



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Bautechnik und
Naturgefahren
Institut für konstruktiven Ingenieurbau
Arbeitsgruppe Ressourcenorientiertes Bauen
Peter Jordanstraße 82
A-1190 Wien

Lechner Julian

Vergleich von Ökobilanzierungen in Gebäuden unter Berücksichtigung des technologischen Fortschritts

Masterarbeit

24. April, 2019

Dipl. -Ing. Dr. Österreicher Doris, MSc.

Dipl. -Ing. Smutny Roman

Durchgeführt am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau,
Arbeitsgruppe ressourcenorientiertes Bauen, BOKU Wien

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, am 24. April 2019

Lechner Julian, BSc

Abstract

Buildings are responsible for approximately 40% of energy consumption and 36% of CO₂ emissions within the EU. Due to the constant growing rate of the building industry due to increasing demand, those numbers are not likely to change in the near future. Therefore, the use of resources and the resulting impact on the environment are to be considered when assessing a building. The method Lifecycle Assessment offers the possibility to assess buildings according to those factors.

Lifecycle Assessment (LCA) in general is a method for assessing environmental aspects and potential impacts throughout the whole life cycle process of a product, from the acquisition of raw material until the disposal. The LCA is not the only method that tackles the assessment of the ecological impact, but it is a comprehensive one and therefore suitable to be used within the building industry. Buildings are rather difficult to assess because of their life expectancy. Many characteristics are unknown and so are predictions for them. Energy sources, consumption of resources, or methods in dismantling processes can change drastically over time but are essential for the result of an assessment. However, one of the main drawbacks is that the LCA does not include the factor time in its assessment. Therefore, the implementation of the factor time into the life-cycle method, to include technological progress, is the main objective of this thesis.

To discuss the aforementioned problem, a case study of the Hütteldorferstraße 252 in the 14th district of Vienna is assessed. Four self-defined scenarios from an actual renovation project are used to show the influence of the technological progress over time in the LCA. Two main tools are used for this work: The LCA-tool Eco2Soft, and the Energy Performance Certificate calculator Archiphysik.

In summary it can be said, that the use of a static LCA-approach is not sufficient to address this kind of problem. To integrate time and subsequently the technological progress, a dynamic approach is necessary. Furthermore, the comparisons of the scenarios are showing, that the dominance of the operational phase is getting compensated by the growing importance of the other life cycle phases in a dynamic approach. Overall it is important to address this issue with a holistic approach to include without exception all aspects in the assessment – including the factor time.

Kurzfassung

Innerhalb der EU entfallen rund 40% des Energieverbrauchs bei gleichzeitig 36% der CO₂ Emissionen auf den Gebäudebestand. Durch die stetig wachsende Baubranche wird sich dieser Anteil auch in nächster Zeit sehr wahrscheinlich nicht verringern. Der Ressourcenverbrauch und die einhergehenden Umweltwirkung stehen somit in enger Verbindung und müssen gemeinsam in eine Gebäudebewertung miteinfließen. Diese Möglichkeit bietet die Methode der Ökobilanz.

Ökobilanzen versuchen, den Umwelteinfluss eines Objektes über dessen gesamten Lebenszyklus zu betrachten und schlussendlich die Möglichkeit zu geben, verschiedene Objekte unter homogenen Bedingungen miteinander zu vergleichen. Objekte, die eine lange Betrachtungsdauer aufweisen, wie in diesem Fall Gebäude, benötigen spezielle Aufmerksamkeit. Faktoren wie Ressourcennutzung, Rückbauverfahren oder Energieversorgung ändern sich im Laufe der Zeit und müssen in die Ökobilanz miteinfließen da sie Ergebnisse ausschlaggebend verändern können. Die Schwierigkeiten liegen hier in der Integration des Faktors Zeit in die Ökobilanz und des damit möglichen technologischen Fortschritts. Genau dieser Ansatz wird in dieser Arbeit verwendet um die klassische Ökobilanzierung von Gebäuden um den sich über die Zeit entwickelnden technologischen Fortschritt zu ergänzen.

Dabei wird die Methode der Ökobilanz anhand eines Fallbeispiels in der Hütteldorferstraße 252 im 14. Wiener Gemeindebezirk untersucht. Um den technologischen Fortschritt zu betrachten werden vier Szenarien definiert, die sich am geplanten Vorhaben der Gebäudesanierung des Fallbeispiels orientieren. Diese Szenarien werden in der Arbeit mit dem Ökobilanztool Eco2Soft und der Software Archiphysik zur Erstellung von Energieausweisen bearbeitet und anschließend gegenübergestellt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Verwendung einer statischen Ökobilanzierung nicht die gewünschten Ergebnisse mit sich bringt. Ein dynamischer Ansatz ist hier unumgänglich, um den Aspekt des technologischen Fortschritts in die Ökobilanz zu integrieren. Die Auswirkungen der Nutzungsphase werden in der dynamischen Ökobilanz vermindert und die restlichen Lebenszyklusphasen rücken mehr in den Vordergrund. Für die Ergebnisse ist es nicht relevant, ob die Gebäudestruktur oder die Haustechnik und die verwendeten Energieträger durch technologischen Fortschritt betroffen sind. Wichtig ist nur, dass ohne Ausnahme alle betroffenen Bereiche, inklusive dem Faktor Zeit, in die Bewertung miteinfließen.

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle all jenen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. An erster Stelle möchte ich mich dabei bei Dipl. -Ing. Roman Smutny und Dipl. -Ing. Dr. Österreicher Doris, MSc. für die Unterstützung und konstruktive Kritik während der Abfassung der Arbeit bedanken.

Aufrichtigen Dank schulde ich ebenfalls Mag. Dr. rer. nat. Petra Auner-Gröbl, die mir bei meiner oft nicht ganz passenden Ausdrucksweise über die gesamte Arbeit unter die Arme gegriffen hat. Ebenfalls möchte ich mich bei Christoph Sutter und der gesamten baubook GmbH für die tatkräftige Hilfe und der Möglichkeit bedanken, eine weiterentwickelte Version von Eco2Soft verwenden zu können.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Eltern Bernhard und Maria-Johanna und meinem Bruder Joshua für die finanzielle aber noch wichtiger, die moralische Unterstützung über meinen gesamten Studienweg bedanken. Meiner Freundin Julia danke ich für ihre Geduld, ihr Verständnis und ihre Unterstützung in schwierigen Zeiten. Ihr seid die Menschen denen ich diesen Erfolg wirklich zu verdanken habe und deshalb widme ich euch diese Masterarbeit.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	8
1.1	Hintergrund und Motivation	8
1.2	Forschungsfrage und Zielsetzung	9
1.3	Methode	9
2	Allgemeine Grundlagen	10
2.1	Nachhaltigkeit	11
2.2	Nachhaltigkeit bei Gebäuden	13
2.2.1	Normierung im Bausektor	13
2.2.2	Bewertungs- und Zertifizierungssysteme von nachhaltiger Gebäudequalität	18
2.2.3	Energieeffizienzklassen von Gebäuden	25
2.3	Ökobilanz von Gebäuden	28
2.3.1	Ökobilanz, Life-Cycle-Assessment (LCA)	28
2.3.2	LCA in der Gebäudebewertung	41
2.3.3	Bewertungstool für LCA: Eco2Soft	49
2.3.4	Aktuelle Entwicklungen der LCA im Gebäudebereich	56
3	Methodik	57
4	Fallbeispiel	60
4.1	Forschungsprojekt EU-GUGLE	60
4.2	Sanierungsprojekt Hütteldorferstraße 252	61
4.2.1	Bestand	63
4.2.2	Energiekennzahlen	64
4.2.3	Beschreibung der geplanten Sanierung	64
4.2.4	Szenarienbeschreibung	67
5	Ergebnisse	72
5.1	Szenario 1 & 2 – statische Bilanzierung von WDVS und MAFA	72
5.1.1	Bauphase	72
5.1.2	Nutzungsphase	73
5.1.3	Austausch- und Instandsetzungsphase	74
5.1.4	Gesamtbetrachtung	75
5.2	Szenario 3 & 4 – dynamische Bilanzierung von WDVS und MAFA	76
5.2.1	Bauphase	76
5.2.2	Nutzungsphase 1	76
5.2.3	Austausch- und Instandsetzungsphase	78
5.2.4	Nutzungsphase 2	79
5.2.5	Rückbau- und Entsorgungsphase	81
5.3	Gesamtbetrachtung	81
6	Diskussion	83

7	Zusammenfassung	85
8	Literaturverzeichnis.....	89
9	Abbildungsverzeichnis	92
10	Tabellenverzeichnis	93
11	Formelverzeichnis.....	94

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Während meines gesamten Studiengangs trat ein Begriff besonders hervor, der Begriff der Dringlichkeit. Dringlichkeit in dem Sinne, dass unserer Gesellschaft nicht mehr unendlich viel Zeit bleibt um unsere Fehler, die wir zum Teil heute noch begehen, rückgängig zu machen oder zumindest abzuschwächen.

Große ökologische, ökonomische und technische Fragestellungen zu diesem Thema befinden sich in ihren Lösungswegen jedoch erst im Anfangsstadium und eine finale Lösung hierzu ist noch weit entfernt. Durch das Betrachten vieler umweltrelevanter Aspekte sticht der Bausektor besonders ins Auge, ein Bereich, der in Vergangenheit als auch in der Zukunft eine konstant wichtige Rolle aufweist und aufweisen wird.

Deshalb ist es wichtig Gebäude so zu gestalten, dass sie als nachhaltig gelten. Nachhaltig in dem Sinne, dass sie die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigen, ohne die Bedürfnisbefriedigung zukünftiger Generationen zu gefährden (Development, 1990). Diese Nachhaltigkeit muss auf drei Ebenen erreicht werden: der ökonomischen, der sozialen und der ökologischen Ebene.

Dieser Gedankengang ist im heutigen Bausektor bereits sehr verbreitet und Gebäude werden darauf ausgelegt, möglichst hohe Energieeinsparungen bei gleichzeitig geringem Ressourceninput zu gewährleisten. Doch nun stellt sich die Frage: Wie gehen wir mit Gebäuden um, die bereits lange vorher errichtet wurden? Energieeinsparungen sind hier so gut wie nicht vorhanden und es wurden Ressourcen verwendet, die nur wenig dem Nachhaltigkeitsgedanken entsprechen.

Eine Erneuerung des Baubestandes ist hier unausweichlich, um den Lebensstandard der Bewohner zu erhöhen, den ökologischen Input in Form von Ressourcen zu verringern und dies gleichzeitig mit möglichst geringem finanziellem Aufwand zu gewährleisten. Der technologische Fortschritt im Bausektor bietet uns hier verschiedene Ansätze, die verfolgt werden können, um die obigen Ziele zu erreichen. Vor allem der Umgang mit dem Altbestand von Gebäuden erfordert unsere Aufmerksamkeit und die Einbringung neuer Technologien, -Technologien, die es erlauben, diese alten und aus der Sicht der Ressourcen, doch so wertvollen Gebäude als neue Ressourcenquelle zu verwenden oder sie zumindest möglichst sparsam in den Ressourcenkreislauf zurückzuführen.

1.2 Forschungsfrage und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, den technologischen Fortschritt in den Bereichen Kreislaufwirtschaft, Haustechnik und Energieversorgung innerhalb einer Ökobilanz zu betrachten und zu vergleichen. Somit soll die Methode der Ökobilanz um den technologischen Fortschritt erweitert werden.

Im Verlauf dieser Arbeit werden folgende zwei Forschungsfragen behandelt:

- Welchen Einfluss hat technologischer Fortschritt in den Bereichen Ersatz, Entsorgung und Recycling von Baukomponenten auf die Ergebnisse einer Ökobilanz?
- Wie wirkt sich technologischer Fortschritt in Bereichen der Haustechnik und der verwendeten Energieträger auf die Ergebnisse einer Ökobilanz aus?

Technologischer Fortschritt im Kontext dieser Arbeit bedeutet eine inkrementelle Verbesserung der bestehenden Technologien. Technologien in den Bereichen Ersatz, Entsorgung und Recycling sowie der Haustechnik und der verwendeten Energieträger werden gegenwärtig recherchiert und eigenhändig überarbeitet.

1.3 Methode

Diese Arbeit setzt sich aus einem theoretischen und einem praktischen Teil zusammen.

Im theoretischen Teil wird grundsätzlich am Verständnis für das Thema gearbeitet, dies beinhaltet zu Beginn eine Recherche zum Stand des Wissens in den Bereichen der Lebenszyklusanalyse (LCA). Weiters wird auch auf den Nachhaltigkeitsaspekt im ressourcenorientierten Bauen eingegangen. Für die benötigten Grundsätze und Durchführungsregeln der LCA wird auf entsprechende Normen zurückgegriffen. Dasselbe gilt auch für die Berechnung und Verwendung für den Energieausweis, hier wird auf die bestehenden Energieausweis-Normen eingegangen. Die verwendete Software für die Erstellung der Arbeit teilt sich auf zwei Programme auf. Zum einen die Berechnung der Energieausweise über Archyphysik, zum anderen die Erstellung der Ökobilanzen für die zu betrachtenden Varianten mittels dem LCA-Tool Eco2Soft. Zur Beantwortung der Forschungsfragen der Arbeit wird ein Fallbeispiels anhand eines praktischen Beispiels ausgeführt. Als Objekt des Fallbeispiels dient die Sanierung der Wohnhausanlage in der Hütteldorferstraße 252, 1140-Wien. Im Rest des theoretischen Teils wird auf den Bestand des Gebäudes, auf die geplanten Sanierungsvarianten und auf die Beschreibung der benötigten Szenarien des Fallbeispiels eingegangen.

Im praktischen Teil der Arbeit werden zu Beginn die Ökobilanzen der Hütteldorferstraße 252 erstellt. Aus Gründen der einfacheren Darstellung beschränken sich die Berechnungen auf die Stiegen 1-3. Die Arbeit lehnt sich dabei an die Ergebnisse von Sasdi (2019) sowie weiteren bestehenden Ökobilanzen an. Um die nötigen Veränderungen der Ökobilanzen innerhalb der ausgewählten Szenarien zu tätigen, wird auf eine erweiterte Version des Eco2Soft

zurückgegriffen, die es ermöglicht hinterlegte Daten zu Ergebnissen aus Eco2Soft selbständig zu bearbeiten. Parallel zur Erstellung der Ökobilanzen wird an den Energieausweisen der betroffenen Szenarien mittels Excel gearbeitet. Anschließend erfolgt eine kritische Betrachtung der Ergebnisse und einer Gegenüberstellung der Varianten. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Ökobilanz bezieht man sich nur auf das Global Warming Potential (GWP). Auf weitere Indikatoren wie das Versäuerungspotenzial etc. wird nicht eingegangen. Grund dafür ist, dass für eine allgemein Betrachtung der Umweltwirkung das GWP vollkommen ausreichend ist. Das abschließende Kapitel befasst sich mit einer Reflexion der Methode und weiteren Fragestellungen, die während der Arbeit aufgetreten sind.

2 Allgemeine Grundlagen

Am 4. November 2016 trat das Pariser Abkommen in Kraft und legte damit einen Grundstein für die zukünftige Handhabung der Klimaerwärmung. Durch dieses Abkommen wurden rund 194 Vertragsparteien dazu verpflichtet ihren Anteil an der Bekämpfung des Klimawandels zu leisten. Als Hauptziel wurde eine maximale Erderwärmung von 2°C bei einer anzustrebenden Erwärmung von 1,5 °C gesetzt (UNFCCC, 2015).

Grund für die Notwendigkeit eines solchen Abkommens ist die langjährig verschwenderische Nutzung von natürlichen Ressourcen in vielen unterschiedlichen Sektoren der Gesellschaft. Bei genauer Betrachtung der Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren in Österreich zeigt sich ganz deutlich, dass die Sektoren Energie und Industrie (37,0 Mio. Tonnen), Verkehr (23,7 Mio. Tonnen), Gebäude (8,3 Mio. Tonnen) sowie die Landwirtschaft (8,2 Mio. Tonnen) die größten Verursacher darstellen. Die Emissionen im Gebäudesektor unterliegen relativ starken jährlichen witterungsbedingten Schwankungen. Werden diese Schwankungen jedoch herausgerechnet ergibt sich ein Rückgang der Emissionen im Gebäudesektor gegenüber 2005 von 36,5%. Es ist ein deutlich rückläufiger Trend der THG-Emissionen im Gebäudesektor zu erkennen.

Dies kann unter anderem auf den Begriff des nachhaltigen und ressourcenorientierten Bauens zurückgeführt werden, der in den letzten Jahren auf nationaler Ebene gesetzlich geregelt wurde und somit schlagartig in Form von Energierichtlinien, Bauproduktverordnungen, Abfallrichtlinien etc. im Baugewerbe Fuß gefasst hat. Ursachen der Verminderung waren neben thermisch-energetischen Sanierungen auch der Einsatz von effizienten Heizsystemen und der Wechsel zu kohlenstoffärmeren Brennstoffen. Trotz großer Anstrengungen in dieser Hinsicht ist in diesen Bereichen und somit im gesamten Gebäudesektor nach wie vor ein erhebliches Reduktionspotenzial vorhanden (Umweltbundesamt, 2018).

Das folgende Kapitel setzt sich mit dem Begriff der Nachhaltigkeit und im genaueren mit der Nachhaltigkeit im Gebäudesektor auseinander.

2.1 Nachhaltigkeit

Der Begriff der Nachhaltigkeit ist bereits seit vielen Jahren in allen Bereichen der Gesellschaft integriert. Der erste niedergeschriebene Gedanke zur Nachhaltigkeit stammt vom sächsischen Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz (1645-1714), aus dem damaligen Freiberg in Sachsen. Der Ursprung des Gedankens stammt aus der Forstwirtschaft und der Idee Carlowitz, den Wald durch Entnahme des Bestandes nur soweit zu belasten wie durch eine Aufforstung wieder ausgeglichen werden kann. Carlowitz spricht hierbei von einer „nachhaltigen Nutzung der Wälder“. Niedergeschrieben wurde diese Entwicklung der Nachhaltigkeit in dem vom Carlowitz 1713 verfasstem Werk „Sylvicultura Oeconomica, oder hauswirtschaftliche Nachricht und Naturgemäße Anweisung zur Wilden Baum-Zucht“ (Schulze Karsten, 2006).

Überraschend hierbei ist, dass Carlowitz dem Problem der übermäßigen Bestandsentnahme der Wälder nicht nur mittels forstwirtschaftlicher Theorien begegnete, sondern versuchte, das Problem auf volkswirtschaftlichen Ebenen zu lösen. Man erkannte also bereits damals, dass ein Sektor der Wirtschaft nicht allein die Lösung für das Problem liefern kann, sondern einzig eine intersektorale Betrachtung (Grober, 2013).

Ein weiteres Werk, das den Begriff der Nachhaltig in das Bewusstsein der Gesellschaft brachte war das Buch „Silent Spring“ („Der stumme Frühling“) von Rachel Carson. Dieses Buch gilt seit seinem Erscheinen als Ausgangspunkt für die moderne Umweltpolitik und den Umweltschutz-als interdisziplinäre Fachgebiete (Carson Rachel, 1962).

Durch diese Werke wurde der Gesellschaft versucht klar zu machen, dass ein weiteres Ausbeuten der natürlichen Ressourcen nicht mehr zu vertreten war und man sich bald an den Grenzen der Belastbarkeit des Planeten befand. Meadows drückte dies mit seinem Bericht „Bericht zur Lage der Menschheit: Die Grenzen des Wachstums“ an den Club of Rome aus. Meadows fasste die Probleme wie folgt zusammen:

„Wenn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht (...) (Meadows Dennis, 1972)“

„Es erscheint möglich, die Wachstumstendenzen zu ändern und einen ökologischen und wirtschaftlichen Gleichgewichtszustand herbeizuführen, der auch in weiterer Zukunft aufrechterhalten werden kann. (...) (Meadows Dennis, 1972)“

Der Bericht besitzt in seinen Grundzügen heute noch Aktualität. Er wird noch immer als Grundsatz bei wissenschaftlichen als auch gesellschaftlichen Auseinandersetzungen zu den Grenzen unseres Planeten herangezogen.

Der im Jahr 1987 folgende Brundtland-Report definierte Nachhaltigkeit als eine Entwicklung, die es ermöglicht Bedürfnisse gegenwärtiger Gesellschaften zu befriedigen, ohne dabei zukünftige

Gesellschaften in ihrem Handeln einzuschränken (Development, 1990).

Um eine nachhaltige Entwicklung voranzutreiben reicht es nicht aus sich nur auf eine Dimension zu beziehen. Um nachhaltig zu agieren, ist es notwendig, alle beteiligten Dimensionen in die Diskussion und Lösungssuche einzubeziehen. Die Schwierigkeit liegt dabei darin, die ökologischen, ökonomischen und sozialen Ziele gleichgewichtig und gleichrangig zu bewerten. Dies führte zur Entwicklung des Drei-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit. Lützendorf et al. (2009) führten noch eine kulturelle Dimension ein, um das Modell zu ergänzen. Abbildung 1 stellt die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit dar.



Abbildung 1: Dimensionen nachhaltiger Entwicklung (The Sustainable People, 2019).

Je nach Gewichtung der einzelnen Dimensionen ist es möglich, Nachhaltigkeit in schwache und starke Nachhaltigkeit zu unterteilen.

Im Fall der schwachen Nachhaltigkeit können Verluste einer Dimension durch eine andere Dimension ausgeglichen werden. Oberstes Ziel dieser Art der Nachhaltigkeit ist nicht die Bewahrung der Umwelt, sondern die Aufrechterhaltung und Steigerung des Gesamtwohlstandes. Diese Form der Nachhaltigkeit wird als anthropozentrisch angesehen. Das Drei-Säulen-Modell präsentiert den Fall einer schwachen Nachhaltigkeit. Im Fall der starken Nachhaltigkeit wird die ökologische Dimension den anderen Dimensionen übergeordnet, da sie die Grundlage aller anderen Dimensionen bildet. Ein Ausgleich zwischen den Dimensionen ist auch hier möglich, aber nur zwischen der ökonomischen, kulturellen und sozialen Dimension. Innerhalb der starken Nachhaltigkeit ergeben sich folgende Regeln für den Umgang der ökologischen Dimension und somit für den Umgang mit den natürlichen Ressourcen:

- Die Abbaurate der Ressource darf nicht höher sein als die Regenerationsrate der Ressource.

- Knappe Ressourcen (Fossile Rohstoffe) dürfen somit gar nicht verwendet werden, da sie sich nicht erneuern können.
- Die Senkenfunktion der Umwelt darf nur soweit genutzt werden bis die maximale Aufnahmefähigkeit erreicht wird. Weiters sind Emissionen von umweltschädlichen Stoffflüssen so gering wie möglich zu halten, auch wenn die Aufnahmefähigkeit der Umwelt unterschritten ist (Steurer, 2001).

2.2 Nachhaltigkeit bei Gebäuden

Bei der Betrachtung von weltweiten Klimadaten ist klar, dass ein nachhaltiges Agieren unumgänglich ist um die Klimaziele und vor allem das 1,5 °C-Ziel zu erreichen. Doch natürlich bringt diese Aufgabe eine gewisse unvermeidliche Komplexität mit sich. Viele ganz unterschiedliche Sektoren wie Verkehr, Energie, Industrie, Landwirtschaft, Gebäude etc. müssen Emissionsminderungen erreichen. Im Verhältnis zu anderen Bereichen wie Verkehr und Mobilität sind im Gebäudesektor vergleichsweise große Emissionsminderungen bei gleichzeitig geringem Aufwand möglich. Der Grund liegt im großen Effizienzsteigerungspotenzial in Form von veränderter Haustechnik oder Energieversorgung.

Durch die hohen Energieströme, die in den Bausektor fließen und die große Zahl an Wohnungsbewilligungen, erscheint der Einfluss des Gebäudesektors auf die Emissionsentwicklung nachvollziehbar und eine nachhaltige Entwicklung im Bausektor als Voraussetzung. Um eine nachhaltige Entwicklung zu sichern besteht aber die Notwendigkeit, alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit abzudecken und das möglichst gleichzeitig.

Ökologisch gesehen ist der Gebäudesektor weltweit für ca. 60% der entnommenen Rohstoffe und für rund 60% der anfallenden Abfallmengen verantwortlich (Hegger, 2009), gleichzeitig ist der Gebäudesektor innerhalb der EU für rund 40% des Gesamtenergieverbrauchs verantwortlich und für 36% der CO₂ Emissionen (Europäische Kommission, 2015). Auch die ökonomische Dimension ist nicht zu unterschätzen. Allein in Österreich sind im Jahr 2015 rund 33.700 Unternehmen in der Baubranche tätig, darunter Groß-, Mittel- und Kleinunternehmen. Auch in den Jahren 2016 und 2017 kam es zu konstanten Nachfrageüberschüssen nach Fachkräften in der Branche (Auer, 2017). In der sozialen Dimension ist zu erwähnen, dass wir uns rund 90% unserer Lebenszeit in Gebäuden aufhalten, aus eigener Entscheidung oder auch auf Grund von beruflichen Verhältnissen. Daraus folgt, dass auch Aspekten wie Raumklima und Wohnqualität große Wichtigkeit zugewiesen werden muss (Treberspurg, 2006).

2.2.1 Normierung im Bausektor

Um unterschiedliche Ansätze jedoch miteinander zu vergleichen braucht es eine gewisse Form der Normierung. Damit wird versucht die drei Säulen der Nachhaltigkeit möglichst gleichzeitig und gleichberechtigt auf der Grundlage von technischen und funktionalen Eigenschaften des jeweiligen Gebäudes zu bewerten (DIN EN 15643-1:2010, 2010, S. 4). Im Bereich für nachhaltige Gebäude erfolgt die Normierung durch die International Standardisation Organisation (ISO

TC59/SC17: Sustainability in building construction), auf europäischer Ebene durch das technische Komitee des Europäischen Komitees für Normung (CEN/TC 350: Sustainability of construction works). Ziel beider Normungsorganisationen ist ein einheitliches Normenwerk für Indikatoren und die Bereitstellung einheitlicher Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen für den internationalen bzw. den europäischen Markt. Gemeinsam entwickelte Normen enthalten den Zusatz ÖNORM EN ISO (Bundesministerium des Innern, 2018).

Grundlage und Rahmen bildet die vierteilige Norm EN 15643 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden des technischen Komitees CEN/TC 350 „Nachhaltigkeit von Gebäuden“. Teil 1 der Norm legt die Rahmenbedingungen der Norm fest, Teil 2-4 befasst sich jeweils mit einer der drei Dimensionen (Ökologisch, ökonomisch und sozial). (DIN EN 15643-1:2010, 2010).

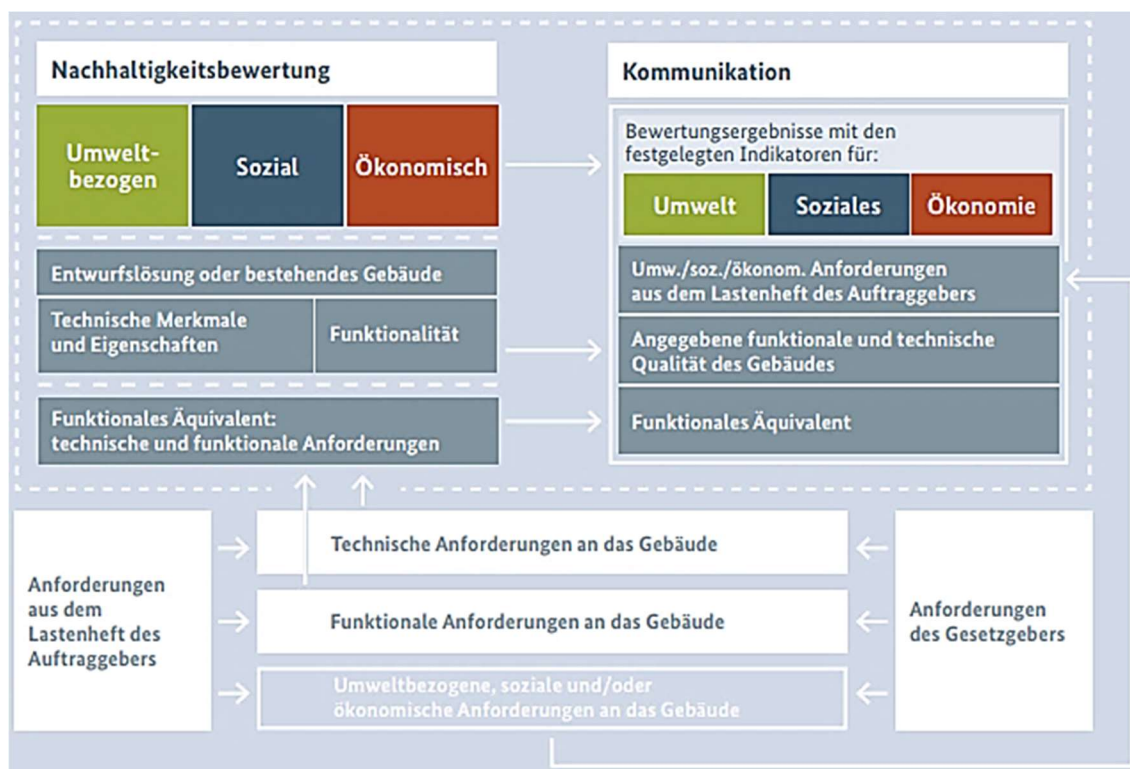


Abbildung 2: Konzeption der Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden (DIN EN 15643-1:2010, 2010)

Abbildung 2 stellt jenen Bereich dar (Rot strichlierter Bereich), der durch die CEN/TC 350 genormt werden soll. Die Bewertung der technischen und funktionalen Qualität ist zwar nicht Teil der Normreihe, trotzdem bildet ihre Wechselbeziehung mit den unterschiedlichen Dimensionen eine Voraussetzung für die Bewertung und wird deshalb berücksichtigt.

Innerhalb der Norm erfolgt die Anwendung eines Bewertungssystems auf Grundlage eines Lebenszykluskonzepts. Ein solches Bewertungssystem kann aus verschiedenen methodischen Teilen bestehen, zum einen aus einem quantitativen beschreibenden, analytischen Teil und zum anderen aus einem bewerteten, Werturteile enthaltenden Teil. Die Norm beschäftigt sich ausschließlich mit dem analytischen Teil. Deshalb ist zu erwähnen, dass die Norm keinerlei

Grenzwerte, Klassen oder Richtwerte enthält (DIN EN 15643-1:2010, 2010, S. 4).

Ziele des Bewertungssystems sind:

- die Auswirkungen und Aspekte eines Gebäudes und seines Grundstücks zu ermitteln und
- eine Entscheidungshilfe für Auftraggeber, Nutzer und Entwurfsplaner in Nachhaltigkeitsfragen zum jeweiligen Objekt zu gewährleisten (DIN EN 15643-1:2010, 2010, S. 18) .

Wichtigster Grundsatz für ein System der nachhaltigen Gebäudebewertung ist es, dass alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit möglichst gleichgewichtet in die Bewertung der Qualität des Gebäudes einbezogen und kommuniziert werden. Es ist grundsätzlich möglich, auch die unterschiedlichen Dimensionen unabhängig voneinander zu bewerten. Ihre Aussagekraft für das System ist dabei jedoch gering. Um sicherzustellen, dass die Verfahren der Bewertung der unterschiedlichen Qualitäten nachprüfbar, transparent und vergleichbar mit anderen Bewertungsergebnissen sind, müssen sie glaubwürdig gestaltet und in ihrem Ablauf systematisch und transparent sein. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, beziehen sich alle Ergebnisse auf die jeweilige funktionelle Einheit (FE). Die funktionelle Einheit bildet die Grundlage für einen Vergleich auf der Gebäudeebene. Vergleiche zwischen Ergebnissen, die sich aus der Gebäudebewertung ergeben, dürfen nur auf Grundlage ihrer funktionellen Einheit angestellt werden (DIN EN 15643-1:2010, 2010, S. 18).

Bewertung der umweltbezogenen Qualität

Bei der Bewertung der umweltbezogenen Qualität sind Methoden zu verwenden, die sich auf die umweltbezogenen Aspekte und Auswirkungen eines Gebäudes beziehen. Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität wird jede Phase des Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet (Abbildung 3). Dazu werden Informationen aus jeder der Phasen A-C, die die Lebenszyklusphasen darstellen, benötigt. Die verwendeten Verfahren müssen mit den Umweltaspekten und -auswirkungen der Phasen A-C zusammenhängen. Abschnitt D ist freigestellt und wird für etwaige Wiederverwendung, Recycling oder Energierückgewinnung verwendet, die aber nicht im Lebenszyklus des Gebäudes enthalten sind (DIN EN 15643-2:2010, 2011, S. 27).

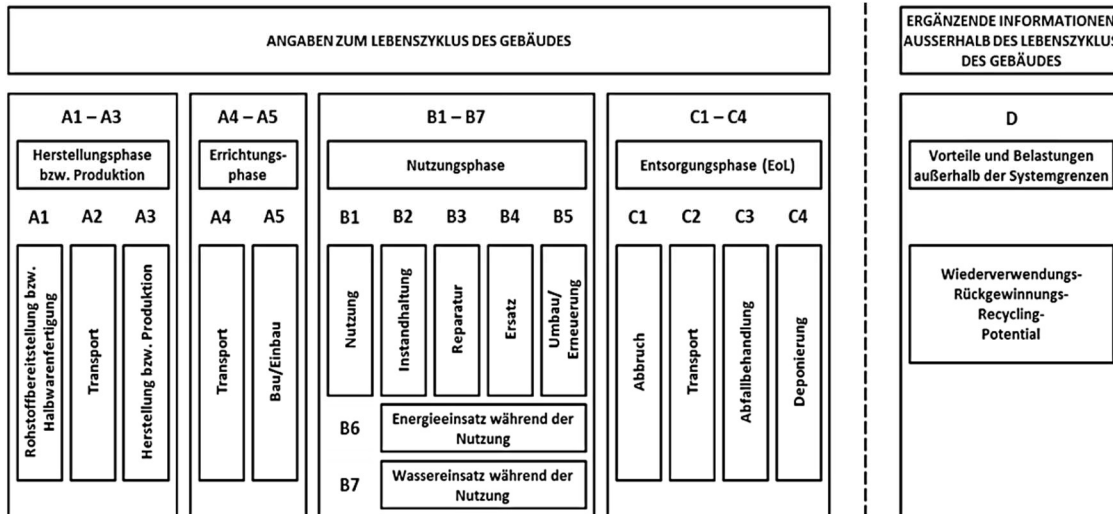


Abbildung 3: Lebenszyklusphasen in der Bewertung der umweltbezogenen Qualität (DIN EN 15643-2:2010, 2011)

Der Gegenstand der Bewertung schließt die Fundamente und Außenanlagen auf dem zugehörigen Grundstück sowie jede Form von Arbeiten, die im Zeitraum der Errichtung des Gebäudes anfallen mit ein (DIN EN 15643-1:2010, 2010, S. 19). Bei der Betrachtung des Zeithorizonts ist der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes bei der umweltbezogenen Bewertung anzunehmen. Verwendete Indikatoren, die in die Beschreibung einfließen, können in drei Hauptgruppen unterteilt werden.

- Indikatoren für Umweltauswirkungen (LCIA-Kategorien)
- Indikatoren für den Einsatz von Ressourcen (Umweltaspekte)
- Indikatoren für weitere umweltbezogene Informationen (Umweltaspekte) (DIN EN 15643-2:2010, 2011, S. 28)

Spezifische Indikatoren zu den einzelnen Hauptgruppen werden im Anhang B angeführt. Hinsichtlich der Transparenz und eines einheitlichen Informationsflusses ist zu beachten, dass alle Indikatoren quantifizierbar sind, Indikatoren der Produktebene auch für die Gebäudeebene gelten und eine Doppelzählung ausgeschlossen ist (DIN EN 15643-2:2010, 2011, S. 28).

In Bezug auf die Datenqualität sind die ÖNORMEN EN 15978 (Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden) und EN 15804 (Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte) zu erwähnen. Die Qualität der umweltbezogenen Informationen über Produkte, Prozesse, Dienstleistungen und die Beschreibung der umweltbezogenen Qualität müssen den Anforderungen der Normen 15978 und 15804 entsprechen. Besonderer Wert wird auf Genauigkeit, Vollständigkeit und Repräsentativität der Datenqualität gelegt. Der Ablauf der Berechnung wird durch prEN 15978 beschrieben (DIN EN 15643-2:2010, 2011, S. 24).

Bewertung der sozialen Qualität

Bei der Bewertung der sozialen Qualität sind Methoden anzuwenden, die sich auf die sozialen Aspekte und Auswirkungen eines Gebäudes auf seinen Lebenszyklus beziehen. Die soziale Qualität eines Gebäudes kann durch folgende Punkte festgelegt werden:

- Gesetzliche Anforderungen
- Aufgabenstellung des Kunden
- Anwendungsspezifikationen

Kategorien die die soziale Qualität beschreiben sind Zugänglichkeit, Anpassungsfähigkeit, Gesundheit und Behaglichkeit, Belastungen für benachbarte Bereiche, Instandhaltung, Sicherheit/Schutz, Herkunft der Baustoffe und Dienstleistungen und Einbeziehung der Beteiligten (DIN EN 15643-3:2010, 2012, S. 7).

Wie auch bei der Bewertung der umweltbezogenen Qualität ist die Berechnung des Verfahrens zur sozialen Qualität in einer eigenen Norm angegeben, der prEN 16309 (Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der sozialen Qualität von Gebäuden – Verfahren).

Anhang B gibt Möglichkeiten, welche sozialen Aspekte in die Beurteilung der sozialen Qualität einfließen können (DIN EN 15643-3:2010, 2012, S. 27).

Bewertung der ökonomischen Qualität

Bei der Bewertung der ökonomischen Qualität sind Methoden anzuwenden, die sich auf die ökonomischen Aspekte und Auswirkungen eines Gebäudes beziehen. Die Bewertung innerhalb der DIN-Norm enthält zwei Indikatoren für die ökonomische Qualität:

- Qualität ausgedrückt in den entstehenden Kosten im Verlauf des Lebenszyklus

Dieser Ansatz bewertet ein Gebäude umso höher, je ökonomischer es im Vergleich zu anderen steht. D.h. Gebäude mit den geringsten Lebenszykluskosten werden präferiert. Damit der Vergleich auch verwendbar ist, dürfen sich die Gebäude in ihrer Funktionalität und ihren möglichen Einnahmen nicht unterscheiden. Für die Bewertung des Gebäudes reichen somit Kostenangaben aus.

- Qualität ausgedrückt im Kapitalwert

Dieser Ansatz bewertet ein Gebäude auf Grund seiner diskontierten Erlöse abzüglich seiner diskontierten Kosten. Für die Bewertung müssen neben Kostenangaben auch Informationen zu den finanziellen Erträgen erfasst werden. Grund dafür sind Ähnlichkeiten des Ansatzes mit dem Ertragswertverfahren wo marktbezogene Ertragsquellen integriert sind (DIN EN 15643-4:2010, 2012, S. 18).

Bei der Festlegung der Systemgrenzen ist es wichtig, Aspekte und Auswirkungen der Gebäudetechnik sowie der mit dem Gebäude verbundenen Ausrüstung und Ausstattung einzubeziehen. Nicht mit dem Gebäude verbundene Ausstattung kann gesondert aufgezeichnet und angegeben werden (DIN EN 15643-4:2010, 2012, S. 19).

Für die Bewertung der ökonomischen Qualität sind folgende Projektschritte und Entscheidungen zu beachten: Entscheidung zur möglichen Sanierung, Erneuerung, Erweiterung oder Abbruch, vertragliche Vereinbarung zu Entwurf und Spezifikation, Beschaffung von Produkten, Bautätigkeit, Übergabe hinsichtlich Nutzung und Ausrüstung, Inbetriebnahmen und tatsächliche Nutzung bis zur Außerbetriebnahme und Rückbau oder Abriss (DIN EN 15643-4:2010, 2012, S. 20).

Die Bewertung der ökonomischen Qualität muss alle Informationen aus den Modulen A bis D enthalten, die folgende Aspekte beschreiben:

- Ökonomische Aspekte und Auswirkungen in der Phase vor der Nutzung. Inklusive Planungsphase A0 (A0, A1-A5)
- Ökonomische Aspekte und Auswirkungen ausgenommen des Gebäudes im Betrieb in der Nutzungsphase (B1-B5)
- Ökonomische Aspekte und Auswirkungen während des Gebäudebetriebs (B6-B7)
- Ökonomische Aspekte und Auswirkungen während der Entsorgungsphase (C1-C4, D) (DIN EN 15643-4:2010, 2012, S. 21)

2.2.2 Bewertungs- und Zertifizierungssysteme von nachhaltiger Gebäudequalität

Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung besitzen nun bereits seit einigen Jahren einen Fixplatz in den Bereichen Planungswesen und dem Bausektor. Um Bewertungs- und Zertifizierungssysteme in der Praxis anzuwenden müssen sie mehrere Anforderungen erfüllen: Sie müssen die Nachhaltigkeit von Gebäuden einerseits transparent an die Öffentlichkeit weiterleiten und andererseits die Interessen verschiedener Personengruppen (Politik, Investoren, Bauherren, etc.) abdecken. Zertifizierungssysteme dienen großteils als Planungsinstrument und Signalgeber, deshalb müssen sie die Anforderungskriterien und Zielwerte für nachhaltiges Bauen möglichst verständlich definieren und beschreiben. Weiters müssen die Bewertungssysteme bei zunehmender Komplexität trotzdem finanzierbar sein, Mehrwerte generieren und ihre Ergebnisse transparent und nachvollziehbar an alle Beteiligten weiterleiten. Bewertungs- und Zertifizierungssysteme müssen an klimatische, soziale und ökonomische Randbedingungen angepasst und gleichzeitig nicht zu stark an einzelne Bereiche gebunden sein, um ihre Komplexität und Vergleichbarkeit nicht unnötig zu erhöhen (Ebert et al., 2013, S. 6-7).

Die Bewertungs- und Zertifizierungssysteme können als Systeme der ersten Generation und als Systeme der zweiten Generation bezeichnet werden. Systeme der ersten Generation bewerten

hauptsächlich und vorrangig die ökologischen und energetischen Qualitätskriterien und lassen ökonomische und soziale Aspekte außen vor. Bewertungssysteme der zweiten Generation bauen auf Erfahrungen der ersten Generation auf und bewerten seine ganzheitliche Qualität, d.h. ökologische, ökonomische und soziale Aspekte, sowie Technik- Standort- und Prozessqualität. Die britische Methode Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) des Building Research Establishment (BRE) von 1990 gilt als Vorreiter von Zertifizierungssystemen. Ihr folgte 1996 das französische System Haute Qualité Environnementale (HQE). Im Jahre 1998 folgte das nordamerikanische Label Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) des U.S. Green Building Council (USGBC). Die genannten Label sind alle Zertifikatsysteme aus der ersten Generation. Bewertungssysteme der zweiten Generation sind beispielsweise das 2008 entwickelte Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen (DGNB) (Ebert et al., 2013, S. 26).

Die meisten der Bewertungs- und Zertifizierungssysteme bauen aufeinander auf und profitieren von gegenseitigem Informationsaustausch. Aus der schnellen Entwicklung der 90er Jahre entstanden viele weitere Bewertungs- und Zertifizierungssysteme (Abbildung 5). Trotz zahlreicher Ansätze hat sich bisher keine Bewertungsmethode international durchsetzen können. Einzig der BREEAM und der LEED ist es gelungen, kleinere nationale Ableger zu schaffen (BREEAM Spanien, BREEAM Türkei, LEED Brasilien etc.).

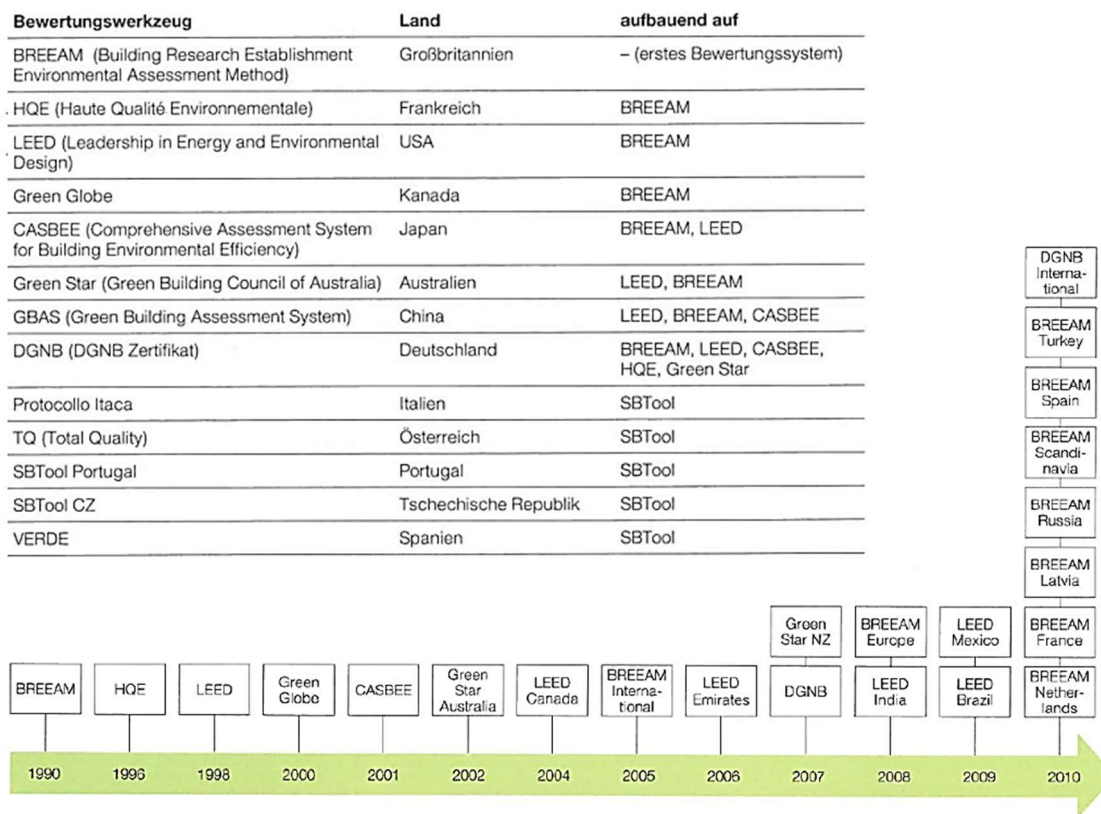


Abbildung 4: Zeitstrahl und Entwicklung von Bewertungs- und Zertifizierungssystemen (Ebert et al., 2013)

Im Folgendem wird kurz auf die drei wichtigsten Bewertungs- und Zertifizierungssysteme eingegangen

2.2.2.1 BREEAM

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) gilt als Urversion der Zertifikatsysteme, da es Grundlage so gut wie aller anderen Bewertungsschemata darstellt. BREEAM gilt als führende Methode zur Nachhaltigkeitsbewertung und wird in 72 Ländern weltweit angewandt. Rund 530.000 Zertifikate wurden in den Jahren seit dem Inkrafttreten gewährt und mehr als 2,2 Millionen Gebäude registriert. Neben dem führenden Land Großbritannien sind etwa Deutschland, Italien und Spanien die weiteren BREEAM Zertifizierungsgebiete (BREEAM, 2016).

Wie auch andere Systeme erstreckt sich bei BREEAM der Zertifizierungsprozess über die verschiedenen Herstellungsphasen in Planung und Bau. Abhängig von den erreichten Punktezahlen in den BREEAM-Kategorien (Abbildung 6) werden verschiedene Zertifizierungsgrade vergeben. Neben den prozentualen Erfüllungsgraden sind definierte Mindestanforderungen in den verschiedenen Kategorien zu erreichen, werden diese Punktezahlen nicht erreicht wird der Bereich als nicht bestanden bewertet (Ebert et al., 2013, S. 33).

Kategoriengewichtung (in Abhängigkeit von Region und Nutzungsprofil)

– Management:	12,0 %		– Materials:	12,5 %	
– Health and Wellbeing:	15,0 %		– Waste:	7,5 %	
– Energy:	19,0 %		– Land Use and Ecology:	10,0 %	
– Transport:	8,0 %		– Pollution:	10,0 %	
– Water:	6,0 %		– Innovation: Separate Bewertung		

Abbildung 5: Gewichtung der Kategorien (Schüco International, 2016)

Zertifizierungsstufen

Allgemeine Unterteilung:	– Unclassified	< 30 %	– Very good	≥ 55 %
	– Pass	≥ 30 %	– Excellent	≥ 70 %
	– Good	≥ 45 %	– Outstanding	≥ 85 %

Abbildung 6: BREEAM Zertifizierungsgrade (Schüco International, 2016)

2.2.2.2 LEED

Das amerikanische LEED-Modell (Leadership in Energy and Environmental Design) zeigt große Ähnlichkeiten mit dem BREEAM, was man an der ähnlichen Gliederung der einzelnen Kriterien erkennt.

Entwickelt wurde das LEED vom USGBC (U.S. Green Building Council) mit dem Gedanken, ein System zu schaffen, mit dem Gebäude in Bezug auf deren Nachhaltigkeit beurteilt und miteinander verglichen werden können. Geschaffen wurde eine Zertifizierungsmethode, die eine hochwertige, ökologische, profitablere und umweltfreundlichere Bauweise für Gebäude definieren soll. Das LEED soll es hauptsächlich den Betreibern und Eigentümern von Gebäuden ermöglichen praktikable und messbare Maßnahmen für Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung ihrer Gebäude zu setzen. LEED setzte seine Schwerpunkte hauptsächlich auf Energie- und Wassereffizienz, Reduzierung von CO₂-Emissionen, gesunde und behagliche Innenräume, Ressourcenschonung, Bauaktivitäten und Qualität des Standorts. (Ebert et al., 2013, S. 38).

LEED ist weltweit in rund 165 Ländern anzufinden und wird meist von international tätigen Unternehmen verwendet, die Wert auf eine einheitliche Bewertung der firmeneigenen Gebäude legen (USGBC, 2018).

Die Zertifizierung mittels LEED ist auf einem Punktesystem aufgebaut, bei dem für die Erfüllung einzelner Kriterien Punkte gesammelt werden. Die Themenfelder (Tabelle 1) geben eine unterschiedliche Anzahl von Punkten die anschließend addiert werden, wobei in jedem Themenfeld eine Mindestpunktezah erreicht werden muss. Die Zertifikate werden in die Kategorie Certified (40-49 Punkte), Silver (50-59 Punkte), Gold (60-69 Punkte) und Platinum (80-110 Punkte) eingeteilt und vergeben (USGBC, 2018).

Tabelle 1: LEED Kriterien (Ebert et al., 2013)

Kriterien	Kriterien Anzahl	Max. Punkte
Nachhaltige Baugelände (Sustainable Sites)	15	26
Effiziente Wassernutzung (Water Efficiency)	5	10
Energie und Atmosphäre (Water Efficiency)	9	35
Materialien und Ressourcen (Materials and Resources)	15	14
Komfort und Innenraumklima (Indoor Environmental Quality)	17	15
Innovationen (Innovation and Design)	2	6
Regionale Schwerpunkte (Regional Credits)	1	4

2.2.2.3 DGNB

Die deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) wurde 2007 gegründet, um ein deutsches System zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauwerken zu entwickeln und im deutschen als auch im internationalen Raum den Nachhaltigkeitsaspekt zu stärken. In Kooperation mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) wurde 2009 an einem DGNB Zertifizierungssystem gearbeitet. Bereits zu Beginn der Entwicklung wurde großer Wert auf Expertenwissen aus vielen unterschiedenen Bereichen gelegt, um das System möglichst umfassend zu definieren. Das DGNB ist ein Zertifizierungssystem der zweiten Generation. Das erkennt man daran, dass das System ganzheitlich, ökologische, ökonomische und soziokulturelle Nachhaltigkeitsaspekte und gleichzeitig technische, prozessorientierte und standortspezifische Aspekte einbindet (Ebert et al., 2013, S. 48).

Derzeit stehen dem DGNB rund 20 verschiedene Nutzungsprofile auf nationaler und internationaler Ebene zur Verfügung. Durch die hohe Flexibilität innerhalb des Systems ist es möglich, innerhalb kurzer Zeit weitere Nutzungsprofile zu entwickeln. Die Nutzungsprofile reichen von Büro- und Verwaltungsbauten, Bildungsbauten, Industriebauten bis hin zu Wohngebäuden und Hotels. Weiters ist es möglich, innerhalb des Systems auf die verschiedenen klimatischen, gesetzlichen und baulichen Bestimmungen einzugehen, was die Anwendung auf internationaler Ebene deutlich erleichtert (DGNB, 2018).

Das Zertifizierungssystem baut stark auf Erfahrungen bestehender Bewertungssysteme auf. Das System integriert den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, das heißt neben Planung, Herstellung und Errichtung auch die Nutzung, Bewirtschaftung und den Abriss (Ebert et al., 2013, S. 52). Neben einem Gesamterfüllungsgrad ist auch ein Mindesterfüllungsgrad zur Erreichung

der Zertifikatsziele zu erreichen.

Tabelle 2: Bewertungsstufen des DGNB-Systems (DGNB, 2018)

Gesamterfüllungsgrad	Mindesterfüllungsgrad	Auszeichnung
ab 35%	-%	Bronze*
ab 50%	35%	Silber
ab 65%	50%	Gold
ab 80%	65%	Platin

*Die Auszeichnung Bronze gilt nur für Bestandsgebäude

2.2.2.4 Vergleich der Bewertungs- und Zertifizierungssysteme

Jüngere Systeme der zweiten Generation wie das DGNB Zertifikat haben den Vorteil, dass sie die ersten Ansätze der internationalen und europäischen Normung bereits in ihre Struktur aufgenommen haben. LEED und BREEAM befinden sich noch auf dem Weg, die Normung in ihre Struktur miteinzubinden (Ebert et al., 2013, S. 86-88).

Alle Instrumente arbeiten nach demselben Prozess. Grundsätzlich werden Instrumente verwendet um ökologische, ökonomische und soziokulturelle Qualitäten eines Gebäudes zu bestimmen. Diese Qualitäten werden in jedem System anders dargestellt. Je höher die erreichte Punkte- oder Prozentzahl in den jeweiligen Bereichen, desto höher die finale Note der Bewertung.

Die Aufbauten der Systeme sind in Abbildung 8 dargestellt. Ebene 1 bilden bei allen Systemen die nationalen Schutzziele. Ebene 2 befasst sich mit den in Ebene 1 definierten Schutzziele mithilfe von Kategorien und Qualitäten.

Da DGNB einen ganzheitlichen Ansatz verfolgt, existiert eine zusätzliche Ebene zwischen der Ebene 2 und Ebene 3. Hier bündeln die Qualitäten die einzelnen Bewertungskriterien. Ebene 3 beinhaltet die Kriterien der jeweiligen Systeme. Sie bilden den Hauptbestandteil der Bewertungssysteme. Je nach klimatischen, politischen, gesetzlichen und kulturellen Bedingungen unterscheidet sich hier die Auswahl der Kriterien.

Tabelle 3: Vergleich der Systeme LEED, BREEAM, DGNB

	LEED	BREEAM	DGNB
1. Ebene: Ziele	nationale Schutzziele	nationale Schutzziele	nationale Schutzziele
2. Ebene: Qualitäten, Kategorien, Aspekte			6 Qualitäten: ökologische Qualität, ökonomische Qualität, soziokulturelle und funktionale Qualität, technische Qualität, Prozessqualität, Standortqualität
	6 Kategorien: nachhaltige Baugelände, effiziente Wassernutzung, Energie und Atmosphäre, Materialien und Innenraumklima, Innovation und Planungsprozess	10 Kategorien: Management, Gesundheit und Behaglichkeit, Energie, Transport, Wasser, Materialien, Abfall, Flächenverbrauch und Grundstücksökologie, Emissionen, Innovationen	11 Kategorien: Wirkungen auf die globale/lokale Umwelt, Ressourceninanspruchnahme/Abfallaufkommen, Lebenszykluskosten, Werstabilität, Gesundheit/Behaglichkeit, Funktionalität, gestalterische Qualität, Qualität der technischen Ausführung, Qualität der Planung, Qualität der Bauausführung, Qualität des Standorts
3. Ebene: Kriterien	43 Kriterien	76 Kriterien	49 Kriterien
4. Ebene: Indikatoren	qualitativ und quantitativ	qualitativ und quantitativ	qualitativ und quantitativ
5. Ebene: Gewichtung	mit Punkten	in %	mit Bedeutungsfaktoren und in %
6 Ebene: Ergebnis	Zertifiziert, Silber Gold, Platin	Bestanden, Gut, Sehr gut, Exzellent,	Bronze, Silber Gold

Alle drei Bewertungsmethoden verwenden Kriterien, die in den jeweils anderen nicht verwendet werden. Hier einen Vergleich anzustellen fällt schwer, da die Kriterien oft unterschiedliche Inhalte aufweisen, wie es z.B. bei den CO₂-Emissionen der Fall ist.

Die Ökobilanz wird momentan nur bei BREEAM und DGNB gefordert. LEED hat ebenfalls Vorgaben für die Auswahl an Baumaterial aber diese beziehen sich nur auf die Auswahl des jeweiligen Materials und nicht auf den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes (Ebert et al., 2013, S. 96).

2.2.2.5 Österreichische Systeme

Innerhalb Österreichs haben sich zwei Vereine gebildet die sich mit der Gebäudezertifizierung auf nationaler, österreichischer Ebene beschäftigen. Dabei handelt es sich um die 2009

gegründete Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (ÖGNB) und die ebenfalls 2009 gegründete Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft (ÖGNI).

Die ÖGNI lehnt sich sehr stark an den deutschen Bewertungsansatz des DGNB und bietet diesen in Österreich an. Dabei wird das deutsche Bewertungssystem fast zu Gänze übernommen und implementiert. Die ÖGNB verwendet in ihren Bewertungen das Bewertungssystem TQB (Total Quality Gebäudebewertung), das als System der 2. Generation bezeichnet werden kann (ÖGNB, 2019).

2.2.3 Energieeffizienzklassen von Gebäuden

Um die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden innerhalb der EU zu verbessern, wurde durch das Europäische Parlament gemeinsam mit dem Rat im Dezember 2002 die Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden erlassen (RL 2002/91/EG). Ziele der Richtlinie ist es, die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in der Gemeinschaft der EU unter Berücksichtigung der jeweiligen äußeren klimatischen und lokalen Bedingungen sowie der Anforderungen an das Innenraumklima und der Kostenwirksamkeit zu unterstützen (RL 2002/91/EG, 2002). Die Energieeffizienz eines Gebäudes wird mittels der Gesamtenergiekennzahl beschrieben, die durch den Primärenergieverbrauch (Energie aus nicht erneuerbaren Energieträgern) während der Nutzungsphase ausgedrückt wird (Lützkendorf et al., 2009, S. 63).

Die Richtlinie enthält im Wesentlichen folgende Vorgaben für:

- die Berechnung der Gesamtenergieeffizienz
- Mindestanforderungen der Gesamtenergieeffizienz von Neubauten und größere Renovierungsprojekte
- die Energieausweispflicht von Neubauten und öffentlich genutzten Gebäuden sowie bei Nutzerwechsel
- die regelmäßige Inspektion von Heizkesseln, Klimaanlage und Heizungsanlagen älter als 15 Jahre.

Die Mitgliedsstaaten mussten die Richtlinie bis 04. Januar 2006 in nationales Recht umsetzen. In Österreich wurden die Vorgaben durch das Energieausweisvorlagegesetz und die OIB-Richtlinie 6 in nationales Recht implementiert (RL 2002/91/EG, 2002).

Am 19. Mai 2010 erfolgte die Neufassung der Gebäuderichtlinie (RL 2010/31/EU), die für strengere Regelungen innerhalb der Bauvorschriften und der Gesamtenergieeffizienz in der gesamten EU sorgt. Die Umsetzung in nationales Recht erfolgte am 09. Juli 2012.

Die Neuerungen betreffen hauptsächlich die Vorbildfunktion von öffentlichen Gebäuden, Bestrebungen zur Ausweitung der Bedeutung des Energieausweises und der Energiekennzahlen sowie das Ziel, neue Gebäude ab 2020 durch entsprechende Maßnahmen „nahezu energieautark“ zu gestalten.

Gebäude können im Energieausweis in verschiedene Energieeffizienzklassen eingeteilt werden, dies erfolgt in den Klassen A++ bis G. Die Einteilung erfolgt auf Basis von vier Kategorien:

- HWB (Heizwärmebedarf)
- PEB (Primärenergiebedarf)
- CO₂
- f_{GEE} (Gesamtenergiefaktor) (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015)

Tabelle 4: Energieeffizienzklassen von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden nach OIB RL (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015)

Energieeffizienzkategorie	HWB	PEB	CO ₂	F _{GEE}
A++	HWB _{Ref,SK} ≤ 10 kWh/m ² a	PEB _{SK} ≤ 60 kWh/m ² a	CO _{2 SK} ≤ 8 kg/m ² a	fGEE ≤ 0,55
A+	HWB _{Ref,SK} ≤ 15 kWh/m ² a	PEB _{SK} ≤ 70 kWh/m ² a	CO _{2 SK} ≤ 10 kg/m ² a	fGEE ≤ 0,70
A	HWB _{Ref,SK} ≤ 25 kWh/m ² a	PEB _{SK} ≤ 80 kWh/m ² a	CO _{2 SK} ≤ 15 kg/m ² a	fGEE ≤ 0,85
B	HWB _{Ref,SK} ≤ 50 kWh/m ² a	PEB _{SK} ≤ 160 kWh/m ² a	CO _{2 SK} ≤ 30 kg/m ² a	fGEE ≤ 1,00
C	HWB _{Ref,SK} ≤ 100 kWh/m ² a	PEB _{SK} ≤ 220 kWh/m ² a	CO _{2 SK} ≤ 40 kg/m ² a	fGEE ≤ 1,75
D	HWB _{Ref,SK} ≤ 150 kWh/m ² a	PEB _{SK} ≤ 280 kWh/m ² a	CO _{2 SK} ≤ 50 kg/m ² a	fGEE ≤ 2,50
E	HWB _{Ref,SK} ≤ 200 kWh/m ² a	PEB _{SK} ≤ 340 kWh/m ² a	CO _{2 SK} ≤ 60 kg/m ² a	fGEE ≤ 3,25
F	HWB _{Ref,SK} ≤ 250 kWh/m ² a	PEB _{SK} ≤ 400 kWh/m ² a	CO _{2 SK} ≤ 70 kg/m ² a	fGEE ≤ 4,00
G	HWB _{Ref,SK} > 250 kWh/m ² a	PEB _{SK} > 400 kWh/m ² a	CO _{2 SK} > 70 kg/m ² a	fGEE > 4,00

Tabelle 3 stellt die Klassengrenzen für Wohn- und Nicht-Wohngebäude nach OIB Richtlinie 6 dar.

HWB, PEB und CO₂ beziehen sich auf eine Referenzfläche, die innerhalb der Richtlinie 6 definiert wird.

Es folgte eine Neufassung der Gebäude Richtlinien (RL 2010/31/EU) im Jahr 2010, die praktisch alle neuen Gebäude mit Fertigstellung 2020, auf dem Standard eines Niedrigstenergiehauses forderte. 2018 kam folgte eine aktuelle Neuerung, der EPBD (Energy Performance of Buildings Directive). Die neue Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden 2018/844 wurde am 19. Juni 2018 veröffentlicht und trat am 9. Juli 2018 in Kraft (RL 2018/844 EG, 2018).

Das Niedrigstenergiehaus

Ein Niedrigstenergiehaus zeichnet sich durch folgende Eigenschaften in seiner Bauweise aus: Kompakte Bauweise, sommertaugliches Bauen, sehr gute Wärmedämmung mit vorgeschriebene U-Werten für Bauteile, Nutzung einer Komfortlüftung, Luftdichtheit und die Verwendung von erneuerbaren Energiequellen zum Heizen und zur Warmwasseraufbereitung. Diese Eigenschaften ergeben eine hohe Energieeffizienz bei gleichzeitig geringem Energiebedarf des Gebäudes (Baur-Gschier et al., 2014).

Laut Definition sind Kennzahlen des Niedrigstenergiehauses für Neubauten und Renovierungsvorhaben unterschiedlich, wobei Kennzahlen für Neubauten strenger geregelt sind und sich deshalb auf diese bezogen wird. Laut OIB RL 6 dürfen Niedrigstenergiehäuser mit Baujahr 2018 einen Primärenergiebedarf von $170 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ nicht überschreiten. Der HWB wird über die charakteristische Länge l_c berechnet ($16 \cdot (1 + 3,0/l_c)$) und der Gesamtenergiefaktor darf maximal 0,8 betragen. Diese Kennzahlen sind laut OIB RL 6 bis zum Jahr 2020 geregelt und werden jährlich angepasst, was zu einer Verringerung der hervorgerufenen Umweltwirkung der Gebäude führt (Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB-Dokument zur Definition des Niedrigstenergiegebäudes und zur Festlegung von Zwischenzielen in einem „Nationalen Plan“ gemäß Artikel 9 (3) zu 2010/31/EU, 2014).

Das Passivhaus

Das Passivhaus stellt eine Weiterentwicklung der zuvor vorgestellten Bauweise des Niedrigstenergiehauses dar. Grundsätzlich kommt ein Gebäude in Passivhaus-Standard ohne separates Heiz- und Klimatisierungssystem aus. Dabei werden die Kernverluste des Gebäudes durch entsprechende Dämmstandards derart verringert, dass eine herkömmliche Heizung nicht mehr erforderlich ist. Die benötigte Innentemperatur des Gebäudes wird durch eine Nacherwärmung der Zuluft, innere Wärmegewinnung durch Personen und Geräte sowie durch solare Gewinne durch die Gebäudeorientierung erreicht.

Grundsätzlich darf ein Gebäude in Passivhaus-Standard einen HWB von $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und einen nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf von $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ nicht überschreiten. Diese Kennzahlen sind auf die Passivhaus-Energiebezugsfläche bezogen – die deutlich kleiner ist als die Bruttogrundfläche - und werden gemäß Passivhausprojektierungspaket berechnet. Daher sind diese Kennzahlen nicht direkt vergleichbar mit den Kennzahlen des Energieausweises nach OIB. Umgerechnet in Heizöl liegt der jährliche Nutz-Energiebedarf für die Raumheizung eines Passivhauses bei weniger als $1,5 \text{ l/m}^2$. (Treberspurg, 2006, S. 129-130).

Das Passivhaus plus

Eine Steigerung des Passivhausstandards ist das Passivhaus plus. Eingeführt wurde dieser Standard im Jahr 2015 durch das Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) Version 11. Gleich wie beim Passivhaus darf der HWB auch hier maximal $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ betragen. Durch die neue Passivhausklasse „Passivhaus plus“ wurde der Primärenergiebedarf durch den erneuerbaren

Primärenergiebedarf pro Energiebezugsfläche (PER-Bedarf) ersetzt, der die Nutzung von fossilen Energieträgern ausschließt. Darauf folgt ein PER-Bedarf von maximal 45 kWh/m²a bei gleichzeitigem Ertrag an erneuerbarer Energie pro bebauter Fläche von mindestens 60 kWh/m²a (Krick, 2015).

2.3 Ökobilanz von Gebäuden

„Eine Ökobilanz ist eine Zusammenstellung und Beurteilung der Input- Output Flüsse und der potentiellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ (Treberspurg, 2006, S. 242).

Ökobilanzen, oft auch als Lebenszyklusanalysen bezeichnet, arbeiten nach dem Prinzip der Lebenszyklusperspektive. Innerhalb einer Ökobilanz wird versucht den Lebensweg eines Produktes oder auch einer Dienstleistung aus umweltorientierter Sicht zu beleuchten. Dabei werden nur die Umweltwirkungen eines Produkts betrachtet, ökonomische oder soziale Aspekte werden in der Ökobilanz nicht behandelt. Für die Analyse der Umweltwirkungen werden Daten aller Materialien, Inhaltsstoffe und Verarbeitungsprozesse benötigt: Daten zu Rohstoffabbau und Transport, Herstellungsprozessen, Hilfs- und Betriebsstoffen, Nutzung und Entsorgung (Eberle et al., 2018).

Das Konzept der Ökobilanzierung beruht auf folgenden drei Grundgedanken:

- Der gesamte Lebenszyklus wird betrachtet (Rohstoffgewinnung, Aufbereitung, Herstellung, Nutzung, Recycling, Entsorgung). Das erfordert eine Entwicklung von Szenarien für in Zukunft liegenden und somit unsicheren Lebenszyklusphasen.
- Alle mit dem Lebenszyklus verbundenen Umweltwirkungen (Emission in Luft, Wasser und Boden) werden erfasst und addiert.
- Die Umweltbelastungen werden ihren Wirkungen zugeordnet und für eine Bewertung transparent gemacht (Lützkendorf et al., 2009, S. 38)

2.3.1 Ökobilanz, Life-Cycle-Assessment (LCA)

2.3.1.1 Entwicklung und Methode der Ökobilanz

Die Ökobilanz hat ihren Ursprung in den 70er Jahren mit der Zunahme der sichtbaren Auswirkungen der Umweltverschmutzung und der zunehmenden Probleme der Energieversorgung. Dabei entstand ein erster konzeptioneller Zugang für die Verknüpfung von Konsum und den daraus resultierenden Umweltwirkungen. In den 90er Jahren wurde in Deutschland eine Debatte um die Verpackungsverordnung der damaligen Zeit geführt. Dabei wurde die Ökobilanz als das Mittel zum Zweck angepriesen um die scheinbar einfache Diskussion, über die aus Erdöl produzierte Verpackung zu entscheiden. Dabei wurden aber die Schwierigkeiten aufgedeckt, die eine Ökobilanz mit sich bringt. Die vielen unterschiedlichen Varianten, die durch die Ökobilanz abbildbar sind, machten die gesellschaftliche und vor allem

die politische Entscheidungsfindung schwierig. Zu dieser Zeit verschwand die Ökobilanz aus der Öffentlichkeit, wobei sie aus wissenschaftlicher Sicht noch immer ihre Attraktivität behielt (Schebek & Bräutigam, 2007, S. 4).

Die Rahmenkriterien der Ökobilanz werden durch die ISO-Normen 14040 bis 14044 abgesteckt. Die definierten Normen geben der Ökobilanz eine transparente und vor allem einheitliche Grundlage (siehe Kapitel 2.3.1.2).

Aus Sicht der Methodik umfasst die Ökobilanz vier Arbeitsschritte, die untereinander im direkten Austausch stehen:

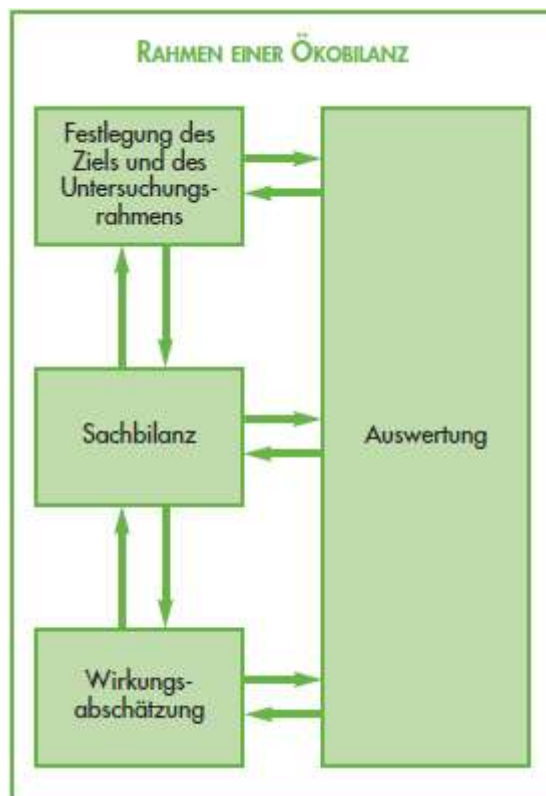


Abbildung 7: Methodik der Ökobilanz (Eberle et al., 2018)

1. Die Ökobilanz beginnt mit dem wichtigsten Schritt, der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens (Goal-and-Scope-Definition). Hierbei werden die Systemgrenzen festgelegt und die funktionelle Einheit definiert.
2. Schritt zwei ist die Erstellung der Sachbilanz (Life Cycle Inventory). Dabei werden für alle Prozesse im Systemverlauf die ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme ermittelt und auf das Gesamtsystem aggregiert. Schritt zwei bildet den arbeitsintensivsten Punkt der Ökobilanz ab.
3. In der Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment) werden den einzelnen Stoffflüssen definierte Wirkungskategorien zugeordnet und quantifiziert.
4. Mittels der Auswertung werden die erhaltenden Informationen der vorigen Schritte betrachtet und bewertet. Auf Basis derer werden Schlussfolgerungen und

Handlungsempfehlungen abgeleitet. Abschließend verpflichtet die Norm den Durchführenden der Ökobilanz zur Fehlerbetrachtung und Sensitivitätsüberprüfung, was möglicherweise zu Änderungen in den zuvor gemachten Annahmen führen kann (Schebek & Bräutigam, 2007, S. 5).

Der Erstellung einer Ökobilanz ist ein iterativer Prozess der in mehreren „Runden“ durchgeführt wird, dabei werden immer wieder Zwischenergebnisse durchgeführt, die dazu führen können, dass die ursprünglichen Daten und Annahmen ergänzt und ausgebessert werden müssen.

2.3.1.2 Beschreibung internationaler Standards

Auf nationaler Ebene wurden in den einzelnen Ländern Gremien für die Zuständigkeit im DIN Bereich eingeführt. International liegt der Schwerpunkt in der Betrachtung der einzelnen Ökobilanzierungsmethoden der national entwickelten Normen und wie diese vereinheitlicht und somit auch vergleichbar gemacht werden können. Die Zuständigkeit dafür liegt beim technischen Komitee „Umweltmanagement“ (ISO/TC 207). Dabei handelt es sich um ein Gremium der internationalen Organisation für Normung (ISO), worin nationale Vorstellungen der Länder zusammengetragen werden und unter Beteiligung aller Normungsorganisationsmitglieder des TC 207, eine internationale Norm entwickelt wird.

Das TC 207 ist für die gesamte Reihe der Umweltmanagementnormen 14000 verantwortlich. Darin enthalten sind Normen für: Grundlagen des Umweltmanagements, Zertifizierungs-Norm und Benutzungsanleitung, Richtlinien für die Auditierung, Auditverfahren und Qualifizierung für Auditoren, Umweltkennzeichnung und Deklarationen, Messverfahren sowie Ökobilanz (ISO, 2009).

Bereits seit den frühen 1990er Jahren wurden von der ISO große Anstrengungen betrieben, um eine einheitliche internationale Norm für die Ökobilanz zu entwickeln. Auf nationaler Ebene haben zu dieser Zeit nur zwei Normungsorganisationen eine eigene Norm betrieben, Frankreich mit der Association Française de Normalisation (AFNOR) und Kanada mit der Canadian Standards Association (CSA).

Die erste Normungsserie internationaler Normen für die Ökobilanz umfasst:

- ISO 14040: Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen; internationale Norm 1997;
- ISO 14041: Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz; internationale Norm 1998;
- ISO 14042: Ökobilanz – Wirkungsabschätzung; internationale Norm 2000;
- ISO 14043: Ökobilanz – Auswertung; internationale Norm 2000

Die wichtigste Normungsarbeit für eine internationale akzeptierte Norm wird dennoch von der ISO geleistet, womit sich auch die AFNOR und CSA in den ISO-Normungsprozess einbrachten. Die

CEN sowie die länderspezifischen Normungsorganisationen übernehmen die Normungstexte der ISO und übersetzen diese in drei offizielle Sprachen (Englisch, Französisch, Deutsch). Die einzelnen nationalen Gremien ergänzen die Texte mit etwaigen nationalen Problemfeldern (Klöpffer & Grahl, 2009, S. 15-17).

In den Jahren 2001-2006 kam es zu einer Überarbeitung und Neustrukturierung der Norm, die jedoch keine großen inhaltlichen Änderungen aufwies. Die Normungsserie heißt weiterhin 14040, die einzelnen Normen 14041, 14042 und 14043 wurden jedoch zur Norm 14044 zusammengefasst. Hinzugefügt wurden schlussendlich noch zwei technische Berichte und eine technische Spezifikation, die illustrative Beispiele zur Anwendung von ISO 14042 enthält, Dokumentationsformate und Beispiele zur Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens (ISO 14041) (Lützkendorf et al., 2009, S. 39-40).

2.3.1.3 Beschreibung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Der erste Schritt einer Ökobilanz ist immer die Auswahl eines entsprechenden Ziels und des Untersuchungsrahmens. Die Auswahl der zwei Punkte muss sehr sorgfältig getroffen werden, denn es bildet die Grundlage der gesamten Ökobilanz und ist schlussendlich entscheidend für den Erfolg der Arbeit. Aufgrund des iterativen Vorgehens innerhalb der Arbeit ist es möglich, dass sich Änderungen im Bearbeitungsverlauf ergeben, die sich rückwirkend auf das Ziel und den Untersuchungsrahmen auswirken. Diese sind in schriftlicher Form festzuhalten. Aufwand und Breite von Ökobilanzen können je nach Zielsetzung untereinander variieren.

Die Zieldefinition enthält grundsätzliche Information über die Arbeit und wird meist vom Auftraggeber verfasst. Sie enthält Informationen zur beabsichtigten Anwendung, dem Inhalt sowie den Grund der Arbeit. Weiter werden die angesprochenen Zielgruppen genannt und wie mit den Ergebnissen umgegangen wird (eventuelle Publikation). Der Untersuchungsrahmen hat etwaige geographische oder zeitliche Rahmenbedingungen zu enthalten. Das Beachten dieser Bedingungen kann einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis haben. Es macht einen deutlichen Unterschied in welchem Land das Produkt hergestellt wird und welche Energieform dafür verwendet wird. Ebenfalls können räumliche Abstände zu den benötigten Rohstoffen stark variieren. Auch ist zu beachten, dass im Zeitraum der Betrachtung etwaige Schwankungen in Umweltwirkungen miteinbezogen werden (saisonal, jahresabhängig).

Der Untersuchungsrahmen enthält weiters folgende Punkte:

- das Produktsystem sowie dessen Funktion
- die funktionelle Einheit
- jeweilige Allokationsverfahren (bezeichnet die Zuteilung von entstandenen Umweltwirkungen auf Haupt- bzw. Nebenprodukte über deren Lebensweg)
- Methode der Wirkungsabschätzung und der Auswertung
- Anforderungen an die Datenqualität

- vorgenommenen Annahmen;
- etwaige Einschränkungen (DIN EN ISO 14040:2009, 2009, S. 19)

Bei der Auswahl der verwendeten Daten ist es wichtig die Datenqualität so festzulegen, dass das Ziel und der Untersuchungsrahmen erfüllt werden können. Die Daten können von verschiedenen Quellen stammen, in der Praxis kommt es jedoch meist zu einer Mischung von gemessenen, errechneten oder geschätzten Daten. Sollten aufgrund von Nichtvorhandensein derselben, Daten angenommen werden, muss das dokumentiert werden. Um die Anwendbarkeit der verwendeten Daten sicherzustellen sind mehrere Anforderungen zu erfüllen: Aktualität, Präzision, Vollständigkeit, Konsistenz, Repräsentativität und Nachvollziehbarkeit.

Während Produktionsprozessen entstehen neben dem Hauptprodukt oft auch Nebenprodukte. Dabei stellt sich die Frage, welches Haupt- bzw. Nebenprodukt mit welcher Umweltwirkung belastet werden soll. Werden Umweltwirkungen falsch verteilt, können umweltschädliche Produkte falsch bewertet werden. Hilfe bieten hier Allokationsverfahren (Eberle Ulrike, 2018).

Aufbauend auf der Zielsetzung der Ökobilanz können verschiedene Arten der Allokation gewählt. In der Gebäudebewertung sind Allokationen nach Masse, Heizwert, Marktwert oder weiteren selbstständig gewählten Variablen möglich. Je nach Ziel der Ökobilanz können hier verschiedene Allokationsregeln in Betracht gezogen werden. Verschiedene Ökobilanzen zu gleichen Produkten können sich aufgrund ihrer Allokationsregeln stark in ihren Ergebnissen unterscheiden.

Um die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen zu gewährleisten ist für jede Ökobilanz ein Ziel und Untersuchungsrahmen zu definieren. Zur Definition des Untersuchungsrahmens gehört auch die Definition der funktionellen Einheit. Die funktionelle Einheit (FE) bestimmt die Funktion und damit den Nutzen des jeweiligen Produktes und bildet somit die Bezugsgröße der Ökobilanz ab.

Alle ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme der Ökobilanz werden auf diese Größe bezogen, um einen Vergleich verschiedener Varianten anstellen zu können. Wichtig ist zu beachten, dass die Produkte/Dienstleistungen hier nicht als solche verglichen werden, sondern auf Basis des Nutzens der Verwendung derer (EcoSMEs, 2004).

Die funktionelle Einheit sollte immer folgende drei Aspekte abdecken:

- die Effizienz des Systems (z.B. bei Wohngebäuden könnte dies etwa die Anzahl der jetzigen Bewohner je m² Wohnfläche sein);
- die Lebensdauer (z.B. die Nutzungsdauer des Gebäudes);
- mindestens einen Qualitätsaspekt (z.B. Qualitätsstandard des Innenausbaus).

In der funktionellen Einheit muss immer die Hauptfunktion des Produktes/Dienstleistung abgebildet werden. Sollten unterschiedliche Produkte jedoch multifunktional ausgelegt sein, muss dem einen Produkt die fehlende Funktion „virtuell“ hinzugefügt werden bzw. dem anderen Produkt die Funktion entzogen werden. Bei Gebäuden könnten das fehlende Parkmöglichkeiten sein

(Parkplätze oder Tiefgarage), die dann virtuell hinzugefügt oder abgezogen werden müssen. Erweiterungen als auch Abzüge von Funktionen werden jedoch als heikel eingestuft, da Produkt- oder Dienstleistungssysteme damit verzerrt werden können (econcept, 1998, S. 6-7).

2.3.1.4 Sachbilanz

Auf Basis des Ziels und des Untersuchungsrahmens werden für die Sachbilanz alle Input- und Outputströme innerhalb der definierten Systemgrenzen erfasst. Für die verwendeten Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie für deren Herstellungs-, Verarbeitungs- und Transportprozesse werden Masse- und Energiebilanzen erstellt, die durch Verknüpfung, die Sachbilanz des Gesamtsystems darstellt (Eberle Ulrike, 2018). Die Ergebnisse der Sachbilanz sind dann Grundlage für die darauffolgende Wirkungsabschätzung. Der allgemeine Ablauf zur Erstellung einer Sachbilanz wird in Abbildung 8 dargestellt.

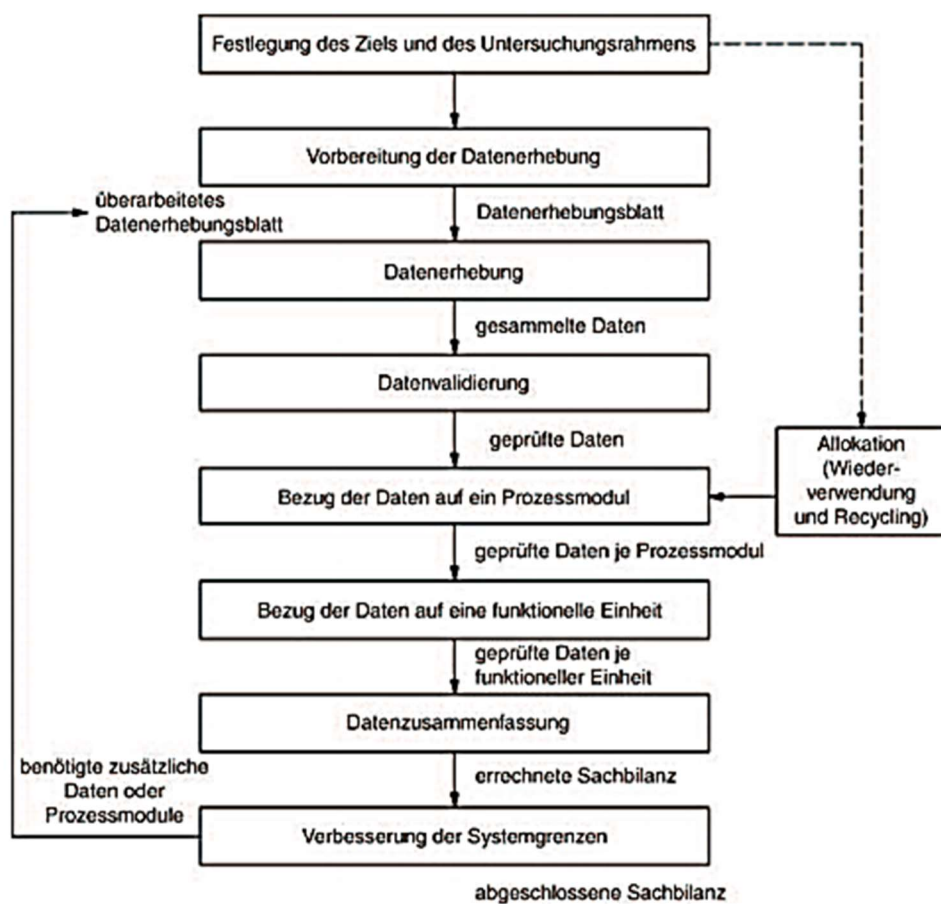


Abbildung 8: Verfahrensablauf für eine Sachbilanz (DIN EN ISO 14044:2006, 2006)

Innerhalb der Sachbilanz werden für die einzelnen Formen von Ressourcen Kennzahlen gebildet. Die zentralen Kennzahlen werden im Folgenden kurz beschrieben.

Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar (in MJ)

Der Primärenergieverbrauch aus nicht erneuerbaren Quellen setzt sich zusammen aus den endlichen abiotischen energetischen Ressourcen Erdgas, Erdöl, Braunkohle, Steinkohle und Uran. Die Nutzung der Ressourcen unterscheidet sich untereinander. Erdgas sowie Erdöl werden für die Energieerzeugung als auch für stoffliche Bestandteile genutzt. Kohle dient hauptsächlich der Energieerzeugung und Uran ausschließlich der Stromgewinnung. Die Energieträger werden auf Basis ihres Energiegehalts/Heizwerts summiert. Dabei spricht man von einer exergetischen Bewertung der chemischen Energie. Andere abiotische Ressourcen wie Erze und Mineralien werden nach ihrer Knappheit charakterisiert (Lützkendorf et al., 2009, S. 43).

Primärenergieverbrauch erneuerbar (in MJ)

Der Primärenergieverbrauch aus erneuerbaren Quellen wird unabhängig vom nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch betrachtet. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Wind- und Wasserkraft, Geothermie, Solar und Biomasse. Berechnet wird die Kennzahl auf die gleiche Weise wie bei den Nicht-erneuerbaren Quellen. Es ist zu beachten, dass genutzte Endenergie und Primärenergie nicht verwechselt werden, da bei der Endenergie der Wirkungsgrad der Herstellung nicht beachtet wird (Lützkendorf et al., 2009, S. 43).

Wassernutzung (in kg)

Der Summenwert wird bei Wasser durch das Grund- und Oberflächenwasser angegeben. Es wird durch chemische Prozesse (meist) nicht irreversibel verbraucht und liegt somit weiterhin in der Umwelt in anderer Form vor. Die größten Mengen befinden sich in Meeren, Tiefengrundwasser und im Polareis. Bei Wasser stellt sich deshalb die Frage der Verfügbarkeit. Für die Bewertung ist wichtig zu wissen, ob Wasser als knapp angesehen werden muss oder nicht (Neubildungsrate < regionaler Verbrauch)

Naturinanspruchnahme (in m²a)

Bei der Naturinanspruchnahme gibt es noch keine einheitliche Methode zur Bewertung, jedoch wird an mehreren Möglichkeiten gearbeitet. Hier bieten die Flächenbelegung zur Abbildung der Nutzungskonkurrenz oder aber auch die Flächenumwandlung zwei passende Methoden.

Abfälle (in kg)

Neben den Ressourcen werden auch Abfälle als Summenwerte in der Sachbilanz ausgewiesen. Abfall fällt in unterschiedlichen Kategorien und Qualitäten an, diese sind in die Systemgrenzen zu integrieren damit alle Wirkungen der Abfallbehandlung in der Sachbilanz abgedeckt werden. Die Kennzahl wird in folgende Kategorien unterteilt: Abraum und Haldengüte, Hausmüll und müllähnlicher Gewerbeabfall und Sonderabfall (Lützkendorf et al., 2009, S. 44).

2.3.1.5 Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsbilanz werden die summierten Ressourcenverbräuche und Emissionen aus der

Sachbilanz auf Basis ihrer Umweltwirkung geordnet und anschließend mit unterschiedlichen Wirkungsindikatoren verknüpft. Aufgrund der Summierung der Flüsse der Sachbilanz können die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung keine direkte Ursache-Wirkungs-Beziehungen herstellen. Durch die Wirkungsabschätzung können einzig verschiedene potenzielle Umweltwirkungen abgebildet werden (Lützkendorf et al., 2009, S. 44).

Es gibt zwei verschiedene Ansätze für Wirkungsabschätzungsmethoden: den schadens- und den wirkungsorientierten. Bei einem schadensorientierten Ansatz wird darauf Bezug genommen, wie schwerwiegend der sich aus den Sachbilanzergebnissen resultierende Schaden auf die Umwelt ist. Im Gegensatz dazu befasst man sich bei einem wirkungsorientierten Ansatz mit dem Wirkungsbeitrag der Ergebnisse auf die Gesamtsituation.

Es gibt verschiedene Methoden der Wirkungsabschätzung:

- CML 2001 (wirkungsorientiert)
- EcoIndicator 99 (schadensorientiert)
- ReCiPe 2009 (schadensorientiert)
- Methode der ökologischen Knappheit

Die Wirkungsabschätzung beschrieben nach ISO 14044, verwendet eine Methode, die weitestgehend die Struktur der CML-Methode aufweist (Eberle et al., 2018).

Die Wirkungsabschätzung enthält nach DIN ISO 14044 verbindliche und optionale Bestandteile (Abbildung 9: Bestandteile der Wirkungsabschätzung Abbildung 9). Diese werden im Weiteren erläutert.

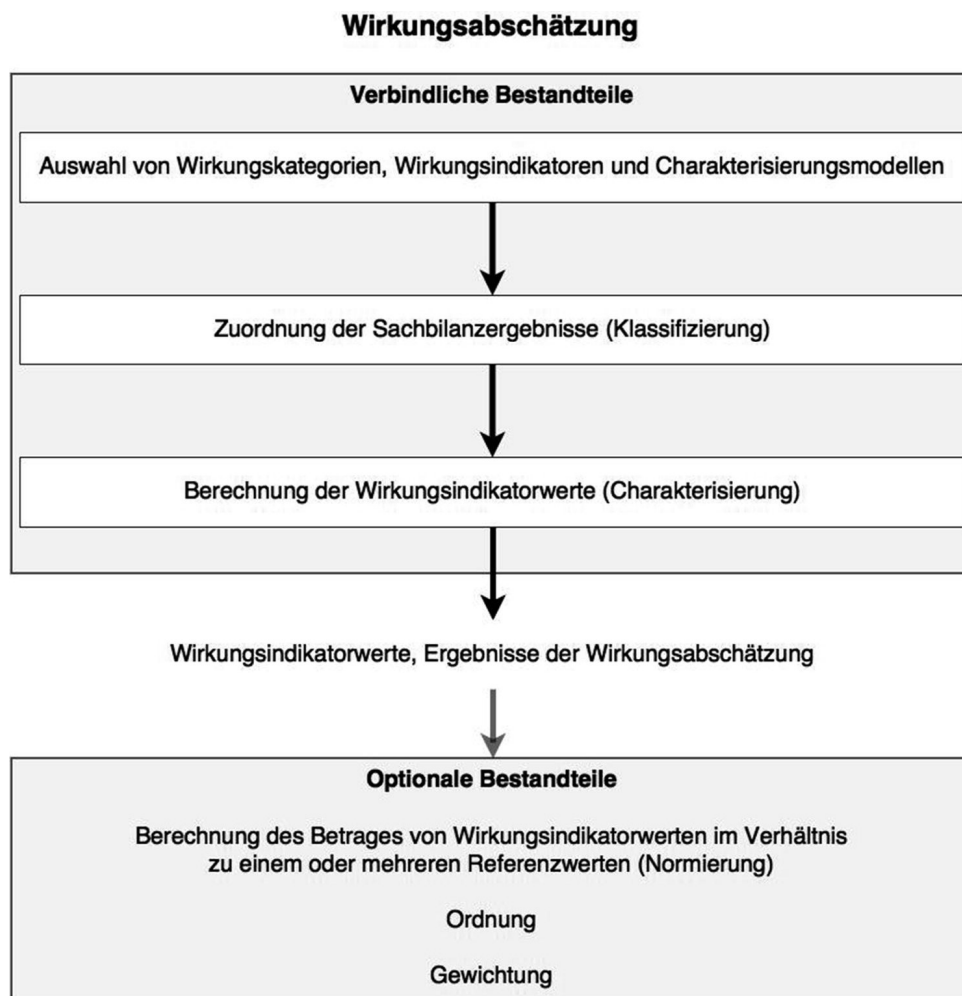


Abbildung 9: Bestandteile der Wirkungsabschätzung (DIN EN ISO 14040:2009, 2009)

Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen

Bei der Auswahl der Wirkungskategorien, der Wirkungsindikatoren und den Charakterisierungsmodellen muss beachtet werden, dass das Ziel und der Untersuchungsrahmen der Ökobilanz abgedeckt werden, deshalb sollten sie bereits in der Phase der Bestimmung von Ziel und Rahmenbedingungen festgelegt werden. Grundsätzlich bleibt es dem Verfasser der Ökobilanz überlassen, welche Wirkungen ausgewählt werden. Zu beachten ist jedoch, dass nicht jede Methode, die für die Untersuchung relevanten Wirkungen betrachtet (DIN EN ISO 14044:2006, 2006, S. 27).

Eine genaue Beschreibung der Wirkungsindikatoren erfolgt in Kapitel Wirkungsindikatoren

Klassifizierung

Während der Klassifizierung werden die Ressourcenverbräuche und Emissionen aus der Sachbilanz gemäß ihrer Umweltwirkungen den Wirkungskategorien zugeordnet. Es besteht die Möglichkeit, dass Sachbilanzergebnisse einzelnen als auch mehreren Wirkungskategorien zugeordnet werden müssen (z.B. NO_x kann als Beitrag zur Bildung bodennahen Ozons als auch

als Beitrag zur Versäuerung klassifiziert werden).

Charakterisierung

In diesem Schritt werden die zuvor klassifizierten Ressourcenverbräuche und Emissionen innerhalb jeder Wirkungskategorie mit einem Äquivalenzfaktor gewichtet, um sie untereinander vergleichbar zu machen. Durch die Festlegung eines Referenzstoffes können die Verbräuche und Emissionen auf eine Einheit gebracht werden. Durch die Multiplikation der Stoffmenge mit dem Äquivalenzfaktor erhält man die potenzielle Wirkung des jeweiligen Stoffes. Anschließend summiert man die Ergebnisse und erhält den Wirkindikator (Lützkendorf et al., 2009, S. 45).

Optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung

Zusätzlich zu den verbindlichen Bestandteilen der Wirkungsabschätzung gibt es noch optionale Bestandteile:

- Normierung

Mit der Normung soll erkennbar gemacht werden, welchen Einfluss und Beitrag ein Wirkungsindikatorwert auf das Gesamtergebnis hat (Lützkendorf et al., 2009, S. 47).

- Ordnung

Mittels der Ordnung können die Wirkungskategorien in eine oder mehrere Klassen eingeteilt werden, ebenfalls kann eine Einordnung bzw. Rangbildung erfolgen. Die Ordnung kann mit zwei möglichen Verfahren durchgeführt werden: Mittels nominaler Skala oder einer vorgegebenen Hierarchie (DIN EN ISO 14044:2006, 2006, S. 29).

- Gewichtung

Bei der Gewichtung wird aus einer Vielzahl an gewichteten und/oder normierten Indikatoren ein numerisches Endergebnis errechnet. Eine Gewichtung ist als stark subjektiv anzusehen und ist somit auch nicht richtig oder falsch. Um eine Gewichtung jedoch aussagekräftig zu gestalten muss sie eine starke Transparenz aufweisen. (Lützkendorf et al., 2009, S. 48).

- Analyse der Datenqualität

Die Analyse der Datenqualität dient zum besseren Verständnis der Signifikanz, der Unsicherheit und der Sensitivität der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (DIN EN ISO 14044:2006, 2006)

Wirkungsindikatoren

In der DIN EN 14040 werden sieben verschiedene Umwelteinwirkungen genannt: Treibhauseffekt, Ozonschichtabbau, Ozonbildung, Versauerung, Überdüngung, Humantox- und Ökotoxizität. Innerhalb der Ökobilanz erfolgt die Wirkungsabschätzung gegenwärtig in folgenden fünf Kategorien:

- Treibhauspotenzial – Global Warming Potential (GWP) [kg CO₂-Aqv.]
- Ozonschichtabbaupotenzial – Ozon Depletion Potential (ODP) [kg R11-Aqv.]
- Ozonbildungspotenzial – Photochemical Ozon Creation Potential (POCP) [kg C₂H₄-Aqv.]
- Versäuerungspotenzial – Acidification Potential (AP) [kg SO₂-Aqv.]
- Überdüngungspotenzial – Eutrophication Potential (EP) [kg PO₄-Aqv.]

(Eberle et al., 2018).

Im Folgenden wird auf die einzelnen Indikatoren als auch auf den abiotischen Ressourcenverbrauch und die Toxizitätspotenziale eingegangen.

Treibhauspotential

Beim natürlichen Treibhauseffekt werden kurzwellige Strahlen, die auf die Erdoberfläche treffen teilweise absorbiert und teilweise in Form von langwelliger Infrarotstrahlung reflektiert. Ein Teil dieser Strahlung verlässt die Troposphäre der Erde. Der natürliche Treibhauseffekt bewirkt, dass der Rest der reflektierten Strahlung durch die Treibhausgase absorbiert und teilweise wieder zur Erde gestrahlt wird. Das bewirkt eine natürliche Erwärmung der Erde, die für das Leben auf der Erde unverzichtbar ist.

Durch den anthropogenen Ausstoß von Treibhausgasen wie z.B. Methan (C₂H₄), Kohlendioxid (CO₂), Lachgas (N₂O) erhöht sich die Konzentration der Spurengase und die Menge an absorbierter Infrarotstrahlung in der Troposphäre nimmt zu. Die damit zunehmende Erderwärmung hat zum Teil gravierende Folgen für das Klima und die verschiedenen Ökosysteme der Erde (Zimmermann, 2012, S. 7).

Das GWP beschreibt den Beitrag eines Spurengases zum anthropogenen Treibhauseffekt. Der Wert darf nicht als absolute Größe verstanden werden, sondern als Kohlendioxid-Äquivalent. Das heißt, dass alle Emissionen bezüglich ihres Beitrages zum Treibhauseffekt zu Kohlendioxid ins Verhältnis gesetzt werden. Dieses Verhältnis reicht jedoch nicht aus. Zu beachten ist die Verweilzeit des jeweiligen Gases in der Atmosphäre, diese ist entscheidend für das GWP eines Stoffes. Deshalb ist es wichtig, den betrachteten Zeithorizont immer mit anzugeben (üblich sind Berechnungen für 20, 100 und 500 Jahre) (Lützkendorf et al., 2009, S. 45).

Da es für die weitere Arbeit von Bedeutung ist, wird das GWP in folgende Kategorien aufgeteilt: GWP-S (Summe), GWP-C (C-Gehalt) und GWP-P (Prozess). Das GWP-P beschreibt den Beitrag des Spurengases zur globalen Erwärmung. Das GWP-C beschreibt die während des Wachstums von Biomasse aus der aufgenommen und über die Lebensdauer gespeicherte Menge an CO₂. Das GWP-S bildet die Summe beider Indikatoren.

Ozonschichtabbaupotenzial

Innerhalb der Stratosphäre entsteht Ozon durch die Bestrahlung von Sauerstoffmolekülen mit kurzwelligem UV-Licht. Die so entstandene Ozonschicht schützt die Erde und absorbiert einen großen Teil der harten UV-Strahlung und dient als UV-Schutzschicht. Die für den Menschen, als auch für Ökosysteme gefährliche Strahlung wird somit zu einem Großteil absorbiert. Durch die Freisetzung von anthropogen geschuldeten Flurchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) und Stickoxiden (NO_x) wird unter bestimmten klimatischen Bedingungen das Ozon durch Umwandlung in Sauerstoff abgebaut. Durch ein so entstehendes, sogenanntes „Ozonloch“ gelangt ein größerer Anteil an Strahlung an die Erdoberfläche und verstärkt die Erderwärmung und ihre Folgen. Durch die schädliche Wirkung von UV-A und UV-B Strahlung auf Menschen, Tiere und Ökosysteme hat die Abnahme von Ozon auch gesundheitsschädliche Wirkungen wie Störung der Photosynthese, Hautkrebs und die Abnahme von wichtigem Meeresplankton (Zimmermann, 2012, S. 7-8).

Für die Berechnung des ODP wird die Emission von Halogenkohlenwasserstoffen erfasst, die für einen Großteil der Zerstörung von Ozonmolekülen verantwortlich sind. Auch hier wird der Wert nicht als absolute Größe angegeben, sondern bezogen auf den durch Trichlorfluormethan (FCKW-11) verursachten Ozonabbau. Alle Emissionen werden somit mit ihrem Potenzial zum Abbau der Ozonschicht zu FCKW-11 ins Verhältnis gesetzt (Lützkendorf et al, 2009, S. 46).

Ozonbildungspotenzial

Das Ozonbildungspotenzial, oft auch als Sommersmog bezeichnet, beschreibt die Bildung von Ozon in Bodennähe durch die Reaktion von Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen in Verbindung mit Sonnenlicht. Kohlenwasserstoffe entstehen bei unvollständiger Verbrennung, bei Verwendung von Ottomotoren oder Lösungsmitteln. Durch das emittierte Kohlenmonoxid aus dem Verkehr, wird das Ozon in CO_2 und O_2 zerlegt, was dazu führt, dass bodennahes Ozon meist nicht an den Emissionsquellen seinen Maximalwert erreicht, sondern in Gebieten wo wenig CO vorhanden ist (z.B. Wäldern) (Zimmermann, 2012, S. 8).

Ozon in der Stratosphäre hat eine schützende Wirkung gegen UV-Strahlung. In Bodennähe ist Ozon jedoch ein gefährliches Spurengas, das humantoxisch wirkt und im Verdacht steht, Vegetations- und Materialschäden zu verursachen.

Zur Berechnung des POCP werden alle Emissionen bezüglich ihres Einflusses auf die Bildung von Ozon mit Ethen (C_2H_4) ins Verhältnis gesetzt. Wie auch bei den vorherigen Potenzialen, wird hier keine absolute Größe angegeben.

Versäuerungspotential

Emission von Luftschadstoffen und deren Umwandlung in Säuren resultiert aus einer Verringerung des pH-Werts von Regenwasser und Nebel. Die wichtigsten Mitverursacher sind Schwefeldioxid und Stickoxide mit ihren Säuren. Durch Abregnen der Wolken führt das zu

vermehrter Versäuerung von Böden und Oberflächengewässern. Folgen daraus sind verringertes Pflanzenwachstum, Blattschäden, Nährstoffauswaschung von Böden und einer erhöhten Aufnahme von Schwermetallen. Daraus folgen Waldsterben sowie Schäden an Gebäuden in Form von Korrosion und Zersetzung von verbautem Gestein. Versäuerung ist als regionales Problem anzusehen und schwankt mit unterschiedlicher Aufnahmekapazität von Böden. Das Versäuerungspotenzial erhält man indem man alle betreffenden Emissionen bezüglich ihres Beitrags zur Versäuerung zu Schwefeldioxid (SO_2) ins Verhältnis setzt (Lützkendorf et al., 2009, S. 46).

Überdüngungspotenzial

Unter Düngung versteht man eine Anreicherung eines Bodens mit Nährstoffen. Das kann auf natürliche aber auch anthropogene Art und Weise erfolgen. Durch emittierte Luftschadstoffe, Abwässer und Düngung in der Landwirtschaft kann es zu einem Überangebot an Nährstoffen in Böden und Gewässern kommen. Dies führt zu vermehrtem Algenwachstum und möglichem „Umkippen“ von Gewässern als auch zu erhöhter Anfälligkeit von Pflanzen gegen Krankheiten und Schädlingen. Das Überdüngungspotenzial wird dadurch berechnet, dass alle Emissionen bezüglich ihres Beitrags zur Überdünnung zu Phosphat ins Verhältnis gesetzt werden (Zimmermann, 2012, S. 8).

Verbrauch abiotischer Ressourcen und Human und Ökotoxizitätspotenzial

Die Wirkungskategorie abiotischer Ressourcen versucht die Verknappung von Rohstoffen zu beschreiben. Die Kategorie berechnet sich durch die Erstellung von Inventaren, auf deren Basis eine Ressource nach Knappheit sortiert und gewichtet werden kann. In der Wissenschaft herrscht jedoch Uneinigkeit was als Bezugsgröße verwendet werden kann und soll. Deshalb ist dieser Wirkungsindikator gegenwärtig in der Praxis nicht in Verwendung.

Mithilfe von Human- und Ökotoxizitätspotenzialen wird versucht die potenzielle Schädigung von Menschen und Umwelt zu bilanzieren. Durch die benötigten, aber zurzeit nicht vorhandenen Modelle, um die Übergänge und Ausbreitung der Schadstoffe miteinzubeziehen, treffen diese Wirkungskategorien gegenwärtig auf keinen Konsens in der Ökobilanzierung.

2.3.1.6 Auswertung und Interpretation

Laut ISO 14044 umfasst die Auswertung einer Ökobilanz drei grundlegende Bestandteile:

- Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz;
- Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung berücksichtigt;
- Schlussfolgerung, Einschränkungen und Empfehlungen.

Nach Abschluss der obigen Arbeitsschritte kann es nachträglich noch zu einer Überarbeitung der

Daten und Berechnungen kommen. Gemeinsam mit der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens bildet die Auswertung den Rahmen einer Ökobilanz. Sachbilanz und Wirkungsabschätzung sind jene Bestandteile die Informationen liefern (DIN EN ISO 14044:2006, 2006, S. 31).

Nach der Auswertung der Daten und dem Abschluss der Ökobilanzierungsrechnungen wird eine Interpretation vorgenommen. Die Ergebnisse einer Ökobilanz haben allein so gut wie keine Aussagekraft, sie müssen immer in der Gesamtbetrachtung in Bezug auf Untersuchungsrahmen und Ziel betrachtet werden. Die Interpretation der Ergebnisse ist ein subjektives Verfahren und es gibt hier keinerlei Normen oder Vorschriften. Es obliegt dem Ökobilanz-Verfasser wie Ergebnisse bewertet und ausgelegt werden (Eberle et al., 2018).

2.3.1.7 Berichterstattung

Die Art und Weise der Berichterstattung wird bereits bei der Festlegung des Ziels- und Untersuchungsrahmens festgelegt. Die Ergebnisse der Ökobilanz sind laut Norm der bestimmten Zielgruppe vollständig, korrekt und unvoreingenommen zu präsentieren. Jegliche Teile der Ökobilanz wie Ergebnisse, Daten, Methode, Ausnahme und Einschränkungen müssen transparent und ausführlich beschrieben werden, um der Zielgruppe die Ökobilanz verständlich zu machen. Zusätzlich dazu sind weitere Punkte im Bericht zu integrieren: etwaige Modifikationen des Untersuchungsrahmens und Begründung, Beschreibung von Systemgrenze und Prozessmodulen, Beschreibung von Datenqualität und Datenverwendung, Auswahl von Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren (DIN EN ISO 14044:2006, 2006, S. 36).

2.3.2 LCA in der Gebäudebewertung

Im folgenden Kapitel wird die Anwendung der Ökobilanz in der Gebäudebewertung betrachtet. Dabei wird der allgemeine Ansatz der Lebenszyklusperspektive beschrieben und auf die wichtigsten Punkte einer Ökobilanz innerhalb der Lebenszyklusbetrachtung eines Gebäudes eingegangen.

2.3.2.1 Lebenszyklusperspektive

Ein Produkt mit Hilfe der Lebenszyklusperspektive zu betrachten bedeutet, jenes Produkt über seinen gesamten Lebensweg zu begleiten und dementsprechend zu bewerten. Bei der Betrachtung einzelner Lebenszyklusphasen isoliert von anderen, besteht die Gefahr, dass etwaige Störungen/Belastungen von einer Phase in die nächste verschoben und somit nicht korrekt bewertet werden („Trade-Offs“) (Lützkendorf et al., 2009).

Die Betrachtung von Gebäuden erfolgt gegenwärtig in den Lebenszyklusphasen aus Abbildung 10: Lebenszyklusphasen von Gebäuden nach CEN für nachhaltige Gebäude (Donath et al., 2011). Zu Beginn eines Lebenszyklus steht die Planungsphase, sie ist der Produktphase vorgelagert und gehört eigentlich nicht zum Lebenszyklus eines Gebäudes, jedoch werden hier Aspekte festgelegt, die später Einfluss auf die Nachhaltigkeit des Gebäudes haben (siehe Kapitel 2.3.2.2.1).

Vor dem Lebensbeginn des Gebäudes: Produktphase	Bauphase	Nutzungsphase	Lebensende des Gebäudes	Über das Lebensende des Gebäudes hinausgehende Gutschriften und Belastungen – Lebensende des Produkts
A1: Rohstoffabbau A2: Transport A3: Herstellung	A4: Transport A5: Bau- und Installationsstadium	B1: Nutzung B2: Instandhaltung B3: Reparatur B4: Ersatz B5: Erneuerung B6: Betrieb B7: Betrieblicher Wasserverbrauch	C1: Abbau- und Abriss C2: Transport C3: Abfallaufbereitung C4: Deponie	D: Wiederverwendung, Recycling, Verwertung – Ersatz von Primärproduktion

Abbildung 10: Lebenszyklusphasen von Gebäuden nach CEN für nachhaltige Gebäude (Donath et al., 2011)

Zu Beginn einer Lebenszyklusbetrachtung muss klar sein, wie der Lebenszyklus eines Gebäudes definiert ist. Es gibt hier verschiedene Ansätze für die Wahl der Systemgrenzen und wie diese gesteckt werden können:

- „von der Wiege bis zum Werktor“ (Cradle to Gate)

Diese Betrachtung umfasst den Abbau der Rohstoffe, seinen Transport sowie die Herstellung des Gebäudes mit allen damit verbundenen Prozessen (A1-A3).

- „von der Wiege bis zum Werktor – mit Optionen“ (Cradle to Gate mit Optionen)

Neben dem Abbau der Rohstoffe, dem Transport sowie der Herstellung mit allen damit verbundenen Prozessen (A1-A3), können auch Bereiche wie Instandhaltung und Entsorgung berücksichtigt werden (A4-C4 sowie D).

- „von der Wiege bis zur Bahre“ (Cradle to Grave)

Hier werden alle Lebenszyklusphasen des Gebäudes (Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase) miteinbezogen (A1-C4). Optional können die Prozesse aus Bereich D ebenfalls berücksichtigt werden. Diese umfassende Betrachtung wird auch in der Ökobilanzierung verwendet (Lützkendorf et al., 2009).

Wichtig ist die Überlegung, wie die Grenzen der Lebenszyklusbetrachtung gesetzt bzw. wie sinnvoll manche Grenzen überhaupt sind. Je größer der Lebenszyklus eines Gebäudes ist, desto größer die Unsicherheiten über das Verhalten von Bauteilen und desto größer auch der Informationsbedarf zur Bewertung. Wichtig zu beachten ist auch, dass ein Gebäude selbst kein einzelnes Produkt darstellt. Ein Gebäude kann als System, bestehend aus vielen weiteren Systemen angesehen werden (z.B. Fenster, Türen, Dach). Auf Basis dieser Erkenntnis, muss auch bei der Festlegung der Lebenszyklusdauer des Gebäudes auf viele Einzelkomponenten Rücksicht genommen werden.

Bei der Betrachtung von Ökobilanzen im Gebäudebereich stellt sich zu Beginn die Frage, zu welchem Zeitpunkt eine Ökobilanz erstellt werden soll. Die Entscheidung über den Zeitpunkt spiegelt sich in der Gewichtung der Ergebnisse wieder.

- Konzeptphase/Vorplanung

Zu Beginn der Planung sind die Möglichkeiten der Entwurfs- oder Konzeptänderung noch sehr hoch. Wird eine Ökobilanz bereits in dieser frühen Phase erstellt, können Szenarien-Vergleiche für beispielsweise Energieversorgungskonzepte oder Gebäudekubatur erstellt werden. Dabei können mittels einer Dominanzanalyse etwaige Optimierungspotenziale ermittelt und ausgebessert werden. Durch den frühen Zeitpunkt der Analyse ist die Datenqualität zu Entwurfs-, Konstruktions- und Materialentscheidungen mit großer Unsicherheit behaftet. Deshalb werden Datensätze auf Basis von Erfahrungs- und Durchschnittswerten verwendet.

- Ausführungsplanung/Detailplanung

Eine Änderung des Gebäudekonzeptes ist in dieser Phase nicht mehr möglich. Eine Lebenszyklusanalyse zu diesem Zeitpunkt bietet die Möglichkeit Details und Komponenten zu ändern die einen oft großen Einfluss auf die Nutzungsphase und die Gebäudeeffizienz haben.

- Nach Baufertigstellung

Eine Ökobilanz nach der Fertigstellung kann auf die tatsächlichen Daten des Gebäudes zugreifen und dient somit als Basis für Dokumentation und Monitoring. Das Gebäude kann zu diesem Zeitpunkt produktspezifisch betrachtet werden. Grundlage dafür ist ein Nachweis der verwendeten Produkte und eine entsprechende Datengrundlage (Lützkendorf et al., 2009, S. 49).

Bei Neubauten treten selten Probleme bei benötigten Daten auf, da meist Datenkataloge vorhanden sind, woraus benötigte Werte entnommen werden können. Bei Altbeständen sieht das anders aus, Materialien sind zwar mit Nutzungszeiten versehen, trotzdem kann es oft sein, dass Materialien frühzeitig ausgetauscht werden müssen, wenn sie sich in einem Verbund befinden, dessen Bestandteile unterschiedliche Lebensdauern aufweisen. Weiters ist unbedingt darauf zu achten, dass eine vollständige Liste aller verbauten Produkte und Materialien vorliegt, da fehlende Komponenten zu einer Verbesserung der Ökobilanz und somit zu einer Verzerrung der Umwelteinflüsse führen (Zimmermann, 2012, S. 39).

2.3.2.2 Lebenszyklusphasen von Gebäuden

Jeder Bauherr hat gewisse Vorstellungen wie sein zukünftiges Gebäude seinen Nutzen und seine Bedürfnisse maximal abdecken soll. Er wird sein Objekt auf die Art und Weise errichten, dass es folgende Eigenschaften möglichst erfüllt:

- Alle Wohn- und Lebensbedürfnisse sollen maximal erfüllt werden;
- Mögliche Veränderungen der genannten Bedürfnisse sollen möglichst einfach durch Änderungen am Gebäude umsetzbar sein (z.B. barrierefreies Wohnen)

- Eine dauerhafte Nutzung (auch generationenübergreifend) soll ohne Verluste der Wohnqualität möglich sein;
- Der finanzielle Wert des Gebäudes soll langfristig erhalten bleiben.

Um die genannten Eigenschaften abzudecken, ist es notwendig das Gebäude möglichst vorrausschauen zu planen, zu errichten, zu nutzen als auch wenn notwendig zu erweitern oder zu beseitigen. Dafür muss jede einzelne Lebenszyklusphase des Gebäudes berücksichtigt werden (Kompetenzzentrum der Initiative "Kostengünstig qua, 2009, S. 2).

Wie bereits im Kapitel 2.3.2.1 erwähnt, kann zwischen vier Lebenszyklusphasen unterschieden werden, auf die im folgendem eingegangen wird:

- Bauwerkserstellung
- Nutzung (inkl. Instandhaltung)
- Umnutzung
- Abbruch und Entsorgung

Die Planungsphase gehört streng genommen nicht zur Lebenszyklusbetrachtung, dennoch wird sie zu Beginn kurz behandelt.

Planungsphase

Die Planungsphase ist den weiteren vier Lebenszyklusphasen vorgelagert und spielt eine wichtige Rolle. Hier werden Entscheidungen getroffen, die sich auf die allgemeine Struktur des Gebäudes sowie auf dessen Wirkungsbeziehung mit der Umwelt auswirken (Donath et al., 2011). Zu Beginn jedes Neubaus steht die Auswahl eines Grundstücks. Um die natürliche Umwelt möglichst wenig zu belasten müssen Punkte wie Oberflächenversiegelung, Flächenaufwand der Infrastruktur, Umgang mit Regenwasser, Umfang des Bodenaushubs und wie erwähnt der Gebäudeentwurf sorgfältig betrachtet werden.

Bei falscher oder unnötig großer Versiegelung muss anfallendes Regenwasser abgeleitet werden, was den Grundwasserhaushalt im Erdreich verringert. Bei geringerem Wasserhaushalt nimmt die Anzahl an Pflanzenbeständen am Grundstück ab, was sich auf die CO₂-Senken, Schutz vor Erosion und die Anzahl an Tierarten auswirkt. Die Planung von Straßen oder Stellplätzen für Fahrzeuge unterliegt dem gleichen Gedanken. Aus ökologischen Gründen sollte hier wasserdurchlässiges Material verwendet werden und die Anzahl und Größe der versiegelten Flächen möglichst klein gehalten werden (Kompetenzzentrum der Initiative "Kostengünstig qua, 2009).

Obwohl Wasser in Europa gegenwärtig nicht als knapp eingestuft werden muss, ist es trotzdem eine wertvolle Ressource, mit der schonend umgegangen werden muss. Bei der Planung eines Gebäudes sollte eine Verwendung von Regenwasser in Form von Bewässerungsanlagen in Betracht gezogen werden. Bei der Errichtung des Gebäudes anfallender Bodenaushub sollte

wenn möglich am Gelände bleiben, um unnötige Emissionen in Form von Transport und Entsorgung zu minimieren.

Der Gebäudeentwurf selbst wirkt sich auf Bereiche wie Energieversorgung, Wasserversorgung, Be- und Entlüftung, Belichtung und Abfallentsorgung aus. Besonders wichtig ist die Auswahl der Bauweise und der Baumaterialien für die nachhaltige Gestaltung eines Gebäudes. Die Entscheidung ob eine vorgefertigte Bauweise verwendet wird oder ob das Gebäude komplett am Bauplatz errichtet wird, bietet einerseits die Chance der Wiederverwertbarkeit der Bauteile, erhöht aber den Aufwand im Transport. Hier muss abgewogen werden, wie ein nachhaltiges Gebäude bestmöglich realisiert werden kann (Treberspurg, 2006).

Bei zunehmender Verknappung von fossilen Energieträgern, muss innerhalb der Planungsphase entschieden werden, wie die Energieversorgung des Gebäudes umgesetzt wird. Eine energiesparende Bauweise wie sie im Kapitel 2.2.3 behandelt wird, ist hier Voraussetzung, um die Energienachfrage möglichst gering zu halten. Eine Möglichkeit, um die Ökobilanz des Gebäudes weiter zu verbessern und den Einfluss auf die Umwelt zu verringern, ist eine geplante Nutzung von erneuerbaren Energieträgern wie Solar- und/oder Photovoltaikanlagen.

Wie erwähnt ist die Planungsphase nicht Bestandteil der Lebenszyklusphasen und sie wird als vorgelagert betrachtet, trotzdem sind hier wichtige Entscheidungen zu treffen die sich auf die folgenden Lebensphasen eines Gebäudes auswirken.

Errichtungsphase

Die Errichtungsphase des Gebäudes umfasst zum einen den Herstellungsprozess der verwendeten Baumaterialien, also den kompletten Lebensweg begonnen bei der Rohstoffgewinnung bis hin zur Verarbeitung zum Produkt. Hier werden nicht nur Stoff- und Energieströme der Herstellungs- und Umwandlungsprozesse betrachtet, sondern auch die entstandenen Energie- und Materialaufwände der dafür benötigten Infrastruktur. Die so entstehenden Umweltbelastungen durch die Baumaterialherstellung (Rohstoffentnahme, Flächeninanspruchnahme, Emissionen, Energieverbrauch) sind meist durch den Hersteller bekannt und können somit gut in die Ökobilanz integriert werden.

Zum anderen beinhaltet die Errichtungsphase auch den Bauprozess selbst. Die Auswahl des Baumaterials und die Umweltbelastungen, die durch den Transport dessen auftreten werden dem Bauprozess zugeordnet. Ebenfalls sind Umweltwirkungen auf Wasser, Luft, Boden und Lärm durch Baumaschinen, Bauverfahren wie Aushebungen oder Betonieren oder Abfallmengen in der Bauphase zu beachten. Eine genaue Kalkulation der Umwelteinflüsse innerhalb dieser Lebensphase ist im Vorfeld schwer zu erstellen, da wechselnde Bedingungen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Auch Verallgemeinerungen von ähnlichen Gebäuden werden durch wechselnde Standorte, örtliche Gegebenheiten und einer Vielzahl von Gewerken erschwert (Graubner & Hüske, 2003, S. 80-81).

Um die wesentlichen Umweltbelastungen so gering wie möglich zu halten spielen in der

Bauwerkserstellung auch die vorgegebenen Qualitätsstandards eine wesentliche Rolle. Bei Mängeln in der Ausführung kommt es nicht nur zu zusätzlichen Kosten sondern auch zu zusätzlichen Stoff- und Energieströmen, die in den Bauprozess fließen und die Nachhaltigkeit des Gebäudes beeinflussen (Kompetenzzentrum der Initiative "Kostengünstig qua, 2009).

In der Phase der Bauwerkserstellung kann durch die Art der Bauweise, die Auswahl der Maschinen sowie die verwendete Haustechnik der größte Beitrag zu Nachhaltigkeit eines Gebäudes beigetragen werden.

Nutzungsphase

Die Nutzungsphase bildet die längste Lebenszyklusphase und hat aus ökologischer und sozialer Sicht den größten Anteil am Lebenszyklus eines Gebäudes. Zur Nutzungsphase werden alle Zeiträume gezählt, in denen das Gebäude zur Nutzung zu Verfügung steht, inklusive eventueller Leerstand (Donath, 2011). Die Nutzungsphase umfasst alle Vorgänge zur Herstellung des Innenraumklimas (Temperatur, Feuchtigkeit, Luftqualität) und der Grundbedürfnisse (Licht, Beleuchtung, Warmwasser) sowie funktionelle Vorgänge wie Reinigung, Abfallmanagement, Wasserverbrauch, Transport. Es sind vor allem energieumsetzende Prozesse, die die größte Relevanz besitzen. Die Daten für den Energieverbrauch eines Gebäudes sind durch gezieltes Monitoring leicht zu ermitteln und können in der Analyse gut berücksichtigt werden (Graubner & Hüske, 2003, S. 81).

Die Nutzungsphase beinhaltet auch Material- und Energieströme für mögliche Instandsetzung am Gebäude. Materialströme, die bei der Instandsetzung eines Gebäudes (z.B. Austausch von Bauelementen) auftreten, sind entsprechend ihrer Lebensdauer und in Abhängigkeit der gewählten Verbindung zu ermitteln. Aufgrund der Standzeiten von Gebäuden können die Materialströme der Instandhaltungsprozesse, denen der Bauphase ähneln. Die Instandhaltung kann in Instandsetzung, Reinigung, Wartung und Inspektion unterteilt werden, wobei unter normalen Umständen nur die Instandsetzung ökobilanztechnisch eine Rolle spielt (Lützkendorf et al., 2009, S. 52).

Umnutzungsphase

Die Umnutzungsphase umfasst Teilerneuerung, Gesamterneuerung und Umbau (Lützkendorf et al., 2009, S. 11). Sollte sich während der Nutzungsdauer eines Gebäudes eine Änderung in der Gebäudenutzung ergeben (z.B. Änderung der Familien- oder Haushaltsstruktur) müssen jegliche der damit verbundenen Prozesse innerhalb der Umnutzungsphase bilanziert werden. Dazu gehören Abbruch und Entsorgung der anfälligen Baurestmassen, sowie die Neuerrichtung von Bauteilen und die Erneuerung der technischen Gebäudestruktur. Durch die damit einhergehenden Bauvorgänge kommt es zu hohen Umweltbelastungen, die durch eine bereits zu Beginn geplante, flexible Konstruktion des Gebäudes umgangen hätte werden können (Graubner & Hüske, 2003, S. 82).

Gebäude bestehen meist über mehrere Generationen, dabei kann es der Fall sein, dass es

während der Nutzungsperiode eines Gebäudes zu mehreren sich abwechselnden Erneuerungs- und Nutzungsphasen kommt (Lützkendorf et al., 2009, S. 11).

Abbruch und Entsorgung

Der Abbruch eines Gebäudes und dessen Rückbau beginnt mit der Absicht, das Gebäude nicht mehr nutzen zu wollen und endet mit der Überführung aller betroffenen Materialien in die Folgenutzung (Lützkendorf et al., 2009, S. 11).

Der Abbruchprozess beinhaltet alle Stoff- und Energieströme, die zum Abbruch notwendig sind und die dabei anfallen, inklusive Umweltbelastungen durch Lärm-, Staubentwicklung und Erschütterungen. Grundsätzlich treten ähnliche Umweltbelastungen wie in der Phase der Bauwerkserstellung auf. Diese sind hier jedoch schwerer zu quantifizieren (Graubner & Hüske, 2003, S. 81).

Bei der Analyse der Umwelteinwirkungen werden alle im Gebäude verbauten Materialien, Bauteile und gebäudetechnischen Anlagen in Materialgruppen unterteilt, denen ein Szenario der Nachnutzung (Recycling, thermische Verwertung, Deponie) zugeteilt wird. Durch die gewählte Art der Bauwerkserstellung werden meist jedoch nur weniger Baustoffe nach dem Rückbau wiederverwendet. Grundsätzlich wird in der Ökobilanzierung das Recyclingpotenzial verschiedener Bauteile als Gutschrift verbucht. Das Recyclingpotenzial repräsentiert die Umweltlasten, die durch vollständiges Recycling des Baustoffes eingespart werden, das spielt vor allem bei Metallen eine entscheidende Rolle. Brennbare Materialien wie Holz oder Kunststoffe werden thermisch verwertet. Abfälle, die keiner Stoffklasse zugeordnet werden können, werden deponiert. Sie machen durchschnittlich den kleinsten Anteil aus (Zimmermann, 2012, S. 26-30).

2.3.2.3 Umwelt-Produktdeklaration

Umweltproduktdeklarationen oder auch EPD (Environmental Product Declarations) bilden die Grundlage von Ökobilanzierungen von Gebäuden. Sie enthalten grundsätzliche Informationen zum Ressourcenverbrauch und zu den Umweltindikatoren. Neben diesen Kennwerten enthalten sie ebenfalls technische Angaben zur Lebensdauer, Wärme- und Schallschutz und Luftqualitäten (Zimmermann, 2012, S. 13). Geregelt werden die Produktdeklarationen durch die internationale Norm ISO 14025 "Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen – Grundsätze und Verfahren" und die EN 15804 "Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltdeklarationen für Produkte – Grundregeln für die Kategorie Bauprodukte"

Grundsätzlich verfolgen die genormten EPDs laut EN 15804 die Systemgrenzen „von der Wiege bis zum Werktor“. Einige bestimmte EPDs können je nach Entscheidung des Herstellers auch Angaben zur Nutzung und Entsorgung/Recycling des Produkts enthalten („von der Wiege bis zum

Werktor – mit Optionen“ bzw. „von der Wiege bis zur Bahre“). EPDs werden von Herstellern eigenständig und freiwillig in Auftrag gegeben. Sie dienen in erster Linie dem Informationsaustausch zwischen Anbietern aber auch zwischen Anbieter und Verbraucher. Deklarationen beruhen auf unabhängig ausgearbeiteten Ökobilanzen, aus Sachbilanzen oder aus Informationsmodulen, die nach der ISO 14044 Norm erstellt wurden. Die deklarierenden Unternehmen haben die Aufgabe die Daten unabhängig zu prüfen und eine Transparenz sicherzustellen, die das Vertrauen in die Deklaration stärkt.

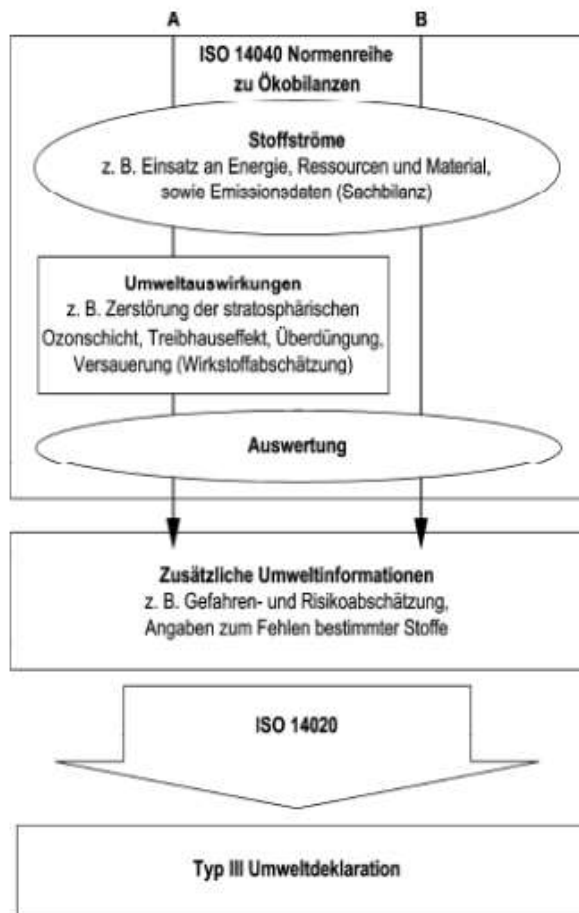


Abbildung 11: Methodische Optionen zur Erstellung einer Umweltdeklaration (DIN EN ISO 14025:2010, 2010)

Abbildung 11 beschreibt zwei mögliche Optionen für die Erstellung einer Umweltproduktdeklaration. Beide Methoden basieren auf der ISO Normenreihe 14040 zu Ökobilanzen. Beide Optionen unterscheiden sich hauptsächlich in der Festlegung der betrachteten Phasen. Unterschied ist die der Sachbilanz folgende Wirkungsabschätzung bei Methode A, die bei Methode B nicht betrachtet wird (DIN EN ISO 14025:2010, 2010).

Jede Umweltdeklaration nach ISO 14025 muss folgende Angaben enthalten:

- Beschreibung des deklarierenden Unternehmens sowie Datum der Veröffentlichung und Geltungsdauer;
- Beschreibung des Produkts sowie dessen Definition (z.B. Modellnummer);

- Identifizierung des Programms (Adresse, Name, Logo);
- Auflistung der Produktkategorieregeln (Regeln zur Beschreibung einer oder mehrerer Produktkategorien);
- Daten aus Sachbilanz, Ökobilanz oder aus Informationsmodulen sowie definierte Systemgrenzen;
- eine Inhaltserklärung zur Produktzusammensetzung;
- Quellen von verwendeten Daten;
- Feststellung, dass die EPDs verschiedener Programme nicht vergleichbar sind (DIN EN ISO 14025:2010, 2010).

2.3.3 Bewertungstool für LCA: Eco2Soft

Das Software-Tool Eco2Soft ist eine Möglichkeit zu Berechnung von Ökobilanzen und dem Vergleich verschiedener Ausführungsvarianten von Gebäuden. Während der Berechnung fließen auch haustechnische Komponenten in die Berechnung mit ein. Grundlage für Eco2soft bildet der vom Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie (IBO) entworfene baubook-Rechner.

Basierend auf den Ergebnissen des baubook-Rechners wird der Ökoindex 3 (OI3) der verbauten Materialien und haustechnischen Komponenten berechnet. Es handelt sich hierbei um eine Kombination aus den drei Ökoindikatoren: dem Primärenergiegehalt (PEI), dem Treibhauspotenzial (GWP) und dem Versäuerungspotential (AP). Zusätzlich zu den obigen Berechnungen kann der OI3 für die Bilanzierungsgrenzen BG0-BG6 ausgelegt werden (Abbildung 12: Bilanzgrenzen für OI3) Die Bilanzierungsgrenzen sind genau definiert und beschreiben, welche Teilbereiche in die Berechnung miteinfließen (IBO, Ökoindex3. Anwendung, 2013).

	Ersterrichtung		Ersterrichtung + Instandhaltungszyklen				
	BG0	BG1	BG2	BG3	BG4	BG5	BG6
Konstruktionen der thermischen Gebäudehülle (TGH vereinfacht), Zwischendecken	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Konstruktionen der thermischen Gebäudehülle (TGH vollständig), inkl. Dacheindeckungen, Feuchtigkeitsabdichtungen, hinterlüftete Fassaden, Zwischendecken		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Trennwände (nur bauphysikalisch relevante Trennbauteile)			✓	✓	✓	✓	✓
Innenwände (gesamt), Keller, unbeheizte Pufferräume (Baukörper komplett), innenliegende Stiegenhäuser, Verkehrsflächen				✓	✓	✓	✓
Offene Erschließungszonen (offene Stiegenhäuser, Laubengänge, Loggien)					✓	✓	✓
Haustechnik						✓	✓
Außenanlagen, Nebengebäude							✓

Abbildung 12: Bilanzgrenzen für OI3 (IBO, Ökoindex3. Anwendung, 2013)

In der Berechnung in Eco2Soft werden auch Transporte von Bauteilen zur Baustelle, sowie der Gebäudebetrieb und die Entsorgung des Gebäudes betrachtet. Die Art der Entsorgung spiegelt sich also in den Ökokennzahlen wieder. Die Bilanzierung des Gebäudebetriebs erfolgt über die Eingabe des Energieträgers und des Energiebedarfs des Gebäudes. Ebenfalls kann der „ökologische Rucksack“ für die Erneuerung und Instandhaltung des Gebäudes berechnet werden. Dabei müssen den unterschiedlichen Bauteilschichten Nutzungsdauern und die jeweiligen Betrachtungszeiträume zugeordnet werden. Gemäß der ÖN EN 15804 liegt der Betrachtungszeitraum normalerweise bei 100 Jahren, dieser kann jedoch von Fall zu Fall variieren. Nutzungsdauern werden in Eco2Soft für die Bauteile vorgeschlagen, können aber zu jeder Zeit geändert werden (IBO, Ökoindex3. Anwendung, 2013).

Die folgenden zwei Kapitel befassen sich mit dem Ökoindex 3 und dem Entsorgungsindikator. Aufgrund von den in dieser Arbeit verwendeten Zitierregeln ist darauf hinzuweisen, dass die dargestellten Formeln aus dem Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude vom Österreichischen Institut für Bauen- und Ökologie aus dem Jahr 2013 wortwörtlich und in gleicher Form entnommen worden sind.

2.3.3.1 Ökoindex 3 (OI3)

Der Ökoindex 3 (OI3-Index) wurde im Jahr 2003 vom Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie (IBO) als vereinfachte, quantitative Bewertungsmethode, für Baustoffe, Konstruktionen und Gebäude auf Basis von Ökobilanzen entwickelt. Als „Einzahlangabe“ umfasst der OI3 die Kennzahlen Treibhauspotenzial (GWP), Versäuerungspotenzial (AP) und den Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie (PEI n.e.).

Die Ökokennwerte der Baustoffe und Konstruktionen werden vom IBO, den Bauphysik-Softwareherstellern und der Datenbank baubook kostenlos zur Verfügung gestellt. Der OI3 stellt die absoluten Werte der Wirkungsindikatoren in einem Punktesystem dar, je höher die Punktezahl, desto größer der Umwelteinfluss des Objekts (IBO, Okoindex3. Anwendung, 2013, S. 2).

OI3 – Basisindikatoren für Konstruktionen

Die folgenden drei Basisindikatoren sind für Konstruktionen definiert:

- Ökoindikator $OI3_{KON}$
- Ökoindikator $\Delta OI3_{BS}$
- Ökoindikator $OI3S_{kon}$

Alle Indikatoren liegen im Wertebereich von 0-100 Punkten.

Der $OI3_{KON}$ -Indikator beschreibt die ökologische Qualität von Konstruktionen. Der Ökoindikator $OI3_{KON}$ einer Konstruktion (1 m² Bezugsfläche) wird als Grundlage für alle anderen Indikatoren benötigt. Er berechnet sich durch die Addition von OI_{PEIne} (Primärenergie nicht erneuerbar), OI_{GWP} (Treibhauspotential) und OI_{AP} (Versäuerungspotential) mit je einem Drittel. Die Formel lautet wie folgt:

$$OI3_{KON} = \frac{1}{3} OI_{PEIne} + \frac{1}{3} OI_{GWP} + \frac{1}{3} OI_{AP} \quad (1)$$

Der $\Delta OI3_{BS}$ beschreibt eine Baustoffschicht und gibt an um wie viel sich der $OI3_{KON}$ -Wert einer Wand verändert bei Änderung einer Bauteilschicht. Der $\Delta OI3_{BS}$ ist besonders hilfreich, um zu erkennen, welche Bauteile einen besonders großen Einfluss auf den Umwelteinfluss des Bauteils haben. Primärenergieaufwand, GWP und AP sind in den jeweiligen Äquivalenzeinheiten in die Formeln einzusetzen (siehe Kapitel 2.3.1.5.1).

$$\Delta OI3_{BS} = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{10} \cdot (PEIne)_{BS} + \frac{1}{2} (GWP)_{BS} + \frac{100}{0,25} (AP)_{BS} \right] \quad (2)$$

Der $OI3S_{kon}$ dient zur Berechnung von Sanierungsobjekten und berechnet sich wie der $OI3_{KON}$ -Indikator mit zusätzlicher Berücksichtigung von Nutzungsdauer und Bestandsalter über ein Abschreibungsmodell. Dabei wird die Lebensdauer jeder Schicht berücksichtigt. Dieser Indikator bewertet langlebige Konstruktionen mit einer sehr geringen ökologischen Belastung, neue Schichten hingegen mit einer maximalen ökologischen Belastung. Der Ökoindikator $OI3S_{Kon}$ berechnet sich wie $OI3_{KON}$. Jedoch müssen hier Nutzungsdauer und Bestandsalter in die Formel

integriert werden. Dafür müssen die Variablen OIS_{PENe} , OIS_{GWP} und OIS_{AP} berechnet werden.

$$OI3_{KON} = \frac{1}{3} OIS_{PEI_{ne}} + \frac{1}{3} OIS_{GWP} + \frac{1}{3} OIS_{AP} \quad (3)$$

Die OI3-Indikatoren können auf die konditionierte Bruttogrundfläche (BGF), die Bezugsfläche (BGF+50% Bruttogrundfläche von unkonditionierten Pufferräumen) oder auf die charakteristische Länge l_c (Variabel des Oberflächen-Volumen-Verhältnis A/V) bezogen werden (IBO, OI3-Indikatoren, 2013)

Ein Gebäude setzt sich aus vielen unterschiedlichen Konstruktionen zusammen. Um den OI3 eines Gebäudes zu berechnen müssten theoretisch alle Bestandteile aller Konstruktionen berücksichtigt und eingerechnet werden. Da dies einen enormen Aufwand bedeutet werden bei Gebäuden Mittelwerte der Konstruktionsindikatoren berechnet.

OI3 – Basisindikatoren für Gebäude

Es sind folgende OI3 Indikatoren für ein Gebäude definiert:

- Ökoindikator $OI3_{BGx}$; Flächengewichteter $OI3_{KON}$ in Abhängigkeit zur jeweils gültigen Bilanzgrenze ($x=0,1$)
- Ökoindikator $OI3_{BGx, l_c}$; Flächengewichteter $OI3_{KON}$ in Abhängigkeit zur jeweils gültigen Bilanzgrenze, korrigiert um die charakteristische Länge ($x=0,1$);
- Ökoindikator $OI3_{BGx, BGF}$; Flächengewichteter $OI3_{KON}$ der einbezogenen Bauteile in Abhängigkeit zur jeweils gültigen Bilanzgrenze bezogen auf die Bruttogrundfläche ($x=0,1$)
- Ökoindikator $OI3_{BGx, BZF}$; In Abhängigkeit zur Bezugsfläche ($x>2$)
- Ökoindikator $OI3_{SBGX}$ für Sanierungen

$OI3_{BGX}$

$OI3_{BG0}$ und $OI3_{BG1}$ sind der Mittelwert der $OI3_{KON}$ – Werte aller Konstruktionen innerhalb der Bilanzgrenze.

$$OI3_{BGx} = \sum_{i=1}^N \frac{A_i \cdot OI3_{KON,i}}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (4)$$

$x=0,1$

A_i ... Flächen der Konstruktionen in m^2

$OI3_{KON,i}$... $OI3_{KON}$ der i-ten Konstruktion

$\sum_{i=1}^N A_i$... Konstruktionsfläche

OI3_{BGX, lc}

Dieser Indikator wird angewandt um die Umweltbelastung bei schlecht gewählten A/V-Verhältnissen zu erfassen. Die Berechnung von L_c erfolgt mittels OIB-Leitfaden energietechnisches Verhalten von Gebäuden.

$$OI3_{BGX,lc} = 3 \cdot \frac{OI_{BGX}}{2+L_c} \quad (5)$$

$x=0,1$

$L_c=V_G/A_G$... charakteristische Länge

V_G ... Volumen des Gebäudes

A_G ... Oberfläche des Gebäudes

OI3_{BGX, BGF}

Dieser Indikator beschreibt die Umweltbelastung pro m² – Bruttogrundfläche

$$OI3_{BGX,BGF} = \sum_{i=1}^N \frac{A_i \cdot OI3_{KON,i}}{BGF} \quad (6)$$

$x=0,1$

A_j ... Flächen der Konstruktionen in m²

$OI3_{KON,i}$... $OI3_{KON}$ der i-ten Konstruktion

BGF ... Bruttogrundfläche in m²

Die Berechnung der BGF erfolgt nach OIB-Leitfaden RL6 für die Berechnung von Energiekennzahlen für Gebäude.

OI3_{BGX, BZF}

Für die Berechnung der Umweltbelastung pro -Bezugsfläche für Errichtung- und Nutzungsphase wird der Indikator **OI3_{BGX, BZF}** verwendet, er wird wie folgt berechnet:

$$OI3_{BGX,BZF} = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{PEI_{ne,Gebäude}}{BZF} - 500 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{GWP_{Gebäude}}{BZ} + 50 \right) + 400 \left(\frac{AP_{Gebäude}}{BZF} - 0,21 \right) \right] \quad (7)$$

$x>2$

$PEI_{ne,Gebäude}$... Primärenergiegehalt nicht erneuerbar des Gebäudes

$GWP_{Gebäude}$... Treibhauspotential des Gebäudes

$AP_{Gebäude}$... Versäuerungspotential des Gebäudes

BZF ... Bezugsfläche in m²

t ... Betrachtungszeitraum 100 a

OI3_{BGx} (x=0,1; ohne Nutzungsdauer)

Der Ökoindikator OI3_{BGx} (x=0,1) wird herangezogen, um die ökologische Qualität einer Sanierung der thermischen Gebäudehülle zu bewerten. Die Berechnung erfolgt gleich wie OI3_{BG1}, nur wird hier über ein Abschreibungsmodell das Alter des Gebäudes berücksichtigt.

$$OI3S_{BGx} = \frac{1}{3} OI_{BGx,PEIne} + \frac{1}{3} OI_{BGx,GWP} + \frac{1}{3} OI_{BGx,AP} \quad (8)$$

Die Berechnung der Faktoren PEIne, GWP und AP erfolgt je nach Alter der jeweiligen Schicht. In die Berechnung fällt die Lebensdauer jeder Schicht. Je jünger eine verwendete Konstruktion ist, desto stärker der ökologische Einfluss. Umso älter eine Konstruktion, desto geringer die ökologische Belastung.

OI3_{BGx} (x≥2, inkl. Nutzungsdauer)

$$OI3S_{BGx} = \frac{1}{3} OI_{BGx,PEIne} + \frac{1}{3} OI_{BGx,GWP} + \frac{1}{3} OI_{BGx,AP} \quad (9)$$

Die Berechnung erfolgt auf dieselbe Weise wie im vorigen Absatz. Die jeweiligen Werte für PEIne, GWP und AP weisen Änderungen auf (IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013).

2.3.3.2 Entsorgungsindikator

Der Entsorgungsindikator (EI) von Bauteilen und Gebäuden wurde 2003 vom IBO entwickelt, um die Entsorgungseigenschaften von Gebäuden darzustellen. Je größer der Umwelteinfluss durch die Entsorgung, je höher der Indikator. 2018 erfolgte eine Neuauslegung des Indikators (EI10). Der EI10 kann gemeinsam mit dem OI3, ohne zusätzliche Datenerfassung innerhalb von Eco2Soft berechnet werden, wobei hier die Möglichkeit besteht, den Indikator in der Bilanzgrenze BG1 vereinfacht oder detailliert in der Bilanzgrenze BG3 zu berechnen.

In der Beurteilung werden die Entsorgungswege Recycling, thermische Verwertung und Deponierung betrachtet. Dabei wird auf einer Skala von 1-5 der aktuelle Entsorgungsweg eines Bauteils und dessen Verwertungspotenzial bewertet.

Entsorgungsindikator von Konstruktionen

Die Berechnung der Entsorgungseigenschaften erfolgt nach folgendem Ablauf:

- Berechnung des anfallenden Volumens des Baustoffs innerhalb der Bauteilschicht

- Berücksichtigung der Nutzungsdauer von Bauteilschichten innerhalb des Lebenszyklus des Gebäudes
- Gewichtung des anfallenden Baustoffvolumens mit der jeweiligen Entsorgungseinstufung
- Gewichtung des anfallenden Baustoffvolumens mit dem jeweiligen Verwertungspotenzial
- Berücksichtigung der Abfallfraktionen (thermische Verwertung, Deponierung, Recycling)
- Berechnung der Entsorgungszahl der Konstruktion EI KON

$$EI\ KON\ (gesamt) = EI\ KON\ (End\ of\ life) + EI\ KON\ (Erneuerung) \quad (10)$$

$$EI\ KON\ (End\ of\ life) = \sum_n^i V_i * 1 * Entsorg\ (IST)_i * Verwert\ (POT)_i \quad (11)$$

$$EI\ KON\ (Erneuerung) = \sum_n^i V_i * \left(\frac{a}{ND_i} - 1\right) * Entsorg\ (IST)_i * Verwert\ (POT)_i \quad (12)$$

V_i ... Volumen der Bauteilschicht i pro m^2 Konstruktion

a ... Betrachtungszeitraum des Gebäudes

a/ND_i ... Anzahl Entsorgungszyklen einer Bauteilschicht im Betrachtungszeitraum des Gebäudes

Entsorg (IST) ... Entsorgungseinstufung einer Bauteilschicht

Verwertung (POT) ... Reduktions- oder Erhöhungsfaktor entsprechend dem Verwertungspotenzial einer Bauteilschicht

Entsorgungsindikator von Gebäuden

Auf Basis des EI KON aller Konstruktionen, wird durch flächengewichtete Mittelung der Entsorgungsindikator des Gebäudes berechnet.

$$EI10 = \frac{\sum_i^n EI\ KON * A_i}{\sum_i^n ABt_i + 0,25 * \sum_i^n IBt_i} * 10 \quad (13)$$

$EI\ KON_i$... Entsorgungskennzahlen aller betrachteten Konstruktionen

A_i ... jeweilige Bauteilfläche der Konstruktion

$\sum_n^i ABt_i$... Summe aller betrachteten Außenbauteilflächen

$\sum_n^i IBt_i$... Summer aller betrachteten Innenbauteilflächen

Die Ergebnisskala ist um den Faktor 10 erhöht. Somit reicht die Skala von 10-50 wobei 10 das beste Ergebnis darstellt (IBO, EI KON-Entsorgungsindikator für Bauteile, 2018).

2.3.4 Aktuelle Entwicklungen der LCA im Gebäudebereich

Durch die immer stärkeren Präsenzen der LCA in der Gesellschaft, im Bewusstsein von Kunden, Banken, Investoren und Behörden, wurde dem Thema auch innerhalb der Wissenschaft größere Aufmerksamkeit geschenkt. Lützkendorf setzt sich in einigen seiner Arbeiten mit dem Thema der umweltorientierten Bewertung von Gebäuden auseinander. Dabei gibt es verschiedene Aspekte, die speziell in Bezug auf die Interpretation und Verwendung der Ergebnisse einer LCA von Gebäuden von großer Bedeutung sind.

In die Errichtung eines Gebäudes fließen ab dem Beginn der Bauphase große Mengen an Energie und Rohstoffen, wobei die Wirkung des Gebäudes auf die Umwelt dementsprechend groß ist. In der Politik, der Wissenschaft und der Baupraxis herrscht großes Interesse, diese Auswirkungen eines Gebäudes so gering wie möglich zu halten. Eine Möglichkeit dafür, ist die möglichst lange Verwendung von Gebäuden. Einerseits ist das direkt möglich durch höhere Nutzungsdauern und die dafür etwaig notwendigen Sanierungen, andererseits indirekt, durch die Verwendung des Gebäudes über seine Lebensphasen hinaus. Aus dieser Perspektive können Gebäude als „Material-Banken“ gesehen werden und dienen sowohl in Zukunft, als auch bereits in der Gegenwart als Quelle für Ressourcen für zukünftige Projekte. Die Menge an Ressourcen, die im Gebäude verbaut ist, kann laut Lützkendorf als sein ökologischer Wert bezeichnet werden (Lützkendorf, 2017, S. 12).

Um die Menge an verbauten Ressourcen in Zukunft möglichst effizient wiederzuverwenden, sind bereits in der Planungsphase Maßnahmen zu setzen, um das Rückbau- und Recyclingpotenzial zu maximieren. Maßnahmen sind hierfür eine möglichst rückbaufähige Gebäudekonstruktion, die Verwendung von demontierbaren Baustoffen und die Anwendung von Gebäudeausweisen, die die Menge und Art der verbauten Materialien darstellen.

Innerhalb der Lebenszyklusbetrachtung und LCA fallen Konstruktion und Rückbau des Gebäudes in die Module A und C. Das Recyclingpotenzial und die Wiederverwendung von Baumaterialien betreffen Modul D (Wiederverwendung, Rückgewinnung, Recycling). Wie bereits in Kapitel 2.2.1 und 2.3.2.3 beschrieben, ist Modul D kein verbindlicher Teil der Lebenszyklusbetrachtung von Gebäuden. Würde Modul D in die LCA in vollem Maß integriert werden, dann würden Systemgrenzen nicht wie bisher in Kapitel 2.3.2.1 gesetzt werden, sondern mit der Systemgrenze „Von der Wiege zur Wiege“ (Cradle to Cradle, C2C). Somit würden die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes einen geschlossenen Kreislauf bilden, wo die Rohstoffnachfrage teilweise, durch den Rückbau alter Gebäude abgedeckt ist (Silvestre et al., 2013, S. 37-39).

Wenn wir von Emissionen oder auch von Ressourcen sprechen, ist die Frage der Diskontierung ein unumgänglicher Punkt. Wie sollen jetzige Emissionen als auch Ressourcen im Vergleich zu Zukünftigen gewichtet werden? Auch in der Gebäudebewertung und Planung spielt das eine tragende Rolle da hier meist große Lebensdauern mitspielen. Eine Bewertung auf traditionellem, aber keinesfalls generations-gerechtem Wege würde zukünftige Emissionen mit gegenwärtiger Gewichtung diskontieren. Dies führt dazu, dass jetzige Emissionen und Ressourcen stärker

konsumiert werden und zukünftige Generationen schlechter gestellt werden würden.

Ökobilanzen kann man als statische Bewertungsmethode ansehen (Pehnt, 2005). Der Faktor Zeit wird nicht betrachtet. Innerhalb der LCI werden statische Faktoren über die gesamte Lebensdauer angenommen. Ressourcenverbrauch und Emissionen werden über die gesamte Nutzungsdauer mit konstanten Werten betrachtet. Weiters werden keine Angaben gemacht, wo bzw. wann Ressourcen innerhalb der Lebenszyklusphasen ausgetauscht werden. Gleiches passiert mit den verwendeten Wirkungsindikatoren (GWP, AP, PEI n.e.). Auch Nutzungsverhalten und Energieversorgung eines Gebäudes werden als konstant angenommen und Bauteile werden, wenn benötigt, mit Bauteilen der gleichen Qualität und des gleichen Typs ersetzt (Lützkendorf, 2017, S. 9).

Der Faktor Zeit wird innerhalb einer LCA somit außen vorgelassen, was dazu führt, dass der Faktor des technologischen Fortschritts ebenfalls nicht betrachtet wird. Der technologische Fortschritt, der über die Zeit auftritt, kann sich jedoch stark auf die LCA und die zuvor besprochenen Argumente auswirken. Technische Innovationen können sich auf die Qualität von Bauteilen auswirken, was die Nutzungsdauer des Gebäudes ändert. Andererseits wirkt sich technologischer Fortschritt nicht nur auf die Entwicklung von Gebäudebauteilen, sondern auch auf die Verwendung dieser aus. Als gutes Beispiel dient der selektive Rückbau von Bausubstanzen. Dabei werden alle anfallenden Materialien nach ihrer Funktion oder Materialzusammensetzung rückgebaut und zur späteren Wiederverwendung sortiert. Zurzeit findet selektiver Rückbau nur sehr selten statt, weil es einerseits die Wirtschaftlichkeit nicht zulässt aber andererseits die notwendige Technologie noch nicht zur Gänze zur Verfügung steht. Wenn hier in Zukunft ein technologischer Fortschritt auftritt, kann die rückgebaute Bausubstanz zum einen als Ressource wieder in den Bauprozess einfließen und die Systemgrenze C2C kann in Betracht gezogen werden. Zum anderen werden Emissionen durch Rückbau und Verwertung der Bausubstanz verringert, was ein Diskontieren der zukünftigen Emissionen und des Ressourcenverbrauchs überflüssig macht.

In der Wissenschaft sind die Argumente zu möglichen Schwächen der Ökobilanzierung bekannt und verschiedene Forschungsobjekte arbeiten bereits an diesen Problemen. Effektive Lösungen sind aber noch nicht vorhanden obwohl dringender Handlungsbedarf zur Integration des Faktors Zeit und des technologischen Fortschritts besteht (Lützkendorf, 2017, S. 14).

3 Methodik

Im vorigen Kapitel wurde kurz auf die Merkmale einer statischen Ökobilanz sowie deren Probleme eingegangen und wie ein möglicher Lösungsansatz ausschauen kann. Eine Lösungsmöglichkeit ist die Verwendung einer dynamischen Ökobilanz, wie sie auch in dieser Arbeit angewendet wird. Da es sich hierbei um keine definierten Ansätze mit vorgegebenen Schemata handelt, ist vorab zu definieren wie die Herangehensweise an die Ökobilanz innerhalb des Fallbeispiels aussieht.

Um die Forschungsfragen dieser Arbeit zu beantworten, werden innerhalb der Arbeit vier

verschiedene Szenarien definiert (siehe 4.2.4). Szenario 1 und Szenario 2 werden mittels einer herkömmlichen, statischen Ökobilanzierung betrachtet und verglichen. Szenario 3 und Szenario 4 weisen Eigenschaften auf, die eine herkömmliche Herangehensweise nicht möglich machen. Dazu gehört beispielsweise die mit der Zeit ansteigende Menge an verwendeter erneuerbarer Energie. Hierbei wird auf eine dynamische Ökobilanzierung zurückgegriffen. Die verwendete Methode in den jeweiligen Szenarien wird im Folgenden erklärt.

Technologischer Fortschritt tritt über die Zeit auf und ermöglicht Technologieverbesserungen in Bereichen wie Errichtung, Sanierung und Haustechnik von Gebäuden. Da es jedoch nicht möglich ist, jeden Schritt an technologischem Fortschritt an einem bestehenden Gebäude über die Zeit zu realisieren, wurde dafür innerhalb der Szenarien der Zeitpunkt nach der ersten Nutzungsphase gewählt (Jahr 2058). Zu diesem Zeitpunkt werden alle benötigten Schritte (Austausch Haustechnik, Aufdopplung usw.) gesammelt durchgeführt

Szenario 1 und Szenario 2 integrieren keinen technologischen Fortschritt in ihrer Berechnung, somit lässt sich ihr gesamter Lebenszyklus durch vier Phasen einfach veranschaulichen. Dabei wird der Ansatz einer statischen Ökobilanz verfolgt, die auch im Programm Eco2Soft verwendet wird (Abbildung 13).

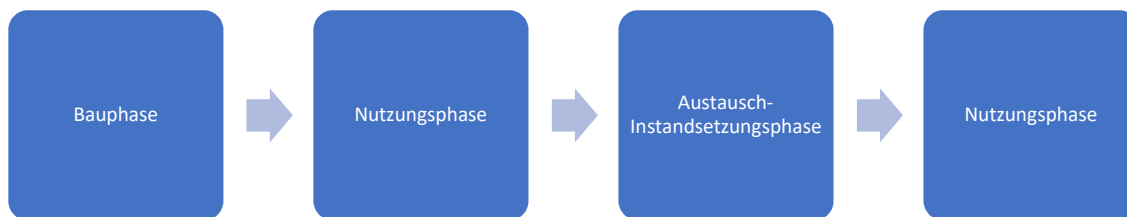


Abbildung 13: Lebenszyklus der Szenarien WDVS und MAFA (statische Betrachtung)

Der Lebenszyklus beginnt mit einer Bauphase. Diese beinhaltet die Errichtung aller Bauteile und Haustechnikkomponenten. Anschließend folgt eine 80-jährige Nutzungsphase, die nur durch eine Erneuerungsphase 2058 unterbrochen wird. Nach Ablauf der Nutzungsdauer ist die Ökobilanz beendet und das Gebäude wird auf Basis dieser Ergebnisse bewertet.

Die in Szenario 3 und Szenario 4 angenommenen technischen Entwicklungen benötigen eine dynamische Betrachtung und eine Einteilung der Nutzungsdauer in fünf Lebenszyklusphasen (Abbildung 14):

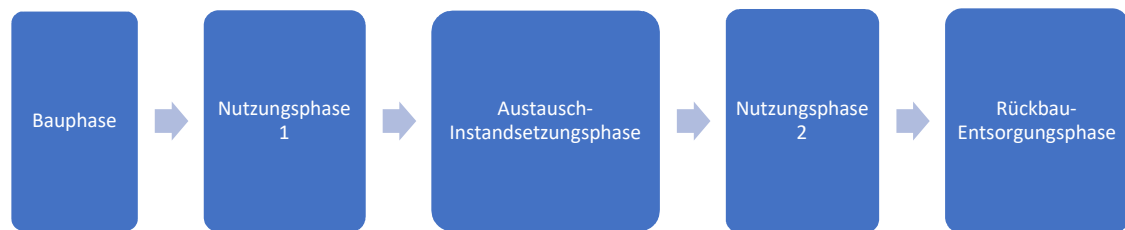


Abbildung 14: Lebenszyklus der Szenarien WDVS und MAFA (dynamische Betrachtung)

Einer Bauphase, die den technischen Stand 2018 abbildet, einer ersten Nutzungsphase von 2018 bis 2057 mit technischem Fortschritt in den Bereichen der Energieversorgung, einer Rückbau- und Erneuerungsphase im Jahr 2058 wo Aufdopplung bzw. Austausch der Haustechnik stattfinden, einer zweiten Nutzungsphase von 2058-2097, wo ebenfalls durch technische Entwicklung die Energieversorgung und somit die Umweltwirkung der Gebäudenutzung beeinflusst werden, sowie einer abschließenden Rückbau- und Entsorgungsphase im Jahr 2098.

Für die Berechnungen der Umweltwirkungen in den einzelnen Szenarien wird mit Eco2Soft gearbeitet. Dies betrifft hauptsächlich die Bauphase, die auftretende Austausch- und Instandsetzungsphase und die Rückbau- und Entsorgungsphase. Nach Rücksprache mit den Software-Entwicklern (baubook GmbH) kann hier auf eine umfassendere, aber noch nicht veröffentlichte Version von Eco2Soft zurückgegriffen werden. Damit ist es möglich alle benötigten Daten in ein Excel-Format zu importieren und anschließend zu bearbeiten. Benötigte Austauschzyklen, sowie die verwendeten Indikatoren werden damit an die definierten Szenarien händisch angepasst.

Die Nutzungsphasen der Szenarien werden mittels Archiphysik betrachtet. Die anschließend notwendigen Berechnungen werden in Excel durchgeführt. Dabei handelt es sich um die Berechnungen der Endenergiebedarfe (EEB) und die daraus resultierende Umweltwirkung der Szenarien. Die erbrachte Leistung der PV wird, wenn im Szenario definiert, in den EEB miteinberechnet. Konversionsfaktoren für die Umrechnung von EEB in das GWP werden der OIB Richtlinie 6 entnommen (Abbildung 15).

	Energieträger	f _{PE} [-]	f _{PE,n.em.} [-]	f _{PE,em.} [-]	f _{CO2} [g/kWh]
1	Kohle	1,46	1,46	0,00	337
2	Heizöl	1,23	1,23	0,01	311
3	Erdgas	1,17	1,16	0,00	236
4	Biomasse	1,08	0,06	1,02	4
5	Strom-Mix Österreich (inkl. Netto-Importe)	1,91	1,32	0,59	276
6	Fernwärme aus Heizwerk (erneuerbar)	1,60	0,28	1,32	51
7	Fernwärme aus Heizwerk (nicht erneuerbar)	1,52	1,38	0,14	291
8	Fernwärme aus hocheffizienter KWK ⁽¹⁾ (Defaultwert)	0,94	0,19	0,75	28
9	Fernwärme aus hocheffizienter KWK ⁽¹⁾ (Bestwert)	≥ 0,30	gemäß Einzelnachweis ⁽²⁾		≥ 20
10	Abwärme (Defaultwert)	1,00	1,00	0,00	20
11	Abwärme (Bestwert)	≥ 0,30	gemäß Einzelnachweis ⁽²⁾		≥ 20
⁽¹⁾ ... Als hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) werden all jene angesehen, die der Richtlinie 2004/8/EG entsprechen.					
⁽²⁾ ... Für den Fall, dass ein Einzelnachweis gemäß EN 15316-4-5 durchgeführt wird, dürfen keine kleineren Werte als für industrielle Abwärme verwendet werden. Die Randbedingungen zum Berechnungsverfahren sind im Dokument „Erläuternde Bemerkungen“ festgehalten.					

Abbildung 15: Konversionsfaktoren nach OIB RL 6 (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015)

Für die Szenarien 3 und 4 sind die Konversionsfaktoren nach OIB nicht ausreichend. Da es sich um ein Szenario mit zukünftigen Annahmen handelt, ist der benötigte Konversionsfaktor „Strom-Mix Österreich 2058“ nicht verfügbar. Deshalb wird ein Wert von 0,1 kg/kWh angenommen. Dieser Wert beruht auf dem bestehenden Konversionsfaktor „Strom-Mix Österreich“ aus Abbildung 15 und durch die Annahme, dass der Anteil der erneuerbaren Energieträger 2058 deutlich höher ausfällt als bisher.

Tabelle 5: Konversionsfaktor Strom-Mix Österreich 2058

Energieträger	f _{CO2} (kg/kWh)
Strom-Mix Österreich (2058)	0,1

Die Betrachtung der Nutzungsdauer erfolgt wie beschrieben über 80 Jahre. Mit dem Jahr 2018 beginnt und 2098 endet die Nutzungsdauer des Gebäudes. Damit enden auch die Berechnungen der Ökobilanz.

4 Fallbeispiel

In den folgenden Kapiteln wird versucht, die Forschungsfragen der Arbeit anhand des Fallbeispiels der Hütteldorferstraße 252 zu bearbeiten und zu beantworten. Dabei wird zu Beginn erläutert werden, warum die Hütteldorferstraße als Beispielobjekt ausgewählt wurde.

4.1 Forschungsprojekt EU-GUGLE

Im Rahmen der europäischen Smart-City-Partnerschaft („European Innovation Partnership for Smart Cities and Communities“) werden kosteneffiziente Sanierungsmodelle mit Vorbildfunktion für Städte und Gemeinden entwickelt. Als eines der ersten Projekte wurde das Projekt EU-

GUGLE¹ verwirklicht. Das Projekt verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz, um in sechs Pilotstätten (Wien, Aachen, Tampere, Mailand, Sestao, Bratislava),—durch die Umsetzung von Niedrigstenergie-Sanierungsmodellen im Gebäudebestand eine möglichst große Nachahmung in anderen Smart Cities bis 2020 in dem Bereich der Gebäudesanierung auszulösen.

Die starke Öffentlichkeitsarbeit ist eine der wichtigsten Eigenschaften des Projekts. Durch das Monitoring während der Durchführung der Sanierungsmodelle und durch einen ständigen Wissensaustausch zwischen den teilnehmenden Städten, sollen Forschungsergebnisse und Erfahrungen gesammelt und untereinander ausgetauscht, sowie abgestimmt werden. EU-GUGLE umfasst rund 226.000 m² Bruttogeschossfläche. Während der fünfjährigen Laufzeit je nach Sanierungsmodell wird eine Einsparung der Primärenergie von 40 bis 80%, bei einer gleichzeitigen Erhöhung der erneuerbaren Energien auf 25% angestrebt. Zu den sechs erwähnten Pilotstätten nehmen noch Götheburg und Gaziantep als assoziierte Städte teil, unter der Bedingung, während der Laufzeit auch in diesen Städten smarte Sanierungsaktivitäten zu verfolgen.

Die Stadt Wien verwirklicht die Ziele des EU-GUGLE Projekts im Stadtteil Penzing auf einer Bruttogeschossfläche von ca. 62.500 m², aufgeteilt auf Wohngebäude aus den 50er und 70er Jahren sowie Gebäuden des sozialen Wohnbaus. Es handelt sich dabei um 1038 Wohnungen mit insgesamt 3592 Einwohnern. Dabei sollen Einsparungen der Primärenergie von bis zu 61% erreicht werden. Teilnehmende Organisationen, die für die Durchführung der Sanierungsmodelle in Wien zuständig sind, sind die Universität für Bodenkultur, iC consulenten Ziviltechniker, alpS und die Stadt Wien.

4.2 Sanierungsprojekt Hütteldorferstraße 252

Der Wiener Gemeindebau Hütteldorferstraße 252 gilt als Vorzeige-Projekt von EU-GUGLE in Wien. Durch seine ideale geografische Ausrichtung und seine deutlich zu erkennenden Problemfelder der Energiekennzahlen des Gebäudes gilt das Gebäude als vorrangiges Sanierungsvorhaben der Stadt Wien. Gebäudestruktur und Haustechnik ähneln den anderen Objekten des Projekts stark. Im Folgenden wird das Gebäude beschrieben und auf die geplanten Sanierungsschritte näher eingegangen.

Das Gebäude in der Hütteldorferstraße 252, 14. Wiener Gemeindebezirk Penzing, wurde in den Jahren 1969 bis 1971 unter der Planung des Architekten Karabiberoff Stefan errichtet. Die gesamte Liegenschaft wurde auf einem brach liegenden Grundstück am äußeren Ende der Hütteldorferstraße, an der Kreuzung Hütteldorferstraße / Ernst-Bergmann-Gasse errichtet und umfasst ca. 5116,65 m², wobei rund 1374,98 m² durch die Gebäude abgedeckt werden. Die unbebauten Flächen der Liegenschaft, mit einer Fläche von ca. 3741,67 m² verteilen sich wie

¹ „European Cities serving as Green Urban Gate towards Leadership in sustainable Energy“; Projektnummer: ENER/FP7EN/314632/EU-GUGLE; Fördergeber: European Union's Seventh Programme for research, technological development and demonstration

folgt (Karabiberoff, 1970):

Befestigte Flächen:

Ruheplatz	35,5 m ²
Gehwege	511,25 m ²
Spielplatz	89,25 m ²
Pkw-Stellplätze	405,75 m ²
Kolonia	30,36 m ²

Unbefestigte Flächen:

Restgartenfläche 2669,56 m²

Der Gebäudekomplex besteht aus zwei Gebäuden, aufgeteilt auf die Stiegen 1 bis 3 und 4 bis 6.



Abbildung 16: Lage der Hütteldorferstraße 252 (Stadt Wien, 2018)



Abbildung 17: Luftansicht der Hütteldorferstraße 252 (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Tech, 2019)

Gebäude 1, bestehend aus den Stiegen 1-3, liegt mit seiner Südseite direkt angrenzend an der Hütteldorferstraße. Die Wohnungen sind aufgeteilt auf drei Wohnebenen und das Gebäude ist vollständig unterkellert. Zugänglich sind die Wohnungen über die Nordseite der Gebäude. Durch den stark ansteigenden Untergrund des Grundstücks ist das Kellergeschoss teilweise eingegraben, dadurch besteht die Möglichkeit, die südlich ausgerichteten Teile des Kellergeschosses als Geschäftsfläche zu verwenden. Die nördlichen Teile des Kellergeschosses werden als Lager- und Waschräume verwendet. Im Gebäude befinden sich 35 Wohneinheiten, mit 1961 m² Wohnfläche, wobei zwei Einheiten als Lokale genutzt werden und 2522 m² Bruttogesamtfläche.

Gebäude 2, bestehend aus den Stiegen 4-6, befindet sich im nördlichen Bereich. Stiege 4 und 5 besitzen ebenfalls 3 Wohnebenen, Stiege 6 beinhaltet nur zwei. Die Zugänge zu den Wohnungen, sind wie auch bei Gebäude 1 nordseitig angelegt. Wie auch Gebäude 1 ist Gebäude 2 vollständig unterkellert und das Kellergeschoss ist zum Teil eingegraben. Die Stiegen des Gebäudes sind nach Norden hin versetzt. Stiege 5 ist zu Stiege 4 um 1,5 m versetzt, Stiege 6 zu Stiege 5 um 2,8 m. Gebäude 2 beinhaltet 24 Wohnungseinheiten mit 1415 m² Wohnfläche und 1890 m² Bruttogesamtfläche. Der gesamte Gebäudekomplex ist nicht exakt Ost-West orientiert, es besteht eine Abweichung von ca. 14° im Uhrzeigersinn.

4.2.1 Bestand

Gebäudehülle

Beide Gebäude besitzen einen rechteckigen Grundriss. Laut den zur Verfügung gestellten Bestandsplänen messen die Gebäude in Ost-West-Richtung 66,62 m (Gebäude 1) bzw. 63,36 m (Gebäude 2). In Süd-Nord-Richtung messen beide Gebäude jeweils 10,58 m. Die Außenwände der Gebäude sind mit 30 cm dickem Mauerwerk aus Betonholsteinen ausgeführt. Die nach Westen hin orientierte Fassade ist mit Eternitplatten verkleidet und ist hinterlüftet.

Die Südfassade des Gebäudes 1 hat 6 Loggien, die sich alle auf der Stiege 1 befinden, der Rest der südlichen Fassade enthält Fenster, Loggientüren, Eingangstüren zu den Geschäftslokalen und die jeweiligen Schaufenster. Die Südfassade des Gebäudes 2 besitzt pro Stiege und Stockwerk jeweils zwei Balkone. In der Westseite des Gebäudes 1 befinden sich im ersten und zweiten Stock je ein Balkon sowie ein zusätzliches Fenster im Erdgeschoss. Gebäude 2 hat auf seiner Westfassade je ein Fenster pro Stockwerk. Die Nordfassaden der Gebäude enthalten die Eingangstüren zu den jeweiligen Stiegen sowie Fenster über die gesamte Fläche verteilt. Die Ostfassade des Gebäudes 1 hat keine Fenster, die des Gebäudes 2 nur eines im ersten Stock. Ansonsten sind beide Ostfassaden leer.

Wasser- und Heiztechnik

Der Gebäudekomplex wird von WIEN ENERGIE mit Strom und Gas versorgt. Dabei dient Gas durch kombinierte, dezentrale Wärmebereitstellung für die Raumheizung und das Warmwasser. Einzelne Wohnungen werden vom jeweiligen Mieter auch selbstständig mit Strom geheizt.

4.2.2 Energiekennzahlen

Der Heizwärmebedarf (HWB) von Gebäude 1 ($112 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) und Gebäude 2 ($109 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) liegt momentan weit über dem geforderten Passivhausstandard. Durch die Sanierung soll der HWB um knappe 90% gesenkt werden, was sich dem nach OIB-RL 6 berechneten Passivhausstandard von $10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ annähert (Siehe 2.2.3). Nach Berechnungen laut Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP) liegt der zu erreichende Wert bei $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Dieser Wert kann durch die geplante Sanierung erreicht werden.

4.2.3 Beschreibung der geplanten Sanierung

Bei der Betrachtung der Energiekennzahlen des Bestandes erscheint die Notwendigkeit der Sanierung des Gebäudes. Dem Passivhausstandard will man sich durch eine Verbesserung der Gebäudehülle annähern. Eine Sanierung der Haustechnik ist nicht vorgesehen, sie bleibt somit auf dem jetzigen Stand.

Die Sanierung umfasst die grundlegenden Bereiche: Fenster, Kellerdecke, Dach, Fassade. Der geforderte U-Wert für Passivhausfenster beträgt laut EN ISO 10077 $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, dieser Wert wird durch den Einbau von dreifach verglasten, Alu-Holz Fenstern mit integrierten Jalousien erreicht. Um die thermische Gebäudehülle zu schließen werden einerseits am Deckenbereich des Kellers Dämmplatten aus synthetischem Dämmmaterial angebracht. Andererseits wird das oberste Geschoss des Gebäudes gedämmt, da das Dachgeschoss nicht genutzt wird und somit nicht in die thermische Gebäudehülle fällt.

Ebenfalls wird eine durch den Passivhausstandard geforderte Raumlüftung mit effizienter Wärmerückgewinnung in die Gebäude verbaut. Dabei wird die Wärme der Abluft mittels Wärmetauscher der Zuluft zugeführt. Eine zusätzliche Vorerwärmung der Zuluft ist an besonders kalten Tagen möglich. Neben der Frischluft, transportiert die Lüftungsanlage Schadstoffe und Feuchtigkeit ab. Ein zusätzliches Lüften der Räume wird somit umgangen. Da beide Gebäude während ihrer Sanierung bewohnt bleiben, ist bei der Auswahl und Reihenfolge der Sanierungsschritte darauf zu achten.

Die Sanierung der Gebäudehülle erfolgt einerseits durch ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) und andererseits durch die Installation einer Multi-Aktiv-Fassade (GAP-Fassade) an der Südseite des Gebäude 1.

4.2.3.1 Wärmedämmverbundsystem

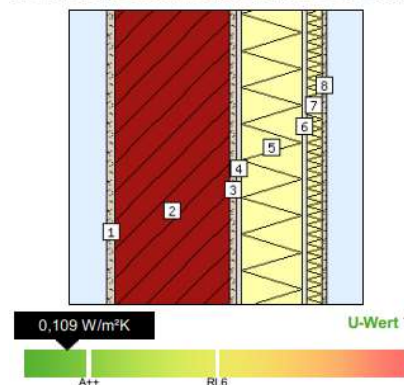
Grundsätzlich ist ein WDVS eine mehrschichtige Konstruktion zur Dämmung von Gebäudefassaden. Ausschlaggebend für die Qualität des WDVS ist die Wahl des Dämmstoffes. Ein WDVS besteht immer aus folgenden Komponenten: einer Befestigung an der Wand (Kleber, Dübel, Schienensystem), der Wärmedämmung (z.B. EPS, Mineralwolle, Nawaro), einer Armierungsschicht und dem Außenputz. Die verbreitetste Art der Befestigung ist das Kleben, dabei wird das Dämmmaterial großflächig auf den Untergrund aufgebracht (bei Unebenheiten auch Punkt-Rand-Verklebung). Zusätzlich zum Kleben erfordern manche Dämmmaterialien eine

zusätzliche Befestigung mittels Dübeln.

Die Sanierung der Fassade der Hütteldorferstraße erfolgt mittels WDVS mit Verwendung von Resol-Dämmplatten. Resol-Dämmplatten ermöglichen besonders schlanke WDVS mit hoher Leistung. Abbildung 16 zeigt die Darstellung des WDVS der Hütteldorferstraße 252 (nördliche Außenwand) mittels Eco2Soft.

NORD AW02 Außenwand Resoldämmung

Wand: gegen Außenluft - nicht hinterlüftet (BG5)



Nr.	Typ Schicht (von innen nach aussen)	d cm	λ W/mK	R m²K/W	$\Delta OI3$ Pkt/m²
1	Kalkputz	2,00	0,830	0,02	14
2	Betonhohlsteine (800 kg/m³)	30,00	0,600	0,50	8
3	Außenputz	2,00	1,050	0,02	11
4	Klebermörtel	0,50	1,000	0,01	9
5	AUSTROTHERM RESOLUTION Fassade-Dämmplatte	16,00	0,022	7,27	92
6	Bauteil mit open KlebeSpachtel W	0,50	0,800	0,01	6
7	Sto-Polystyrol-Hartschaumplatte EPS-F B&W	4,00	0,033	1,21	11
8	Knauf Blauband Tünich Gips-Dünnputz	0,50	0,700	0,01	4
$R_{si} / R_{se} =$		0,130 / 0,040			
R' / R'' (max. relativer Fehler: 0,0%) =		9,216 / 9,216			
Bauteil		55,500	9,216	153	

Abbildung 18: WDVS mit Resol-Dämmplatten der Hütteldorferstraße 252 im Eco2Soft (Eigene Darstellung Eco2Soft)

Die Bauteilschichten werden dem entsprechenden Energieausweis der Gebäudesanierung entnommen, dieser befindet sich im Anhang der Arbeit. Die Ausführung erfolgt mittels einer Resol-Dammplatte mit einer Stärke von 16 cm.

4.2.3.2 MAFA-Fassade



Die nach Süden ausgerichtete Fassade des Gebäude 1 wird mit einer innovativen Multi-Aktiv-Fassade (MAFA) der Firma Gap-Solution ausgeführt. Es handelt sich dabei um vorgefertigte Pfosten-Riegel-Elemente mit integrierter Kartonwabendämmung mit vorgelagerter Photovoltaik-Verglasung (PV).

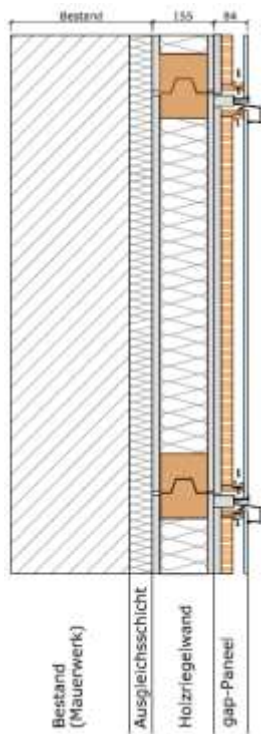
Abbildung 19: Süd-Fassade mit und ohne Gap-Solution der Hütteldorferstraße 252 (Stefan Sattler, 2013)

Die vorgefertigten Elemente werden an der Außenwand befestigt und enthalten die wesentlichen Haustechnikkomponenten. Durch die im Vergleich zu WDVS einfache Befestigung der Elemente verringert sich der bauliche Eingriff in das Gebäude stark. Die in die Verglasung integrierte PV, kombiniert mit einer Ausgleichsbatterie und einem Energiemanagementsystem (Lastspitzen können gepuffert, Verbraucher zu- oder wegschaltet werden), versorgt die Komfortlüftung mit Strom. Durch ein entsprechendes Monitoring werden die Erträge der Fassade dokumentiert und als Erfahrungswert für ähnliche Anlagen gesammelt.

Die geometrischen Maße der Elemente können unterschiedlich gewählt werden. Der Aufbau der Konstruktion ergibt sich wie folgt:

Aufbau	
ESG Floatglas	6 mm
Luftspalt	29 mm
Solarwabe B1, Farbton lt. RAL	30 mm
Trägerplatte	19 mm
Gesamtstärke	84 mm
Ungefähres Paneel Gewicht / m ²	35 kg

Abbildung 20: Aufbau GAP-Paneels (Gap-Solution GmbH, 2018)



Den äußersten Bestandteil bildet die Verglasung. Dahinter befindet sich, vorgelagert zur Solarwabe, ein Luftspalt. Die Solarwabe bildet das Herzstück der Konstruktion, sie ist aufgebracht auf einer Trägerplatte. Bei niedrigstehender Sonne (Winter) dringt das Sonnenlicht in die Wabe ein und erwärmt sie. Die Wabe dient somit als Wärmespeicher für die dahinter liegende Wandkonstruktion. Bei hochstehender Sonne (Sommer) können die Sonnenstrahlen nicht in die Konstruktion eindringen, die Wabe verschattet sich durch den einfallenden Winkel selbst, die Strahlen werden reflektiert und verringern das Aufheizen des Gebäudes.

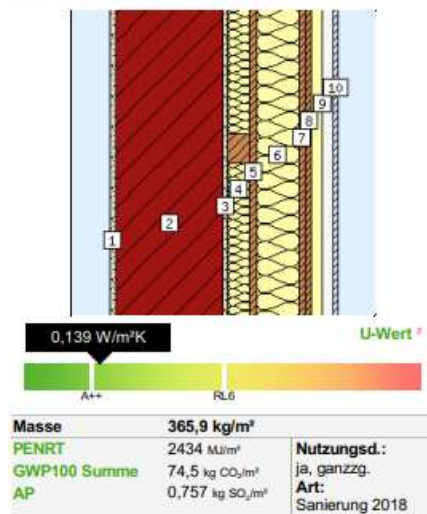
Die Montage der Elemente erfolgt von unten nach oben. Zum Ausgleich etwaiger Unebenheiten kann eine variable Ausgleichsdämmung angebracht werden. Die einzelnen Elemente werden dann auf einer Holzpfosten-Unterkonstruktion, mittels vertikaler Klemmleisten montiert.

Abbildung 21: Aufbau der Gesamtkonstruktion
(Gap-Solution GmbH, 2018)

Abbildung 22 zeigt den Aufbau der verwendeten Gap-Fassade am Beispiel der südlichen Außenwand der Hütteldorferstraße 252.

SÜD F20 MAFa Fassade

Wand: gegen Außenluft - hinterlüftet (BG5)



Nr.	Typ	Schicht (von innen nach aussen)	d cm	λ W/mK	R m²K/W	ΔOI3 Pkt/m²
1		Kalkputz	1,50	0,830	0,02	9
2		Betonhohlstein aus Schlacke, Bims, Ziegelsplitt	30,00	0,600	0,50	8
3		Außenputz	1,50	1,050	0,01	8
4		Inhomogen (Elemente vertikal)	6,00			
		60 cm (88%) Glaswolle MW(GW)-W (32 kg/m³)	6,00	0,035	1,71	14
		8 cm (12%) Nutzholz (475 kg/m³ - zB Fichte/Tanne) - rau, technis	6,00	0,120	0,50	1
5		MDF-Platten mitteldichte Faserplatte (800 kg/m³)	1,90	0,140	0,14	25
6		Inhomogen (Elemente horizontal)	12,00			
		52 cm (87%) Glaswolle MW(GW)-W (32 kg/m³)	12,00	0,035	3,43	27
		8 cm (13%) Nutzholz (475 kg/m³ - zB Fichte/Tanne) - rau, technis	12,00	0,120	1,00	1
7		MDF-Platten mitteldichte Faserplatte (800 kg/m³)	1,60	0,140	0,11	21
8		Gap Solar Trägerplatte	1,90	0,140	0,14	25
9		Gap Solar Rahmen	5,90			
		130,2 cm (49%) flexCL	3,00	0,041	0,73	5
		130,2 cm (47%) Luft (1 kg/m³)	2,90	0,025	1,16	0
		5,8 cm (4%) Nutzholz (425 kg/m³) - rau, technisch getrocknet	5,90	0,110	0,54	0
10		Gap Solar Verglasung	0,60	1,000	0,01	50
				$R_{si} / R_{se} =$		0,130 / 0,130
				R' / R'' (max. relativer Fehler: 5,1%) =		7,541 / 6,803
Bauteil				62,900	7,172	195

Abbildung 22: GAP-Fassade der Hütteldorferstraße 252 (Eigene Darstellung Eco2Soft)

4.2.4 Szenariobeschreibung

Innerhalb des praktischen Teils dieser Arbeit wird auf vier Szenarien eingegangen die den technologischen Fortschritt im Bereich der Ökobilanz möglichst umfassend darstellen sollen. Dazu dienen die Bereiche Ersatz, Entsorgung/Recycling sowie Heizungstechnik und Energieträger. Die Bezeichnung der Szenarien erfolgt durch eine Nummerierung, die in den Szenariobeschreibungen mit dem Kürzel t_0 oder t_1 ergänzt wird. Das Kürzel t_0 bedeutet, dass das Szenario keinen technologischen Fortschritt behandelt und mit dem jetzigen Stand der Technik in Bereichen Ersatz, Entsorgung und Recycling der Gebäudestruktur und Verwendung Heizungstechnik und Energieträger betrachtet wird. Das Kürzel t_1 bedeutet hingegen, dass ein technologischer Fortschritt in die Berechnungen und Betrachtungen der Bereiche berücksichtigt wird. Innerhalb der Szenarien werden verschiedene Annahmen gemacht und verwendet, diese beziehen sich auf Ergebnisse bzw. Einschätzung aus Literatur sowie aus der Praxis. Der Betrachtungszeitraum der Szenarien liegt bei 80 Jahren. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Szenarien beschrieben.

Szenario 1: WDVS- t_0

Szenario 2: MAFA- t_0

Szenario 3: WDVS- t_1

Szenario 4: MAFA- t_1

4.2.4.1 Szenario 1 – WDVS ohne technologischen Fortschritt (statische Bilanzierung)

Szenario 1 beschreibt ein Wärmedämmverbundsystem, wie in 3.2.3.1 beschrieben. Beim Stand der Technik im Jahr 2018 erfolgt der Ersatz eines WDVS durch den Rückbau des Systems, der Entsorgung dessen und der anschließenden Neuerrichtung. In der Praxis der WDVS erfolgt meist ein teilselektiver Rückbau des Dämmmaterials. Die Entsorgung von synthetischen WDVS erfolgt auf drei verschiedene Möglichkeiten: eine thermische Verwertung (bzw. energetische Verwertung), einer stofflichen Verwertung (Recycling) und einer Deponielagerung. Die Menge an recyceltes Material die 2018 wieder vollständig als recyceltes Material verwendet werden kann, ist sehr gering und wird daher nicht in die Berechnung miteinbezogen. Hauptsächlich liegt der Grund für die geringe Recyclingsumme, in der so gut wie nicht vorhandenen Wirtschaftlichkeit der stofflichen Verwertung (Kosten des Rückbaus). Im Jahr 2058 erfolgt aufgrund der Nutzungsdauern der Bauteile ein weiterer Austausch des WDVS-Systems und einer anschließenden Neuerrichtung. Dies erfolgt auf den gleichen technischen Standard wie im Jahr 2018 angenommen.

Die Heizungs- und Warmwasserversorgung des Gebäudes im Jahr 2018 wird durch eine konventionelle Gastherme abgedeckt. Der Austausch von Heizungsanlagen erfolgt durch Rückbau, Entsorgung und der Einrichtung eines Neusystems. Die Stromversorgung erfolgt unter den Annahmen des österreichischen Strommix 2018. Zusätzlich wird eine passive Lüftungsanlage im Gebäude verbaut, um eine dem Passivhaustandard entsprechende Luftqualität zu sichern.

4.2.4.2 Szenario 2 – MAFA ohne technologischen Fortschritt (statische Bilanzierung):

Szenario 2 beschreibt die GAP-Solution-Fassade, als Ausführungsform einer Multiaktivfassade. Der Ersatz einer MAFA-Fassade erfolgt durch das Abnehmen, Entsorgen und eine Neuerrichtung des Systems. Die stoffliche Verwertung im Jahr 2018 wird hier wie auch beim WDVS nicht beachtet. Die vorgelagerte Glasschicht kann durch ihre integrierte PV nur sehr schwer wiederverwendet werden. Die integrierte PV besteht aus Monokristaline-Silizium-Modulen, mit einem Wirkungsgrad von 12%. Fehlerhafte PV-Module werden mit Modulen des gleichen Wirkungsgrads ausgetauscht. Heizungsanlage und Warmwasser, sowie Stromversorgung und Luftqualität wird gleich wie in Szenario 1 gehandhabt. Ebenfalls wie in Szenario 1 wird in Szenario 2 das Fassadensystem im Jahr 2058 mit gleichen technologischen Standards ersetzt.

Tabelle 6: PV-Fläche mit Wirkungsgrad $\eta=12\%$

	PV-Fläche
PV_Fassade	499,5 m ²

In Szenario 3 und 4 wird der technologische Fortschritt in die Betrachtung miteinbezogen. In einem Gebäude kann technologischer Fortschritt aber nicht kontinuierlich verwirklicht werden, da in der Realität Sanierungen nicht jährlich durchgeführt werden können. Deshalb wird die Betrachtungsdauer von 80 Jahren in zwei Phasen unterteilt (je 40 Jahre).

4.2.4.3 Szenario 3 – WDVS mit technologischem Fortschritt (dynamische Bilanzierung):

Mit Annahme des technologischen Fortschritts verändert sich das Szenario 3 stark in Hinsicht zu Szenario 1. Die Bauphase 2018 bleibt ident, jedoch verändert sich der Stand der Technik eines WDVS mit der Zeit. Im Jahr 2058 erfolgt der Austausch des WDVS nicht mehr durch den Ersatz mit einem Neusystem. Es erfolgt eine Aufdopplung der Nord-, Süd-, West- und Ostfassade mit einer 10 cm starken EPS-F-plus Dämmplatte, es handelt sich hierbei um expandierten Polystyrolhartschaumstoff in Plattenform, der durch Klebeverbindung befestigt wird. Die restliche thermische Gebäudehülle (oberste Geschossdecke und Abgrenzung zu unbeheiztem Untergrund) bleibt unverändert.

In der ersten Nutzungsphase des Gebäudes von 2018-2057 wird die Umweltwirkung der Gas- und der Stromnutzung durch die Gastherme bzw. den österreichischen Strom Mix 2018 um 50 % verringert. Dies wird erreicht durch eine Beimischung von Naturgas, sowie eine ständige Erhöhung der Verwendung von erneuerbaren Energiequellen. 2058 wird gleichzeitig mit der Aufdopplung der Gebäudehülle auf die Gastherme verzichtet und diese durch eine dezentrale Wärmepumpe ersetzt. Es handelt sich dabei um eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Tiefensonde im monovalenten Betrieb. Dabei wurde nach eigener Recherche und Betrachtung verschiedener Zukunftsentwicklungen, ein COP (Coefficient of performance) der Wärmepumpe mit einem Wert von 7,5 ausgewählt. Zusätzlich werden zugängliche Leitungen gedämmt und Steigleitungen und Verteilerleitungen als Null angenommen. Die Wärmeabgabe in den jeweiligen Räumen erfolgt durch Heizkörper im Temperaturbereich von 60/35 Grad und wird durch eine Einzelraumregelung mit elektronischem Regelgerät mit Optimierungsfunktion geregelt.

Betrieben wird die Wärmepumpe durch die Installation einer PV-Anlage am Dach des Gebäudes. Dabei werden Monokristaline-Silizium-Module mit einem theoretischen Wirkungsgrad von 30% verwendet. In der aktuellen Version von Archiphysik, die zur Berechnung der Energieausweise verwendet wurde, ist die Eingabe eines Wirkungsgrads von 30% nicht möglich, deshalb wurde der gewünschte Wirkungsgrad von 30% über die sich ergebende Leistung auf die PV-Fläche umgerechnet. Im Jahr 2058 wird eine stoffliche Verwertung der entsorgten Haustechnik von 40% angenommen.

Tabelle 7: PV-Fläche mit Wirkungsgrad $\eta=30\%$

	PV-Fläche
PV_Dach	250 m ²

Die zweite Nutzungsphase reicht von 2058-2098 und kennzeichnet sich durch eine weitere Verminderung der Umweltbelastung der Stromversorgung um 50%. Diese wird wiederum durch eine erhöhte Verwendung von erneuerbaren Energieträgern erreicht.

Am Ende der zweiten Nutzungsphase 2098 greift die Annahme, dass das Gebäude seine Nutzungsdauer erreicht hat und rückgebaut wird. Dabei wird ein tatsächliches Recyclingpotenzial der gesamten Gebäudestruktur von 80% angenommen.

4.2.4.4 Szenario 4 – MAFA mit technologischem Fortschritt (dynamische Bilanzierung): Szenario 4 hat einige Ähnlichkeiten mit Szenario 3 im Bereich der Haustechnik und Energieversorgung des Gebäudes.

Die Konstruktion im Jahr 2018 erfolgt wie in Szenario 2. Im Jahr 2058 erfolgt jedoch eine Aufdopplung der Resoldämmung an der Ost-, West- und Nordfassade des Gebäudes mit einer 10 cm starken EPS-F-plus Dämmplatte. Gleichzeitig erfolgt ein Austausch der MAFA-Fassade wegen der erreichten Nutzungsdauer der Bauteile aber auch der möglichen Effizienzerhöhung der integrierten PV-Fassade. Dabei werden laut Annahme Fassadenmodule mit einem Wirkungsgrad von 30% verwendet.

Tabelle 8: PV-Fläche mit Wirkungsgrad $\eta=30\%$

	PV-Fläche
PV_Dach_30%	250 m ²
PV_Fassade_30%	1154,6 m ²

Zu der bereits vorhandenen und jetzt effizienteren fassadenintegrierten PV, folgt eine PV auf dem Dach des Gebäudes. Es handelt sich dabei, wie auch bei der integrierten PV, um Monokristallinen-Silizium-Module. Auch hier ergibt sich das Problem der Eingabe in Archiphysik. Das Problem wurde aber auf gleiche Weise mit der Berechnung der Fläche über die Leistung gelöst. Damit ergibt sich eine Verdoppelung der Fläche der fassadenintegrierten PV, die aber unter der Annahme steht, dass der Ressourcenaufwand zur Herstellung von Modulen mit einem Wirkungsgrad von 30% deutlich gesteigert ist und somit mit einer starken Erhöhung der Fläche gerechtfertigt wird.

Heizungsanlage, Warmwasserversorgung und Energieversorgung werden gleich wie in Szenario 3 gehandhabt. Wie auch in Szenario 3 erfolgt ein Rückbau des Gebäudes nach Ablauf der Nutzungsdauer mit einem Recyclingpotenzial von 80%.

4.2.4.5 Überblick der untersuchten Szenarien

	Ersatz		Entsorgung/Recycling		Heizungs.+ E.träger	
	t ⁰ ¹	t ¹ ²	t ⁰ ¹	t ¹ ²	t ⁰ ¹	t ²
WDVS	Rückbau des Systems; Errichtung Neusystem (Haltbarkeit 40 Jahre);	4-seitige Aufdopplung (10 cm EPS-F-plus) (Haltbarkeit 40 Jahre); Errichtung PV-Dach (h=30%)	Thermisch (energetisch), Deponie, stoffliche Verwertung nicht wirtschaftlich;	Thermisch (energetisch), Deponie, 40% stoffliche Verwertung im Jahr 2058; 80% stoffliche Verwertung nach Ablauf Nutzungsdauer 2098;	Verwendung Gastherme/vorhandene Ölheizung; Rückbau und Entsorgung des Systems; Errichtung Neusystem (Gas-Brennwert-Kessel); Verwendung Gas/Strom bzw. Heizöl; MAFA-System beinhaltet PV-Fassade;	Halbierung der Umweltwirkung ³ Gas um 50% und Strom um 50% bis 2058 (durch Naturgas und erneuerbare Energien); Bis Ende der Nutzungsdauer 2098 weitere Halbierung der Umweltwirkung Strom (Austausch Gas zu Wärmepumpe, erneuerbare Energien); Verwendung von PV-Anlagen in beiden Szenarien;
MAFA	Rückbau des Systems; Errichtung Neusystem (Haltbarkeit 40 Jahre); Austausch der PV-Module mit gleichem Wirkungsgrad;	3-seitige Aufdopplung (10 cm EPS-F-plus) (Haltbarkeit 40 Jahre); Errichtung PV-Dach (h=30%); Austausch PV-Fassade mit h=30%;				

t₀¹= Stand der Technik (Gegenwart); t₁²= Stand der Technik in 40a; ³ Umweltwirkung= ausschließlich GWP

5 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen und Vergleiche dargestellt. Dabei wird gesondert auf die Szenarien 1 und 2, sowie auf die Szenarien 3 und 4 eingegangen. Anschließend folgen eine Gesamtbetrachtung und Gegenüberstellung der Szenarien.

5.1 Szenario 1 & 2 – statische Bilanzierung von WDVFS und MAFA

Kapitel 5.1 beinhaltet Szenario 1 und Szenario 2. Dies werden innerhalb der Berechnungen auf ihre einzelnen Lebenszyklusphasen aufgeteilt.

5.1.1 Bauphase

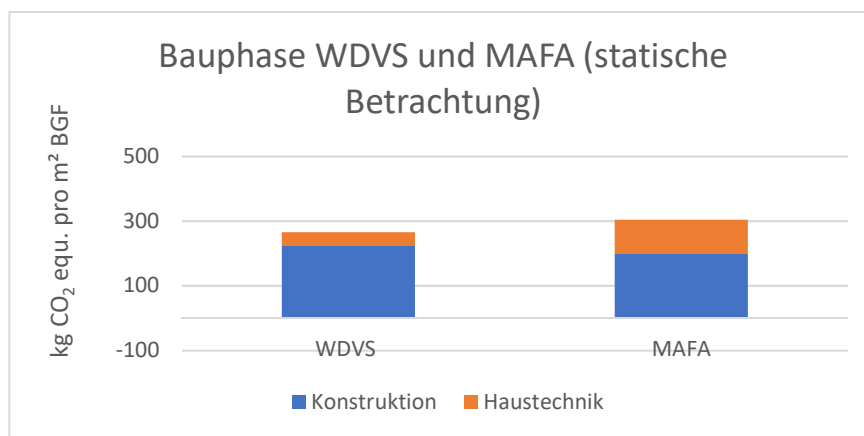


Abbildung 23: GWP der Bauphase

Abbildung 23 stellt die anfallende Umweltbelastung bei der Konstruktion der Szenarien dar, aufgeteilt auf die Konstruktion (Errichtung opaker und transparenter Bauteile des Gebäudes) und die Haustechnik (Heizung- und Warmwasseranlagen). Aus Sicht der Umweltwirkung und der gesamten Bauphase ist das Gebäude mit der reinen WDVFS-Fassade zu präferieren. Grund dafür ist der große Umwelteinfluss der Errichtung der PV-Anlage in der MAFA (statisch). Dabei ist wichtig zu beachten, dass die späteren Strom-Exporte der PV-Anlage außer Acht gelassen werden und als rein negativer Wert in die Bilanz einfließen.

5.1.2 Nutzungsphase

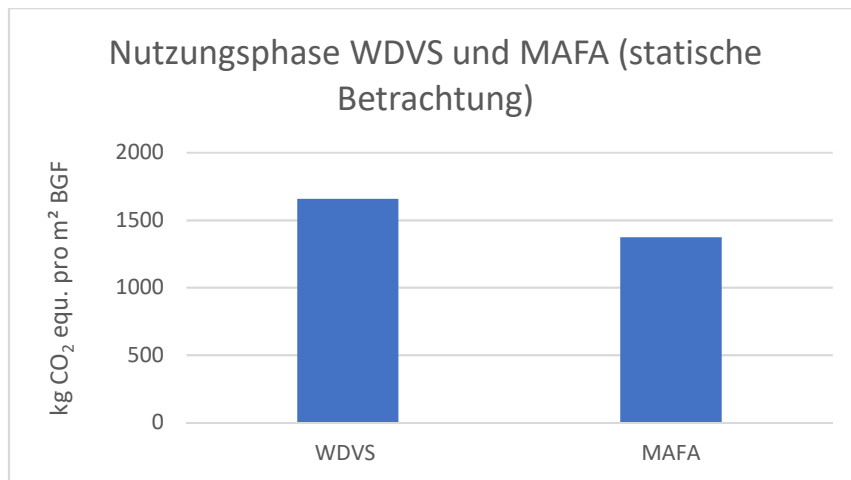


Abbildung 24: GWP der Nutzungsphase

Die Betrachtung der Nutzungsphase zeigt die wesentlichen Unterschiede der Szenarien 1 und 2 (WDVS und MAFA – statisch) auf. Die Photovoltaik, die in der Bauphase noch negativ in die Bilanz einfließt, erweist sich hier als sinnvoll und vermindert die Umweltwirkung der MAFA deutlich. Für die Berechnung der Nutzungsphase wurde mittels Archiphysik der jeweilige Endenergiebedarf, aufgeteilt auf die verwendeten Energieträger Strom und Gas, ermittelt (Abbildung 27).

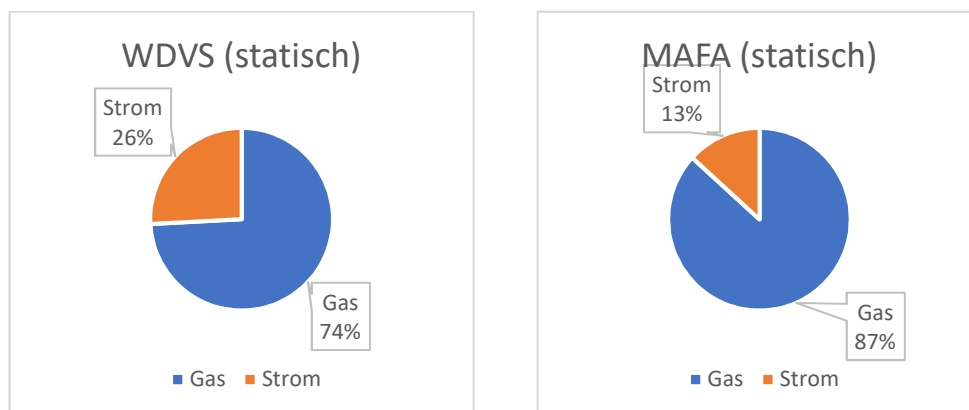


Abbildung 25: Endenergiebedarf WDVS aufgeteilt auf verwendete Energieträger

Tabelle 9 stellt die Ergebnisse der GWP Berechnungen dar. Die PV, die sich im Szenario 2 in der Südseite des Gebäudes befindet, wurde in die Berechnungen einbezogen.

Tabelle 9: Energiekennzahlen und GWP (WDVS und MAFA (statische Betrachtung))

	WDVS	MAFA	
EEB (Gas)	62,35	61,79	kWh/m^2*a
EEB (Strom)	21,75	9,40	kWh/m^2*a
Σ EEB	84,10	71,19	kWh/m^2*a
GWP (Gas)	14,71	14,58	kg/m^2*a
GWP (Strom)	6,00	2,59	kg/m^2*a
Σ GWP	20,72	17,18	kg/m^2*a
Σ GWP (80 Jahre)	1657,41	1374,13	kg/m^2

Grundsätzlich weisen beide Szenarien stark signifikant Ergebnisse auf. Der Grund dafür liegt in den ähnlichen Aufbauten der thermischen Gebäudehülle. Ost-, West- und Nordfassade besitzen den gleichen Aufbau, einzig die Südfassade unterscheidet sich durch die Multiaktivfassade. Hier weist die MAFA -Fassade einen U-Wert von $0,139 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf, im Gegensatz zu $0,109 \text{ W/m}^2\text{K}$ des WDVS. Der ausschlaggebende Faktor bilden die Strom-Exporte der PV-Fassade an der Südseite des Gebäudes, dadurch erreicht Szenario MAFA (statisch) in der Nutzung einen um knapp 18% besseren GWP-Wert als Szenario WDVS (statisch).

5.1.3 Austausch- und Instandsetzungsphase

Die Szenarien 1 & 2 (WDVS und MAFA - statisch) betrachten keinen technologischen Fortschritt. Demzufolge kommt es auch zu keiner Verbesserung der verwendeten Systeme im Jahr 2058. Aufgrund von abgelaufenen Nutzungsdauern im Jahr 2058 müssen das Szenario WDVS (statisch) und MAFA-System (statisch) durch ein Neusystem ersetzt werden. Dabei kommt es zu einem Rückbau der Fassadensysteme und einer Neuerrichtung.

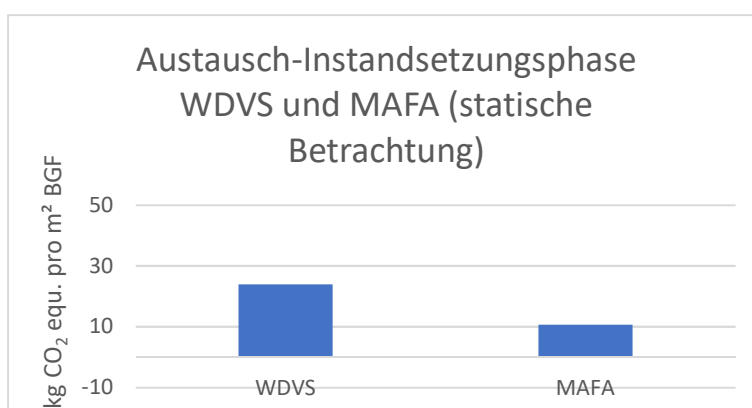


Abbildung 26 zeigt die GWP-Unterschiede der Erneuerung des Systems. Durch die ökologisch besser gereihten Bauteile und dem Wiederverwenden der Verglasung erreicht das MAFA-System ein besseres Ergebnis.

Abbildung 26: GWP der Austausch- und Instandsetzungsphase der Szenarien WDVS und MAFA (statische Betrachtung)

Der Austausch der Systeme hat zur Folge, dass in der grafischen Darstellung, die Nutzungsphase der Betrachtung nach 40 Jahren sprunghaft ansteigt, was auf die zusätzliche GWP-Belastung der Erneuerung zurück zu führen ist.

5.1.4 Gesamtbetrachtung

Für die Gesamtbetrachtung ist es nun wichtig die Nutzungs- und Bauphase zu kombinieren, um ein Ergebnis über eine mögliche Sinnhaftigkeit der Verwirklichung der Szenarien zu erhalten.

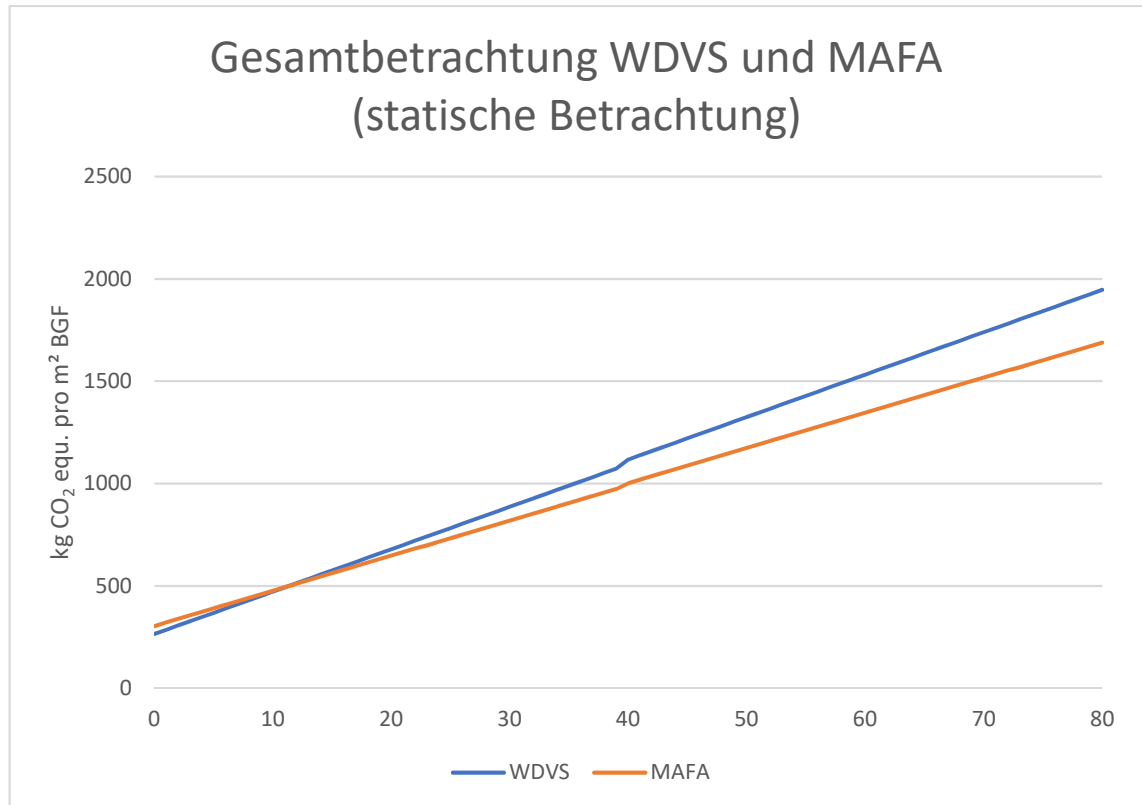


Abbildung 27: Gesamtbetrachtung und Vergleich der Szenarien WDVS und MAFA (statische Betrachtung)

Abbildung 27 zeigt, dass das Gesamtergebnis aufgrund der Umweltwirkung für die Ausführung des Gebäudes in Form von Szenario 2 spricht. Eine erhöhte Umweltwirkung zu Beginn der Bauphase wird durch Einsparungen in der Nutzungsphase ausgeglichen. Die zusätzliche Austausch- und Instandsetzungsphase wirkt sich nur gering auf das Endergebnis aus. Die Ergebnisse zeigen ein um knapp 14% besseres Ergebnis des Szenarios 2 nach Ablauf der Betrachtungsdauer.

Die Betrachtung spiegelt die Verwendung einer statischen Ökobilanz wieder. Es werden Werte zu Konstruktion, Energieversorgung, Entsorgung usw. angenommen und über die gesamte Nutzungsdauer als konstant angesehen.

5.2 Szenario 3 & 4 – dynamische Bilanzierung von WDVS und MAFA

Kapitel 5.1 beinhaltet Szenario 3 und Szenario 4. Dies werden innerhalb der Berechnungen auf ihre einzelnen Lebenszyklusphasen aufgeteilt.

5.2.1 Bauphase

Die Umweltwirkung der Bauphase der Szenarien 3 und 4 unterscheidet sich nicht von denen der Szenarien 1 und 2. Beide verwenden den Stand der Technik im Jahr 2018 und besitzen dieselben Aufbauten von opaken und transparenten Bauteilen, sowie der Haustechnik. Deshalb wird auf die Abbildung 23 im vorigen Kapitel verwiesen, die die Umweltwirkung der Konstruktion der Szenarien darstellt. Szenario 3 entspricht den Ergebnissen von Szenario 1 und Szenario 4 den Ergebnissen von Szenario 2. Aufgrund der gleichen Bauteile und Ergebnisse, wäre in Bezug auf die Umweltwirkung, Szenario 3 dem Szenario 4 vorzuziehen.

5.2.2 Nutzungsphase 1

Die erste Nutzungsphase verläuft von 2018-2057. Diese wird in Abbildung 28 für Szenario 3 und in Abbildung 29 für Szenario 4 dargestellt. Die Darstellung der Nutzungsphase folgt aus den sich ergebenden EEB und GWP aus Tabelle 10.

Tabelle 10: Energiekennzahlen und GWP der Energieträger – Nutzungsphase 1 (WDVS und MAFA (dynamische Betrachtung))

	WDVS	MAFA	
EEB (Gas)	31,18	30,90	kWh/m^2*a
EEB (Strom)	10,88	4,70	kWh/m^2*a
Σ EEB	42,05	35,59	kWh/m^2*a
GWP (Gas)	7,36	7,29	kg/m^2*a
GWP (Strom)	3,00	1,30	kg/m^2*a
Σ GWP	10,36	8,59	kg/m^2*a
Σ GWP (40 Jahre)	414,35	343,53	kg/m^2

Die Summe der normalen Betrachtung der Energieträger wird durch die Datenreihe Nutzung E. träger Gas & Strom dargestellt. Dies ergibt sich durch die Addition der GWP-Teile von Gas (Nutzung E. träger Gas) und Strom (Nutzung E. träger Strom). Grundsätzlich wird dabei ein linearer Verlauf über die Zeit angenommen, wie es auch in der statischen Ökobilanz der Fall ist. Ein Unterschied zu einer dynamischen Betrachtung ist die Nicht-linearität der Nutzungsphase. Durch technologischen Fortschritt im Bereich der Energieträger, steigt der Anteil der Erneuerbaren über die Zeit nicht linear, sondern exponentiell an, was durch eine prozentuelle Erhöhung der Anteile über die Zeit verursacht wird. Diese Verringerung des GWP wird durch die vollen Linien in Abbildung 28 und Abbildung 29 dargestellt.

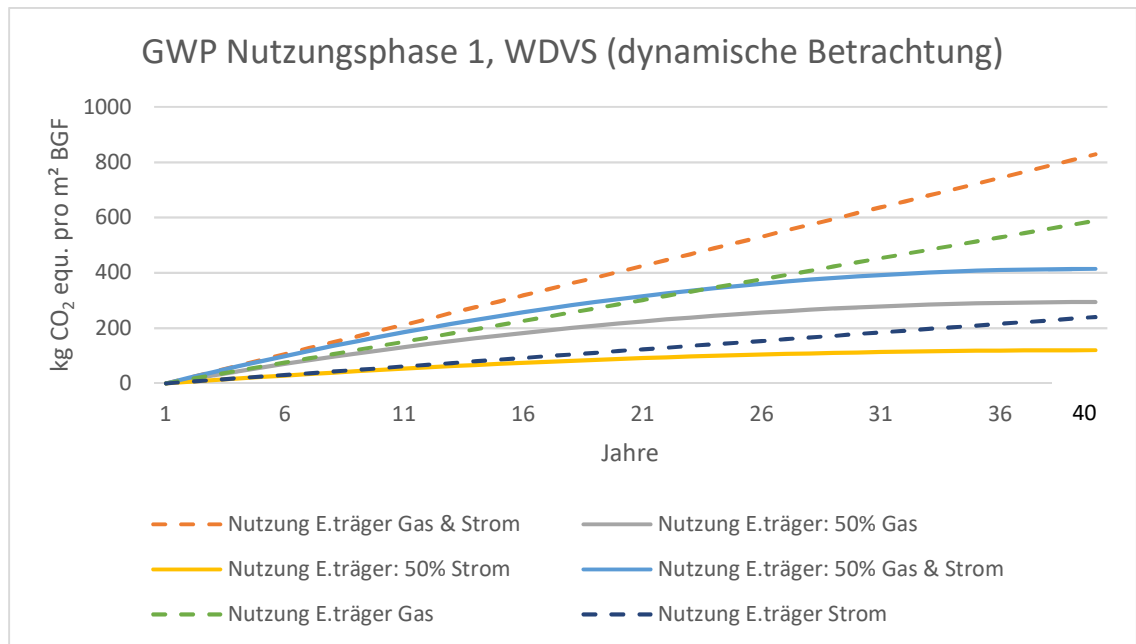


Abbildung 28: GWP der Nutzungsphase 1 von WDVS (dynamische Betrachtung) mit Einbezug von technologischem Fortschritt (volle Linie) und ohne technologischen Fortschritt (strichlierte Linie)

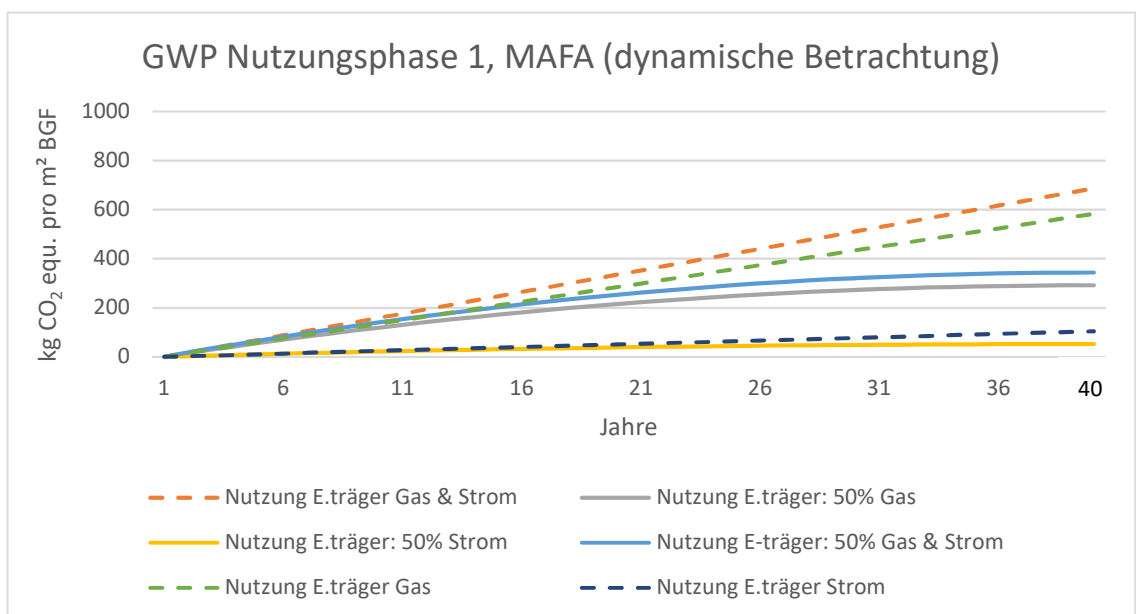


Abbildung 29: GWP der Nutzungsphase 1 von MAFA (dynamische Betrachtung) mit Einbezug von technologischem Fortschritt (volle Linie) und ohne technologischen Fortschritt (strichlierte Linie)

5.2.3 Austausch- und Instandsetzungsphase

Bei Szenario 3, wie bereits in 4.2.4.3 beschrieben, erfolgt ein Austausch der Haustechnik und eine 4-seitige Aufdopplung der Gebäudefassade. Bei Szenario 4 erfolgt ein Austausch der Haustechnik, eine 3-seitige Aufdopplung und ein Austausch der integrierten PV-Module an der Südseite der Fassade. Beide Szenarien stehen unter der Annahme einer Recyclingrate von 40% im Jahr 2058. Grund dafür kann erhöhte Wirtschaftlichkeit des recycelten Materials sein, verursacht durch effizienteren Rückbau der Fassadensysteme oder politische Anreize zum Austausch von ineffizienter Haustechnik.

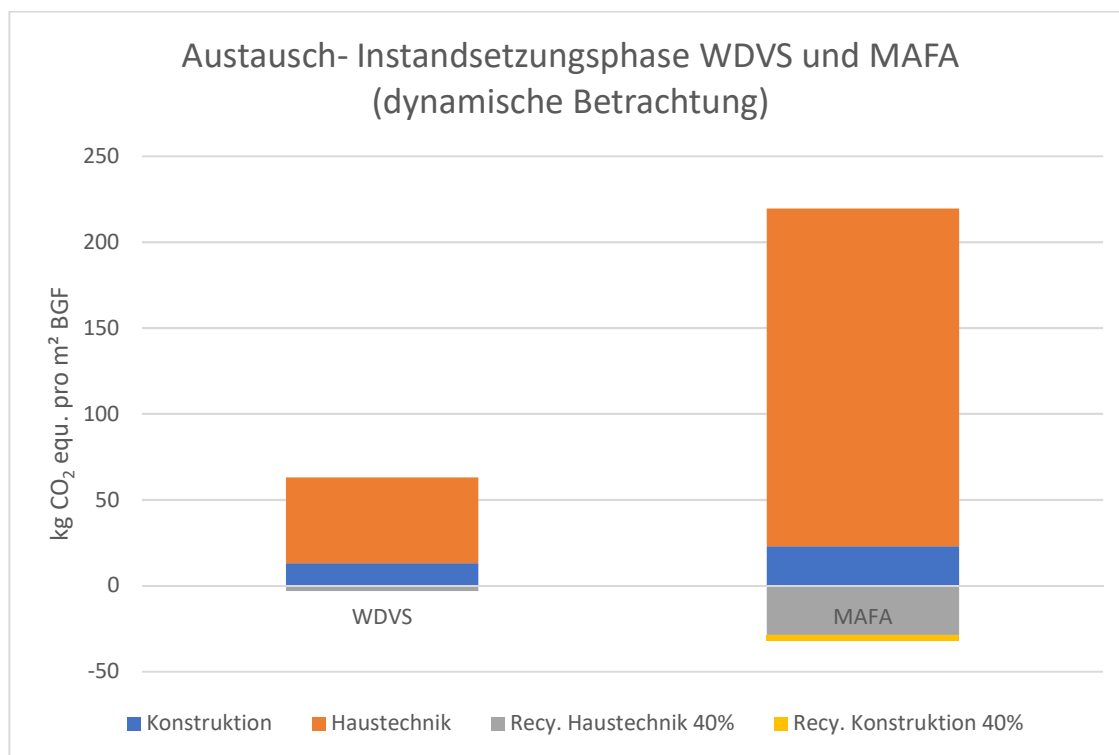


Abbildung 30: GWP der Austausch- und Instandsetzungsphase

Abbildung 30 zeigt die Auswirkungen auf das GWP der zusätzlichen Aufdopplung (Konstruktion) und den Austausch der Gastherme mit der beschriebenen Wärmepumpe (Haustechnik) in Szenario 3. Zu beachten ist die Gutschrift der recycelten Gastherme, die positiv in die Bilanz einfließt. Ähnliche Auswirkungen hat die Aufdopplung bzw. Erneuerung der MAFA Fassade auf das GWP in Szenario 4. Auch hier geht die Menge an GWP, die durch die recycelten Bauteile (Gastherme, Fassadenkonstruktion, PV) erreicht wird, als Gutschrift in die Berechnung ein.

Zu sehen ist der sehr große Einfluss der integrierten PV an der Fassade bzw. der neu errichteten PV am Dach des Szenarios 3. Abbildung 31 zeigt den prozentuellen Anteil der PV (Fassade und Dach) am Gesamt-GWP der Haustechnik am Ende der Austausch- und Instandsetzungsphase.

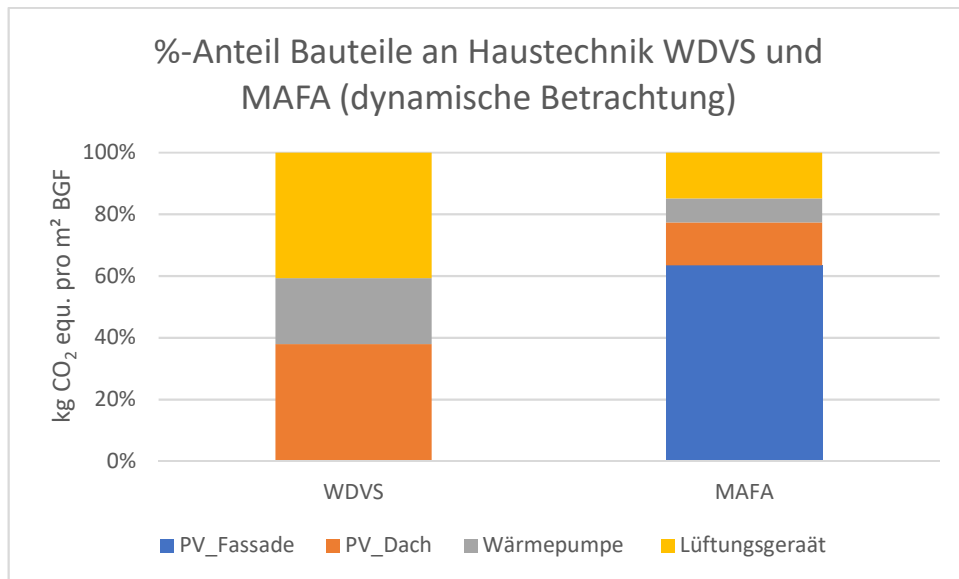


Abbildung 31: Anteil der verschiedenen Bauteile (PV, Wärmepumpe, Lüftungsgerät)

5.2.4 Nutzungsphase 2

Die Nutzungsphase 2 verläuft von 2059 bis 2097. Dabei tritt, wie auch in Nutzungsphase 1, ein technologischer Fortschritt in den Bereichen der Energieversorgung auf. Dadurch, dass die 2018 noch aktive Gastherme 2058 gegen eine effiziente-Wärmepumpe ausgetauscht wurde, liegt der Anteil des Energieträgers Gas in der zweiten Nutzungsphase bei null. Die Wärmepumpe übernimmt den Heizungs- und Warmwasserbedarf und wird durch die in beiden Szenarien installierten PV-Anlagen betrieben. Die Umweltwirkung des Energieträgers Strom und somit des gesamten Energiebedarfs wird während der Nutzungsphase um weitere 50% verringert.

Die zweite Nutzungsphase beruht auf den Ergebnissen der Energiekennzahlen aus Tabelle 11.

Tabelle 11: Energiekennzahlen und GWP der Energieträger – Nutzungsphase 2 (WDVS und MAFA (dynamische Betrachtung))

	WDVS	MAFA	
EEB (Strom)	15,75	-1,15	$kWh/m^2 \cdot a$
Σ EEB	15,75	-1,15	$kWh/m^2 \cdot a$
GWP (Strom)	1,58	-0,11	$kg/m^2 \cdot a$
Σ GWP	1,58	-0,11	$kg/m^2 \cdot a$
Σ GWP (40 Jahre)	63,02	-4,60	kg/m^2

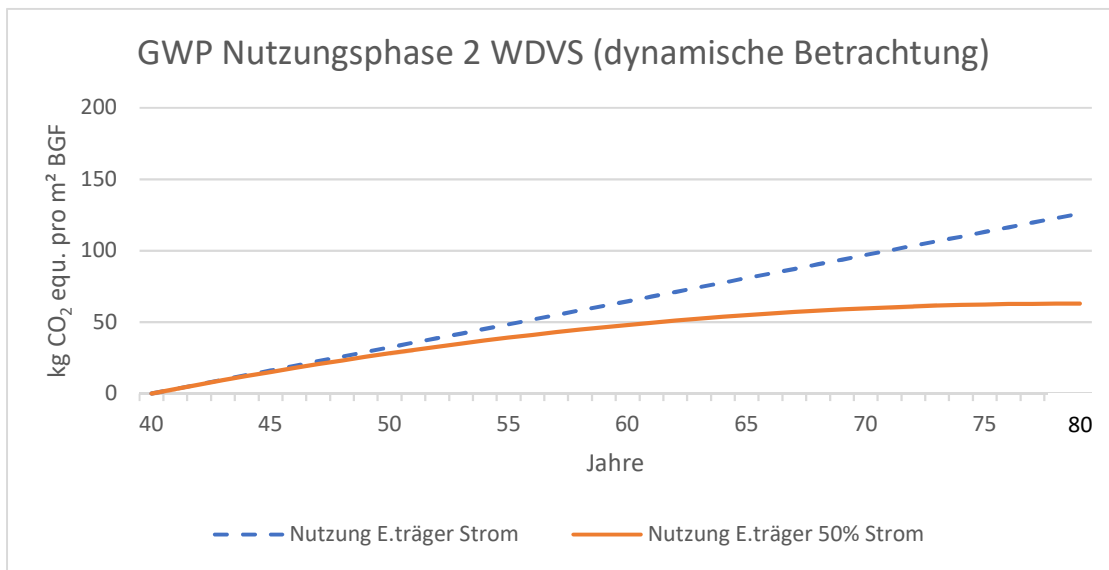


Abbildung 32: GWP der Nutzungsphase 2 von WDVS (dynamische Betrachtung)

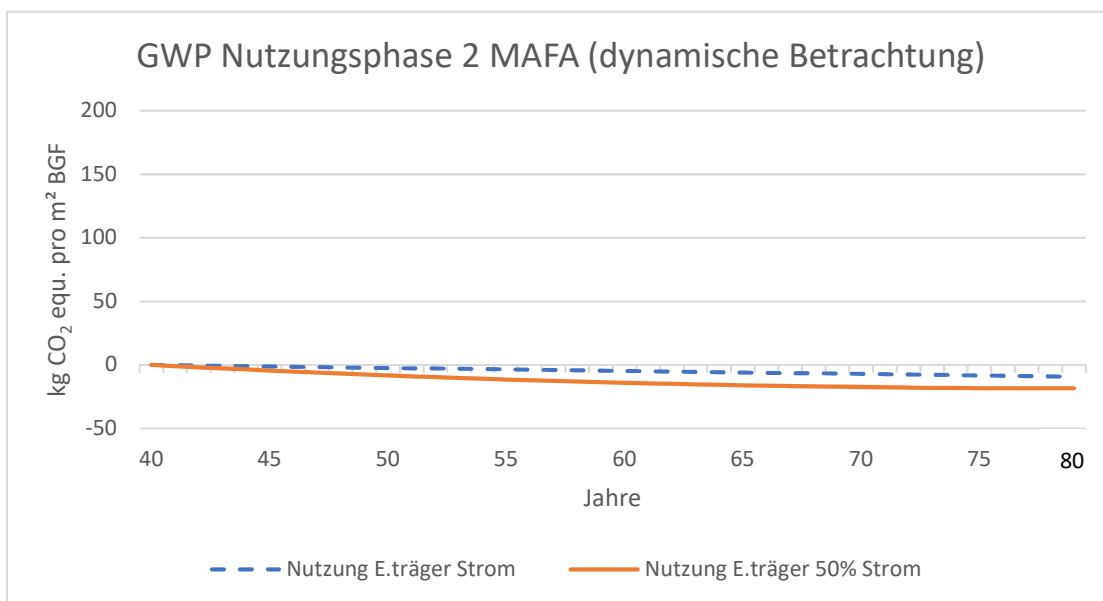


Abbildung 33: GWP der Nutzungsphase 2 von MAFA (dynamische Betrachtung)

Auch in der Nutzungsphase 2 zeigt sich ein nicht-linearer Verlauf der Umweltwirkung, basierend auf den gleichen Gründen wie in Nutzungsphase 1. Die in der Rückbau- und Erneuerungsphase durchgeführten Änderungen am Gebäude, sowie die Veränderung der Energiezusammensetzung, sind an den deutlich geringeren GWP der Szenarien zu sehen. Abbildung 32 zeigt die Umweltwirkung während der Nutzungsphase ohne technologischen Fortschritt (strichlierte Linie) als auch mit technologischem Fortschritt (volle Linie). Szenario 4 erreicht durch die effiziente PV an der Fassade des Gebäudes sogar ein negatives Wachstum des GWP, was in Abbildung 33 durch die negative Steigung der Graphen dargestellt wird.

5.2.5 Rückbau- und Entsorgungsphase

Nach Ablauf der Nutzungsdauer 2098 erfolgt der Rückbau des Gebäudes. Durch die getätigten Annahmen ermöglicht technologischer Fortschritt in den Bereichen des selektiven Rückbaus und stofflichen Verwertung eine prozentuelle Menge an recyceltem Material von 80%.

Abbildung 34 stellt die gesamte Umweltbelastung dar, die durch die Konstruktion des Gebäudes in Phase 1 und Phase 3 aufgetreten sind. Dabei wurden das GWP aller opaken und transparenten Bauteile und das GWP als Haustechnikkomponenten addiert. Der negative Wert in beiden Diagrammen stellt die GWP-Gutschrift (80% stoffliche Verwertung) nach Ablauf der Nutzungsdauer dar.

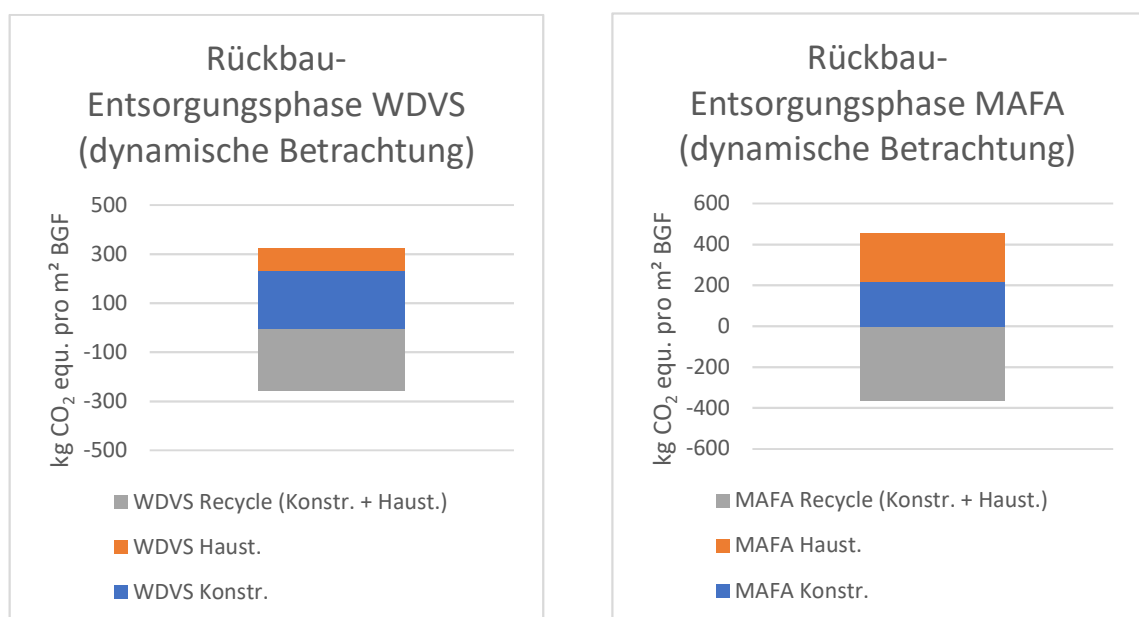


Abbildung 34: GWP Rückbau- und Entsorgungsphase WDVS und MAFA (dynamische Betrachtung)

Mit dieser Lebenszyklusphase endet die Nutzungsdauer des Gebäudes und damit die dynamische Betrachtung der Ökobilanz. Im nächsten Kapitel wird eine Gesamtbetrachtung aller Lebenszyklusphasen der Szenarien vorgenommen.

5.3 Gesamtbetrachtung

Abbildung 35 bildet eine Gesamtbetrachtung der Szenarien 1-4. Es zeigt sich, dass eine dynamische Betrachtung im Gegensatz zur statischen deutlich komplexer ist. Zu Beginn erfolgt die Bauphase, die bei den Szenarien 1 und 3, sowie 2 und 4 den gleichen Wert bildet. Die Nutzungsphase 1 wird durch den nicht linearen Anteil von 1 bis 39 dargestellt. Bis zu diesem Zeitpunkt liegen die Ergebnisse des GWP-Verlaufs recht nahe aneinander. Die Unterschiede, die in der Nutzungsphase auftreten sind auf die installierte PV im Szenario 2 und 4 zurückzuführen. Dieser Unterschied zieht sich innerhalb der statischen Betrachtung bis zum Ende der

Nutzungsdauer. Die Austausch- und Instandsetzungsphase zeigt sich bei allen vier Szenarien mit einem Sprung des GWP-Verlaufs im Jahr 40, gefolgt von der Nutzungsphase 2. Der GWP-Sprung der Szenarien 3&4 ist jedoch deutlich höher, was sich auf die Unterschiede der Haustechnik zurückführen lässt. Der Unterschied, der Szenarien 3 und 4, die im Jahr 2059 zu erkennen sind, beträgt 95,4 kg CO₂/m². Dieser Unterschied wird jedoch durch das negative GWP-Wachstum des Szenarios 4 fast vollständig aufgehoben. Den Abschluss bildet die Rückbau- und Entsorgungsphase 2098.

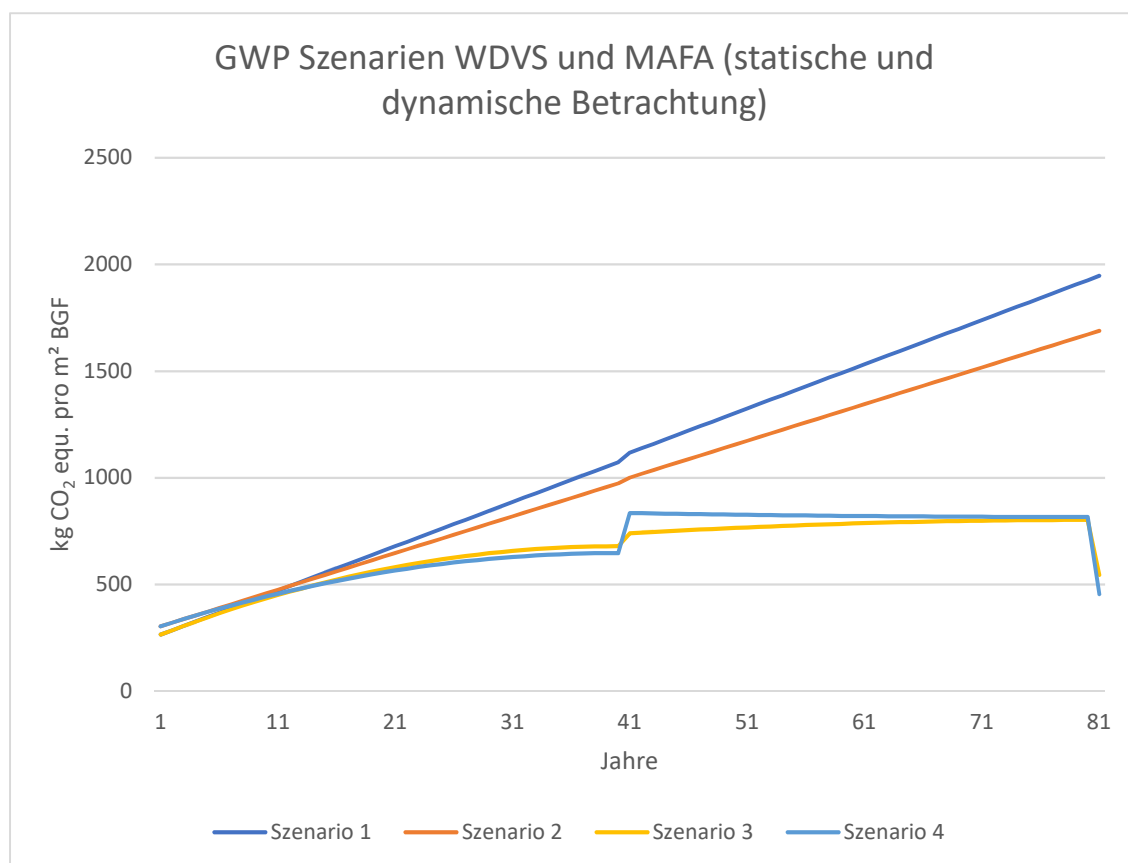


Abbildung 35: GWP der Gesamtbetrachtung WDVS und MAFA (statische und dynamische Betrachtung)

Tabelle 12: Ergebnisse Ökobilanz

	Σ GWP (80 Jahre) kg/m ²
WDVS (statisch)	1922,86
MAFA (statisch)	1678,16
WDVS (dynamisch)	546,14
MAFA (dynamisch)	468,93

Tabelle 12 zeigt letztendlich die Ergebnisse der Ökobilanz aus Sicht der Umweltwirkung der Szenarien. Durch die getätigten Annahmen zeigt sich Szenario 4 innerhalb der statischen und dynamischen Betrachtung als bestes Ergebnis.

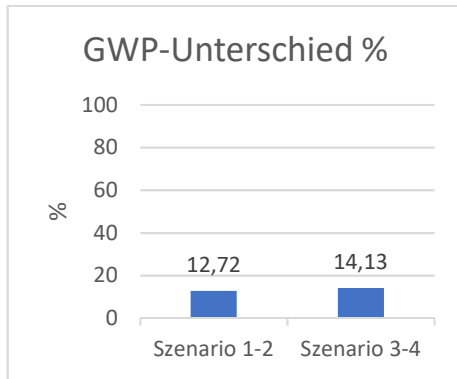


Abbildung 36: Prozentueller Unterschied der Umweltwirkung WDVS und MAFA

Eine weitere Betrachtung zeigt, dass der prozentuelle Unterschied zwischen der WDVS und einer MAFA - Fassade durch die dynamische Betrachtung nicht verändert wird. In der statischen Betrachtung besitzt Szenario 2 (MAFA) ein um 12% besseres Ergebnis als Szenario 1 (WDVS). Innerhalb der dynamischen Betrachtung liegt der Unterschied bei knapp 14% von Szenario 4 (MAFA) zu Szenario 3 (WDVS).

6 Diskussion

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass in einer statischen Ökobilanz die Nutzungsphase als entscheidende und dominante Phase betrachtet werden kann. Somit gilt, dass entscheidende Verbesserungen am Ökobilanzergebnis in der Nutzungsphase erreicht werden können (z.B. durch Verringerung des HWB). Es wird damit ein Großteil der Bemühungen in die Verbesserung der Energiekennzahlen der Nutzungsphase gesteckt und die anderen Phasen werden außen vor gelassen. Dies gilt für die Szenarien 1 & 2.

Betrachtet man die Ergebnisse der Szenarien 3 & 4 erkennt man, dass die Auswirkung der Nutzungsphase auf die Ökobilanz-Ergebnisse stark nachlässt. Die Austausch- und Erneuerungsphase und vor allem die Rückbau- und Entsorgungsphase haben einen deutlich größeren Einfluss auf die Ergebnisse. Der Grund dafür liegt in den Gutschriften, die durch die Recyclingsumme der Primärmaterialien erreicht werden. Innerhalb der dynamischen Betrachtung werden somit andere Lebenszyklusphasen in den Vordergrund gestellt.

In dieser Arbeit lag das Hauptaugenmerk auf drei Werkzeugen: Archiphysik, Eco2Soft und Excel-Berechnung. Im Rückblick darauf kann die Aussage getroffen werden, dass Eco2Soft als Ökobilanztool für diese Arbeit nur begrenzt geeignet war. Grund dafür war die zum Teil nicht vorhandene Transparenz der Ergebnisse der betrachteten Lebenszyklusphasen sowie von Daten, die dem Entsorgungsindikator oder dem GWP des Ressourcentransports hinterlegt sind. Deshalb wurde auf eine erweiterte Version des Programms zurückgegriffen, die es ermöglicht, hinterlegte Details der vorhandenen Bauteile zu bearbeiten und selbstständig zu ergänzen. Diese Version wurde freundlicherweise, nach Rücksprache von der baubook GmbH bereitgestellt.

Hauptsächlich lag die Schwierigkeit in der fehlenden Entsorgungsphase, die in Eco2Soft nicht berücksichtigt wird. Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus liefert beim Einbeziehen der Rückbau- und Entsorgungsphase deutlich unterschiedliche Ergebnisse als die Betrachtung mit den gegenwärtigen Bilanzgrenzen in Eco2Soft.

In dieser Arbeit wurde die Entsorgungsphase deutlich vereinfacht und am Ende eine Recyclingsumme von allen Bauteilen von 80% angenommen. Ein anderer Ansatz wäre, die finale Recyclingsumme durch das Recyclingpotenzial eines jeden Bauteils zu bestimmen (Innenputz, Außenputz, Resoldämmung usw.). Der Grund, warum dies in der vorliegenden Berechnung nicht gemacht wurde, liegt in der Szenario Beschreibung. Hätte die Recyclingsumme aus der Summe jedes Recyclingpotenzials eines jeden Bauteils bestanden, hätte für jedes einzelne Bauteil eine Annahme in der zukünftigen, technologischen Entwicklung getroffen werden müssen. Somit würde die Unsicherheit der Szenario Beschreibung noch weiter ansteigen.

Ein weiterer Punkt, der die Entsorgungsphase in den Ergebnissen so dominant wirken lässt, ist die stoffliche Verwertung und die daraus folgende Gutschrift, die in den Berechnungen berücksichtigt wird. Diese Gutschrift, basierend auf der Produktion der Primärmaterialien, wird in dieser Arbeit als fixer Wert festgelegt. Dabei wird aber eine Überlegung außen vor gelassen: In Zukunft werden Primärmaterialien durch effizientere, klimaschonende Technologien vermutlich „günstiger“ produziert. Das hat zur Folge, dass die Gutschrift in der Entsorgungsphase geringer in die Ergebnisse einfließt und den positiven Einfluss der Entsorgungsphase vermindert.

Rückblicken kann gesagt werden, dass die Ergebnisse dieser Arbeit stark durch die Szenario Beschreibung bestimmt wurden. Es war zum einen das Ziel, die Szenarien möglichst, ohne zu große Unsicherheiten zu definieren. Dafür wurden hauptsächlich Bauteilkataloge von Firmen und Literatur zu technologischen Entwicklungen herangezogen. Zum anderen wollte der Verfasser die Szenarien aber so definieren, dass der technologische Sprung innerhalb der Phasen gut zum Vorschein kommt. Diese zwei Punkte kollidierten während der Szenario Beschreibung oft miteinander. Im Rückblick muss gesagt werden, dass die Annahmen, trotz Recherche, große Unsicherheiten beinhalten. Es wurden technologische Sprünge in Bereichen angenommen, die möglicherweise auch in Zukunft nicht zu realisieren sind, sei es aus wirtschaftlicher Sicht oder aus der Sicht der nachhaltigen Ressourcennutzung.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit, müsste in einem weiterführenden Schritt an der Auslegung der Szenarien gearbeitet werden. Wie im vorigen Absatz beschrieben, wurden die Szenarien sehr hypothetisch vom Verfasser definiert. Eine Auslegung der Szenarien auf einer technisch höherwertigen Basis, würde aus der Sicht des Verfassers andere Ergebnisse mit sich bringen. Ebenfalls von Interesse wäre die Anwendung der Ergebnisse auf einen größeren Bestand von Gebäuden. Das Sanierungsvorhaben der Stadt Wien würde sich hier anbieten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen auf, dass geringe Änderungen an Annahmen und Berechnungen bereits für große Differenzen in den Ergebnissen verantwortlich sein können. Wichtig ist hier, dass auch kleinste Änderungen in die Methode miteinfließen und nicht ignoriert werden. Die Methode der Ökobilanz hat sich bereits in den letzten Jahren als passendes Instrument zur Gebäudebewertung bewiesen und damit Sie diese Stelle auch weiterhin ausfüllen kann ist es wichtig, dass Entwicklungen in diesem Bereich nicht stillstehen, denn wenn man sich

die technologischen Veränderungen in den letzten 100 Jahren vor Augen führt, kann man nur erahnen was sich in weiteren 100 Jahren in diesem Bereich zutragen wird.

7 Zusammenfassung

Mit Inkrafttreten des Pariser Abkommens am 04. November 2016 wurde ein Grundstein für die zukünftige Handhabung mit der Klimaerwärmung gelegt (UNFCCC, 2015). Grund für die Notwendigkeit eines solchen Abkommens ist die langjährig verschwenderische Nutzung von natürlichen Ressourcen in vielen unterschiedlichen Sektoren der Gesellschaft. Bei genauerer Betrachtung der Treibhausgas-Emissionen in Österreich zeigt sich deutlich, dass die Sektoren Energie und Industrie (37,0 Mio. Tonnen), Verkehr (23,7 Mio. Tonnen), Gebäude (8,3 Mio. Tonnen) sowie die Landwirtschaft (8,2 Mio. Tonnen) die größten Verursacher darstellen (Umweltbundesamt, 2018).

Durch die hohen Energieströme, die in den Bausektor fließen und die große Zahl an erteilten Wohnungsbewilligungen erscheint der Einfluss des Gebäudesektors auf die Emissionsentwicklung nachvollziehbar und eine nachhaltige Entwicklung im Bausektor als Voraussetzung für eine klimaschonende Zukunft. Um eine nachhaltige Entwicklung zu sichern besteht aber die Notwendigkeit, alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit abzudecken und das möglichst gleichzeitig. Dazu zählt die ökologische, die ökonomische und die soziale Dimension (DIN EN 15643-1:2010, 2010).

Aus ökologischer Sicht ist der Bausektor für rund 40% des Energieverbrauchs bei gleichzeitig 36% der CO₂ Emissionen in der EU verantwortlich (Europäische Kommission, 2015).

Ökonomisch gesehen spielt die große Anzahl an in der Baubranche tätigen Unternehmen eine wichtige Rolle und dem damit verbundenen ökonomischem Wert. Auch die soziale Dimension mit Faktoren wie Gesundheit, Barrierefreiheit und Sicherheit dürfen nicht vernachlässigt werden.

Um unterschiedliche Ansätze miteinander vergleichen zu können, ist eine gewisse Form der Normierung notwendig. Damit wird versucht, die drei Säulen der Nachhaltigkeit möglichst gleichzeitig und gleichberechtigt auf der Grundlage von technischen und funktionalen Eigenschaften des Gebäudes zu erfüllen. Dabei erfolgt die Normierung auf internationaler Ebene durch die International Standardisation Organisation (ISO) und auf europäischer Ebene durch das technische Komitee des Europäischen Komitees für Normung (CEN/TC). Ziel beider Organisationen ist ein einheitliches Normenwerk und die Bereitstellung einheitlicher Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen auf europäischer und internationaler Ebene (DIN EN 15643-1:2010, 2010).

Mithilfe der Normierung der drei Dimensionen haben sich im Laufe der Zeit verschiedene Bewertungs- und Zertifizierungssysteme für nachhaltiger Gebäudequalität gebildet. Die wichtigsten Systeme sind das britische BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), das amerikanische LEED (Leadership in Energy and

Environmental Design) und das deutsche DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen). Alle Instrumente arbeiten nach demselben Prinzip. Grundsätzlich werden Instrumente verwendet, um ökologische, ökonomische und sozioökonomische Qualitäten eines Gebäudes zu bestimmen. Diese Qualitäten werden in jedem System anders dargestellt. Je höher die erreichte Punkte- oder Prozentzahl in den jeweiligen Bereichen, desto höher die finale Note der Bewertung (Ebert et al., 2013).

Alle Bewertungssysteme verwenden Kriterien, die sich in ihren Inhalten und ihrer Ausführung unterscheiden. Eine dieser geforderten Kriterien ist die Ökobilanz (LCA). Ökobilanzen, oft auch als Lebenszyklusanalysen bezeichnet, arbeiten nach dem Prinzip der Lebenszyklusperspektive. Innerhalb einer Ökobilanz wird versucht den Lebensweg eines Produktes oder auch einer Dienstleistung aus umweltorientierter Sicht zu beleuchten. Dabei werden nur die Umweltwirkungen eines Produkts betrachtet, ökonomische oder soziale Aspekte werden in der Ökobilanz nicht behandelt. Für die Analyse der Umweltwirkungen werden Daten aller Materialien, Inhaltsstoffe und Verarbeitungsprozesse benötigt: Daten zu Rohstoffabbau und Transport, Herstellungsprozessen, Hilfs- und Betriebsstoffen, Nutzung und Entsorgung (Eberle et al., 2018).

Das Prinzip der Ökobilanz ist international durch die ISO-Normen 14040 bis 14044 geregelt. Dabei umfasst die Ökobilanz immer folgende vier Arbeitsschritte:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
2. Erstellung der Sachbilanz
3. Erstellung der Wirkungsabschätzung (Definition der Wirkungsindikatoren z.B. Global Warming Potential)
4. Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerung (DIN EN ISO 14040:2009, 2009)

Die Erstellung der Ökobilanz ist ein iterativer Prozess der in mehreren „Runden“ durchgeführt wird, dabei werden Ergebnisse durchgehend ergänzt und ausgebessert. Die Ökobilanz verfolgt, wie bereits erwähnt, das Prinzip der Lebenszyklusperspektive. Dabei liegt es am Ersteller der Ökobilanz welche Form der Lebenszyklusbetrachtung gewählt wird. Es gibt hier verschiedene Ansätze für die Wahl der Systemgrenzen und wie diese definiert werden können. „Von der Wiege bis zur Bahre“ (Cradle to Grave) bildet die am meisten verwendete Betrachtung in der Ökobilanz. Optional ist hier die Berücksichtigung von Wiederverwendung, Recycling und Verwertung von Primärstoffen (Lützkendorf et al., 2017).

Das System der Ökobilanz hat sich auch außerhalb der erwähnten Bewertungs- und Zertifizierungssysteme durchgesetzt und durch die immer stärkeren Präsenz der LCA in der Wissenschaft, wurde das Thema auch in der Gesellschaft, im Bewusstsein von Kunden, Banken, Investoren und Behörden, größere Aufmerksamkeit geschenkt. Die Nutzung von Gebäuden als „Material-Banken“, rückbaufähige Gebäudekonstruktionen, Integration von

Recyclingpotenzialen in die Bewertung und die Diskontierung von Emissionen sind aktuelle Themen in diesem Bereich. Ebenfalls wird dem Problem der fehlenden Variable Zeit und dem somit nicht vorhandenen technologischen Fortschritt viel Aufmerksamkeit in der Literatur geschenkt (Silvestre et al., 2013).

Ökobilanzen kann man als statische Bewertungsmethode ansehen. Innerhalb der LCA werden Faktoren über die gesamte Lebensdauer als fix angenommen.

Ressourcenverbrauch und Emissionen werden über die gesamte Nutzungsdauer als konstant angesehen. Auch Änderungen am Nutzungsverhalten, Energieversorgung, Austausch von Bauteilen oder technische Innovationen etc. werden in der LCA nicht berücksichtigt. Damit werden Faktoren außer Acht gelassen, die sich stark auf die Ergebnisse einer Ökobilanz auswirken können (Lützkendorf et al., 2017).

Genau dieser Aspekt der statischen Ökobilanz mit seinen Eigenschaften wird in dieser Arbeit betrachtet und mit einer dynamischen Ökobilanz ergänzt. Dabei soll die Methode der LCA mit dem Faktor Zeit und dem technologischen Fortschritt erweitert werden.

Diese Arbeit setzt sich aus einem theoretischen und einem praktischen Teil zusammen. Im theoretischen Teil werden die Grundlagen für das Thema erarbeitet, dies beinhaltet eine Recherche zum Stand des Wissens in den Bereichen: Nachhaltigkeitsaspekt im ressourcenorientierten Bauen, Normenfeld im Bereich der Nachhaltigkeit und der Ökobilanzierung, Energieeffizienzklassen von Gebäuden, Bewertungs- und Zertifizierungssysteme und den Grundlagen der LCA.

Der praktische Teil befasst sich mit der Beantwortung der Forschungsfragen auf Basis eines Fallbeispiels. Es handelt sich dabei um ein Sanierungsvorhaben des EU-Projektes EU-GUGLE im Rahmen der europäischen Smart-City-Partnerschaft. Innerhalb des Projekts geht es um kosteneffiziente Sanierungsmodelle mit Vorbildfunktion für Städte und Gemeinden. Die Stadt Wien verwirklicht ihren Anteil an diesem Projekt im Stadtteil Wien Penzing. Der Wiener Gemeindebau Hütteldorferstraße 252 gilt als Vorzeige-Projekt von EU-GUGLE in Wien. Durch seine ideale geografische Orientierung und seine deutlich als schlecht zu bewertenden Energiekennzahlen, gilt das Gebäude als vorrangiges Sanierungsvorhaben der Stadt Wien. Der Gebäudekomplex besteht aus zwei Gebäuden, wobei in dieser Arbeit nur die Stiegen 1-3 und somit das Gebäude 1 betrachtet werden. Im Gebäude befinden sich 35 Wohneinheiten mit 1961 m² Wohnfläche und 2522 m² Bruttogesamtfläche.

Innerhalb des Fallbeispiels werden vier verschiedene Szenarien definiert, die sich an dem aktuellen Sanierungsvorhaben der Hütteldorferstraße 252 orientieren. Szenario 1 ist eine Sanierungsvariante mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) sowie einer Haustechnik und Energieversorgung mit dem technologischen Stand vom Jahr 2018. Szenario 2 bildet ein Gebäude mit einer südseitigen Multi-Aktiv-Fassade (MAFA) mit integrierten Photovoltaik-Modulen ab, sowie derselben Haustechnik und Energieversorgung

von Szenario 1. Szenario 3 und Szenario 4 beschreiben einen technologischen Fortschritt. Das zeigt sich an dem fortschrittlichen Umgang bei der Instandsetzung der Fassade sowie der Haustechnik und Energieversorgung. Szenario 1 und Szenario 2 werden mittels einer herkömmlichen, statischen Ökobilanzierung betrachtet und verglichen. Szenario 3 und Szenario 4 weisen Eigenschaften auf, die eine herkömmliche Herangehensweise nicht möglich macht. Hierbei wird auf eine dynamische Ökobilanzierung zurückgegriffen. Die verwendete Software für die Erstellung der Arbeit teilt sich auf zwei Programme auf. Zum einen, die Berechnung der Energieausweise über Archyphysik, zum anderen die Erstellung der Ökobilanzen für die zu betrachtenden Varianten mittels einer erweiterten Version des LCA-Tools Eco2Soft. Eco2Soft dient hierbei zur Berechnung der Umweltwirkung (Über den Indikator Global Warming Potential – GWP) der Bauphase, Austausch- und Instandsetzungsphase und der Rückbau- und Entsorgungsphase. Mittels Archyphysik wird die Umweltwirkung der Nutzungsphasen der unterschiedlichen Szenarien berechnet.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Unterschiede zwischen einer statischen und dynamischen Ökobilanzierung groß sind. Durch eine statische Methode können zwar Bauphase, Austausch- und Instandsetzungsphase sowie Rückbau- und Erneuerungsphase dargestellt und auf deren Basis, Vergleiche angestellt werden, wichtige Aspekte wie technologische Entwicklung und die Entsorgungsphase werden aber nicht betrachtet. Die statische Ökobilanz setzt die Nutzungsphase in den Fokus und bestärkt somit die Annahme, dass ökologische Verbesserungen hauptsächlich in der Nutzung des Gebäudes zu erreichen sind. In der dynamischen Ökobilanz erreicht man jedoch ein anderes Ergebnis. Durch die Integration des Faktors Zeit und des technologischen Fortschritts, nehmen die Austausch- und Erneuerungsphase als auch die Rückbau- und Entsorgungsphase eine wichtigere Position ein. Es kommt somit zu einer Verschiebung der Dominanz der Lebenszyklusphasen.

Grundsätzlich kann aus der Sicht des Verfassers gesagt werden, dass eine dynamische Ökobilanz eine deutlich geeignetere Bewertungsmethode für ein Gebäude darstellt. Durch den technologischen Fortschritt werden stetig Verbesserungen möglich und diese müssen in eine ökologische Bewertung miteinfließen, besonders wenn es sich hierbei um ein Objekt mit einer so langen Nutzungsdauer wie der eines Gebäudes handelt.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Anderl Michael, B. J. (2017). *Klimaschutzbericht 2017*. Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- [2] Auer, E. (2017). *Bauwirtschaft gewinnt an Schwung*. Wien: Arbeitsmarktservice Österreich, Abt. Arbeitsmarktforschung und Berufsinformation.
- [3] Austrian Standards Institute. (2012). *ÖNORM EN 15978: 2012 10 01, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode*.
- [4] Austrian Standards Institute. (2014). *ÖNORM EN 15804: 2014 04 15, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*.
- [5] Bättig, I. (2016). *Der CO2-Fussabdruck von Solarstrom*. Swissolar.
- [6] BRE. (2016). *BREEAM Fact Sheet*. BRE.
- [7] BREEAM. (2016). *Best of BREEAM 2016; Outstanding sustainable buildings from the BREEAM Awards 2016*. BRE Global.
- [8] Bundesministerium des Innern, f. B. (2018). Normung zur Nachhaltigkeit im Bauwesen. Berlin. Abgerufen am 19. 04 2018 von <http://www.nachhaltigesbauen.de/normung-zur-nachhaltigkeit-im-bauwesen/grundlagen-und-ziele.html>
- [9] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Tech. (2019). Multi-Aktiv-Fassade. Wlen. Abgerufen am 02. 04 2019
- [10] Carl-Alexander Graubner, K. H. (2003). *Nachhaltigkeit im Bauwesen. Grundlagen - Instrumente - Beispiele*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [11] Carson Rachel, D. L. (1962). *Silent spring*. Boston: Houghton Mifflin; Cambridge, Mass.: Riverside Press.
- [12] Development, W. C. (1990). *Our Common Future*. U.S.A: Oxford University Press.
- [13] DGNB. (2018). Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen. Abgerufen am 01. 05 2018 von <http://www.dgnb-system.de/de/system/zertifizierungssystem/>
- [14] Die Presse. (30. 10 2013). Passivhaussanierung: Pionierprojekt in Wien. Abgerufen am 13. 10 2018 von https://diepresse.com/home/immobilien/1470604/Passivhaussanierung_Pionierprojekt-in-Wien
- [15] DIN EN 15643-1:2010, D. (2010). Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 1: Allgemeine Rahmenbedingungen.
- [16] DIN EN 15643-2:2010, D. I. (2011). Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität.
- [17] DIN EN 15643-3:2010, D. I. (2012). *Nachhaltigkeit von Gebäuden - bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 3: Rahmenbedingungen für die Bewertung der sozialen Qualität*.
- [18] DIN EN 15643-4:2010, D. I. (2012). *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 4: Rahmenbedingungen für die Bewertung der ökonomischen Qualität*.
- [19] DIN EN ISO 14025:2010. (2010). *Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [20] DIN EN ISO 14040:2009. (2009). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut .
- [21] DIN EN ISO 14044:2006. (2006). *Umweltmanagement - Ökobilanz; Anforderungen und Anleitung*. Wlen: Österreichisches Normungsinstitut.
- [22] Donath, C. D. (2011). *Nachhaltige Gebäude-Planen, Bauen, Betreiben*. Düsseldorf: bauforumstahl e.V. .

- [23] Eberle Ulrike, J. D. (2018). *Die Ökobilanz, Methode und Wirkungskategorie*. Hamburg: Ökopol - Institut für Ökologie und Politik GmbH.
- [24] Ebert, T., Eßig, N., & Hauser, G. (2013). *Zertifizierungssysteme für Gebäude: Nachhaltigkeit bewerten - Internationaler Systemvergleich - Zertifizierung und Ökonomie*. Wien: DETAIL Green Books.
- [25] econcept. (1998). *Funktionale Einheit und Systemgrenzen bei Ökobilanzen im Bauwesen*. Zürich: Bundesamt für Energie.
- [26] EcoSMEs. (2004). *EcoSMEs - services for green products*. Abgerufen am 25. 05 2018 von <http://www.ecosmes.net/cm/navContents?l=DE&navID=eVerdEEcourseFirst&subNavID=2&pagID=3&flag=1>
- [27] Europäische Kommission. (2015). *EU Energy in Figures*. Luxemburg: Publications Office of the European Union.
- [28] Europäische Union. (2010). *RICHTLINIE 2010/31/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)*.
- [29] Gap-Solution GmbH. (2018). Technische Unterlagen.
- [30] Grober, U. (2013). *The Discovery of Sustainability, A Cultural History of a Concept*. München: Antje Kunstmann GmbH.
- [31] Hegger, M. (2009). Nachhaltiges Bauen: Neue Aufgabe für Architekten und Ingenieure - Architektur im Klimawandel. In H. H. Schetter, *Brennpunkt CO₂-Reduktion - Chancen für das Bauwesen*. Stuttgart: Stuttgart : Stiftung Bauwesen,.
- [32] IBO. (2013). *OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude*. Wien.
- [33] IBO. (2013). *Okoindex3. Anwendung*. Wien.
- [34] IBO. (2015). *Eco2Soft. Das online-Tool für die ökologische Bewertung von Gebäuden*. Wien.
- [35] IBO. (2018). *EI KON-Entsorgungsindikator für Bauteile, EI10-Entsorgungsindikator für Gebäude*. Wien.
- [36] IKZ-Fachplaner. (2014). Erste Passivhaussanierung eines Wiener Gemeindebaus. Wien. Abgerufen am 23. 07 2018 von www.ikz-haustechnik.at/themen/archiv/erste-passivhaussanierung-eines-wiener-gemeindebaus/at_download/file+&cd=8&hl=de&ct=clnk&gl=at
- [37] ISO. (2009). *Environmental management - The ISO 14000 family of International Standards*. Genf: ISO Central Secretariat.
- [38] Karabiberoff, S. (1970). *Bestandsplan Nr. 1 bis Nr. 10*.
- [39] Klöpffer Walter, G. B. (2009). *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: Wiley-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [40] Komfortlüftung.at. (31. 07 2014). Energieeffizienz. Abgerufen am 18. 05 2018 von <http://xn--komfortluftung-3ob.at/index.php?id=1890>
- [41] Kompetenzzentrum der Initiative "Kostengünstig qua. (2009). *Bauen im Lebenszyklus*. Berlin: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
- [42] Krick, B. (2015). *Die neuen Passivhausklassen und wie sie erreicht werden können*. Leipzig.
- [43] Lützkendorf Thomas, K. H. (2009). *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung. Grundlagen, Berechnungen, Planungswerkzeuge*. München: Detail Green Book.
- [44] Lützkendorf, T. (2017). *Assessing the environmental performance of buildings: trends, lessons and tensions*. Building Research & Information.

- [45] Meadows Dennis, M. D. (1972). *Die Grenzen des Wachstums: Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt.
- [46] Ministerium für ein lebenswertes Österreich. (2016). *Gebäudebewertungssysteme im Vergleich*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- [47] ÖGNB. (2019). *ÖGNB & TQB Wissen*. Abgerufen am 02. 04 2019 von <https://www.oegnb.net/wissen.htm>
- [48] Österreichisches Institut für Bautechnik. (2013). *Ökoindex 3, Anwendung, Grundlagen Ergebnissberechnungen Grundlagen*.
- [49] Österreichisches Institut für Bautechnik. (2014). *OiB-Dokument zur Definition des Niedrigstenergiegebäudes und zur Festlegung von Zwischenzielen in einem „Nationalen Plan“ gemäß Artikel 9 (3) zu 2010/31/EU*.
- [50] Österreichisches Institut für Bautechnik. (2015). *OiB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz*. OIB.
- [51] Passivhaus Austria. (05. 08 2015). *Passivhaus-austria.org*. Abgerufen am 21. 05 2018 von <https://passivhaus-austria.org/content/erstes-mehrfamilienhaus-als-%E2%80%9Epassivhaus-plus%E2%80%9C-zertifiziert>
- [52] Pehtnt, M. (2005). *Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies*. Heidelberg: Institute of Energy and Environmental Research Heidelberg .
- [53] RL 2002/91/EG, E. P. (16. 12 2002). Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.
- [54] RL 2018/844 EG, E. P. (30. 5 2018). Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der.
- [55] Sasdi, M. M. (2019). *Energetisches Einsparungspotential durch den Einsatz passiver und aktiver Solarelemente am Beispiel des sozialen Wohnbaus der Stadt Wien*. Universität für Bodenkultur Wien. Institut für konstruktiven Ingenieurbau.
- [56] Schebek Liselotte, B. K.-R. (16. 12 2007). Von der Wlege bis zur Bahre. Eine Einführung in den Schwepunkt "Lebenszyklusanalysen in der Nachhaltigkeitsbewertung". *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis Nr. 3*.
- [57] Schüco International. (01. 01 2016). BREEAM Fact Sheet. Abgerufen am 02. 05 2018 von file:///C:/Users/Julian/Downloads/fact_sheet_breeam.pdf
- [58] Schulze Karsten, S. R. (2006). *Wald mit Zukunft : nachhaltige Forstwirtschaft in Deutschland*. Bonn: Bonn AID.
- [59] Silvestre, J., Brito, J. d., & Pinheiro, M. (2013). *Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials - calculation rules, results and contribution to a "cradle to cradle" life cycle*. Lisbon: Department of Civil Engineering, Architecture an Georesources of Instituto Superior Técnico.
- [60] Stadt Wien. (2018). *Stadtplan Wien*. Abgerufen am 24. 07 2018 von <https://www.wien.gv.at/stadtplan/>
- [61] Steine-Keramik, IIBW/ FV. (2017). *Wohnbauförderung in Österreich 2016*. Wien.
- [62] Steurer, R. (2001). Paradigmen der Nachhaltigkeit. *Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht* 24.2001/4, S. 537-566.
- [63] The Sustainable People. (2019). Das drei Säulen Modell der Nachhaltigkeit. Hamburg. Abgerufen am 08. 04 2019
- [64] Treberspurg, M. (2006). *Ressourcenorientiertes Bauen*. Wien: Arbeitsunterlagen zur Lehrveranstaltung Ressourcenorientiertes Bauen.

- [65] Ulla Baur-Gschier, H. S. (2014). *Das Niedrigstenergiehaus, Bauen für die Zukunft*.
- [66] Umweltbundesamt. (2018). *Klimaschutzbericht 2018*. Wien.
- [67] UNFCCC. (2015). *Historic Paris Agreement on Climate Change: 195 Nations Set Path to Keep Temperature Rise Well Below 2 Degrees Celsius*. Paris. Abgerufen am 01. 04 2019 von <https://web.archive.org/web/20160117141004/http://newsroom.unfccc.int/unfccc-newsroom/finale-cop21/>
- [68] USGBC. (2018). USGBC homepage. *An introduction to LEED*. Abgerufen am 30. 04 2018 von <https://www.usgbc.org/?CategoryId=19>
- [69] Wohnnet Medien GMBH. (09. 06 2005). *Wohnnet.at*. Abgerufen am 19. 05 2018 von <https://www.wohnnat.at/bauen/bauvorbereitung/energiesparhaus-17180>
- [70] Wohnnet Medien GMBH. (15. 01 2016). *wohnnat.at*. Abgerufen am 22. 05 2018 von <https://www.wohnnat.at/bauen/bauvorbereitung/was-ist-ein-niedrigstenergiehaus-8433629>
- [71] Zimmermann, K. (2012). *Anwendung des Leitfadens Nachhaltiges Bauen und Bewertungssysteme Nachhaltiges Bauen (BNB) in der Bundesbauverwaltung, Zusatzmodul Lebenszyklusanalysen nach BNB "Ökobilanzierung (LCA)"*. Hamm: Öko-Zentrum NRW GmbH.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dimensionen nachhaltiger Entwicklung (The Sustainable People, 2019).....	12
Abbildung 2: Konzeption der Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden (DIN EN 15643-1:2010, 2010).....	14
Abbildung 3: Lebenszyklusphasen in der Bewertung der umweltbezogenen Qualität (DIN EN 15643-2:2010, 2011)	16
Abbildung 4: Zeitstrahl und Entwicklung von Bewertungs- und Zertifizierungssystemen (Ebert et al., 2013).....	20
Abbildung 5: Gewichtung der Kategorien (Schüco International, 2016)	21
Abbildung 6: BREEAM Zertifizierungsgrade (Schüco International, 2016).....	21
Abbildung 7: Methodik der Ökobilanz (Eberle et al., 2018).....	29
Abbildung 8: Verfahrensablauf für eine Sachbilanz (DIN EN ISO 14044:2006, 2006)	33
Abbildung 9: Bestandteile der Wirkungsabschätzung (DIN EN ISO 14040:2009, 2009).....	36
Abbildung 10: Lebenszyklusphasen von Gebäuden nach CEN für nachhaltige Gebäude (Donath et al., 2011).....	42
Abbildung 12: Methodische Optionen zur Erstellung einer Umweltdeklaration (DIN EN ISO 14025:2010, 2010).....	48
Abbildung 12: Bilanzgrenzen für OI3 (IBO, Okoindex3. Anwendung, 2013).....	50
Abbildung 13: Lebenszyklus der Szenarien WDVS und MAFA (statische Betrachtung)	58
Abbildung 14: Lebenszyklus der Szenarien WDVS und MAFA (dynamische Betrachtung)	59
Abbildung 15: Konversionsfaktoren nach OIB RL 6 (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015).....	60
Abbildung 16: Lage der Hütteldorferstraße 252 (Stadt Wien, 2018).....	62

Abbildung 17: Luftansicht der Hütteldorferstraße 252 (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Tech, 2019)	62
Abbildung 18: WDVS mit Resol-Dämmplatten der Hütteldorferstraße 252 im Eco2Soft (Eigene Darstellung Eco2Soft)	65
Abbildung 20: Süd-Fassade mit und ohne Gap-Solution der Hütteldorferstraße 252 (Stefan Sattler, 2013).....	65
Abbildung 20: Aufbau GAP-Paneels (Gap-Solution GmbH, 2018).....	66
Abbildung 22: Aufbau der Gesamtkonstruktion (Gap-Solution GmbH, 2018)	66
Abbildung 22: GAP-Fassade der Hütteldorferstraße 252 (Eigene Darstellung Eco2Soft)	67
Abbildung 23: GWP der Bauphase	72
Abbildung 24: GWP der Nutzungsphase	73
Abbildung 25: Endenergiebedarf WDVS aufgeteilt auf verwendete Energieträger	73
Abbildung 27: GWP der Austausch- und Instandsetzungsphase der Szenarien WDVS und MAFA (statische Betrachtung)	74
Abbildung 27: Gesamtbetrachtung und Vergleich der Szenarien WDVS und MAFA (statische Betrachtung).....	75
Abbildung 28: GWP der Nutzungsphase 1 von WDVS (dynamische Betrachtung) mit Einbezug von technologischem Fortschritt (volle Linie) und ohne technologischen Fortschritt (strichlierte Linie).....	77
Abbildung 29: GWP der Nutzungsphase 1 von MAFA (dynamische Betrachtung) mit Einbezug von technologischem Fortschritt (volle Linie) und ohne technologischen Fortschritt (strichlierte Linie).....	77
Abbildung 30: GWP der Austausch- und Instandsetzungsphase	78
Abbildung 31: Anteil der verschiedenen Bauteile (PV, Wärmepumpe, Lüftungsgerät)	79
Abbildung 32: GWP der Nutzungsphase 2 von WDVS (dynamische Betrachtung)	80
Abbildung 33: GWP der Nutzungsphase 2 von MAFA (dynamische Betrachtung)	80
Abbildung 35: GWP Rückbau- und Entsorgungsphase WDVS und MAFA (dynamische Betrachtung).....	81
Abbildung 35: GWP der Gesamtbetrachtung WDVS und MAFA (statische und dynamische Betrachtung).....	82
Abbildung 37: Prozentueller Unterschied der Umweltwirkung WDVS und MAFA.....	83

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: LEED Kriterien (Ebert et al., 2013).....	22
Tabelle 2: Bewertungsstufen des DGNB-Systems (DGNB, 2018)	23
Tabelle 3: Vergleich der Systeme LEED, BREEAM, DGNB.....	24
Tabelle 4: Energieeffizienzklassen von Wohn- und Nicht-Wohngebäuden nach OIB RL (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015)	26

Tabelle 5: Konversionsfaktor Strom-Mix Österreich 2058.....	60
Tabelle 6: PV-Fläche mit Wirkungsgrad $\eta=12\%$	68
Tabelle 7: PV-Fläche mit Wirkungsgrad $\eta=30\%$	69
Tabelle 8: PV-Fläche mit Wirkungsgrad $\eta=30\%$	70
Tabelle 9: Energiekennzahlen und GWP (WDVS und MAFA (statische Betrachtung)).....	74
Tabelle 10: Energiekennzahlen und GWP der Energieträger – Nutzungsphase 1 (WDVS und MAFA (dynamische Betrachtung))	76
Tabelle 11: Energiekennzahlen und GWP der Energieträger – Nutzungsphase 2 (WDVS und MAFA (dynamische Betrachtung))	79
Tabelle 12: Ergebnisse Ökobilanz.....	82

11 Formelverzeichnis

(1): IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013.....	51
(2): IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013.....	51
(3): IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013.....	52
(4): IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013.....	52
(5): IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013.....	53
(6): IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013.....	53
(7): IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013.....	53
(8): IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013.....	54
(9): IBO, OI3-Indikatoren, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, 2013.....	54
(10): IBO, EI KON-Entsorgungsindikator für Bauteile, EI10-Entsorgungsindikator für Gebäude, 2018.....	55
(11): IBO, EI KON-Entsorgungsindikator für Bauteile, EI10-Entsorgungsindikator für Gebäude, 2018.....	55
(12): IBO, EI KON-Entsorgungsindikator für Bauteile, EI10-Entsorgungsindikator für Gebäude, 2018.....	55

(13): IBO, EI KON-Entsorgungsindikator für Bauteile, EI10-Entsorgungsindikator für Gebäude, 2018.....	55
--	----