool . . . . .	56
6.3	Excel-Tool Menüleiste und Einstellungsmöglichkeiten . . . . .	57
6.4	Vergleichende Resultate Gesamt - EEFA Seite	
	Excel-Tool Ergebnisaufbereitung . . . . .	59
6.5	Detailliertere Einzelauswertung - Tool Seite	
	Excel-Tool Einzelergebnisaufbereitung . . . . .	61
7.1	Lebenszykluskostenkurve kumuliert	
	LCC kumuliert auf 36 Jahre . . . . .	69
7.2	Lebenszykluskostenkurve kumuliert	
	LCC kumuliert auf 36 Jahre . . . . .	70
7.3	Lebenszykluskosten kumuliert nach Jahr und Kostengruppe	
	LCC kumuliert auf 36 Jahre . . . . .	71
7.4	Lebenszykluskosten kumuliert nach Jahr und Kostengruppe	
	LCC kumuliert auf 36 Jahre . . . . .	71
7.5	Nutzungskosten pro Jahr	
	Gesamtfolgekosten durch Betrachtungszeitraum . . . . .	72
7.6	Invest- und Erneuerungskosten Variante B	
	LCC indiziert, diskontiert, nicht kumuliert . . . . .	73
7.7	Lebenszykluskosten der Varianten nach 36 Jahren . . . . .	74
7.8	Vergleich Primärenergiebedarf über 36 Jahre . . . . .	75
7.9	LCA Vergleich: Treibhauspotential & Versauerungspotential . . . . .	76

# Tabellenverzeichnis

1.1	Investitionskosten im Jahr 2012, Lebenszykluskosten nach 36 Jahren . . . . .	5
1.2	Treibhauspotential der drei Fassaden nach 36 Betriebsjahren . . . . .	6
2.1	Baupreisindex für Hochbau in Österreich Jahresentwicklung, Basisjahreswert 2005 ( <i>Statistik Austria</i> ) . . . . .	25
2.2	BPI nach Leistungsgruppen, Basisjahreswert 2010 ( <i>Statistik Austria</i> ) . . . . .	25
3.1	Datensätze für LCA . . . . .	34
3.2	Datensätze für LCA . . . . .	35
4.1	Leitkriterien der ‘ <i>Bauherren</i> ’ . . . . .	37
5.1	Variantenzusammenstellung: Fassadensysteme mit unterschiedlichen Aufbauten, U-Werten und Anteilen an transparenter Fassadenfläche . . . . .	47
5.2	Daten für das Simulationsmodell mit PU-Paneele, KLH Holzfassade und PC-Paneele . . . . .	49
5.3	Daten für das Simulationsmodell mit Metallfassade auf Wandkassettenkonstruktion . . . . .	50
5.4	Nach Simulation gewählte Parameter . . . . .	52
7.1	Simulationsergebnisse mit automatisierter Beschattung und Fensterlüftung Simulation: K.Orehounig . . . . .	65
7.2	Simulationsergebnisse ohne automatisierter Beschattung und Fensterlüftung Simulation: K.Orehounig . . . . .	66
7.3	Globale Parameter . . . . .	67
7.4	Daten der Hüllfläche . . . . .	68

7.5	Gewählte Aufbauten für LCC und LCA . . . . .	68
7.6	Investitionskosten im Jahr 2012 . . . . .	70
7.7	Lebenszykluskosten nach 36 Jahren . . . . .	74
7.8	Primärenergiebedarf der drei Fassaden . . . . .	76
7.9	Treibhauspotential der drei Fassaden . . . . .	77
7.10	Versauerungspotential der drei Fassaden . . . . .	77
8.1	Investitionskosten im Jahr 2012, Lebenszykluskosten nach 36 Jahren . . . . .	80
8.2	Treibhauspotential der drei Fassaden über 36 Betriebsjahren . . . . .	80

# Index

”OGNI, 21, 26

Österreichische Gesellschaft für nachhaltige Immobilienwirtschaft, 7

”ONORM, 16, 22, 23

AP

Versauerungspotential, 31

Barwert, 7, 12, 13, 19, 60, 62, 73

BAS, 52, 63

Building Automation System, 4

BKI, 55

Baukostenindex, 24

BPI, 25

Baupreisindex, 24

CAPM

Capital Asset Pricing Model, 16

Cashflow, 13–15, 24

DCF, 14–16

Discounted Cash Flow, 14

Deflator, 24

DGNB, 16, 20, 30, 36

Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen, 7

DIN, 22

Deutsches Institut für Normung, 16

Discounted Cash Flow, 57

Diskontzinssatz, 67

EEFA, 5, 28, 54, 55, 57

Ecological Economic Facade Analysis, 4

ecological economic facade analysis, 54

- EOL, 62, 75, 76
  - End of Life, 61
- EPD, 30, 33, 34
  - Environmental product declaration, 33
- Ersatzhäufigkeit, 73
- FFG
  - Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH, 78
- Forschungsprojekt INFO, 10, 37, 38, 58, 67, 78
  - Interdisziplinäre Forschung zur Energieoptimierung in Fertigungsbetrieben,  
1
- GWP, 60, 75
  - Treibhauspotential, 31
- Histogramm, 62
- ISO, 27
  - International Organization for Standardization, 27
- Kapitalwert, 12, 13, 62
- Kapitalwertmethode, 7, 12, 13, 55
- KLH
  - Kreuzlagenholz, 4
- LCA, 10
  - Life Cycle Assessment, 3, 6
- LCC, 10, 16, 60
  - Life Cycle Costing, 3, 6
- LCCA, 27
- MVA, 60
  - Müllverbrennungsanlage, 60
- NPV, 13, 15, 17
  - net present value, 12
- PC
  - Polycarbonat, 43
- PEe, 31, 60
  - Primärenergiebedarf erneuerbar, 31
- PEne, 31, 60
  - Primärenergiebedarf nicht erneuerbar, 31

PU

Polyurethan, 40

PV

Photovoltaik, 60

tFF

transparente Fassadenfläche, 64

TGA

Technische Gebäudeausrüstung, 3, 46

TQB

Total Quality Building, 7

WACC

Weighted Average Cost of Capital, 16

# Literaturverzeichnis

- Berk, J. & DeMarzo, P. (2007), *Corporate Finance*, second edn, Pearson.
- BMVBS (2011), *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- Clarke, J. (2001), *Energy simulation in building design*, Butterworth-Heinemann.
- DGNB (2009), *DGNB Handbuch - Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude, Version 2009*.
- DIN-18960 (2008), *Nutzungskosten im Hochbau*, Deutsches Institut für Normung.
- DIN EN ISO 14040 (2009), *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*, DIN, Deutsches Institut für Normung.
- DIN EN ISO 14044 (2006), *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*, DIN, Deutsches Institut für Normung.
- Dorn, C., Kovacic, I., Orehounig, K., Oberwinter, L., Bleicher, F. & Mahdavi, A. (2011), *Energy efficient production – interdisciplinary, systemic approach through integrated simulation*, Vienna University of Technology.
- Ellingham, I. & Fawcett, W. (2006), *New Generation Whole-Life Costing*, Taylor&Francis, 270 Madison Avenue, New York, USA.
- EPD TKS 2011311-D (2011), *Umwelt-Produktdeklaration für Sandwichelemente mit PUR Hartschaumkern und farbig beschichteten Metalldeckschalen für Dach, Wand und Decke*, Institut Bauen und Umwelt e. V.
- F2-Architekten (2006), 'Elementfertigungshalle Obermayr, Schwanenstadt', <http://nextroom.at> . Zugriff: Mai 2011.
- Fischer, D. & Hauke, B. (2010), *Umwelt-Produktdeklaration Baustähle - Erläuterungen*, Technical Report B 104, Bauforum Stahl, Düsseldorf. vergleich EPD - Ökobau.dat.

- Fitl, R., Gamerith, H., Gröll, G., Höfler, K. & Schober, K. P. (2007), 'Bauphysikalische Ausführung von Holzfassaden', *pro:Holz Arbeitsheft* (9).
- Franzeck, J. (1997), Methodik der Lebenszykluskostenanalyse und -planung für die Entwicklung technischer Produktsysteme unter Berücksichtigung umweltlicher Effekte, PhD thesis, Universität Stuttgart.
- Fua, C., Tah, J. & Aouad, G. (2007), 'The lifecycle costing simulation for building construction and maintenance in nd modelling', *Proceedings: Building Simulation* pp. 1580–1586. Salford University, Great Manchester.
- Fuchs, M. (2010), 'Nachhaltigkeitsorientierte Architekturwettbewerbe', *Detail Green* (2), 76–80.
- GEFMA 220 (2006), *Lebenszykluskostenrechnung im FM. Einführung und Grundlagen*, Deutscher Verband für Facility Management.
- Gerbert, P. & Rubel, H. (2009), Solar storm - navigating through the turbulence to reap value in solar energy, Technical report, The Boston Consulting Group.
- Gerichtssachverständigerverband (2006), *Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile*, Vol. 3, Arbeitskreis des Hauptverbandes der allgemein beeideten und gerichtlich zertifizierten Sachverständigen Österreichs, Landesverband Steiermark und Kärnten.
- Girmscheid, G. (2006), 'Risikobasiertes probabilistisches LC-NPV-Modell – Bewertung alternativer baulicher Lösungen', *Bauingenieur* (81), 394–405.
- ÖGNI (2009), *Steckbrief 16 - Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus*, nbv09-16 edn, Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft.
- Heitel, S., Koriath, H., Herzog, C. S. & Specht, G. (2008), 'Vergleichende Lebenszykluskostenanalyse für Fußgängerbrücken aus unterschiedlichen Werkstoffen', *Bautechnik* (10), 1–11.
- Herzog, B. & Friedl, K. (2010), 'Erstes Lebenszykluskostentool, das valide Prognosen von Beginn an ermöglicht', *Wettbewerbe* (286/286), 14–17.
- Herzog, K. (2005), Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen, PhD thesis, TU Darmstadt.
- Herzog, T., Krippner, R. & Lang, W. (2004), *Fassaden Atlas*, 1 edn, Birkhäuser, Technische Universität München.
- IBO (2010), *Leitfaden für die Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude*, Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie GmbH.

- ISOVER (2010), Wandkassetten-System ISOVER Metac WS, Technical report, Saint-Gobain Isover G+H.
- Ökobau.dat (2011), *Ökobilanzbasierte Umweltindikatoren im Bauwesen*, Deutsches Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- König, H., Kohler, N., Kreißig, J. & Lützkendorf, T. (2009), *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung: Grundlagen- Berechnung- Planungswerkzeuge*, Ins. f. int. Architektur.
- Koschade, R. (2002), 'Sandwichbauweise im Aufwind - Informationen für Planer, Handwerk und Bauherren', *Galileo, kreatives Bauen mit Sandwich* .
- Koschade, R. (2004), 'Wandverkleidungssysteme im modernen Industriebau - Sandwichelemente und Kassettenwände im Vergleich', *Galileo, kreatives Bauen mit Sandwich* .
- ÖNORM B 1801-1 (2009), Bauprojekt- und Objektmanagement: Teil 1 Objektterrichtung, Technical report, Austrian Standards Institute.
- ÖNORM B 1801-2 (2011), Bauprojekt- und Objektmanagement: Teil 2 Objektfolgekosten, Technical report, Austrian Standards Institute.
- Riegel, G. W. (2004), Ein softwaregestütztes Berechnungsverfahren zur Prognose und Beurteilung der Nutzungskosten von Bürogebäuden, PhD thesis, Technischen Universität Darmstadt. 1. Auflage Darmstadt, Eigenverlag, Heft 8.
- Schulte, K.-W. & Bone-Winkel, S. (2008), *Handbuch Immobilien - Projektentwicklung*, 3 edn, Rudolf Müller.
- Statistik-Austria (2011), *Baupreisindex Leistungsgruppen und Regionen 2.Q 2011*, Bundesamt Statistik Austria.
- Stocker, E., Gollner, W., Schrag, T. & Neugebauer, J. (2009), 'Lebenszyklusbeurteilung im hochbau', *PM-Bau Symposium* (4), 40–45.
- Teischinger, A., Stingl, R. & Stanek, R. (2008), 'Holzbauanteil in Niederösterreich', *Lignovisionen* (21).