

Lehrstuhl für Wassergüte- und Abfallwirtschaft  
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
Technische Universität München

**Ökologische Bilanzierung von Gebäuden in frühen Planungsphasen  
auf Basis der Produktmodellierung**

Christian Ekkerlein

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr. h.c. Peter A. Wilderer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich
2. Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Ernst Rank

Die Dissertation wurde am 24.11.2003 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
am 30.04.2004 angenommen.

---

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit zur ökologischen Bilanzierung von Gebäuden in frühen Planungsphasen entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Technischen Universität München. Die wesentlichen Grundlagen auf denen diese Arbeit aufbaut, wurden im Rahmen des BayFORREST Forschungsprojektes „Internet basierte Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken“ in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Bauinformatik geschaffen. Die finanzielle Förderung des Vorhabens erfolgte durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen.

Mein besonderer Dank gilt an erster Stelle meinem Doktorvater Herrn Professor Martin Faulstich. Stets stand er mir durch seine wertvollen Ratschläge und Anregungen auf dem gesamten Entwicklungsweg der Arbeit zur Seite. Gleichzeitig schaffte er vor allem in der Schlussphase die notwendigen Freiräume, um diese Arbeit unbeeinflusst vom Tagesgeschäft beenden zu können. Gleichmaßen danke ich Herrn Professor Ernst Rank für die Übernahme des Korreferates.

Meinem Projektpartner Herrn Frank Neuberg vom Lehrstuhl für Bauinformatik möchte ich besonders herzlich danken. Die Zusammenarbeit mit ihm ging weit über eine kollegiale Projektpartnerschaft hinaus. Auch Herrn Martin Egger danke ich für den unermüdlichen Einsatz bei der Softwaretechnischen Umsetzung.

Weiterhin möchte ich Herrn Professor Peter Wilderer danken, der mir die Mitarbeit in seinem Lehrstuhl ermöglicht hat und ich damit in einem Team aus internationalen Wissenschaftlern verschiedenste Aspekte der Wassergüte- und Abfallwirtschaft kennen lernen durfte. Auch allen Kolleginnen und Kollegen der "WGA" gebührt daher mein Dank für die schöne Zeit am Institut. Vor allem Manuela Wimmer, Gabrielle Weber-Blaschke, Rüdiger Dalhoff, Konstantinos Athanasiadis und Thilo Kötze möchte ich hier besonders hervorheben.

Meiner Familie danke ich dafür, dass sie mich in unterschiedlichster Weise unterstützt und somit zum Gelingen meiner Dissertation beigetragen hat.

---

---

## Kurzfassung

Der Bausektor hat in Deutschland einen großen Anteil am gesamten Endenergieverbrauch, den Abfallströmen und Schadstoffemissionen. Daran ist zu einem Großteil der Bau und Betrieb von Gebäuden beteiligt. Aufgrund der daraus resultierenden Umweltprobleme ist es notwendig, das hier vorhandene Potential zur Reduktion dieser Belastungen zu erschließen. Dazu werden von der Politik seit längerem verschiedene Maßnahmen ergriffen, zuletzt durch Einführung der Energie-Einsparverordnung EnEV. Diese zielt auf eine verstärkte Reduktion des Primärenergieverbrauchs von Gebäuden während der Nutzungsphase und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Verbrauch fossiler Energieträger. Dies bedeutet, dass Gebäude derzeit bezüglich eines einzigen Parameters während eines einzigen Lebensabschnittes hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen eingestuft werden.

Dabei existieren andere Methoden, die eine ganzheitliche ökologische Bewertung eines Gebäudes über den gesamten Lebensweg ermöglichen. Angesichts der Energiekrise und der wachsenden Umweltprobleme durch Abfallmengen und Schademissionen, wurden in den 70er Jahren erste Ansätze zur Abschätzung der Umweltauswirkungen von Prozessen und Produkten entwickelt. Aus diesen Fall-spezifischen Untersuchungen entstand das Konzept der Ökobilanz, welches bezüglich der grundlegenden Schritte durch Einführung der ISO-Normenreihe 14040 ff. vereinheitlicht wurde. Eine Ökobilanz ermöglicht eine ökologische Optimierung und Einordnung eines Produktes oder Prozesses im Vergleich zu möglichen Alternativen über den gesamten Lebensweg. Die umfassende Betrachtungsweise verhindert dabei, dass nur Teilaspekte berücksichtigt werden und es damit zur Verlagerung von Umweltproblemen in andere Wirkungsbereiche oder Lebenszyklusabschnitte kommt.

Der Aufwand zur ökologischen Bilanzierung von komplexen Produkten ist jedoch sehr hoch. Daher wurden in den letzten Jahren verstärkt Computerprogramme entwickelt, um einzelne Schritte einer Ökobilanz zu automatisieren. Auch für Bauwerke existieren erste Anwendungen. Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie nicht in den normalen Planungsablauf für Gebäude integriert sind. Damit entstehen für den Planer beträchtliche Mehraufwendungen. Vor allem in der frühen Planungsphase in der sich der Gebäudeentwurf häufig ändert aber trotzdem die wichtigsten Entscheidungen über das ökologische Verhalten des Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus getroffen werden. Dieser Mehraufwand wird nach der derzeitigen Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) aber nicht vergütet. Infolgedessen beschränkt sich die ökologische Bilanzierung von Gebäuden nach wie vor auf wenige Einzelfälle in der Praxis sowie die Forschung.

In dieser Arbeit wird ein Konzept entwickelt, wie der Aufwand für eine ökologische Bilanzierung eines Gebäudeentwurfes in der frühen Planungsphase durch Integration in den normalen Planungsablauf reduziert werden kann. Die Umsetzung erfolgt dabei

---

---

auf Grundlage einer CAD-Anwendung welche die Erstellung dreidimensionaler Produktmodelle unterstützt. Die grundlegende Idee ist, dass ein Planer aus einer zentralen Datenbank die ökologischen Daten von Baustoffen, Bauteilen und der Anlagentechnik in seine CAD Anwendung importieren kann und somit das bisher rein geometrische Modell seines Gebäudeentwurfes zu einem Produktmodell erweitert. Anschließend unterstützen ihn integrierte Analysemodule bei der Durchführung ökologischer Bilanzen um Entwurfsvarianten zu vergleichen und den Gebäudeentwurf aus ökologischer Sicht zu optimieren.

Dazu wird zunächst eine Datenbank mit ökologischen Kennwerten entwickelt. Der Dateninput stammt dabei aus Berechnungen mit dem Globalen Emissionsmodell Integrierter Systeme (GEMIS), erweitert um bauphysikalische Informationen. Als Plattform für die Erstellung des Produktmodells selbst wird exemplarisch die CAD-Anwendung Architectural Desktop ADT 3.3 von Autodesk verwendet. Für eine Analyse des Produktmodells werden zwei integrierte Softwaremodule entwickelt. Eines für Berechnungen nach EnEV und eines zur Automatisierung der arbeitsintensiven Schritte im Zuge einer Ökobilanzstudie (LCA). Durch das LCA-Modul kann automatisch eine Sachbilanz des gesamten Gebäudes basierend auf den im Produktmodell hinterlegten Daten erstellt werden. Zusätzlich wird eine Wirkungsabschätzung durchgeführt. Dazu werden die Bewertungsmethoden CML (Centrum voor Milieukunde Leiden), Ecoindicator 95 und UBP (Umweltbelastungspunkte) verwendet, wobei diese entsprechend den verfügbaren Sachbilanzparametern und der aktuellen Belastungssituation des Bezugsraumes Deutschland angepasst werden.

Abschließend wird anhand eines Beispielgebäudes ein Variantenstudium durchgeführt. Zum einen werden unterschiedliche Sanierungsmaßnahmen für einen Altbau untersucht und auf Basis der Ergebnisse nach Energie-Einsparverordnung und der ökologischen Bilanzierung miteinander verglichen. Zum anderen erfolgt eine ökologische Bilanzierung mehrerer Neubauvarianten, welche sich hinsichtlich des Dämmstandards, der Baustoffwahl sowie der Anlagentechnik unterscheiden. Es wird dargestellt, wie durch eine integrierte Bilanzierungssoftware unterschiedliche Varianten bezüglich ihrer ökologischen Auswirkungen analysiert werden können und damit dem Planer neben ökonomischen Gesichtspunkten eine zusätzliche Entscheidungshilfe bieten. Weiterhin kann gezeigt werden, dass eine Einstufung eines Gebäudes bezüglich der Umweltverträglichkeit ausschließlich auf Grundlage des Primärenergiebedarfes der Anlagentechnik nach EnEV nicht zielführend ist. Einerseits ist es notwendig mehrere Parameter zu berücksichtigen. Andererseits muss der Einfluss der Baustoffe selbst in die Betrachtung miteinbezogen werden, vor allem bei hochgedämmten Konstruktionen.

---

---

## **Abstract**

The building sector has a large portion of the entire final energy consumption, waste streams and pollutant emissions in Germany. Thereby construction and operation of buildings is involved to a majority. Due to the environmental problems which are resulting from this it is necessary to open the existing potential for the reduction of these loads. Because of this different measures have been seized by the policy, last by introduction of the energy saving regulation EnEV. The EnEV aims at an intensified reduction of the primary energy consumption of buildings during the utilization phase and thus of the CO<sub>2</sub> emissions from the consumption of fossil sources of energy. This means that buildings are classified at present concerning only one parameter during only one period of their lifecycle regarding their impact on the environment.

At the same there exist other methods to perform a comprehensive ecological evaluation of a building over the entire life cycle. Because of the energy crisis and the increasing environmental problems caused by waste and noxious emissions in the 70's, first methods were developed to estimate the environmental impact of processes and products. From these drop specific investigations the concept of Life Cycle Assessment (LCA) was developed which was finally standardized concerning the fundamental steps by introduction of the ISO-Standard series 14040. A LCA study enables an ecological classification and optimisation of a product or a process compared with possible alternatives over the entire life cycle. Thereby the comprehensive viewpoint prevents that only partial aspects are considered which could lead to a displacement of environmental problems into other impact categories or life cycle periods.

However, the expenditure for performing a LCA-Study on complex products is very high. Because of this computer software has been developed in the last years to automate single steps of a LCA-Study. Also first specialized applications for buildings exist. The disadvantage of these solutions is, that they are not integrated into the normal planning process. Thus additional expenditures for the planner develop. Especially in the early planning phase where the model is often changed but the most important decisions are made concerning the environmental impact of a building over the entire life cycle. This additional expenditure is not recompensed by the present honorarium code for architects and engineers (HOAI) though. Consequently the LCA of buildings is still limited to the research and a few individual cases in practice.

This work presents an approach to decrease the expenditure of LCA studies on buildings in the early planning phase by integration of LCA into the normal planning process. This is done on basis of computer aided design (CAD) software supporting the generation of three dimensional product models. The basic idea of this work is, that planners can import ecological data of building materials, complex construction

---

---

elements and heating systems from a central database into their CAD software and extend their geometric model to a product model. Integrated software modules support them afterwards to perform LCA studies in order to compare variants and optimise the building design.

Therefore at first a database with ecological data is developed. The data input originate from computations with the global emission model of integrated systems (GEMIS) supplemented with data from the building design aspect. As a platform for creation of the product model itself the CAD planning software Architectural Desktop ADT 3.3 from Autodesk is exemplarily chosen. At second the analyzing software modules are set up. One for calculations based on the EnEV, the other for automating the labour-intensive steps of a LCA study. The LCA module performs automatically the inventory analysis based on the dataset of the product model. Additionally an impact assessment is carried out to estimate the environmental impact of the modelled building. For this the impact assessment methods CML, Ecoindicator 95 and Ecotoxicity are chosen and adjusted to the available inventory data and the current load situation for the reference area Germany.

Finally a exemplary study of alternative designs of a building is accomplished. First different measures for refurbishment of a old building are examined and compared on basis of the EnEV and LCA. At second several variants of a new building are investigated, regarding insulation standard, choice of building material and heating system. It is presented how additional ecological information is offered to the planner by the integrated analysis modules apart from economic criteria. Additionally it can be shown, that it is insufficient to classify the environmental characteristic of a building exclusively by the primary energy consumption of the heating system like the EnEV does. On the one hand it is necessary to consider a dataset of several environmental parameters. On the other hand the influence of the building materials has to be taken into account, especially in high insulated constructions.

---

---

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1	Stoffströme im Baubereich .....	1
1.2	Ökologische Bilanzierung von Gebäuden.....	3
1.3	Zielsetzung dieser Arbeit .....	5
1.4	Aufbau der Arbeit.....	6
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN DER ÖKOBILANZIERUNG.....</b>	<b>7</b>
2.1	Historische Entwicklung.....	7
2.2	Methodik der Ökobilanzierung nach ISO-Norm .....	8
2.2.1	Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen .....	9
2.2.2	Sachbilanz .....	10
2.2.3	Wirkungsabschätzung .....	11
2.2.4	Auswertung.....	13
2.3	Wirkungskategorien .....	14
2.3.1	Treibhauspotential GWP.....	15
2.3.2	Ozonabbaupotential ODP .....	17
2.3.3	Photooxidantienbildungspotential POCP .....	19
2.3.4	Eutrophierungspotential NP .....	20
2.3.5	Versauerungspotential AP .....	20
2.4	Problematik der Wirkungsabschätzung und Bewertung .....	21
2.4.1	Kumulierter Energieaufwand KEA .....	23
2.4.2	ABC-Analyse .....	24
2.4.3	Methode der ökologischen Knappheit - UBP .....	25
2.4.4	CML-Methode .....	26
2.4.5	Ecoindicator 95 Methode .....	26
<b>3</b>	<b>ÖKOBILANZIERUNG UND DATENVERARBEITUNG IM BAUBEREICH.....</b>	<b>27</b>
3.1	Ökoinventare von Baustoffen .....	28
3.1.1	ECOINVENT 2000.....	28
3.1.2	GEMIS .....	29
3.1.3	ECOBIS 2000 .....	30
3.1.4	GaBiE .....	31

---

---

3.2	Ökobilanzierungssoftware im Baubereich.....	32
3.2.1	EcoPro.....	32
3.2.2	SimaPro.....	33
3.2.3	GaBi.....	33
3.2.4	LEGOE.....	34
3.2.5	OPTIMA.....	34
3.3	Energetische Bewertung nach Energie-Einsparverordnung.....	34
3.4	Produktmodellierung.....	35
3.4.1	Das Produktmodell der IAI.....	37
3.4.2	Produktmodell-basierte Planung.....	38
<b>4</b>	<b>ENTWICKLUNG DER DATENBASIS.....</b>	<b>40</b>
4.1	Ökologische und bauphysikalische Datengrundlage.....	40
4.2	Berechnungen in GEMIS – Randbedingungen.....	41
4.3	Modellierung von Bauteilen und Anlagen.....	42
4.3.1	Bodenplatten.....	43
4.3.2	Geschossdecken.....	43
4.3.3	Dächer.....	44
4.3.4	Fenster.....	46
4.3.5	Mauersteine.....	47
4.3.6	Anlagen zur Raumwärmegewinnung.....	48
<b>5</b>	<b>AUSWAHL UND ANPASSUNG DER BILANZIERUNGSMETHODEN.....</b>	<b>52</b>
5.1	Auswahl der Methoden und Sachbilanzparameter.....	52
5.1.1	Bewertungsmethoden.....	52
5.1.2	Sachbilanzgrößen und Bezugsraum.....	54
5.2	Anpassung der Bewertungsmethoden.....	56
5.2.1	CML-Methode.....	56
5.2.2	Methode der ökologischen Knappheit.....	60
5.2.3	Ecoindicator 95 Methode.....	66
<b>6</b>	<b>KOPPLUNG VON ÖKOBILANZ UND PRODUKTMODELL.....</b>	<b>70</b>
6.1	Grundkonzeption und Wahl der Hilfsmittel.....	70
6.1.1	Auswahl des Modellierungswerkzeugs.....	71
6.1.2	Webserver und Datenbanksystem.....	75
6.1.3	Erstellung der Internetdatenbank.....	76

---

---

6.2	Entwickelte Softwaremodule.....	77
6.2.1	Definition des Produktmodells via Internet.....	77
6.2.2	Analyse des Produktmodells nach der EnEV .....	78
6.2.3	Analyseapplikation „LCA-Chart“ .....	82
<b>7</b>	<b>BEISPIELBERECHNUNGEN .....</b>	<b>88</b>
7.1	Allgemeine Definition des Beispielgebäudes .....	88
7.2	Altbausanierung.....	90
7.2.1	Gebäudebeschreibung .....	90
7.2.2	Sanierungsmaßnahmen .....	90
7.2.3	Berechnungsmethodik .....	91
7.2.4	Ergebnisse und Vergleich.....	92
7.3	Neubau .....	95
7.3.1	Berechnungsmethodik und Variantenüberblick.....	95
7.3.2	Variantenbeschreibung.....	96
7.3.3	Ergebnisse und Vergleich.....	99
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>107</b>
8.1	Zusammenfassung .....	107
8.2	Ausblick .....	109
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>111</b>
<b>ANHANG</b>		

---

---

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Stoffströme im Baubereich

Bauwerke haben, verglichen mit den meisten anderen Produkten, eine sehr lange Lebensdauer. Daraus resultiert, dass der Aufwand zur Nutzung und Erhaltung des Produktes „Bauwerk“ in der Regel sehr viel höher ist als für die Herstellung. Auch die zur Entsorgung anfallenden Bauabfälle stellen mengenmäßig enorme Stoffströme dar. Die folgenden Daten verdeutlichen dies und zeigen auf, wie groß der Anteil des Baubereichs und der Haushalte in den einzelnen Bereichen Abfallmengen, Energieverbrauch, Schadstoffemissionen und Verbrauch von Rohstoffen in Deutschland ist:

- (1) Jährlich fallen etwa 231 Mio. Tonnen Bauabfälle an. Dies stellt einen Anteil am gesamten Abfallaufkommen von ungefähr 60 % dar (vgl. Abbildung 1). Die Bauabfälle setzen sich dabei aus etwa zwei Drittel Bodenaushub und einem Drittel Bauschutt zusammen. [UBA, 2002]
  - (2) Die Entnahme von mineralischen Rohstoffen für den Bereich Hochbau und Ausbau betrug im Jahr 1991 etwa 350 Mio. Tonnen. Dies entspricht ungefähr 20 % des Verbrauchs an mineralischen Rohstoffen durch die deutsche Volkswirtschaft. Dieser Anteil verdoppelt sich auf 700 Mio. Tonnen, wenn sowohl Hoch- als auch Tiefbauarbeiten berücksichtigt werden. [Enquete, 1999]
  - (3) Täglich werden in Deutschland rund 130 Hektar in Siedlungs- und Verkehrsfläche umgewidmet. Mindestens die Hälfte davon ist überbaut oder versiegelt. [UBA, 2002]
  - (4) Etwa 20.000 bis 100.000 Abbrüche und Umwidmungen stehen knapp 600.000 Wohnungsneubauten gegenüber. [Friege, 1997]
  - (5) Im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher werden derzeit pro Jahr etwa 171 Megatonnen Emissionen an Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) verursacht. [UBA, 2000b]
  - (6) Im Jahr 2000 betrug der Primärenergieverbrauch ca. 14.200 PJ. Die erneuerbaren Energieträger (Wasser, Wind, Biomasse, Sonne) leisten dabei mit etwas über 2 % einen nur sehr kleinen Beitrag. [UBA 2002]
  - (7) Ein Drittel des gesamten Endenergiebedarfs wird für Raumwärme, Raumluft-Konditionierung und Warmwasser im Bereich der Haushalte aufgewandt [UBA, 2002] (Abbildung 2).
-

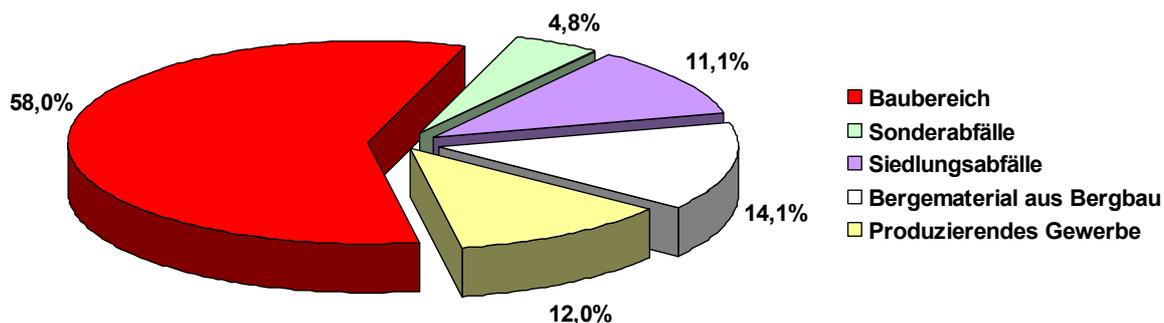


Abbildung 1: Massenanteile am Gesamtabfallaufkommen in Deutschland 1998

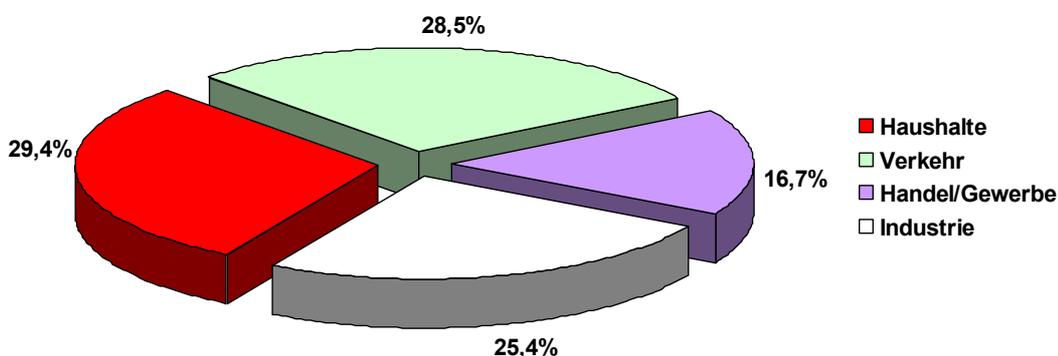


Abbildung 2: Anteile am Gesamt-Endenergieverbrauch in Deutschland 1998

Aufgrund der Verknappung bestimmter Ressourcen, vor allem fossiler Energieträger, und der auftretenden Umweltprobleme durch Emission von Schadstoffen werden bereits seit längerer Zeit verschiedene Maßnahmen diskutiert und ergriffen, um den Verbrauch an Ressourcen einzuschränken und den Ausstoß von Schademissionen zu minimieren. Da der Baubereich (Bauaktivitäten und Betrieb von Bauwerken) an den verschiedenen Problemfeldern einen großen Anteil aufweist, sind vor allem hier diesbezügliche Potentiale vorhanden und zu erschließen. Einen ersten Schritt in diese Richtung stellt die Einführung der Energie-Einsparverordnung EnEV dar, mit der eine signifikante Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebäudebetrieb erreicht werden soll.

In Abbildung 3 ist die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland über die letzte Dekade anteilig nach Sektoren dargestellt [UBA, 2002]. Weiterhin wird das Reduktionsziel bis zum Jahr 2005 angegeben zu dem sich Deutschland über die Anforderungen des Kyoto-Protokolls hinaus verpflichtet hat. Wie man aus der Abbildung ersehen kann, liegt der Anteil der Haushalte an den CO<sub>2</sub>-Emissionen über die Jahre relativ konstant bei etwa 20 %. Dies entspricht für das Jahr 1999 in etwa der Menge von 171 Megatonnen CO<sub>2</sub>. Durch Einführung der Energie-Einsparverordnung soll eine Reduktion von etwa 4 Megatonnen CO<sub>2</sub> bis zum Jahr 2005 erreicht werden. Von dieser Maßnahme sind jedoch überwiegend Neubauten

betroffen. Um die im Gebäudebestand vorhandenen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale zu erschließen, werden als flankierende Maßnahme zusätzlich Fördermittel zur Energieeinsparung im Gebäudebestand bereitgestellt. Durch den daraus entstehenden Anstieg von Investitionen in einen zusätzlichen Wärmeschutz sowie eine neuere Anlagentechnik, soll auch hier eine Reduktion in Höhe von 5 bis 7 Megatonnen CO<sub>2</sub> bis zum Jahr 2005 erreicht werden. [BMU, 2000]

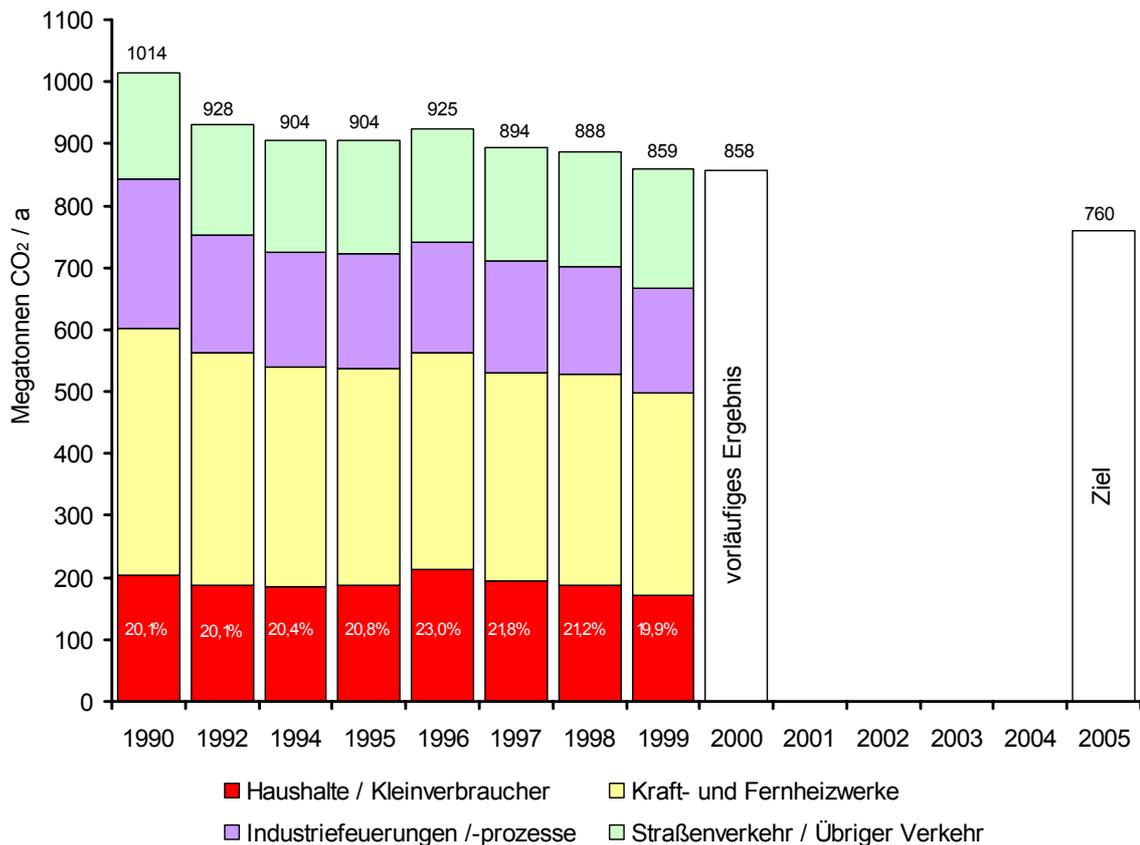


Abbildung 3: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland

## 1.2 Ökologische Bilanzierung von Gebäuden

Aufgrund der Zusammensetzung aus vielen unterschiedlichen Materialien und der Aufwendungen für den Betrieb haben Gebäude sowohl bei der Herstellung als auch während ihrer Nutzung und Entsorgung Auswirkungen auf mehrere Bereiche der Umwelt. Daher reicht es nicht aus, ein solch komplexes Produkt auf Basis eines einzelnen Parameters wie zum Beispiel CO<sub>2</sub> hinsichtlich seiner gesamten Umweltauswirkungen zu optimieren. Vielmehr müssen dazu die verschiedenen Umwelteinflüsse miteinbezogen und berücksichtigt werden. Zusätzlich ist eine integrale Betrachtung über den Lebensweg des Produktes Gebäude notwendig, um die Wirkungen auf die Umwelt über alle Lebenszyklusabschnitte zu erfassen. Diese Anforderungen werden von dem Verfahren der Ökobilanzierung erfüllt, welches damit für eine ganzheitliche ökologische Optimierung eines Gebäudes geeignet ist.

Das Prinzip der ökologischen Bilanzierung wurde im Laufe der letzten 30 Jahre von mehreren Einzelpersonen und Institutionen entwickelt. Daraus entstanden unterschiedliche Methoden die sich hinsichtlich der verwendeten Datengrundlage, der berücksichtigten Einzelparameter und der Bewertungsmethodik stark unterscheiden. Dies bedeutet, dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse dieser unterschiedlichen Ansätze nur sehr eingeschränkt möglich ist. Um zumindest die generellen Schritte zu vereinheitlichen, wurde daher in den Jahren 1997 bis 2000 das methodische Vorgehen zur Erstellung einer Ökobilanz durch die Einführung der Normenreihe EN ISO 14040 ff. erstmals grundsätzlich geregelt. Diese gibt dabei das Rahmengerüst für eine ökologische Bilanzierung vor, lässt jedoch in den einzelnen Teilschritten einen Freiraum für die Anwendung der historisch gewachsenen Ansätze. Dabei haben sich in den letzten Jahren einzelne Methoden international durchgesetzt, während andere nicht mehr weiterverfolgt werden. Nach [ETH, 1998] existiert jedoch keine einzelne Methode die alle Anforderungen voll erfüllt. Vielmehr wird die Pluralität der Methoden als äußerst wichtig erachtet. Das bedeutet, dass im Zuge einer ökologischen Optimierung eines Produktes die Ergebnisse aus der Anwendung mehrerer Bewertungsmethoden berücksichtigt werden sollten.

Des Weiteren ist der Aufwand zur ökologischen Bilanzierung von komplexen Produkten wie einem Gebäude sehr hoch. In den letzten Jahren wurden daher verstärkt Softwareanwendungen entwickelt die eine ökologische Bilanzierung von Gebäuden unterstützen. Eine Bestandsaufnahme dieser Anwendungen zeigt jedoch, dass für eine Lebenszyklusbezogene Analyse eines Gebäudes meist mehrere Softwareanwendungen zu verwenden sind, die jeweils nur einzelne Teilbereiche abdecken (zum Beispiel rein energetische Berechnungen zum Heizwärmebedarf, Bilanzierung der Umweltauswirkungen aus der Baustoffproduktion). Aufgrund einer fehlenden Verknüpfung der Anwendungen untereinander ist somit für jedes neue Projekt sehr viel Handarbeit zur Eingabe der für eine ökologische Bilanzierung notwendigen Daten nötig. Gleichzeitig basieren die in diesen Anwendungen implementierten Wirkungs- und Bewertungsansätze auf Datensätzen, die aus der Zeit der Entwicklung der Bewertungsmethoden stammen. Diese sind jedoch in der Regel nicht mehr aktuell und können damit zu einer Fehleinschätzung der ökologischen Gesamtwirkung eines Gebäudes führen.

Ein weiterer Schwachpunkt der bisher vorhandenen Softwarelösungen ist, dass diese nicht in den normalen Planungsablauf für ein Gebäude integriert sind. Die größten Einflussmöglichkeiten auf das ökologische Verhalten eines Gebäudes über seinen gesamten Lebenszyklus sind dabei in der frühen Planungsphase gegeben. Bereits hier werden die grundlegenden Entscheidungen über Geometrie, Materialwahl und Wärmeschutzeigenschaften getroffen, die das zukünftige Umweltverhalten des Gebäudes maßgeblich bestimmen. Zu diesem Planungszeitpunkt ändert sich der Gebäudeentwurf jedoch sehr häufig. Mit den derzeit verfügbaren Anwendungen zur ökologischen Bilanzierung von Gebäuden

---

resultiert damit für den Planer ein untragbarer Mehraufwand, da dieser nach der derzeitigen Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) nicht vergütet wird. Infolgedessen beschränkt sich die ökologische Bilanzierung von Gebäuden nach wie vor auf die Forschung sowie wenige Einzelfälle in der Praxis.

### 1.3 Zielsetzung dieser Arbeit

Primäres Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Simulationswerkzeuges, das die ökologische Bilanzierung in den normalen Planungsablauf integriert. Auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit soll es damit den Planern von Bauwerken ermöglicht werden, bereits in frühen Planungsphasen eine einfache und schnelle Analyse eines Gebäudeentwurfs hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus durchzuführen. Da heutzutage bei der Planung von Gebäuden bereits überwiegend Computersoftware verwendet wird, vor allem Anwendungen zum Computer Aided Design (CAD), bietet sich eine Integration der Ökobilanzierung auf Grundlage der Produktmodellierung an. Dies bedeutet, dass das Geometriemodell durch einen einfachen Datenimport von ökologischen und bauphysikalischen Informationen der Baustoffe aus einer zentralen Datenbank ergänzt wird und damit ein Produktmodell des Gebäudes entsteht. Dieses dient anschließend als Grundlage für eine ökologische Bilanzierung durch integrierte Analysewerkzeuge.

Wie bereits angesprochen, ändern sich die Entwürfe in der frühen Planungsphase erfahrungsgemäß meist mehrmals. Daher müssen die ökologischen Simulationsrechnungen weitestgehend automatisiert ablaufen, um den Aufwand zur Durchführung und damit der ökologischen Optimierungen gering zu halten. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sollen dabei eine Entscheidungshilfe zur ganzheitlichen Optimierung des jeweiligen Gebäudeentwurfes geben und keine allgemeingültigen Aussagen über einzelne Baustoffe und Bauteile liefern. Im Einzelnen ergibt sich damit für diese Arbeit die folgende Zielsetzung:

- Entwicklung einer Datenbasis mit ökologischen und bauphysikalischen Informationen zu Baustoffen und Bauteilen.
  - Auswahl von geeigneten ökologischen Bewertungsmethoden für eine Integration in die Analysemodule.
  - Anpassung der gewählten Methoden auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis.
  - Integration der Methoden in Standard-Planungssoftware auf Basis der Produktmodellierung.
  - Exemplarisches Variantenstudium anhand eines Beispielgebäudes und Vergleich der ökologischen Bilanz mit der energetischen Bewertung nach Energie-Einsparverordnung (EnEV).
-

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit werden die Grundlagen der ökologischen Bilanzierung vorgestellt. Dazu wird zunächst ein Überblick über die historische Entwicklung der Ökobilanzierung gegeben und die Anforderungen der ISO-Normenreihe 14040 ff. vorgestellt. Weiterhin wird der Stand der Wirkungsabschätzung und der Bewertungsansätze dargelegt.

Die Ansätze der elektronischen Datenverarbeitung im Bereich der Ökobilanzierung und Produktmodellierung im Gebäudesektor sind im Kapitel drei dargestellt. Dazu werden die vorhandenen Ökoinventare und Bilanzierungsanwendungen vorgestellt und einer kritischen Betrachtung hinsichtlich einer integrierten Bilanzierung unterzogen. Weiterhin wird das Konzept der Produktmodellierung erläutert.

Im vierten Kapitel wird die Entwicklung des zentralen Ökoinventars beschrieben. Dies beinhaltet die Auswahl der Datenquelle und die Beschreibung der Randbedingungen zur Berechnung der einzelnen Datensätze. Ebenso wird hier die Modellierung der Bauteile und der Anlagentechnik beschrieben.

In Kapitel fünf erfolgt die Auswahl der Sachbilanzparameter die in die zentrale Datenbank aufgenommen werden und damit im Zuge der Wirkungsabschätzung zur Verfügung stehen. Auch die Auswahl und Anpassung der Bewertungsmethoden die in die Analysemodule implementiert werden, wird an dieser Stelle dargestellt.

Die Kopplung von Ökobilanzierung und Produktmodellierung wird im sechsten Kapitel beschrieben. Zum einen wird die Grundkonzeption der Softwaretechnischen Umsetzung vorgestellt, inklusive der Auswahl des Modellierungswerkzeuges und der Umsetzung des Datenbanksystems für das zentrale Ökoinventar. Zum anderen wird der Datenimport in das Produktmodell und die anschließenden Analyseoptionen durch die integrierten Softwaremodule dargelegt.

Im siebten Kapitel werden anhand eines Beispielgebäudes mehrere Varianten zur Altbausanierung und Neubauplanung vorgestellt und eine ökologische Bilanzierung mit den entwickelten Softwaremodulen durchgeführt. Dies beinhaltet auch einen Vergleich mit den Ergebnissen der rein energetischen Bewertung nach EnEV.

Im achten Kapitel werden schließlich die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf in Zukunft notwendige Forschungsarbeiten gegeben.

---

## 2 GRUNDLAGEN DER ÖKOBILANZIERUNG

### 2.1 Historische Entwicklung

Aufgrund der Energiekrisen in den 70er Jahren entstanden die Vorläufer der heute bekannten Ökobilanzen. Die ersten grundlegenden und methodischen Arbeiten leistete Schäfer mit seinen Untersuchungen über energetische Aufwendungen [Schäfer, 1974]. In der Schweiz [Müller-Wenk, 1974] und in den USA [Hunt, 1974] wurde im Jahr 1974 die Diskussion von der Quellenverknappung (Ressourcen) auf die Verknappung der Senken (Deponieraum) erweitert, wobei bei diesen Arbeiten der Schwerpunkt noch auf energetischen Aspekten lag. Im Jahr 1978 wurde im Rahmen einer Studie der Eidgenössischen Materialprüfanstalt St. Gallen (EMPA) erstmals der Begriff Ökobilanz verwendet. In dieser Untersuchung zu Verpackungsmaterialien bezog man erstmals anfallende Schadstoffe und Reststoffe neben dem Energie- und Rohstoffverbrauch mit ein [Fink, 1992]. Durch eine Erweiterung der betrachteten Systemgrenzen auf Nachnutzungsmaßnahmen berücksichtigte Boustead bei seinen Bilanzen zu Energiesystemen als erster die Idee des Recycling [Boustead, 1979]. Nach diesen ersten fallspezifischen Arbeiten begann die "Society of Environmental Toxicology and Chemistry" (SETAC), die Vorgehensweise zur Ökobilanzierung durch Einführung von Standardisierungsmodellen zu vereinheitlichen [SETAC, 1991]. Aufgrund der verschiedenen Aktivitäten in unterschiedlichen Bereichen zur Methodik und Standardisierung von Ökobilanzen gründete schließlich die Internationale Organisation für Standardisierung (ISO) eine Arbeitsgruppe, um einen Standard auf dem Gebiet des Umweltmanagements zu erarbeiten (ISO Technical Comitee 207 „Environmental Management“). Die konstituierende Sitzung dieses Komitees fand im Jahr 1993 statt. Vier Jahre später wurde die Norm ISO 14040 veröffentlicht in der Prinzipien und allgemeine Anforderungen an eine Ökobilanz beschrieben werden.

*Tabelle 1: Meilensteine in der Entwicklung ökologischer Bilanzen*

Jahr	Autor / Organisation	Titel / Begriff
1974	Schäfer	Energetische Aufwendungen
	Müller-Wenk	Ökologische Buchhaltung
	Hunt	Umweltprofile von Getränkeverpackungen
1978	EMPA	Begriff Ökobilanz wird erstmals verwendet
1981	Boustead	Recycling wird erstmals berücksichtigt
1991	SETAC	Standardisierungsmodell
1993	ISO	Technisches Komitee "Umweltmanagement"
1997	ISO 14040	Regelwerk Ökobilanz

## 2.2 Methodik der Ökobilanzierung nach ISO-Norm

Die Prinzipien und allgemeinen Anforderungen an Ökobilanzen werden seit dem Jahr 1997 mit der Europäischen Norm EN ISO 14040 festgelegt. Zusätzliche Einzelheiten zu den Methoden werden in den ergänzenden Normen EN ISO 14041, 14042 und 14043 bereitgestellt. Diese behandeln die einzelnen Phasen einer Ökobilanzierung ausführlich. Nach dieser Normenreihe umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen [EN ISO 14041]
- Sachbilanz [EN ISO 14041]
- Wirkungsabschätzung [EN ISO 14042]
- Auswertung [EN ISO 14043]

Die einzelnen Schritte einer Ökobilanz stehen dabei nicht für sich alleine, sondern es findet eine gegenseitige Beeinflussung statt. In der folgenden Abbildung ist dieses grundsätzliche Zusammenwirken der einzelnen Bausteine dargestellt.

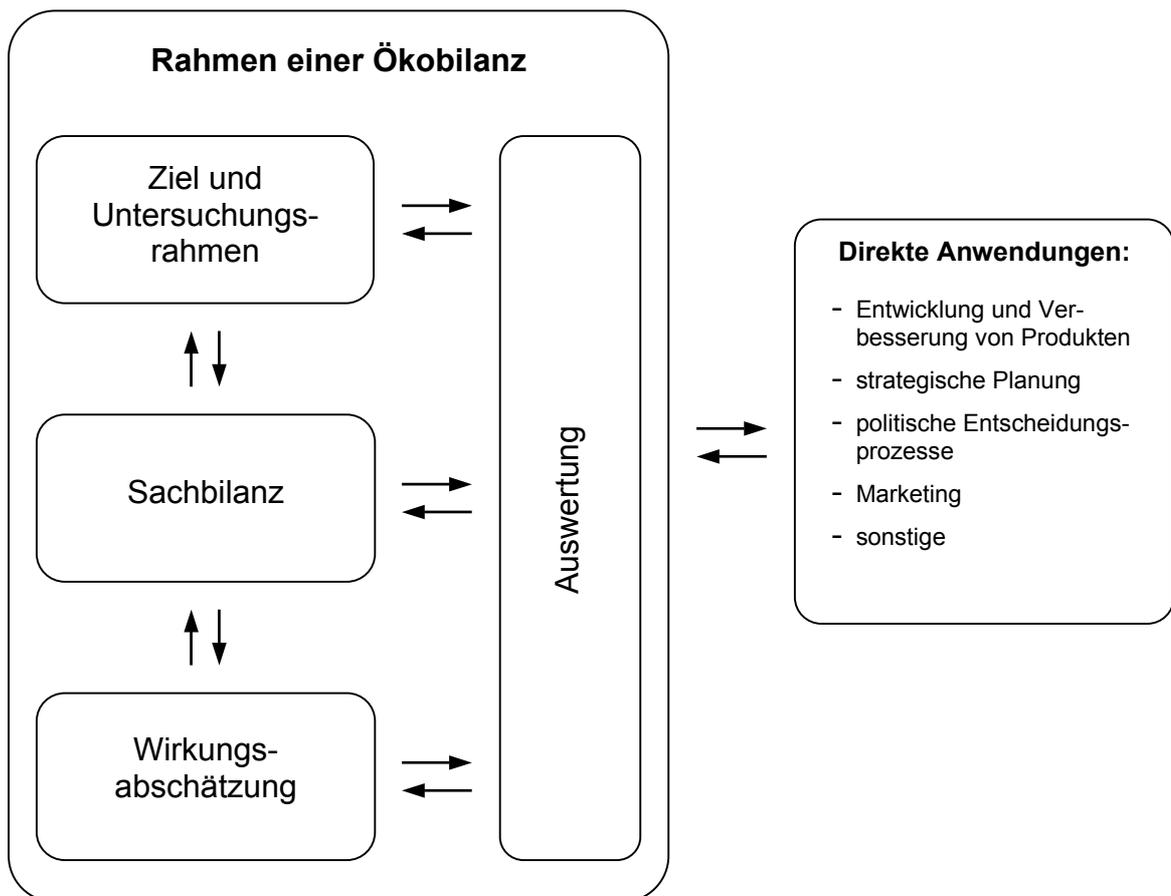


Abbildung 4: Bestandteile einer Ökobilanz nach EN ISO 14040

### 2.2.1 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Als erster Schritt muss im Rahmen einer Ökobilanz-Studie nach EN ISO 14040 das Ziel und der Untersuchungsrahmen eindeutig festgelegt und auf die beabsichtigte Anwendung abgestimmt werden. Insbesondere sind dabei nach [Frischknecht, 2001] hinsichtlich der Zieldefinition die folgenden Fragestellungen zu klären:

- Firmeninterner oder öffentlicher Gebrauch: Die Art der benötigten Daten kann sich stark unterscheiden. Eine Firma will beispielsweise die Umweltbelastung durch Ihre Produkte reduzieren und benötigt daher spezifische umweltrelevante Informationen von Lieferanten. Eine Behörde möchte aus den Ergebnissen einer Ökobilanz verallgemeinerbare Folgerungen ziehen und benötigt daher eher Durchschnittswerte.
- Entscheidungsunterstützende Information oder Dokumentation: Einsatz der Ökobilanz zur umweltlichen Optimierung von Produktion und Prozessen oder lediglich Dokumentation der Umweltbelastungen.
- Geographischer Geltungsbereich: Ökobilanzen können für eine Region, ein bestimmtes Land oder hinsichtlich einer globalen Perspektive erstellt werden.
- Untersuchungsgegenstand: Das Ziel der Studie muss sorgfältig und ausführlich beschrieben werden, um alle Beteiligten auf das gleiche Ziel hinzuführen.

Zusätzlich zu diesen Fragestellungen sind die Gründe für die Durchführung der Studie sowie die angesprochenen Zielgruppen anzugeben (An wen richten sich die Ergebnisse der Studie?). Im Rahmen der Festlegung des Untersuchungsrahmens sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen und zu beschreiben. Zum einen gilt es auf Grundlage des Ziels der Ökobilanz-Studie die Funktion des untersuchten Systems zu definieren. Dazu werden sogenannte funktionelle Einheiten verwendet, welche ein Maß für den Nutzen eines Produktsystems darstellen (vgl. Tabelle 2). Ein weiterer Aspekt ist die Festlegung der räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen. Faktoren wie die angesprochene Zielgruppe, die vorgesehene Anwendung der Studie, Verfügbarkeit von Daten oder auch begrenzte finanzielle Mittel zur Durchführung der Ökobilanz beeinflussen dabei die Wahl. Ein dritter wichtiger Punkt sind nach EN ISO 14040 die Anforderungen an die Datenqualität. Diese beziehen sich auf den zeitbezogenen (z.B. gewünschtes Alter der Daten), geographischen (z.B. regional, national oder global) und technologischen (z.B. Durchschnittswerte oder Beste verfügbare Technologie) Erfassungsbereich. Daneben sind aber auch Angaben zum Schwankungsbereich, zur Vollständigkeit, Repräsentativität, Konsistenz sowie Nachvollziehbarkeit der Daten wichtig für die Interpretierbarkeit der Ergebnisse einer Ökobilanz.

---

Tabelle 2: Beispiele an funktionellen Einheiten im Baubereich

Ziel	Funktion des Systems	Funktionelle Einheit
Optimierung eines Bauteils	Bereitstellung eines Bauteils mit definiertem U-Wert	Flächeneinheit eines Bauteils (z.B. m <sup>2</sup> Wand)
Verfahrenstechnische Optimierungen	Bereitstellung einer definierten Menge Baustoff	Masseneinheit eines Baustoffs (z.B. kg Baustahl)
Integrale Gebäudeoptimierung	Optimierung des Systemverhaltens eines Gebäudes	Gesamtgebäude

### 2.2.2 Sachbilanz

Nach der Definition des Ziels und Festlegung des Untersuchungsrahmens einer Ökobilanz-Studie ist der Schritt der Sachbilanzierung durchzuführen. Hier werden die relevanten Input- und Outputflüsse eines Produktsystems zunächst identifiziert und anschließend quantifiziert. Die zeitliche Systemgrenze sollte dabei möglichst über den gesamten Lebenszyklus des betrachteten Produktsystems gezogen werden, um eine Verschiebung von ökologischen Belastungen in andere Lebensphasen zu vermeiden. Würde lediglich ein Teil des Lebenszyklus betrachtet, hätte dies eine nachhaltige Verfälschung der Bilanzergebnisse zur Folge. Die räumlichen Systemgrenzen beziehen sich auf der Inputseite auf die Beanspruchung von natürlichen Ressourcen (unverknüpfter Input), sowie auf der Outputseite auf die Emissionen in Luft, Wasser und Boden (unverknüpfter Output). Diejenigen Ströme in das zu untersuchende Produktsystem welche bereits selbst Produkte darstellen und keine natürliche Ressourcen sind, müssen mit den Ihnen zugehörigen Vorstufen und Prozessen verknüpft werden (verknüpfter Input). Ebenso verhält es sich mit Outputströmen die nicht innerhalb der Systemgrenzen entsorgt werden (Verknüpfter Output). Beispielsweise sind bei Bilanzierung des Verbrennungsprozesses einer Öl-Heizungsanlage neben den direkten Emissionen aus der Verbrennung des Öls auch die Aufwendungen und Emissionen aus der Bereitstellung des Heizöls mit zu berücksichtigen (z.B. Förderung von Rohöl, Transport, Raffinade und Lagerung).

Bei sehr komplexen Systemen mit mehreren verknüpften Inputströmen wird aufgrund der notwendigen Rückverfolgung von Vorketten der Aufwand für die Bilanzierung sehr groß. Dieser kann jedoch durch Definition geeigneter Abschneidekriterien reduziert werden, wobei darauf zu achten ist, dass durch die Nichtberücksichtigung einzelner Inputströme die Aussagekraft und Qualität des Bilanzergebnisses nicht signifikant reduziert wird. Nach EN ISO 14041 gibt es mehrere Entscheidungskriterien dafür, welche Inputströme zu untersuchen sind. Zum einen sind bei Masseninputs alle Ströme aufzunehmen die kumulativ mehr als einen festgelegten prozentualen Anteil zum gesamten Masseninput des zu untersuchenden Produkt-

systems beitragen. Analog dazu wird mit Energieinputströmen verfahren. Schließlich ist für alle nicht in die Bilanz aufgenommenen Inputströme zu untersuchen ob diese nicht Umweltbeeinflussungen hervorrufen die trotzdem von ökologischer Relevanz sind. In [Kreißig, 1997] wird entsprechend dieser Prozent-Regel nach ISO-Norm vorgeschlagen, dass in der Summe 99 % der Eingangsstoffe bezüglich Energiegehalt und Masse innerhalb der Systemgrenzen liegen sollten.

Parallel zum Vorgehen bei den zu erfassenden Inputströmen kann auch bei den Outputströmen ein Abschneidekriterium definiert werden. Eine Möglichkeit hierfür bietet das sogenannte Schwellenwertverfahren. Hierbei wird durch eine Abschätzung überprüft wie hoch der Anteil einer einzelnen Emission an einer bestimmten Wirkung auf die Umwelt ist. Für jede Umweltwirkung die durch Emissionen beeinflusst wird ist dazu eine Leitgröße zu definieren, aus der ein Schwellenwert ermittelt werden kann. Diejenigen Emissionen, deren potentielle Wirkung unterhalb dieser Schwelle liegen, brauchen nicht in die Bilanzierung aufgenommen zu werden.

Weiterhin muss im Rahmen der Sachbilanzierung die Problematik der Verteilung (Allokation) untersucht werden. Ein Produktsystem besteht in der Regel aus mehreren Modulen (z.B. Gewinnung von Rohstoffen, Transporte, Produktion etc.), wobei diese durch Flüsse von Zwischenprodukten verbunden sind. Ein Modul kann dabei mehrere Inputs (z.B. Grundstoffe) und Outputs (z.B. Produkte) haben. Überschreitet nun eines oder mehrere der Produkte die Systemgrenze nach außen, ist es notwendig die aus der Produktion entstehenden Umweltlasten durch Allokationsverfahren auf die einzelnen Produkte zu verteilen.

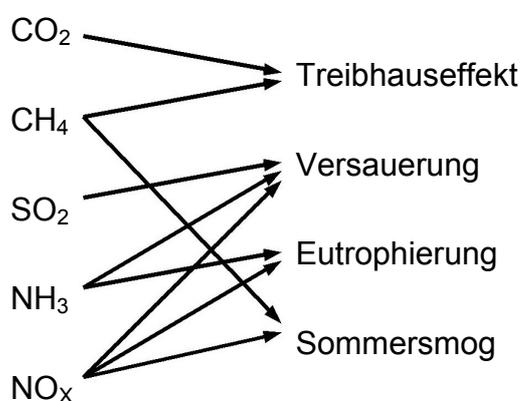
### **2.2.3 Wirkungsabschätzung**

Im Anschluss an den Schritt der Sachbilanzierung ist im Rahmen einer Ökobilanzstudie nach EN ISO 14040 die Phase der Wirkungsabschätzung durchzuführen. Dies ist notwendig, da aus den in der Sachbilanz gewonnenen Ergebnissen keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die Umweltauswirkungen eines betrachteten Produktsystems gezogen werden können. Ziel der Wirkungsabschätzung ist somit die Untersuchung eines Produktsystems aus der Sicht der Umwelt. Um dies zu erreichen, werden einzelne Sachbilanzgrößen mit gleicher Umweltwirkung in Wirkungskategorien zusammengefasst (vgl. Kapitel 2.3). Je Kategorie werden die einzelnen Parameter anschließend auf eine Leitgröße umgerechnet und zu einem Wirkungsindikator aggregiert. Dadurch ist es möglich einzelne potentielle Wirkungen auf die Umwelt zu beschreiben. Dies ermöglicht es, die Ergebnisse der Sachbilanz zu komprimieren und zu erläutern. Eine Wirkungsabschätzung besteht dabei aus mehreren Elementen, um die Sachbilanzergebnisse in Indikatorergebnisse umzuwandeln. In der ISO-Norm wird dabei in obligatorische und optionale Bestandteile unterschieden.

---

### *Obligatorische Bestandteile*

Die obligatorischen Bestandteile einer Wirkungsabschätzung sind zum einen die Auswahl der zu berücksichtigenden Wirkungskategorien, des weiteren eine Klassifizierung der Sachbilanzparameter und schließlich eine Charakterisierung zur Berechnung der Indikatoren. Die Auswahl der Wirkungskategorien muss dabei in Übereinstimmung mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz-Studie stattfinden, wobei die Auswahl begründet werden muss. Im Schritt der Klassifizierung werden zunächst die Ergebnisse der Sachbilanz einzelnen Umweltproblemfeldern zugeordnet. Einzelne Stoffe die auf verschiedene Weise Umweltwirkungen hervorrufen und damit unterschiedliche Wirkungspfade haben können, sind dabei mehreren Wirkungskategorien zuzuordnen (Abbildung 5).



*Abbildung 5: Klassifizierung von Emissionen*

Nachdem die einzelnen Emissionen klassifiziert wurden, erfolgt der Schritt der Charakterisierung. Dazu wird der Beitrag jeder einzelnen Emission zu den entsprechenden Wirkungskategorien bestimmt. Für jede Wirkungskategorie wird dazu eine Referenzgröße, meist die maßgebende Emission, gewählt. Die übrigen zu dieser Wirkungskategorie beitragenden Emissionen werden durch sogenannte Charakterisierungsfaktoren auf Äquivalente der Referenzgröße umgerechnet. Es werden dabei verschiedene Zeithorizonte berücksichtigt (20, 100, 500 Jahre), um die Verweilzeit eines Gases in der Atmosphäre zu berücksichtigen. Die Gewichtung für einen Stoff kann daher für jeden Zeithorizont anders ausfallen, abhängig auch von seiner Abbaubarkeit in der Umwelt. Als Ergebnis einer solchen Charakterisierung erhält man damit für jede Emission einen Äquivalenzwert bezüglich der Referenzemission und kann damit für jede Wirkungskategorie eine einzige Kennzahl bestimmen, den Wirkungsindikator.

In der Normenreihe EN ISO 14040 ff. werden zwar verschiedene Anforderungen und Empfehlungen an die Auswahl der Wirkungskategorien beschrieben. Es werden jedoch keine expliziten Wirkungskategorien angegeben. Dies ermöglicht es, noch in der Entwicklung befindliche Kategorien später zu integrieren. Dabei enthält die Norm Anforderungen und Empfehlungen, welche Wirkungskategorien im einzelnen ausge-

wählt werden sollten. Zum einen müssen die gewählten Wirkungskategorien mit der Zieldefinition übereinstimmen. Des Weiteren sind die Kategorien im Hinblick auf die Wirkungsmechanismen zu erläutern und zu beschreiben. Die Auswahl ist zu begründen, wobei eine internationale Akzeptanz der Wirkungskategorien ausdrücklich erwünscht ist. Schließlich muss vermieden werden, dass Wirkungen in unterschiedlichen Kategorien mehrfach berücksichtigt werden.

#### *Optionale Bestandteile*

Zusätzlich zu den obligatorischen Elementen der Wirkungsabschätzung existieren optionale Bestandteile die der Normierung, Ordnung oder Gewichtung der Indikatorergebnisse dienen. Im Zuge der Normierung wird das Verhältnis der Wirkungsindikatorergebnisse zu einem oder mehreren Referenzwerten berechnet. Dadurch wird ein besseres Verständnis des relativen Verhältnisses jedes Indikatorergebnisses ermöglicht. Die Referenzwerte können zum Beispiel auf Basis eines Bezugsraumes (regional, national, global) ermittelt werden. Im Rahmen der Ordnung werden die Wirkungskategorien in ein oder mehrere Klassen eingeteilt und optional eine auf Werthaltungen beruhende Rangbildung hinsichtlich der Priorität angeschlossen. Da verschiedene Individuen oder Gesellschaften jedoch unterschiedliche Präferenzen haben ist es möglich, dass auf Basis gleicher Indikatorergebnisse unterschiedliche Bewertungen entstehen. Durch eine Gewichtung schließlich werden die Indikatorergebnisse der verschiedenen Wirkungskategorien unter Verwendung numerischer Faktoren umgerechnet und zusammengefasst. Analog dem Verfahren der Ordnung beruht die Gewichtung auf Werthaltungen und kann daher durch unterschiedliche Präferenzen verschiedener Parteien auf Basis der gleichen Indikatorergebnisse zu voneinander abweichenden Ergebnissen führen.

Neben Sachbilanzergebnissen die in Wirkungskategorien zusammengefasst werden, existieren auch Massen oder Energieflussdaten die nicht unmittelbar einer Umweltwirkung zugeordnet werden können. Trotzdem geben diese einen Hinweis auf das Umweltverhalten eines zu untersuchenden Produktsystems und sind somit neben den Wirkungsindikatoren eine weitere Basis für den Prozess der Auswertung.

#### **2.2.4 Auswertung**

Ziel der Auswertung ist es, auf Basis der bereits abgeschlossenen Phasen der Ökobilanz, Schlussfolgerungen abzuleiten, Einschränkungen der Studie zu erläutern und Empfehlungen auszusprechen. Zusätzlich soll diese Phase einer Ökobilanz auch in Übereinstimmung mit der Zieldefinition und des Untersuchungsrahmens eine vollständige und leicht verständliche Ergebnisdarstellung liefern. Die Auswertung besteht dabei aus drei Bestandteilen die untereinander und mit den vorgelagerten Phasen einer Ökobilanz-Studie in einer Wechselwirkung stehen (vgl. Abbildung 6).

- Identifizierung der signifikanten Parameter durch Strukturierung der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung in
-

Wechselwirkung mit der Beurteilung. Signifikante Parameter können dabei Datenkategorien der Sachbilanz, einzelne Wirkungskategorien oder wesentliche Beiträge von Lebenswegabschnitten sein.

- Beurteilung der Ergebnisse, um dem Auftraggeber der Studie oder anderen interessierten Parteien einen klaren und leicht verständlichen Überblick über das Resultat der Studie zu ermöglichen. Dazu sind Prüfungen auf Vollständigkeit (alle relevanten Informationen stehen zur Verfügung), Sensitivität (Einschätzung der Zuverlässigkeit der Endergebnisse und Schlussfolgerungen) und auf Konsistenz (Annahmen, Methoden und Daten stimmen mit der Zieldefinition überein) durchzuführen.
- Ableitung von Schlussfolgerungen und Aussprechen von Empfehlungen für die Zielgruppe der Studie. Es ist jedoch keine Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Variante zu treffen, da dazu neben den ökologischen auch technische und ökonomische Aspekte herangezogen werden müssen.

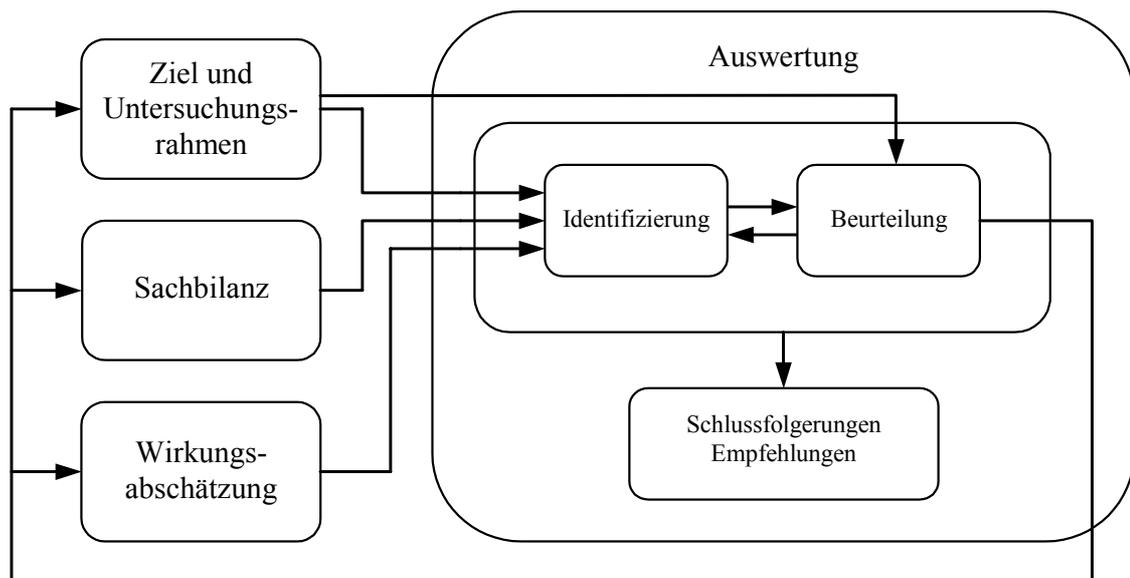


Abbildung 6: Bestandteile der Auswertung nach EN ISO 14043

### 2.3 Wirkungskategorien

Im Zuge der Entwicklungsgeschichte der Ökobilanzierung wurde von den unterschiedlichen Akteuren bis heute eine große Anzahl an verschiedenen Wirkungskategorien zur Beschreibung der Auswirkungen auf die Umwelt entwickelt. In diesem Zusammenhang wird auf eine interdisziplinäre Expertengruppe der Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)-Europe verwiesen, die Empfehlungen für die besten zur Zeit verfügbaren Modelle für Wirkungskategorien erarbeitet. Bei der Auswahl der Kategorien sollte man sich jedoch bewusst sein, dass

die Ergebnisse von Ökobilanzstudien in Abhängigkeit von den gewählten Wirkungskategorien variieren. In Tabelle 3 ist eine Auswahl der derzeit vom Umweltbundesamt verwendeten Wirkungskategorien angegeben [UBA, 2000c]:

*Tabelle 3: Übersicht der derzeit vom UBA verwendeten Wirkungskategorien*

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
Treibhauswirkung	Emissionen die den Wärmehaushalt der Atmosphäre beeinflussen
Ozonabbau	Emissionen welche die Ozonschicht in der Stratosphäre abbauen
Bildung von Photooxidantien	Emissionen die als Ozonbildner in Bodennähe fungieren
Eutrophierung	Emissionen die eine Überdüngung von Gewässern bewirken
Versauerung	Emissionen die eine Versauerung von Böden und Gewässern verursachen
Ressourcenverbrauch	Verbrauch von fossilen Ressourcen
Naturraumbeanspruchung	Verbrauch von natürlichen Flächen
Humantoxizität	Emissionen mit gesundheits- oder erbgutschädigender Wirkung auf den Menschen
Ökotoxizität	Emissionen durch die Organismen und Ökosystemen geschädigt werden

Im folgenden werden die Mechanismen der ersten fünf Wirkungskategorien aus Tabelle 3 beschrieben und die Ermittlung der zugehörigen Indikatoren dargestellt. Da die Toxizitätspotentiale sowie die Inanspruchnahme von Naturraum wissenschaftlich noch nicht abgesichert sind, werden diese hier nicht weiter erläutert.

### **2.3.1 Treibhauspotential GWP**

Die Sonne sendet Energie in Form von kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung aus (Wellenlänge im Bereich zwischen 0,4 und 3  $\mu\text{m}$ ). Diese Strahlung trifft auf die Erde und wird insgesamt zu etwa einem Drittel von Atmosphäre, Wolken und Erdoberfläche reflektiert. Der Rest wird von der Erdoberfläche absorbiert. Der absorbierte Anteil führt zur Erwärmung von Boden, Wasser und Luft, wobei die kurzwellige Strahlung in langwellige Wärmestrahlung (Wellenlänge etwa 3 bis 100  $\mu\text{m}$ ) umgewandelt wird. Diese langwellige Wärmestrahlung wird vom Erdboden

wieder emittiert, wobei diese nun teilweise von bestimmten natürlichen Gasen in der Atmosphäre absorbiert und zurückgestrahlt wird (Abbildung 7). Durch diesen "natürlichen" Treibhauseffekt wird die derzeitige mittlere Temperatur der Erdoberfläche von ca. 15°C bewirkt. Ohne diesen Effekt würde sich eine Temperatur von 18°C unter Null einstellen. Zu dieser lebenserhaltenden Erwärmung trägt Wasserdampf den weitaus größten Teil (etwa zwei Drittel) bei. Es folgen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) mit einem Anteil von ca. 15%, Ozon mit etwa 10% und schließlich Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) und Methan (CH<sub>4</sub>) mit je etwa 3% [MPI, 2002].

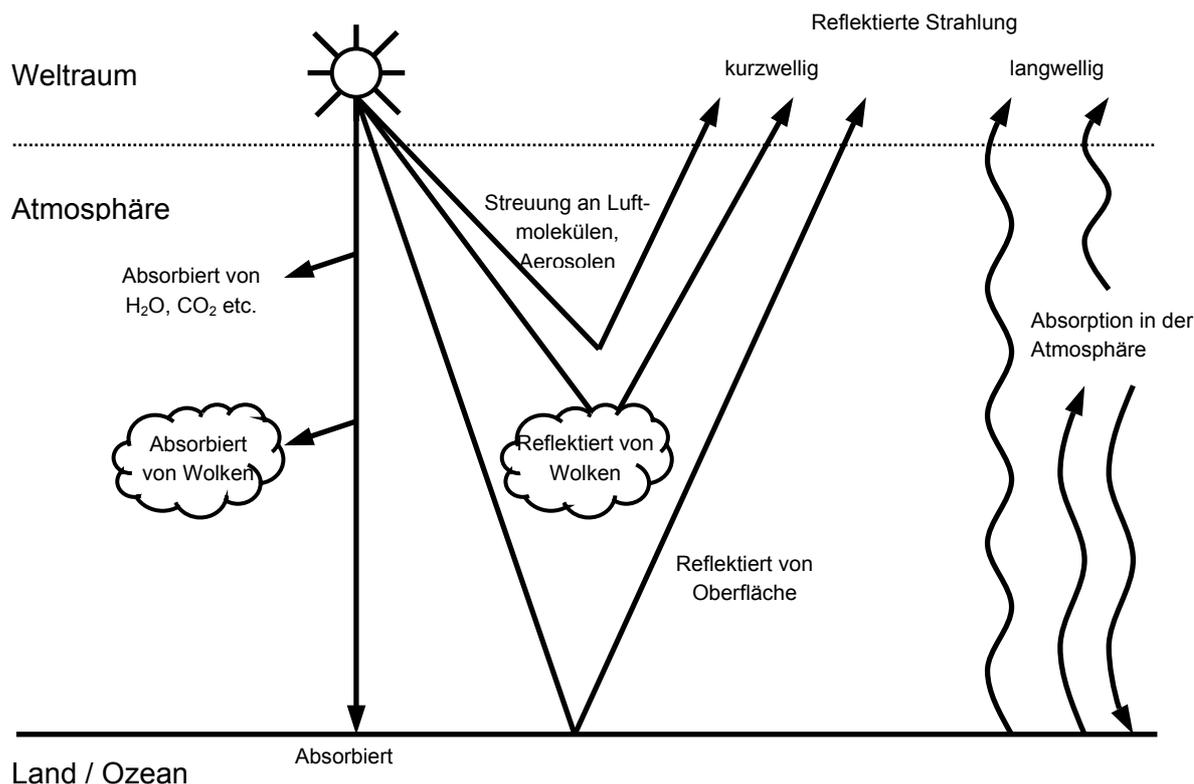


Abbildung 7: Prinzip des Treibhauseffekts

Diskutiert und zunehmend als problematisch angesehen wird der sogenannte anthropogene Anteil am Treibhauseffekt aus der verstärkten Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten. Seit Beginn der Industrialisierung stieg die Konzentration der Treibhausgase bis heute bei Kohlendioxid um ca. 30%, bei Methan um 120% und bei Distickstoffoxid um ca. 10%. Hierdurch wird eine langfristige Erwärmung der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche angestoßen, deren Ausmaß mit der Konzentrationsänderung ansteigt, aber auch stark von der Reaktion des Wasserkreislaufs (Wasserdampf, Bewölkung, Niederschlag, Verdunstung, Schneebedeckung, Meereisausdehnung) bestimmt wird. Der Wasserkreislauf kann sowohl verstärkend wie dämpfend eingreifen, weil viele seiner Zweige stark temperaturabhängig sind. Da die Erwärmung regional und innerhalb eines Jahres unterschiedlich ist und weil die Strahlungsbilanzstörung bei einer Konzentrationsänderung von der Struktur der Atmosphäre, der Jahreszeit und

vom Oberflächentyp abhängt, führt ein erhöhter Treibhauseffekt auch zu veränderten Werten des Niederschlags, der Bewölkung, der Meereisausdehnung, der Schneebedeckung und des Meeresspiegels sowie zu anderen Wetterextremen, d.h. im Letzten zu einer globalen Klimaveränderung. Nach [IPCC, 2001] stiegen die globalen Durchschnittstemperaturen in den letzten 100 Jahren um etwa 0,4 bis 0,8°C. Es wird jedoch diskutiert, inwieweit dies auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen ist oder noch im Bereich natürlicher Schwankungen liegt. Neuere Untersuchungen zeigen einen großen Anteil der gestiegenen Sonnenaktivität.

Zur Konkretisierung des Treibhauspotentials wird versucht, über mögliche Abbaureaktionen die Verweildauer von Gasen in der Atmosphäre zu bestimmen. Das Treibhauspotential wird auf Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) bezogen und für ein kg eines Gases bezogen auf ein kg CO<sub>2</sub> angegeben. Da die Lebenszeit der Gase in der Atmosphäre in die Berechnung mit einfließt, muss zur Angabe des GWP einzelner Gase in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten immer der Zeithorizont mit angegeben werden. Auf internationaler Ebene ist der Bezug auf 100 Jahre üblich. In der Literatur werden auch Zahlen für 20 bzw. 500 Jahre angegeben. Dabei sind die Kennwerte des Intergovernmental Panel of Climatic Change [IPCC, 2001] international akzeptiert.

*Tabelle 4: Treibhauspotentiale für einen Zeitraum von 100 Jahren*

Stoff	chem. Formel	GWP <sub>i</sub> in kg CO <sub>2</sub> -equiv./kg
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	1,0
Distickstoffmonoxid	N <sub>2</sub> O	296
Methan	CH <sub>4</sub>	23

Die Berechnung des gesamten GWP erfolgt aus den Äquivalenzwerten GWP<sub>i</sub> der einzelnen Treibhausgase nach folgender Gleichung [Heijungs, 1992]:

$$\text{GWP}_{\text{Äq.}} = \sum (\text{GWP}_i \cdot e_i)$$

mit  $e_i$ : Masse der Emission  $i$  in kg

### 2.3.2 Ozonabbaupotential ODP

Ozon (O<sub>3</sub>) gehört zu den Gasen, welches trotz seiner geringen Konzentration in der Stratosphäre (15 bis 50 km Höhe) im Gegensatz zu anderen Spurengasen die kurzweilige UV-Strahlung der Sonne absorbiert und unabhängig von der Richtung mit größerer Wellenlänge wieder abgibt. Auf diese Weise gelangt nur ein Teil der UV-Strahlung auf die Erde. Ozon entsteht durch die Bestrahlung von Sauerstoffmolekülen mit kurzweiligem UV-Licht. Es kommt dabei zur Bildung der sogenannten Ozonschicht. In Abbildung 8 ist die Ozon- und Druckverteilung über die Höhe graphisch dargestellt [Dreyer, 1995]. Bestimmte anthropogene Emissionen führen zu Abbauprozessen in der Ozonschicht. Die maßgebende ozonabbauende Wirkung

wird den Stoffgruppen der Fluorchlorkohlenwasserstoffe und den Stickoxiden zugeschrieben. Eine abgeschwächte Ozonkonzentration in der Stratosphäre führt zu einer stärkeren Transmission der Sonnenstrahlung im UV-Bereich und somit zu negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Zwei Effekte des Ozonabbaus sind zu nennen. Dies ist zum einen die zusätzliche Erwärmung der Erdoberfläche, zum anderen die Empfindlichkeit von Mensch, Tier und Pflanzen gegenüber UV-B und UV-A Strahlung. Nach [Eyerer, 2000] wären denkbare Auswirkungen unter anderem Wuchsveränderungen bzw. Minderung der Ernteerträge (durch Störung der Photosynthese), Tumorindikationen (Hautkrebs und Augenerkrankungen) und die Abnahme des Meeresplanktons, was erhebliche Auswirkungen auf die Nahrungskette nach sich ziehen würde.

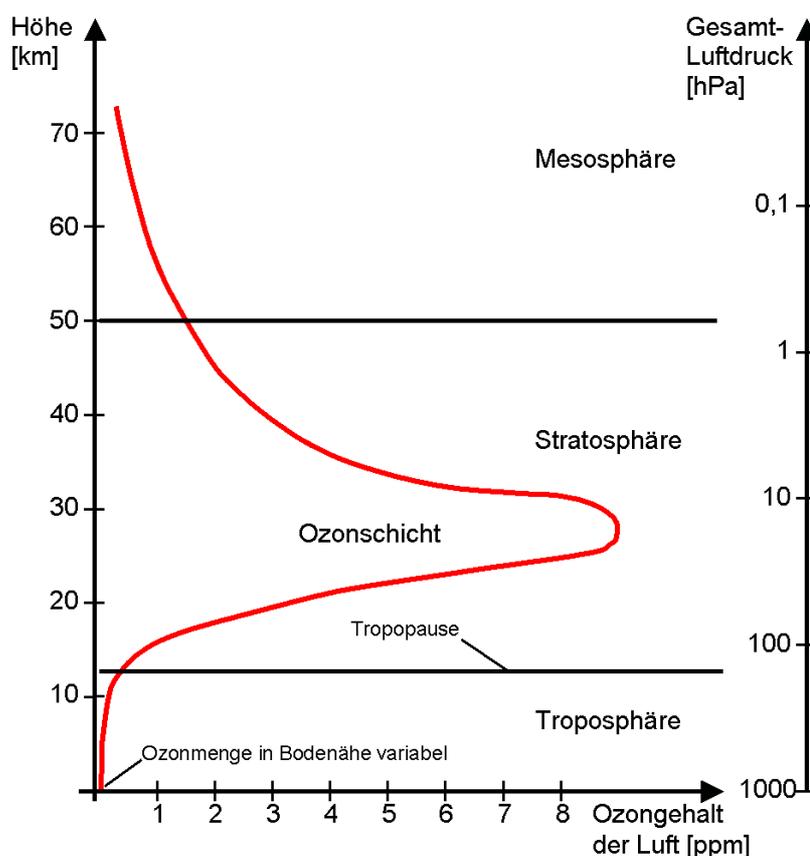


Abbildung 8: Ozon- und Druckverteilung in der Atmosphäre

Zur Abschätzung dieses Effektes, wurde das ODP-Konzept (ODP: Ozone Depletion Potential) definiert. Darin werden vor allem die anthropogen emittierten Halogenkohlenwasserstoffe, die als Katalysatormolekül die Ozonmoleküle zerstören, erfasst. Das ODP wird auf den Fluorchlorkohlenwasserstoff FCKW 11 bezogen und für ein kg eines Gases bezogen auf ein kg FCKW 11 angegeben. In Tabelle 5 sind Ozonabbaupotentiale ausgewählter Stoffe nach [WMO, 1999] angegeben.

Tabelle 5: Ozonabbaupotentiale ausgewählter Stoffe

Stoff	chem. Formel	ODP <sub>i</sub> in kg FCKW11-equiv./kg
Trichlorfluormethan (FCKW 11)	CFCl <sub>3</sub>	1,00
Dichlordifluormethan (FCKW 12)	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	0,82
Trichlortrifluorethan (FCKW 113)	C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	0,90

Die Berechnung des gesamten ODP erfolgt aus den Äquivalenzwerten ODP<sub>i</sub> der einzelnen Gase nach folgender Gleichung [WMO, 1992]:

$$\text{ODP}_{\text{Äq.}} = \sum_i (\text{ODP}_i \cdot e_i)$$

mit  $e_i$ : Masse der Emission  $i$  in kg

### 2.3.3 Photooxidantienbildungspotential POCP

Bodennahes Ozon ist nicht mit der schützenden Ozonschicht zu verwechseln. Während die Bildung von Ozon in der Stratosphäre eine wichtige Schutzfunktion wahrnimmt, ist bodennahes Ozon ein schädliches Spurengas. Ozon gilt als Zellgift für alle Organismen und wirkt schon bei geringer Konzentration humantoxisch. Die photochemische Oxidation, die oft als Sommersmog bezeichnet wird, beruht auf Reaktionen zwischen Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) und organischen, flüchtigen Komponenten (VOC = Volatile Organic Compound) unter UV-Bestrahlung. Randbedingungen, die zu hohen Ozonkonzentrationen führen, sind hohe Temperaturen, geringe Luftfeuchte sowie geringer Luftaustausch. Ozon entsteht aus Stickstoff- und Kohlenwasserstoffemissionen unter Einwirkung von Sonnenlicht durch komplexe chemische Reaktionen. Das alleinige Vorhandensein von Stickoxiden führt noch zu keiner Ozonbildung. Die Gegenwart von Kohlenwasserstoffen ist unabdinglich. Die Modellierung der Zusammenhänge zwischen Emissionen ungesättigter Kohlenwasserstoffe und Stickoxiden ist dabei äußerst schwierig. Kohlenwasserstoffe, Produkte einer unvollständigen Verbrennung, treten beim Umgang mit Ottokraftstoffen (Tanken, Lagerung, Umschlag etc.) und Lösungsmitteln auf. Das in der Regel in unmittelbarer Nähe der Emissionsquellen vorhandene Kohlenmonoxid (meist vom Verkehr) reduziert das gebildete Ozon zu Kohlendioxid und Sauerstoff. Aus diesem Grund treten hohe Ozonkonzentrationen eher in Reinluftgebieten auf. Die „photochemischen ozonbildenden Potentiale“ (POCP = Photochemical Ozone Creation Potential) sind für einzelne Emissionen wieder auf eine Leitsubstanz normiert, in diesem Fall das Ethen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) [Eyerer, 2000]. Das POCP ist jedoch in Fachkreisen sehr umstritten, da es zum einen auf einer Änderung bestehender Ozonkonzentrationen aufbaut und zum anderen für regional weiträumige Ausbreitungsrechnungen entwickelt wurde [UBA, 2000a].

### 2.3.4 Eutrophierungspotential NP

Eutrophierung bezeichnet den Vorgang der natürlichen oder anthropogenen Nährstoffanreicherung von aquatischen und terrestrischen Systemen. Beiträge zur Eutrophierung liefern die Landwirtschaft durch intensive Düngung, aber auch bestimmte Luftschadstoffe und Bestandteile von Abwässern sind in diesem Zusammenhang zu nennen. Die Schädigung von Gewässern erfolgt in der Anfangsphase durch ein verstärktes Algenwachstum, wodurch das Vordringen des Sonnenlichts in tiefere Schichten des Gewässers behindert wird. Damit verbunden ist eine verringerte Photosynthese, was mit einer reduzierten Sauerstoffproduktion gleichzusetzen ist. Zusätzlich wird für den Abbau abgestorbener Algen Sauerstoff benötigt. Durch die geschilderten Effekte wird der Sauerstoffgehalt im Gewässer drastisch gesenkt. Die Konsequenzen daraus sind Fischsterben und der Beginn anaerober Zersetzung (ohne Sauerstoff). Bei diesen Prozessen entsteht unter anderem Schwefelwasserstoff und Methan.

Das Eutrophierungspotential wird bestimmt, indem man die im Molekül vorhandenen Stickstoff- und Phosphatanteile zum Molekulargewicht ins Verhältnis setzt. Als Bezugssubstanz dient das Phosphat-Anion. Dabei wird vorausgesetzt, dass Stickstoff und Phosphor entscheidend zur Eutrophierung beitragen. Für ausgewählte Stoffe ist das Eutrophierungspotential ( $NP_i$ ) nach [Heijungs, 1992] nachstehend aufgelistet:

*Tabelle 6: Eutrophierungspotential ausgewählter Stoffe*

Stoff	chem. Formel	$NP_i$ in kg $PO_4^{3-}$ -equiv./kg
Stickstoffmonoxid	NO	0,20
Stickoxide	$NO_x$	0,13
Phosphat	$PO_4^{3-}$	1,00

Die Berechnung des gesamten NP erfolgt aus den Äquivalenzwerten  $NP_i$  der einzelnen Gase nach folgender Gleichung [Heijungs, 1992]:

$$NP_{\text{Äq.}} = \sum_i (NP_i \cdot e_i)$$

mit  $e_i$ : Masse der Emission  $i$  in kg

### 2.3.5 Versauerungspotential AP

Mit der Diskussion um die neuartigen Waldschäden ist die Versauerung in den Blickpunkt der Öffentlichkeit gerückt. Durch Umwandlung von Luftschadstoffen in Säuren kommt es zur Herabsetzung des pH-Werts von Regenwasser und Nebel. Damit verbunden ist ein Säureeintrag in Böden und Gewässer. Schwefeldioxid und Stickoxide aus Verbrennungsprozessen in Industrie, Kraftwerken, Haushalten und

Verkehr sind als Hauptverursacher zu nennen. Das Versauerungspotential bestimmter Emissionen wird bestimmt, indem die im Molekül vorhandenen Schwefel-, Stickstoff- und Halogenatome zur Molmasse ins Verhältnis gesetzt werden. Die Bezugssubstanz ist Schwefeldioxid. In folgender Tabelle sind die Säurebildungspotentiale ausgewählter Stoffe angegeben [Hauschild, 1998]:

*Tabelle 7: Säurebildungspotentiale ausgewählter Stoffe*

Stoff	chem. Formel	AP <sub>i</sub> in kg SO <sub>2</sub> -equiv./kg
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>	1,00
Stickoxide	NO <sub>x</sub>	0,70
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	1,88

Das Versauerungspotential (Acidification Potential, AP) kann sinngemäß auf Emissionen in Wasser übertragen werden. Die Versauerung ist als globales Problem zu sehen, dessen Auswirkungen regional unterschiedlich ausfallen können. Dies ist bei einer Gewichtung zu berücksichtigen. Ebenfalls sind Unsicherheiten in der Modellbildung Rechnung zu tragen. Diese sind insbesondere in der Ausbreitung der säurewirksamen Gase und der eigentlich notwendigen räumlichen Auflösung zu sehen. Aufgrund in der Regel mangelnder Informationen wird das Versauerungspotential ohne räumliche Auflösung betrachtet [Bossel, 1994; BUND, 1996; De Haes, 1996; De Leeuw, 1993; Gebler 1992; Heijungs, 1992].

Die Berechnung des gesamten AP erfolgt aus den Äquivalenzwerten AP<sub>i</sub> der einzelnen Gase nach folgender Gleichung [Heijungs, 1992]:

$$AP_{\text{Äq.}} = \sum_i (AP_i \cdot e_i)$$

mit  $e_i$ : Masse der Emission  $i$  in kg

## 2.4 Problematik der Wirkungsabschätzung und Bewertung

Wie in den Kapiteln 1.2 und 2.1 beschrieben, haben verschiedene Gruppen und Einzelpersonen die Entwicklung der Ökobilanzierung geprägt. Die Normenreihe EN ISO 14040 bis 14043 ist das aktuelle Ergebnis von mehrjährigen Bestrebungen zur Standardisierung im Bereich der Ökobilanzen. Neben der in der Norm beschriebenen Vorgehensweise zur Wirkungsabschätzung und Bewertung existieren jedoch auch weitere Methoden, die als Teil von früheren Ökobilanzen unabhängig von der Normenreihe entwickelt wurden. Diese finden auch nach wie vor eine breite Anwendung in Industrie und Wissenschaft. Nicht alle dieser Methoden verwenden den Ansatz zur Bildung von Wirkungskategorien wie er durch die Norm vorgegeben wird. Teilweise erfolgt eine Bewertung direkt auf den Ergebnissen der Sachbilanz durch Berechnung eines einzelnen Indikators. Dies bedeutet, dass hier die

Wirkungsbilanz mit der Bewertung verschmolzen wird. Gemeinsam ist jedoch allen Methoden, dass zunächst eine Sachbilanz für das zu untersuchende Produkt zu erstellen ist in der die, entsprechend der gewählten Methode, benötigten Daten und Informationen enthalten sind.

Nach [Stahl, 1998] können die verschiedenen Methoden zur Wirkungsabschätzung und Bewertung zum einen in verbal argumentative und zum anderen in quantifizierende Methoden unterteilt werden. Bei der verbal argumentativen Herangehensweise wird versucht, ohne quantitative und formalisierte Bewertungen zu einer Gesamtbewertung zu kommen. Der Schritt der Wirkungsanalyse wird hier nicht durchgeführt, sondern es erfolgt eine direkte Bewertung der Sachbilanz-ergebnisse durch Anwendung eines Rasters von vorher festgelegten Kriterien. Die quantitativen Ansätze können weiter in teilaggrierende und vollaggrierende Methoden unterteilt werden. Vollaggrierend bedeutet, dass verschiedene Umweltauswirkungen im Zuge einer numerischen Gewichtung bis zu einer einzigen Kenngröße zusammengefasst werden, während bei einer teilaggrierenden Methode nach der Wirkungsabschätzung mehrere Indikatoren für eine Auswertung herangezogen werden.

Weiterhin existieren auch Ansätze die von Anfang an nur auf eine bestimmte Leitgröße abzielen, zum Beispiel bei einer rein energetischen Betrachtung eines Produktes auf den kumulierten Energieaufwand KEA. Da bei diesen Methoden nur auf einen bestimmten Parameter abgezielt wird, ist dort auch keine weitergehende Bewertung durchzuführen, sondern es kann direkt eine Auswertung erfolgen.

In Tabelle 8 sind ausgewählte Bewertungsmethoden angegeben die den unterschiedlichen Ansätzen zugeordnet werden können. In den folgenden Kapiteln werden diese kurz beschrieben.

*Tabelle 8: Überblick über Bewertungsmethoden*

<b>Methode</b>	<b>Typ</b>
Kumulierter Energieaufwand KEA	Leitparameter
ABC-Analyse	Verbal argumentativ
Methode der ökologischen Knappheit	Quantifizierend und vollaggrierend
CML-Methode	Quantifizierend und teilaggrierend
Ecoindicator 95	Quantifizierend und vollaggrierend

### 2.4.1 Kumulierter Energieaufwand KEA

Der kumulierte Energieaufwand wird seit den 70er Jahren als Kennzahl für Energiesysteme verwendet. Anfang der 90er Jahre wurde in einer Kooperation des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) und des Umweltbundesamts die Richtlinie VDI-RL 4600 [VDI 4600] als Regelwerk zur Bestimmung des KEA entworfen. Mit diesem Ansatz wird versucht, anhand einer Leitgröße Aussagen zur Umweltwirkung eines Prozesses oder Produktes zu machen und Energieeinsparpotentiale aufzuzeigen. Der kumulierte Energieaufwand gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung entsteht. Nach [VDI 4600] setzt er sich dabei aus dem kumulierten Prozessenergieverbrauch und dem kumulierten nichtenergetischen Aufwand zusammen. Dies bedeutet, dass der Energiegehalt von bestimmten Stoffen (z.B. Schwefel) formal mitbilanziert werden muss, da diese Stoffe bei ihrer chemischen Umsetzung entsprechende Reaktionsenthalpien aufweisen. Damit werden diese Stoffe als Brennstoffe definiert und finden entsprechenden Eingang in den gesamten KEA. Weiterhin werden bei Energieträgern, die nicht energetisch genutzt werden, nach VDI-RL ebenfalls Energieinhalte über Heizwerte berücksichtigt. Auch dann wenn diese Stoffe nicht als Brennstoffe eingesetzt werden (z.B. Holz für Dachkonstruktionen). Dies ist dann richtig, wenn - wie in der VDI-RL vorgesehen - auch eine entsprechende (und transparente) Gutschrift bei der energetischen Nutzung von Abfällen berücksichtigt wird, also am Ende des Lebenszyklusses von Produkten, die aus „Brennstoffen“ hergestellt wurden, deren Heizwerte wieder dem System zur Verfügung gestellt werden. In der Praxis ist es jedoch wenig aussichtsreich, für die sehr unterschiedlichen Produktgruppen jeweils komplette Lebenszyklen mit differenzierten Daten zur Entsorgung und den dann anzurechnenden Gutschriften anzunehmen. Grund hierfür ist das prinzipiell offene System der Entsorgung, bei dem eine Vielzahl von Produkten stark gemischt und aus verschiedenen Zeithorizonten in sehr verschiedene Entsorgungspfade übergeben werden und sich diese Pfade zusätzlich über die Zeit ändern (z.B. Deponie, thermische Behandlung, stoffliches Recycling). Die tatsächliche Entkopplung der Nutzungs- und Entsorgungsphase von Produkten spricht daher gegen eine „starre“ Festlegung zur Berücksichtigung der Entsorgung, wie sie die VDI-RL über die Heizwert-Gutschrift vorsieht.

Demgegenüber sollte nach [Fritzsche, 1999] der gesamte Kumulierte Energie Aufwand ( $KEA_{\text{gesamt}}$ ) in mehrere, der Art der Energiequelle entsprechende Komponenten disaggregiert werden, um eine genauere Aussage über die Umweltauswirkungen des betrachteten Produktes oder Prozesses zu erhalten. Weiterhin wird vorgeschlagen, zur Bestimmung des KEA ausschließlich die Energieanteile mitzubilanzieren, die sich direkt aus dem energetisch genutzten Energieinhalt von Brennstoffen bzw. Primärenergien ergeben. Damit werden alle Bezüge zum Heizwert von stofflich genutzten potentiellen Energieträgern sowie die Reaktionsenthalpien

---

von Stoffen aus dem KEA eindeutig ausgeklammert. Als Ergebnis resultieren nach [Fritzsche, 1999] die folgenden drei Komponenten:

- KEA<sub>nicht erneuerbar</sub>: Kumulierter Energieaufwand aus nicht erneuerbaren Quellen. Diese Größe enthält aggregiert die Energieäquivalenzwerte der Ressourcen Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran.
- KEA<sub>erneuerbar</sub>: Kumulierter Energieaufwand aus erneuerbaren Rohstoffen. Diese Größe enthält aggregiert die Energieäquivalenzwerte der Ressourcen Holz, Wasser, Sonne und Wind.
- KEA<sub>andere</sub>: Kumulierter Energieaufwand aus energetisch genutzten Reststoffen.

Die stofflich genutzten Ressourcen werden dafür als Ausgleich im Kumulierten Stoff Aufwand KSA berücksichtigt. Dieser ist eine Maßzahl für den gesamten Aufwand an Rohstoffen zur Bereitstellung eines Produktes. Der KSA ist damit die stoffbezogene komplementäre Größe zum KEA. Der KSA<sub>gesamt</sub> wird dabei analog zum KEA in die folgenden Komponenten disaggregiert:

- KSA<sub>nicht erneuerbar</sub>: Kumulierter Stoffaufwand aus nicht erneuerbaren Quellen; z.B. Erdöl bei der Herstellung von Kunststoff.
- KSA<sub>erneuerbar</sub>: Kumulierter Stoffaufwand aus erneuerbaren Rohstoffen; z. B. Holz als Baustoff.
- KSA<sub>andere</sub>: Kumulierter Stoffaufwand aus stofflich genutzten Reststoffen.

#### 2.4.2 ABC-Analyse

Die ABC-Analyse wurde entwickelt um eine betriebliche Entscheidungsfindung bei der ökologischen Bewertung von Prozessen und Produkten zu unterstützen. Sie versucht durch eine verbal-argumentative Wirkungsabschätzung eine Gesamtbewertung zu erreichen. Auf quantitative und formalisierte Bewertungen wird dabei verzichtet. Die Umwelteinwirkungen der verschiedenen Input-/Outputstoffe werden dazu zunächst anhand eines Rasters bewertet. Es entsteht eine Prioritätenrangfolge, die ökologische Handlungen auslösen soll. Folgende Einteilung wird dabei angewendet:

- A** ökologisch besonders relevantes Problem mit hohem Handlungsbedarf
- B** ökologisches Problem mit mittelfristigem Handlungsbedarf
- C** nach jetzigen Kenntnisstand geringes Problem, z.Zt. kein Handlungsbedarf

Die Einteilung erfolgt dabei subjektiv von dem einzelnen Unternehmen. Die Methode beruht auf dem Grundgedanken, dass häufig nur sehr wenige Faktoren ein Problem

---

entscheidend prägen und damit die eigentlichen Schlüsselstellen bilden, die es zu beeinflussen gilt. Eine Gewichtung erfolgt dabei nicht als absolute Gewichtung, sondern findet nach folgenden Kriterien statt:

- Einhaltung umweltrechtlicher/-politischer Anforderungen
- Gesellschaftliche Akzeptanz
- Gefährdungs-/Störpotential
- Negative externe Effekte (vor- und nachgelagerte Prozesse)
- Erschöpfung nicht regenerativer/regenerativer Ressourcen.

Mit der ABC-Analyse ist es damit möglich eine Bewertung direkt auf Basis von Sachbilanzdaten durchzuführen. Die nach EN ISO 14040 obligatorischen Elemente einer Wirkungsabschätzung, wie die Auswahl von Wirkungskategorien, Klassifizierung und Charakterisierung entfallen in dieser Methode. Die Schritte Wirkungsanalyse und Auswertung sind zudem verschmolzen. Daraus resultiert, dass diese Methode nicht im Rahmen einer Ökobilanz nach ISO-Norm angewendet werden kann.

#### **2.4.3 Methode der ökologischen Knappheit - UBP**

Die Methode der ökologischen Knappheit [BUWAL, 1990] ist unter verschiedenen Begriffen bekannt, so auch als „Methode BUWAL 133“, „Stoffflussmethode“, „Umweltbelastungspunkte (UBP) – Methode“ oder „Ökopunktemethode“. Mit ihr werden einzelne Emissionsmengen unter dem Aspekt der ökologischen Knappheit miteinander verglichen. Die ökologische Knappheit ist dabei durch die Relation zwischen Belastbarkeit einer Umweltressource und der heutigen Belastung definiert. Diese Methode wurde in der Schweiz ursprünglich als Meßsystem für Betriebe (ökologische Buchhaltung) entwickelt, um die Umweltauswirkungen systematisch, regelmäßig und nach verbindlichen Vorschriften zu erfassen. Erst später wurden die gewonnenen Faktoren für die Bewertung von Ökobilanzen benutzt.

Zentrale Komponente dieser Methode ist die Bestimmung der ökologischen Knappheit, welche auf dem Verhältnis des aktuellen Flusses an bestimmten Emissionen zu dem sogenannten kritischen Fluss basiert. Der kritische Fluss wird dabei aus den maximal zulässigen Umweltbelastung bestimmt. Diese sind durch völkerrechtliche Verpflichtungen, durch politische Zielvorgaben mit Konsenscharakter und Aussagen anerkannter Gremien oder Fachleute zu bestimmen. Die Methode gewichtet anhand der Ziele der schweizerischen Umweltpolitik. Globale und lokale Wirkungskategorien werden dabei im Rahmen der Bestimmung der Zielwerte auf die schweizerische Ebene umgerechnet. Die Methode ist jedoch auch für andere Regionen anwendbar, wenn die entsprechenden Ökofaktoren ermittelt werden. Für Schweden und Belgien wurde dies bereits umgesetzt [Nordic, 1994; SGP, 1994].

---

#### **2.4.4 CML-Methode**

Diese Methode ist vom niederländischen „Centrum voor Milieukunde“ der Universität Leiden (CML) erarbeitet worden [Heijungs. 1992]. Sie entspricht der Methode der Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) zur Durchführung von Ökobilanzen. Wie in Kapitel 2.1 angesprochen, war die SETAC die erste internationale Organisation die ab dem Jahr 1989 auf eine Standardisierung im Bereich der Ökobilanzierung hinarbeitete. Der von SETAC im Jahr 1993 veröffentlichte „Code of Practice“ zur Durchführung von Ökobilanzen kann als Vorläufer der in Kapitel 2.2 beschriebenen ISO-Normen angesehen werden [Guinée, 2001]. Mit der CML-Methode wird versucht, Sachbilanzergebnisse mit gleicher Wirkung auf die Umwelt medienübergreifend in Wirkungskategorien zusammenzufassen (Klassifizierung). Eine Bewertung von Einzelstoffen wird somit vermieden. Diese Aggregation innerhalb der Wirkungskategorien erfolgt durch Festlegung von Äquivalenzfaktoren für die einzelnen Schadstoffe bezüglich eines für jede Kategorie definierten Leitparameters (Charakterisierung). Im Anschluss an die Berechnung der Wirkungsindikatoren erfolgt optional eine Normalisierung der erhaltenen Ergebnisse bezüglich des gewählten Bezugsraumes. Eine Gewichtung zwischen den einzelnen Kategorien untereinander wurde in der ursprünglichen Methode nicht vorgesehen.

#### **2.4.5 Ecoindicator 95 Methode**

Die Ecoindicator 95 Methode wurde entwickelt, um einfach und schnell ökologische Aspekte im Konstruktionsprozess zu integrieren. Diese Methode trennt zwischen Sachbilanz, Wirkungsanalyse und Bewertung und ist explizit für den Bezugsraum Europa entwickelt worden. Der Schritt der Sachbilanz und Wirkungsanalyse entspricht dabei der CML-Methode. Jedoch erfolgt innerhalb der Ecoindicator 95 Methode eine weitergehende Aggregation der einzelnen Wirkungskategorien zu einem einzigen ökologischen Indikator, dem Ecoindicator. Um diese Vollaggregation zu erreichen, wird bei dieser Methode daher nur ein Teil der in der CML-Methode vorgeschlagenen Wirkungskategorien verwendet. Die Bewertung erfolgt dabei in zwei Schritten. Zunächst werden die ermittelten Wirkungsindikatoren zu den jeweiligen europäischen Belastungsdaten in Bezug gesetzt (Normalisierung). Anschließend werden die normalisierten Wirkungsindikatoren mit Gewichtungsfaktoren multipliziert und aufaddiert. Die Gewichtungsfaktoren wurden dabei anhand des „Distance-to-target“ Prinzips für den Bezugsraum Europa ermittelt.

---

### 3 ÖKOBILANZIERUNG UND DATENVERARBEITUNG IM BAUBEREICH

In der Vergangenheit wurde die Planung, Gestaltung und Ausführung von Gebäuden primär nach technischen, ökonomischen und ästhetischen Kriterien durchgeführt. Seit etwa 25 Jahren steigt auch das gesellschaftliche und politische Interesse hinsichtlich ökologischer Aspekte. Somit fließen diese immer mehr auch in die Entscheidungsfindung bei Baumaßnahmen ein [Sedlbauer, 1998]. Dabei werden Ökobilanzen im Gebäudebereich auf unterschiedlichen Ebenen eingesetzt um je nach Fragestellung die folgenden Aspekte näher zu untersuchen:

- Unterstützung bei der Wahl der einzusetzenden Materialien, des Bauortes, der einzusetzenden Haustechnik etc.
- Identifizierung von umweltrelevanten Prozessen oder Phasen
- Vergleich von verschiedenen Techniken (Dämmung, Heizung etc.)

In [ETH, 2000] wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes versucht, einen systematischen Überblick über die in der Schweiz und in anderen Ländern verfügbaren Instrumente zur Überprüfung der Umweltverträglichkeit von Gebäuden zu gewinnen. Die verschiedenen Ansätze und Methoden wurden dabei näher untersucht und miteinander verglichen um Übereinstimmungen, Diskrepanzen und Trends festzustellen. Dabei zeigte sich, dass die untersuchten Methoden meist auf eine Minimierung der Umweltwirkung des Gesamtgebäudes zielen. Als sehr wichtig eingestuft wurde dabei die Wahl der funktionellen Einheit und die Setzung der Systemgrenzen, die je nach Fragestellung verschieden gewählt werden. Als funktionelle Einheiten werden zum Beispiel der gesamte Gebäudebestand eines Gebietes, einzelne Gebäude, ein Bauelement ( $m^2$ ) oder ein Baustoff (in kg) als sinnvoll erachtet. Um jedoch eine Aussage bezüglich der Umweltbeeinflussung eines Gebäudes treffen zu können, ist eine Analyse des gesamten Lebensweges notwendig. Nach [Kohler, 1997] müssen sämtliche Einwirkungen auf die Umwelt aus Gewinnung der Rohstoffe und deren Verarbeitung, der Nutzung und Instandhaltung des Gebäudes sowie der Entsorgung durch Verwertung oder Beseitigung berücksichtigt werden. Dazu zählen Emissionen in Luft und Wasser, Abfälle, Energie- und Rohstoffverbrauch. Jedoch ist eine einfache Summation der Umweltbelastungen durch die einzelnen Baumaterialien nicht zielführend, wenn ein Gebäude bezüglich seines gesamten Lebenszyklus untersucht werden soll. Dazu sind zusätzliche Hintergrundinformationen zur Systemqualität und zu Wechselwirkungen in Zusammenhang mit dem Gebäude notwendig.

---

### 3.1 Ökoinventare von Baustoffen

Die Grundlage einer konsistenten Vorgehensweise der Bilanzierung ist eine Datenbasis, in der die umweltrelevanten Einflüsse der Einzelbaustoffe enthalten sind. In der Vergangenheit wurden Ökobilanzen zu Baustoffen von den unterschiedlichsten Akteuren erstellt. Die dort erhaltenen Ergebnisse sind jedoch meist nicht weiterzuverwenden, da diese Daten unter unterschiedlichen Systemgrenzen und Randbedingungen ermittelt wurden. Aufbauend auf den Arbeiten am Laboratorium für Energiesysteme an der ETH Zürich [Frischknecht et al., 1994] wurde im Jahr 1995 durch die Universitäten Karlsruhe, Hab Weimar und der ETH Zürich ein umfangreiches Ökoinventar für Baustoffe veröffentlicht [ifib, 1995]. Darin wurden erstmals Sachbilanzdaten zu verschiedenen Baustoffen auf Basis einheitlicher Randbedingungen zusammengefasst und zum Teil neu erhoben. Diese Daten werden bis heute in verschiedenen Ökobilanzierungen zu Einzelgebäuden verwendet oder wurden in andere Datenbanken integriert.

#### 3.1.1 ECOINVENT 2000

Das Projekt ECOINVENT 2000 ist eine Revision und Erweiterung der Datenbestände des oben genannten Ökoinventars aus dem Jahr 1995. Unter dem Dach der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in der Schweiz existierten verschiedene Datenbanken für die Durchführung von lebenszyklusbezogenen Berechnungen. Zu diesem ETH Bereich gehören neben den beiden Eidgenössischen Technischen Hochschulen ETH Zürich und ETH Lausanne auch die Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, das Paul Scherrer Institut (PSI), die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) sowie die Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG).

Im aktuell laufenden Vorhaben ECOINVENT 2000 [ecoinvent 2000] werden nun die verschiedenen Ökoinventare der einzelnen Anstalten harmonisiert und in einer einzigen zentralen Datenbank zusammengefasst. Diese Datenbank wird ökologische Daten aus den verschiedensten Bereichen wie Energiesysteme, Baumaterialien, Konsumgüter, Verpackungsmaterialien, etc. enthalten. Neben den ökologischen Daten zu den verschiedensten Materialien, Prozessen und Produkten werden auch Bewertungsmethoden wie die Öko-Indikator Methoden oder die CML Methode aufgenommen. Die ECOINVENT Datenbank wird auf einem Server bereitgestellt und kann via Internet abgefragt werden. Kommerzielle LCA-Software wie zum Beispiel Gabi, SimaPro, Umberto u.a. können zusätzlich als lokale Datenbanken eingebunden werden. Über das Administrations-Werkzeug ECOADMIN werden die von den kooperierenden Instituten gelieferten Datensätze auf Ihre Vollständigkeit überprüft und in die zentrale Datenbank eingespeist. Durch das Abfrage-Werkzeug ECOQUERY können Benutzer die zentrale Datenbank abfragen und Datensätze herunterladen. Dabei werden Abfragen nach individuellen Prozessen, nach bestimmten ökonomischen Bereichen (z.B. Transport oder Energiesektor) oder nach

---

Daten eines bestimmten Institutes ermöglicht. Generelle Informationen über Prozesse sind dabei jedermann frei zugänglich, wogegen quantitative Daten nur registrierten Mitgliedern von ECOINVENT 2000 zur Verfügung gestellt werden. Als Datenaustauschformat wird dabei ECOSPOLD genutzt. ECOSPOLD basiert auf XML und stellt eine Schablone für die enthaltenen Informationen dar, mit der Daten ganzheitlich beschrieben werden können. Es stellt dabei eine Untermenge von SPOLD (Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development) [Spold, 2001] dar. Diverse LCA-Anwendungen unterstützen bereits das SPOLD-Format (SimaPro, Umberto u.a.). Die Veröffentlichung der Daten und Ergebnisse aus dem Projekt ECOINVENT 2000 erfolgte am 25. September 2003. Im Rahmen dieser Arbeit konnten diese überarbeiteten Datenbestände jedoch nicht mehr verwendet werden.

### 3.1.2 GEMIS

Die Basisversion von GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) wurde als Instrument zur vergleichenden Analyse von Umwelteffekten der Energiebereitstellung und -nutzung vom Öko-Institut Freiburg und der Gesamthochschule Kassel (GhK) in den Jahren 1987 bis 1989 entwickelt und seitdem kontinuierlich fortentwickelt und aktualisiert [GEMIS, 2002]. Neben den eigenen Erhebungen der GhK wurden im Laufe der Zeit weitere Ökoinventare anderer Forschungseinrichtungen in die Datenbasis integriert. Seit der Version 3.0 (1996) ist GEMIS als public domain Software kostenlos erhältlich. Die aktuelle GEMIS-Datenbasis enthält unter anderem Informationen zu:

- Bereitstellung von Energieträgern: fossile Energieträger (Stein- und Braunkohle, Erdöl und Erdgas), regenerative Energien und Uran sowie nachwachsende Rohstoffe (schnellwachsende Hölzer, China-gras, Raps, Zuckerhirse) sowie Wasserstoff (jeweils mit Brennstoffdaten und den vorgelagerten Prozessen)
- Bereitstellung von Wärme und Strom (Heizungen, Warmwasser, Kraftwerke vieler Größen und Brennstoffe, Heizkraftwerke, BHKW...)
- Bereitstellung von Stoffen: vor allem Grundstoffe, Baumaterialien inklusiver deren vorgelagerter Prozesse (bei Importen auch im Ausland)
- Transportprozessen: Personenkraftwagen (für Benzin, Diesel, Strom, Biokraftstoffe), Öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Bahn) und Flugzeuge sowie Gütertransport (Lastkraftwagen, Bahn, Schiffe und Pipelines)

Neben der numerischen Beschreibung ist in GEMIS auch eine graphische Darstellung der einzelnen Prozesse möglich, wobei die einzelnen Prozessketten mit automatischer Verknüpfung auf die einzelnen Inputströme ausgegeben werden (Abbildung 9).

---

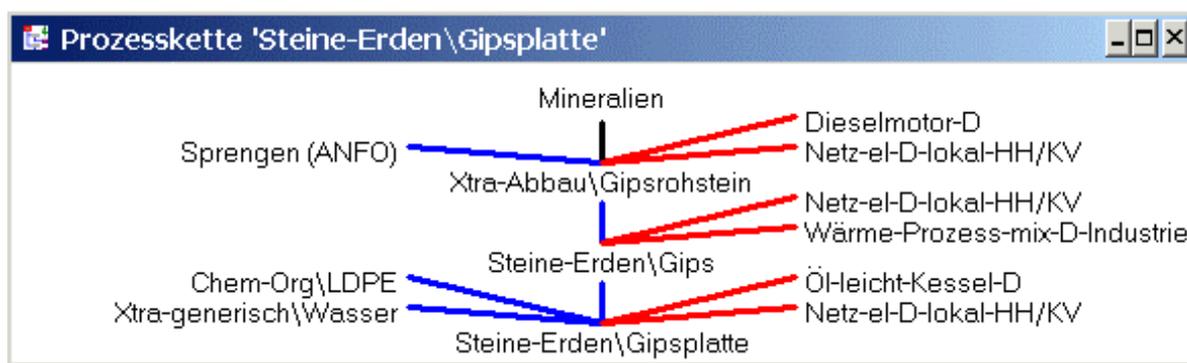


Abbildung 9: Prozesskettenbild aus Gemis für den Baustoff „Gipsplatte“

Weiterhin können zusätzlich zu den ökologischen Daten und Informationen der verschiedenen Prozesse auch Kosten analysiert werden. Entsprechende Kenndaten der Brenn- und Treibstoffe sowie der Energie- und Transportprozesse (Investitions- und Betriebskosten) sind in der Datenbasis ebenfalls enthalten. Weiterhin ist es mit dem Programm möglich, eine Wirkungsanalyse durch die Berechnung verschiedener Wirkungsindikatoren und aggregierter Sachbilanzgrößen durchzuführen. Die folgenden Wirkungsindikatoren und aggregierten Sachbilanzgrößen werden dabei in der aktuellen Version GEMIS 4.13 (Mai 2002) berücksichtigt:

- KEA und KSA (kumulierter Energie- und Stoff-Aufwand)
- GWP (Global Warming Potential, Treibhauspotential)
- TOPP (Tropospheral Ozone Precursor Potential, Ozon-Vorläuferpotential)
- AP (Acidification Potential, Versauerungspotential)

### 3.1.3 ECOBIS 2000

ECOBIS steht für "ökologisches Baustoffinformationssystem" und enthält umwelt- und gesundheitsrelevante Informationen zu Bauproduktgruppen in allen 5 Lebensphasen (Rohstoffe, Herstellung, Verarbeitung, Nutzung, Nachnutzung). Das Programm wurde aus dem Fachinformationssystem BUG-Datenbank 1.0 entwickelt, das von der Bayerischen Architektenkammer und dem Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen finanziert wurde [ECOBIS, 2000]. Die Informationen basieren in erster Linie auf Auswertungen der Fachliteratur, sowie der Informationen und Angaben von Herstellerverbänden, Herstellern, wissenschaftlicher Institute und Behörden. Daneben enthält ECOBIS auch das Gefahrstoffinformationssystem der Bauberufsgenossenschaften (GISBAU) WINGIS 2.0, welches über die Gesundheitsauswirkungen und rechtlichen Anforderungen bei der Verarbeitung von Bauproduktgruppen und Bauprodukten informiert.

ECOBIS bietet dem Nutzer die Möglichkeit, in übersichtlicher Weise auf recherchierte Datenbestände in Form von Textbausteinen zuzugreifen (siehe Abbildung 10). Es unterstützt den Planer bei der Auswahl von Baustoffen unter den Gesichtspunkten

der Ökologie und der Nachhaltigkeit. Die Datenbestände und Information aus ECOBIS 2000 können weder direkt noch über eine Programmschnittstelle in eine andere Software importiert werden, da die Daten in Form von Textbausteinen vorliegen, die überwiegend qualitative Aussagen und Erläuterungen beinhalten. Daten über Graue Energie, den kumulierten Energieaufwand oder Emissionswerte (z.B. CO<sub>2</sub>) existieren nicht durchgängig zu allen Baustoffen. In der Regel sind nur Teile dieser Informationen je Baustoff vorhanden. Auch diese Informationen liegen lediglich als Textbausteine vor und können infolge dessen nicht automatisch in anderen Computeranwendungen genutzt werden.

The screenshot shows the ECOBIS 2000 software window. The left sidebar contains a tree view of building product groups, with 'Normalmörtel' selected. The main area displays the following information:

Gehe zu:

→ auch **Mauermörtel**

**Energieaufwand:**

**Beispielrezeptur Zement-Mauermörtel MG III:**

Zement	20 M-%
Kalksteinsand 0 - 1 mm	40 M-%
Kalksteinsand 1 - 2 mm	20 M-%
Kalksteinsand 2 - 4 mm	10 M-%
Füller	10 M-%

**nichtererneuerbare Energie** 1,74 MJ/kg  
**erneuerbare Energie** 0,03 MJ/kg

Quelle:  
 ifib TH Karlsruhe, HAB Weimar, ESU+ETH Zürich: Baustoffdaten-Ökoinventare, 1995, Karlsruhe/Weimar/Zürich  
 Wirkungsbilanzen der HAB-Weimar (Systemgrenze: Herstellung der Baumaterialien)

Mörteltyp	Anwendungsbereich, Spezifikation	Zusammensetzung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Graue Energie [MJ/kg]
Zementmörtel	Normalmauermörtel CEM I 300 kg/m <sup>3</sup>	15% CEM I 32.5, 0.06% Zusatzm.	1900	1,11
Zementmörtel	Normalmauermörtel CEM I 450 kg/m <sup>3</sup>	22% CEM I 32.5, 0.05% Zusatzm.	1900	1,39
Verlängerter Mörtel	Mauermörtel verlängert CEM I 100 HK 250	5.6 CEM I 32.5, 13% hydr. Kalk, 0.06% Zusatzm.	1800	1,28

Quelle:  
 Büro für Umweltchemie (Hrsg.): Graue Energie von Baustoffen, 1998, Zürich

**Emissionen:**  
 Die Kohlendioxidemission (CO<sub>2</sub>-Emission) eines Zementmörtels (Werkrockenmörtel) wird mit 221 kg CO<sub>2</sub> / t (Systemgrenze: einschließlich Verarbeitung) angegeben (Baustoff 2.08 nach SIA - D

Abbildung 10: Programmfenster ECOBIS 2000

### 3.1.4 GaBiE

Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE (München) hat ein von der Bayerischen Forschungsförderung (BfS) gefördertes Forschungsprojekt mit dem Titel „GaBiE: Analyse von Energie- und Stoffströmen – Basisdaten für die ökologische Bewertung von Unternehmen, Wirtschaftsgütern und Dienstleistungen“ [GaBiE, 1999] durchgeführt. Im Rahmen dieses Projektes wurden in Zusammenarbeit mit verschiedenen Projektpartnern aus der Energiewirtschaft (z.B.: Bayernwerk AG, Isar-Amperwerke, REW, VEW, Siemens KWU, etc.) aufbauend auf detaillierten Stoffstromanalysen, Aussagen zum Energieaufwand bzw. den energiebedingten Emissionen bei der Bereitstellung von Energieträgern, Rohstoffen und Halbzeugen

erarbeitet. Die Ergebnisse dieses Vorhabens wurden im Rahmen mehrerer Berichte veröffentlicht, um zum einen eine Datenbasis für die rationelle Stoff- und Energieverwendung und damit eine Reduktion von klimarelevanten Emissionen zu schaffen und andererseits ein Hilfsmittel zur Erstellung von Stoff-, Energiebilanzen, sowie Ökobilanzen und Ökoaudits bereitzustellen. Das Projekt gliederte sich in vier Bereiche mit unterschiedlichen Schwerpunkten: Ganzheitliche Bilanzierung der Brennstoffbereitstellung, Ganzheitliche Bilanzierung der Strombereitstellung, Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen sowie die Ganzheitliche Bewertung von Wärmepumpen und Niedrigenergiehäusern. Der Teil II des Bereiches „Ganzheitliche energetische Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen“ befasst sich mit den wichtigsten Baustoffen und stellt diese mit Hilfe des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) und wichtiger, kumulierter Emissionswerte auf eine einheitliche, vergleichbare Basis. Weitere Teilprojekte befassen sich mit Metallen (Teil III), Kunststoffen (Teil IV) und Biogenen Kraftstoffen (Teil V).

Bei der energetischen Bilanzierung der Baustoffe wird zunächst für jeden Roh- bzw. Baustoff der Herstellungsprozess ausführlich geschildert. Darauf aufbauend werden die Prozessenergieaufwendungen für die einzelnen Schritte der Prozesskette auf Endenergiebasis ermittelt und der Kumulierte Energieaufwand sowie ausgewählte Emissionen bestimmt. Die Vorgehensweise einschließlich der Definitionen zum Kumulierten Energieaufwand und der Festlegung der Rahmenbedingungen werden im Allgemeinen Teil (Teil I) beschrieben. Bei der Ermittlung der Daten wurde zum Teil auf bereits existierende Arbeiten an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft zurückgegriffen. Diese Arbeiten wurden überprüft und entsprechend aktualisiert. Schließlich wurden zahlreiche Daten im Rahmen von Betriebsanalysen, Befragungen o.ä. neu erhoben. Die erhobenen Daten stehen dabei zwar in einer relationalen Datenbank zur Verfügung, können jedoch nicht direkt von anderen Softwareanwendungen ausgelesen oder über Internet abgefragt werden. Diese Daten stehen derzeit lediglich als interne Datenbank der FfE zur Verfügung.

## **3.2 Ökobilanzierungssoftware im Baubereich**

Aufgrund der Komplexität und des Umfangs von Ökobilanzierungen für Gebäude wurden zur Unterstützung verschiedene Computeranwendungen entwickelt. Diese ermöglichen es, einzelne Teilbereiche einer Ökobilanz wie die Sachbilanz und die Wirkungsanalyse durch automatisierte Berechnungsschritte zu beschleunigen. Nachfolgend werden einige ausgewählte Computerprogramme beschrieben, die derzeit im Bereich der Ökobilanzierung von Gebäuden Anwendung finden.

### **3.2.1 EcoPro**

EcoPro wurde 1996 als Resultat einer Forschungsarbeit des Institutes für Industrielle Bauproduktion an der Universität Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der Bauhaus-Universität Weimar und der ETH Zürich, zum ersten Mal vorgestellt. Es ist ein

---

Instrument zum Vergleich von Projektvarianten in der Phase Projektierung und Entwurfsplanung mit dem Ziel, den Einfluss von Baukörper, Haustechnik und Nutzung auf die Kosten, den Energiebedarf und die Umweltbelastung zu veranschaulichen. Ziel von EcoPro ist die gesamtheitliche Betrachtung eines Gebäudes. Das verwendete Verfahren für die ökologischen Bewertungen basiert auf der Betrachtung der Energie- und Stoffflüsse des Gebäudes während seiner gesamten Lebensdauer. Für die Umsetzung des Berechnungsverfahrens mittels Energie- und Stoffstromanalyse wurde ein modularer Aufbau gewählt, der Datenbanken für Baustoffe und Elemente und einen Programmteil mit Berechnungen enthält. Die rechentechnische Umsetzung erfolgte auf der Basis von Microsoft-Excel. EcoPro ist nicht mit einer CAD-Planungssoftware verknüpft. Als Datengrundlage dienen die von der ETH- Zürich initiierte Studie über Ökoinventare für Energiesysteme und die darauf aufbauenden Baustoffökoinventare, erstellt durch HAB Weimar, ifib-Karlsruhe und ETH-Zürich ESU [ifib, 1995].

### **3.2.2 SimaPro**

SimaPro ist eines der ersten Ökobilanzierungstools, das entwickelt wurde. Es verfügt etwa über die gleichen Funktionen wie EcoPro [Wolpensinger, 2001]. SimaPro wurde von PRé Consultants in den Niederlanden entwickelt und ist derzeit in der Version 5.1 verfügbar [Pré, 2003]. In der Datenbank werden öffentlich zugängliche Daten verwendet. Die meisten Daten stammen aus der Schweiz, aus Deutschland, Schweden und den Niederlanden. SimaPro wird mit einer Anzahl von Methoden zur Klassifizierung und Gewichtung von Umweltfolgen geliefert. Darunter CML, Eco-Indicator 95 und UBP (vgl. Kapitel 2.4). Eine Verknüpfung der Software mit einer CAD-basierten Planungssoftware ist auch hier nicht gegeben.

### **3.2.3 GaBi**

Das Software-System GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung) ist eine Entwicklung des Instituts für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit der PE Europe GmbH (PE) in Dettingen/Teck. GaBi bietet die Möglichkeit, mit Hilfe sogenannter Kostenassistenten eine genaue wirtschaftliche Betrachtung des in der Ökobilanz definierten Systems auf Basis von Material-/Energiekosten, Personal- und Maschinenkosten durchzuführen. Die zusammen mit dem System erhältlichen Datenbanken GaBi 3 lean und GaBi 3 professional enthalten Sachbilanz-Daten aus Erhebungen des IKP der Universität Stuttgart und der PE Product Engineering GmbH, aus Projekten mit Industriepartnern und Instituten, wie auch aus Literatur und Modellberechnungen. Daneben werden den Anwendern veröffentlichte, allgemein verwendete Datensätze aus weiteren Quellen zur Verfügung gestellt. Derzeit ist GaBi in der Version 4 erhältlich [IKP, 2003].

---

### 3.2.4 LEGOE

Das Programm LEGOE geht aus dem Forschungsprojekt „Umweltorientierte Planungsinstrumente für den Lebenszyklus von Gebäuden“ (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, AZ 11238) hervor. Zusammen mit dem Institut für industrielle Bauproduktion, dem Fachbereich technischer Ausbau (beide Universität Karlsruhe) und dem Institut für ressourcenschonendes Bauen (Bauhaus-Universität Weimar) werden Ausschreibungstexte und Elemente mit Informationen über den Energie- und Stofffluss bzw. den bauphysikalischen Daten versehen. Diese komplexen Baudaten können von der CAD-Software speedikon der IEZ AG, Bensheim und der AVA-Software Netbau der Software Sidoun, Freiburg verarbeitet werden. Darin wird die Erfassung, Beschreibung und Bewertung des Lebenszyklusses von Gebäuden unter ökologischen Gesichtspunkten und eine kombinierte Berechnung von Energiebedarf, Umweltbelastung und Baukosten in frühen Planungsphasen realisiert. Da dabei jedoch auf einem spezifischen CAD-System aufgebaut wird, welches aber kein standardisiertes Produktmodell verwendet, ist eine Anwendung von LEGOE ohne diese spezielle CAD-Anwendung nicht gegeben.

### 3.2.5 OPTIMA

Das Programm OPTIMA geht aus dem Verbundprojekt „Integrale Planung solar-optimierter Gebäude - RETEx II / INTESOL vor, bei dem eine Planungsplattform für energetische Optimierung von Gebäuden im Sinne eines integralen Lösungsansatzes (Groupware) entstand. Darin werden dreidimensionale Gebäudedaten aufbereitet und unter Verwendung des objektorientierten IFC-Schemas in einer relationalen Datenbank gespeichert. Daraus wird anschließend eine Eingabedatei für thermische Simulationen mit dem Programmsystem TRNSYS generiert. Dieses System beinhaltet jedoch nur eine wärmespezifische Simulation, Gebäudedaten müssen in verschiedenen Schritten umgearbeitet werden. Eine direkte Kopplung an bestehende CAD-Systeme oder eine Integration ist nicht vorgesehen.

## 3.3 Energetische Bewertung nach Energie-Einsparverordnung

Vor dem Hintergrund des ökologisch und politisch immer wichtiger werdenden Aspekts der Schonung nicht erneuerbarer Energieressourcen und des Klimaschutzes, hat die Bundesregierung am 21. November 2001 eine Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) im Bundesgesetzblatt verkündet [EnEV, 2001]. Die EnEV ist seit 1. Februar 2002 in Kraft. Sie ersetzt die bis zu diesem Zeitpunkt getrennt in der Wärmeschutzverordnung und Heizungsanlagenverordnung behandelten Inhalte und bietet durch die Zusammenfassung der beiden Verordnungen erstmals einen ganzheitlichen Ansatz zur Ermittlung der energetischen Effizienz eines Gebäudes. Die Energie-Einsparverordnung fordert, dass in Zukunft bei der Planung von Gebäuden ein

---

strengerer Maßstab bei der Umsetzung eines ganzheitlichen Energiekonzeptes anzulegen ist. Dieser neue integrierte Ansatz der Verordnung erlaubt Bauherrn und Planern die verschärften energetischen Zielvorgaben nach eigener Entscheidung entweder stärker über den baulichen Wärmeschutz oder stärker über die Anlagentechnik oder mit einer Kombination aus beiden Bereichen zu erfüllen. Die so erhaltene Flexibilität in der Planung erfordert jedoch eine frühzeitige Einschätzung der Auswirkungen von Änderungen der einzelnen Parameter und damit die Durchführung von vergleichenden Rechnungen.

Grundlage der Berechnungen nach EnEV bilden die beiden Regelwerke DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10. Erstere dient dabei zur Berechnung des Jahresheizwärmebedarfes in Abhängigkeit von den bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäudehülle (Transmissionswärme-, Lüftungs-, Wärmebrücken-Verluste sowie Solare und innere Gewinne). Die zweite Norm dient zur Berechnung der Anlagentechnik und der energetischen Bewertung des Gesamtgebäudes. Die energetische Bewertung erfolgt dabei durch Multiplikation der von dem gesamten Gebäude benötigten Energiemengen (Nutzwärme zuzüglich Verluste, getrennt nach Wärme- und Hilfsenergie) mit dem Deckungsanteil des jeweiligen Erzeugers, der Erzeugeraufwandszahl und dem Primärenergiefaktor der Energiequelle. Die Primärenergiefaktoren sind in der DIN V 4701-10 fest vorgegeben und wurden unter Berücksichtigung sämtlicher Vorketten aus den Stammdatensätzen von GEMIS (vgl. Kapitel 3.1.2) ermittelt. Der Einfluss von Wärmeenergie aus erneuerbaren Quellen wird in den Erzeugeraufwandszahlen berücksichtigt. Aufgrund der Berechnungsmethodik der DIN V 4701-10 entspricht daher der Primärenergiebedarf dem kumulierten Energieaufwand aus nicht erneuerbaren Energiequellen (vgl. Kapitel 2.4.1).

### **3.4 Produktmodellierung**

Bevor komplexe Produkte hergestellt werden erfolgt in der Regel zunächst eine Beschreibung des Produktes durch Modelle. Bei Produkten bei deren Herstellung verschiedene Gruppen verschiedene Teilbereiche abdecken, werden meist auch nur jeweils den entsprechenden Teilbereich abdeckende Modelle erstellt. Dies ist derzeit vor allem Bereich des Bauwesens der Fall, da dort die unterschiedlichsten Gewerke an der Herstellung eines einzigen Produktes, dem Gebäude, beteiligt sind. Für die Berechnungen zur Statik werden statische Modelle des Gebäudes erstellt, während zur Planung der Architektur Modelle mit dem Fokus auf die geometrischen Aspekte benötigt werden. Dabei stellt jedes einzelne Modell eine Abstraktion des realen Gebäudes dar, wobei jeweils nur die vom jeweiligen Fachplaner benötigten Informationen enthalten sind. Das Modell als solches bleibt dabei immer ein „imperfektes, für das Einsatzgebiet zugeschnittenes Abbild“ [Kowalczyk, 1997]. In der Baupraxis müssen jedoch für die Erstellung und den Unterhalt eines Bauwerks die verschiedenen beteiligten Fachplaner und Firmen zusammenarbeiten. Dies bedeutet,

---

dass auch die jeweils verwendeten Modelle zwischen den Kooperierenden Parteien ausgetauscht werden müssen.

Heutzutage werden im Bauwesen hauptsächlich CAD-Systeme verwendet, um Pläne und Informationen über ein Gebäude bereitzustellen. Damit die Modelle durch Computer dargestellt werden können, ist es aber notwendig sogenannte Metamodelle zu definieren. Diese sind Modelle zur Beschreibung eines Modells. Meist werden die einzelnen fachspezifischen Modelle jedoch auf der Basis unterschiedlicher CAD-Plattformen erstellt, welche wiederum unterschiedliche Metamodelle verwenden. Somit ist eine Kommunikation und der direkte Datentransfer zwischen den einzelnen Modellen in der Regel unmöglich. Dies hat zur Folge, dass die das Gebäude beschreibenden Daten mehrfach in den verschiedenen Modellen enthalten sind. Kommt es zu Änderungen des Entwurfes können daraus uneinheitliche Informationsstände, sogenannten Dateninkonsistenzen entstehen. Um dieses Problem zu lösen, sind grundsätzlich zwei Lösungsansätze denkbar. Zum einen eine Standardisierung der im Bauwesen verwendeten Software. Dies hätte jedoch mehrere Nachteile. Zunächst müsste eventuell von staatlicher Seite aus geregelt werden, welche Software zu verwenden ist. Dadurch ist die Gefahr gegeben, dass auf dem Softwaremarkt für Bauprodukte die Monopolbildung begünstigt wird. Des Weiteren würden einigen Firmen immense Kosten durch die Anschaffung der neuen Software und der benötigten Hardware entstehen. Auch müssten die Benutzer wieder neu für diese Software geschult werden. Zusätzlich wäre ein solch staatliches Diktat im Widerspruch zu den Gesetzen und Vorschriften in der freien Marktwirtschaft. Dieser Lösungsansatz scheidet also von vorneherein aus.

Die zweite Lösung sieht die Bestimmung eines kleinsten gemeinsamen Nenners sämtlicher Modelle vor. Dabei könnten alle Unternehmen durch den Einsatz ihrer gewohnten Programme am effizientesten arbeiten. Dieser Ansatz wird zur Zeit allgemein befürwortet. Der fundamentale Gedanke dabei ist die Generierung eines einzigen umfassenden Modells, das sämtliche im Bauwesen eingesetzten Einzelmodelle zusammenfasst. Dieses wird Produktmodell genannt.

Das Produktmodell enthält damit nicht nur die Daten zum Design und zur Herstellung eines Gebäudes, sondern vielmehr alle Informationen, die während des Entstehungsprozesses und des weiteren Lebenslaufs anfallen. Das Produktmodell ist somit eine „Beschreibung aller für die Produktion des Objektes relevanten Eigenschaften“ [Heinecke, 1994]. Die Stimmigkeit der Daten ist dabei durch die Vermeidung einer mehrfachen Datenhaltung sichergestellt. Ein zusätzlicher Vorteil des Produktmodells ergibt sich aus dem Umstand, dass sämtliche Informationen über ein Projekt, die dem Modell einmal hinzugefügt wurden zu einem späteren Zeitpunkt wieder verfügbar sind. Damit erhöht sich die Produktivität im Planungsprozess. Die verschiedenen Fachplaner und andere am Projekt Beteiligte können auf schon vorhandene Daten zurückgreifen.

---

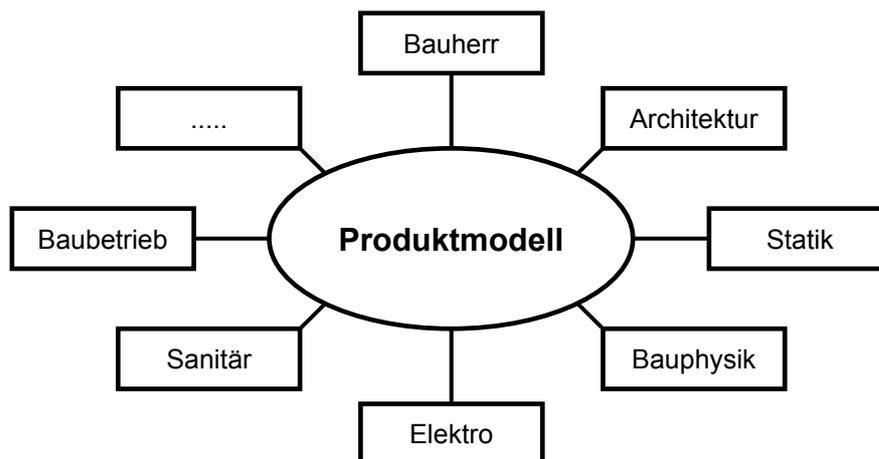


Abbildung 11: Lage des Produktmodells zwischen den Projektbeteiligten

### 3.4.1 Das Produktmodell der IAI

Die „International Alliance For Interoperability“ (IAI) ist ein gemeinnützige Bündnis, das aus einem losen Zusammenschluss führender Firmen in den USA entstand. Im Jahr 1995 wurde die IAI zu einer öffentlichen Organisation, der beliebige Firmen auf der ganzen Welt beitreten können. Die IAI berücksichtigt alle im Baubereich tätigen Organisationen und Personen wie Ingenieure und Architekten, Bauunternehmen, Bauherren, Vertragsunternehmer, Verwaltungsfirmen, Softwareentwickler, Dienstleister, öffentliche Stellen, Forschungs-Labors und Universitäten [IAIWEB, 2003]. Sie arbeitet als eine nicht profitorientierte Organisation. Die breite Palette von unterschiedlichen Beteiligten trägt dazu bei, dass viele verschiedene Sichtweisen auf ein Gebäudemodell berücksichtigt werden. Das Ziel der IAI ist die Steigerung der Produktivität im Planungsprozess und die Vermeidung von Fehlern durch Inkonsistenz in Informationen. Mit den „Industry Foundation Classes“ (IFC) wird dabei versucht einen Standard zu schaffen, der während der Lebensdauer eines Projekts als einheitliche Basis für einen Datenaustausch innerhalb der Bauindustrie dient. Die IFC stellen somit eine vielversprechende Möglichkeit dar, ein Produktdatenmodell zu definieren.

Durch die IFC legt die IAI fest, wie einzelne Bauteile eines Gebäudes computerorientiert darzustellen sind [IAIWEB, 2003]. Diejenigen Bauteile die gleiche Eigenschaften aufweisen werden dabei zu Klassen zusammengefasst. Zum Beispiel besteht eine Wand in den IFC aus einem eigenständigen komplexen Objekt, welches neben den grundlegenden Daten einer Wand wie Volumen, Fläche und Schichten auch über Informationen darüber besitzt ob sich andere Bauteile wie Fenster und Türen in ihr befinden. In einem Gebäudemodell gibt es jedoch mehrere Wände. Jedes dieser Bauteile wird aber aus ein und derselben Klasse der IFC erstellt. Die einzelnen Wände sind somit Objekte ihrer Klasse, welche bei der Erstellung jeweils einen weltweit (statistisch) eindeutigen Objekt-Identifizierer (GUID, Globally Unique

Identifiziert) zugeordnet bekommen. Durch diese sind sie während ihrer gesamten Lebensdauer eindeutig identifizierbar. Die Wertebelegung der Attribute der Objekte können und werden im Detail voneinander abweichen (zum Beispiel Länge, Höhe, Anzahl der Schichten etc.). Dieser objektorientierte Ansatz zur Beschreibung von Gegenständen als auch von Prozessen erlaubt es der IAI, einen einheitlichen Standard für den Datenaustausch zu formulieren.

Softwareentwickler bedienen sich der IFC, um damit eine Schnittstelle in ihre Programme zu implementieren, welche die Möglichkeit bietet, die Daten eines Modells zwischen mehreren unabhängigen Applikationen auszutauschen. Die Sicht auf das Modell kann dabei in allen Anwendungen je nach den Anforderungen des Programms verschieden sein. Dadurch wird es möglich, in einer Anwendung ein Modell so zu erstellen, dass Programme, die mit einer IFC-Schnittstelle ausgestattet sind, die Informationen wieder einlesen und verarbeiten können. Eine in einem „IFC-konformen“ CAD-System erstellte Wand kann also von einem zweiten „IFC-konformen“ Programm in der Weise eingelesen werden, dass die Wand als solche auch erkannt wird. Ob dabei allerdings sämtliche Daten der Wand oder nur ein Teil eingelesen wird, hängt von der Sicht des einlesenden Programms ab. Die Anwendung ist jedoch grundsätzlich in der Lage, die Informationen über die Wand zu verändern und zu erweitern. Dieses gesamte Konzept unterstützt die Vermeidung der redundanten Datenhaltung und erreicht damit eine sehr hohe Informationskonsistenz. Für Daten, die nach den IFC aufgebaut werden, besteht die Möglichkeit, ihre Informationen durch eine Schnittstelle anderen Anwendungen zur Verfügung zu stellen. Die Daten können durch ein Netzwerk, per E-Mail oder einen physikalischen Datenträger (z.B. Diskette, CD) ausgetauscht werden. Dazu definiert die Datendefinitionssprache EXPRESS (ISO 10303 Teil 11) als abstrakte Beschreibung des Produktmodells den Inhalt einer IFC-Datei. Diese Form des Austausches über eine IFC-Datei (IFC Release 2x) wird zur Zeit in mehreren Anwendungen wie zum Beispiel ALLPLAN (Nemetschek), Architectural Desktop (Autodesk) oder ArchiCAD (Graphisoft) angeboten.

### **3.4.2 Produktmodell-basierte Planung**

Im Rahmen einer modellbasierten Planung eines Bauwerks wird ein dreidimensionales Modell des zukünftigen Bauwerks im Computer erstellt. Von diesem zentralen Datenmodell werden dann alle im Verlauf der Planung benötigten Informationen abgegriffen oder abgeleitet. Dazu gehören z.B. Informationen für die Massenermittlung, die Raumplanung oder die virtuelle Präsentation des zukünftigen Bauwerks. Weiterhin können Plandokumente mit Grundrissen, Schnitten und Ansichten generiert werden (vgl. Abbildung 12). Das Produktmodell enthält nicht nur die zum Entwurf und zur Herstellung eines Gebäudes nötigen Daten, es kann auch um alle Informationen ergänzt werden, die während des Entstehungsprozesses und der Gebäudenutzung anfallen. Die Konsistenz der Daten ist dabei durch redundanzfreie Datenhaltung sichergestellt.

---

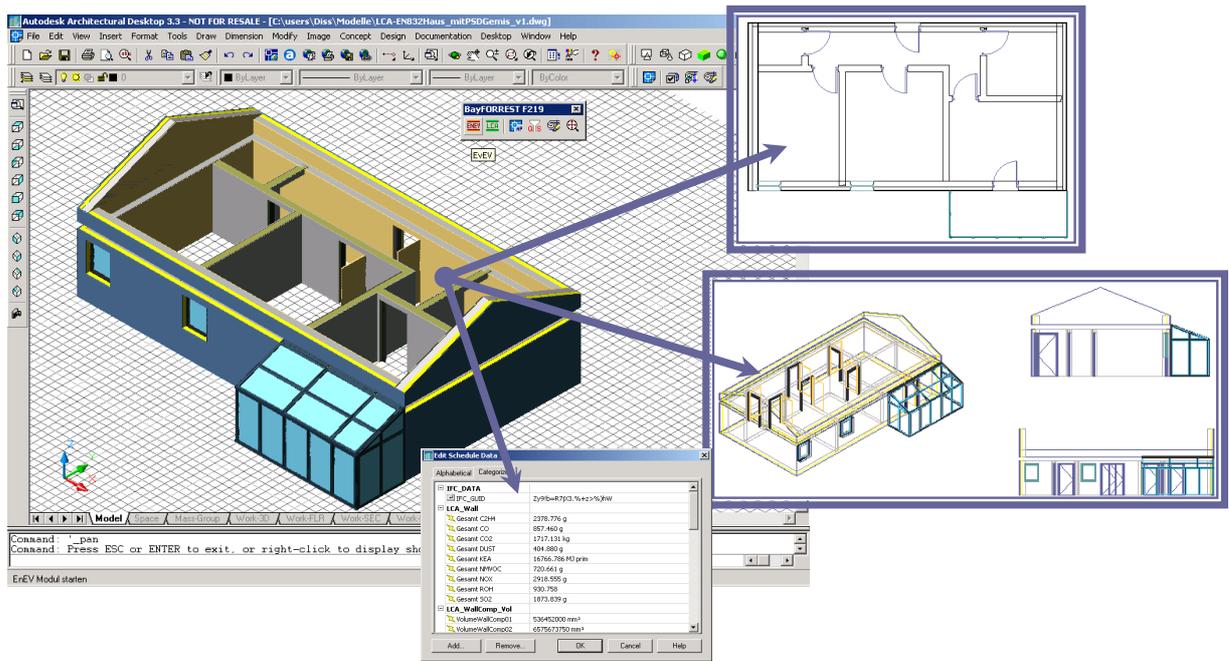


Abbildung 12: Modellbasierte Planung im Architectural Desktop

---

## 4 ENTWICKLUNG DER DATENBASIS

### 4.1 Ökologische und bauphysikalische Datengrundlage

Grundlage für eine ökologische Analyse eines Gebäudes ist eine Datenbank, in der die ökologischen und bauphysikalischen Daten von Baustoffen enthalten sind. Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, existieren jedoch verschiedene Ökoinventare, die zum Teil aus kleineren Einzelerhebungen zu bestimmten Baustoffgruppen stammen oder das Ergebnis einer Kooperation verschiedener Institutionen über einen längeren Zeitraum darstellen. Der Umfang der ermittelten Daten zu Emissionen und Ressourcenverbrauch variiert dabei zwischen den einzelnen Inventaren. Zudem basieren diese meist auf einer unterschiedlichen Wahl der Systemgrenzen. Damit sind deren Ergebnisse untereinander nur schwer vergleichbar. Eine Ausnahme bilden dabei die Ökoinventare ECOINVENT 2000 und GEMIS. Diese basieren ihrerseits zwar auf den Ergebnissen verschiedener Einzelerhebungen, jedoch wurde bei der Zusammenstellung und Modellierung der einzelnen Daten auf vergleichbare Randbedingungen geachtet. ECOINVENT 2000 stellt dabei eine komplette Revision und Überarbeitung früherer von verschiedenen Schweizer Forschungseinrichtungen entwickelten Ökoinventaren dar (vgl. Kapitel 3.1). Die Arbeiten an ECOINVENT 2000 wurden erst am 25. September 2003 abgeschlossen, was eine Verwendung dieses Inventars im Rahmen dieser Arbeit daher nicht mehr ermöglicht hat.

Die Grunddaten in GEMIS stammen ebenfalls aus verschiedenen Quellen. Zum einen aus dem von den Universitäten Karlsruhe, HAB Weimar und der ETH Zürich entwickelten Ökoinventar [ifib, 1995]; zum anderen aus dem Projekt GaBiE der Forschungsstelle für Energietechnik FfE in München [GaBiE, 1999], verschiedenen Untersuchungen des Umweltbundesamtes und eigenen Erhebungen des Öko-Institutes und der Gesamthochschule Kassel. GEMIS ist eine Datenbank mit Bilanzierungs- und Analysemöglichkeiten für Lebenszyklen von Energie-, Stoff- und Transportprozessen sowie ihrer beliebigen Kombination. Dies bedeutet, dass von der Primärenergie- bzw. Rohstoffgewinnung bis zur Nutzenergie bzw. Stoffbereitstellung alle wesentlichen Schritte berücksichtigt werden. Auch der Hilfsenergie- und Materialaufwand zur Herstellung von Energieanlagen und Transportsystemen wird miteinbezogen. In der aktuellen Version GEMIS 4.13 sind derzeit über 5.000 Prozesse modelliert, darunter auch eine Vielzahl zur Bereitstellung verschiedener Baustoffe und Bauteile, Anlagen zur Gewinnung von Raumwärme und zur Bereitstellung von elektrischem Strom. Weiterhin ist es möglich, eigene Prozesse zu definieren und mit anderen zu kombinieren. Aus einzelnen bereits in der Standard-Datenbank von GEMIS vorhandenen Baustoffprozessen können komplexe Bauteile modelliert und bilanziert werden. Die mit GEMIS ausgelieferte Standard-Datenbank wird zusätzlich laufend mit aktuellen Datensätzen durch das Öko-Institut ergänzt und ausgebaut. Für sämtliche Prozesse in GEMIS sind die folgenden Informationen enthalten oder werden direkt berechnet:

---

- Kenndaten zu Nutzungsgrad, Leistung, Auslastung, Lebensdauer
- direkte Luftschadstoffemissionen (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Staub, CO etc.)
- Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O sowie SF<sub>6</sub> und FKW)
- feste Reststoffe (Asche, Entschwefelungsprodukte, Klärschlamm, Produktionsabfall, Abraum)
- flüssige Reststoffe (AOX, BSB<sub>5</sub>, CSB, N, P, anorganische Salze)
- Flächenbedarf

Aufgrund dieser umfangreichen ökologischen Daten zu einer Vielzahl von Baustoffen und Anlagen sowie der Möglichkeit eigene Prozesse zu modellieren, wurde GEMIS als Grundlage zur Erstellung der Datenbank ausgewählt. Die ökologischen Informationen wurden dabei zusätzlich ergänzt durch die bauphysikalischen Informationen zu Masse, Wärmedämmeigenschaften und Lebensdauer.

#### 4.2 Berechnungen in GEMIS – Randbedingungen

Für Berechnungen in GEMIS ist es möglich, verschiedene Randbedingungen mittels sogenannter Globalschalter selbst einzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für sämtliche Berechnungen alle Globalschalter aktiviert. Dies hat die folgenden Auswirkungen auf den Rechengang:

- Eventuelle Materialvorleistungen zum Bau aller Prozesse werden berücksichtigt. Beispiel: bei Emissionsberechnung zur Bereitstellung von Raumwärme durch eine Gasheizung werden auch die Emissionen aus der Herstellung der Gaspipeline, der Gas-Aufbereitung usw. berücksichtigt.
  - Nichtstationäre Transporte werden berücksichtigt. Beispiel: vorgelegte Transporte von Materialien zur Herstellung eines Baustoffes.
  - Gutschriften für gekoppelt erzeugten Strom oder Wärme werden berücksichtigt. Beispiel: erzeugt ein Kraft-Wärme-Kopplung System Strom erhält es eine Wärmegutschrift.
  - Der Nutzungsgrad von Primärenergie- oder Rohstoffgewinnungsprozessen wird definitorisch zu 100% gesetzt. Beispiel: bei Stromerzeugung mittels Photovoltaikanlagen wird die eingestrahlte Sonnenenergie zu 100% genutzt.
  - Stofflich genutzte Ressourcen werden berücksichtigt. Beispiel: Bei der Herstellung von PUR-Hartschaum werden die eingesetzten Erdgas- und Erdölmengen die nicht als Hilfsenergien dienen, sondern als Material in die Produktion eingehen stofflich im KSA verbucht.
-

- Behandelte oder deponierte Reststoffe werden nicht im Ergebnis berücksichtigt. Beispiel: bei Stromerzeugung durch ein Steinkohlekraftwerk fällt unter Emissionen weniger Asche an da diese ja entsorgt wird. Die im Rahmen der Entsorgung entstehenden Emissionen durch z.B. Transporte werden jedoch im Gegenzug miteinberechnet.

### 4.3 Modellierung von Bauteilen und Anlagen

In der mit GEMIS ausgelieferten Standarddatenbank sind neben den Prozessen zur Herstellung einzelner Baustoffe auch exemplarisch Prozesse für komplette Bauteile enthalten. Die Anzahl an modellierten Bauteilen ist jedoch begrenzt. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben bietet GEMIS jedoch die Möglichkeit selbst neue Prozesse zu erstellen, um damit zusätzliche Bauteilkonstruktionen einzugeben und zu berechnen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher auf Basis von Bauteil-Grundkonstruktionen verschiedene Varianten in GEMIS modelliert und berechnet. Der Schwerpunkt der Variationen lag dabei auf der Materialwahl und der Stärke von Dämmschichten. Diese beeinflussen neben architektonischen Aspekten (z.B. Himmelsausrichtung von Fensterflächen, Form des Baukörpers) maßgeblich den Heizwärmebedarf eines Gebäudes und haben daher über die Emissionen und den Ressourcenbedarf aus Raumwärmegewinnung einen entscheidenden Einfluss auf das ökologische Gesamtverhalten eines Gebäudes. Parallel zu den Berechnungen von Emissionen und Ressourcenbedarf der Bauteile und Baustoffe in GEMIS erfolgte eine Ermittlung der zugehörigen bauphysikalischen Kennwerte. Je nach Bauteiltyp wurde der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  bzw. der Wärmeübergangswiderstand  $R_T$ , sowie die Dichte  $\rho$  bzw. das Flächengewicht ermittelt. Diese Werte werden neben der ökologischen Bilanzierung der Baustoffe und Bauteile auch im Rahmen der energetischen Berechnungen für das Gesamtgebäude nach der Energie-Einsparverordnung [EnEV, 2001] benötigt. Die Wärmeübergangswiderstände vom Bauteil zur Innenluft  $R_{si}$  und zur Außenluft  $R_{se}$  wurden bei der Ermittlung der  $U$ -Werte nicht berücksichtigt, da dies bei der Analyse des Produktmodells in Abhängigkeit von den vorhandenen Randbedingungen des Gebäudes mit dem Softwaretool „EnEV“ erfolgt (vgl. Kapitel 6.2.2). Im Anhang A 2 sind die den modellierten Bauteilkonstruktionen zugrundeliegenden Daten der einzelnen Schichten angegeben.

---

### 4.3.1 Bodenplatten

Der grundlegende Aufbau der modellierten Bodenplatten ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Modellierung erfolgte unter Variation von Materialart und Dicke der Perimeterdämmung, wobei alle anderen Schichten unverändert blieben. Als Materialvarianten der Perimeterdämmung wurde beidseitig mit Vlies kaschierter Polyurethan-Hartschaum (PUR), Expandiertes Polystyrol (EPS) und Schaumglas berücksichtigt. Die Dämmstärken variierten in einem Bereich von 40 bis 160 mm.

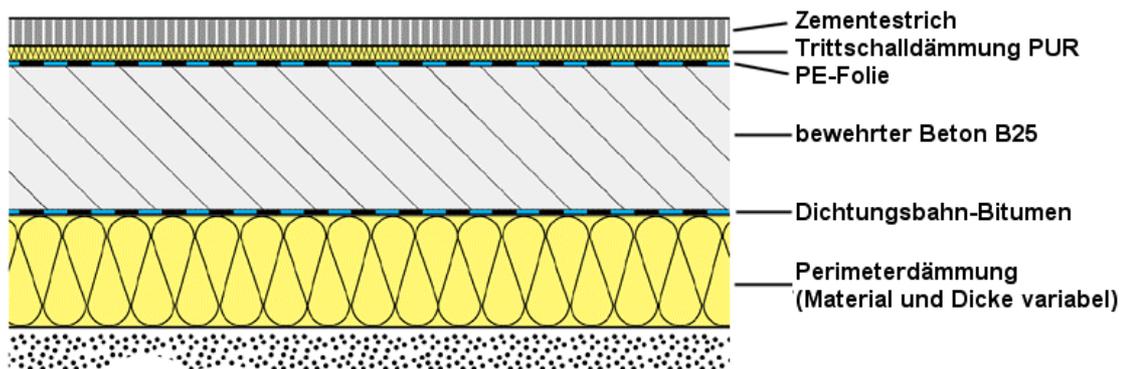


Abbildung 13: Aufbau der in GEMIS berechneten Bodenplatten

### 4.3.2 Geschossdecken

#### Beton-Geschossdecke

In Abbildung 14 ist der Grundaufbau der Beton-Geschossdecken dargestellt. Neben der Variation der Dämmung hinsichtlich Material und Stärke erfolgte auch eine Berücksichtigung zweier unterschiedlicher Stärken der Betonschicht mit 14 und 20 cm. Als Dämmung wurde PUR-Hartschaum, EPS und Steinwolle mit Dicken von 20 bis 280 mm modelliert. Zusätzlich wurden Varianten mit einer Kombination aus 40 mm Perlite mit einer 8 mm Holz-Weichfaserplatte, sowie alleiniger Verwendung einer Holzweichfaserplatte (20 bis 60 mm) berechnet. Durch die Varianten mit sehr niedrigen Dämmstoffstärken können neben Geschossdecken zu unbeheizten Zonen auch Geschossdecken innerhalb einer beheizten Zone abgebildet werden. Die Dämmschicht erfüllt dann lediglich eine Funktion als Trittschalldämmung.

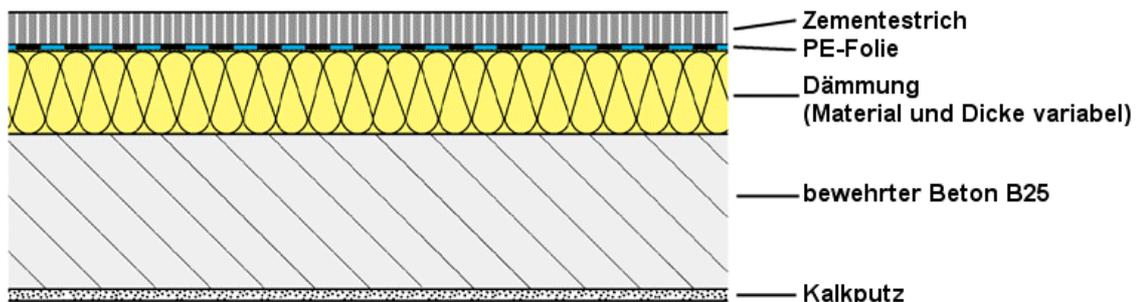


Abbildung 14: Grundaufbau der Beton-Geschossdecken

### Holz-Geschossdecke

Analog zu den Beton-Geschossdecken erfolgte auch hier eine Variation der Dämmstoffdicken und der Materialart. Neben PUR-Hartschaum wurden auch Steinwolle sowie EPS mit Dämmstärken zwischen 80 und 320 mm betrachtet. Die Sparren (Querschnitt 10/16) wurden dabei mit einem Abstand von 80 cm definiert. Die Grundkonstruktion der modellierten Holz-Geschossdecken ist in folgender Abbildung dargestellt.

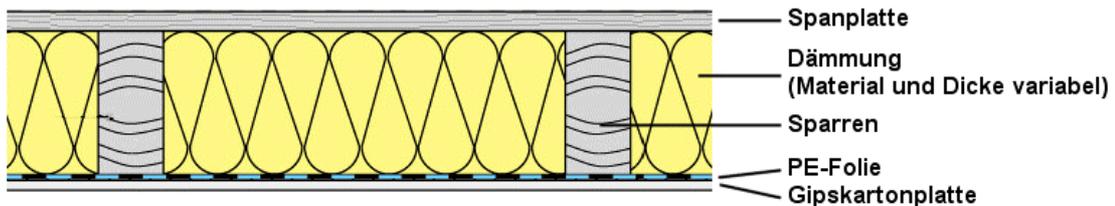


Abbildung 15: Grundaufbau der Holz-Geschossdecken

### 4.3.3 Dächer

#### Flachdach

Wie in Abbildung 16 zu sehen besteht der Grundaufbau der Flachdachkonstruktion im wesentlichen aus einer bewehrten Betondecke mit außenliegender Wärmedämmung und Kiesschüttung. Als Dämmstoffalternativen wurden EPS, PUR-Hartschaum sowie Schaumglas berücksichtigt. Die Dicke der Dämmschicht variierte dabei zwischen 100 und 240 mm.

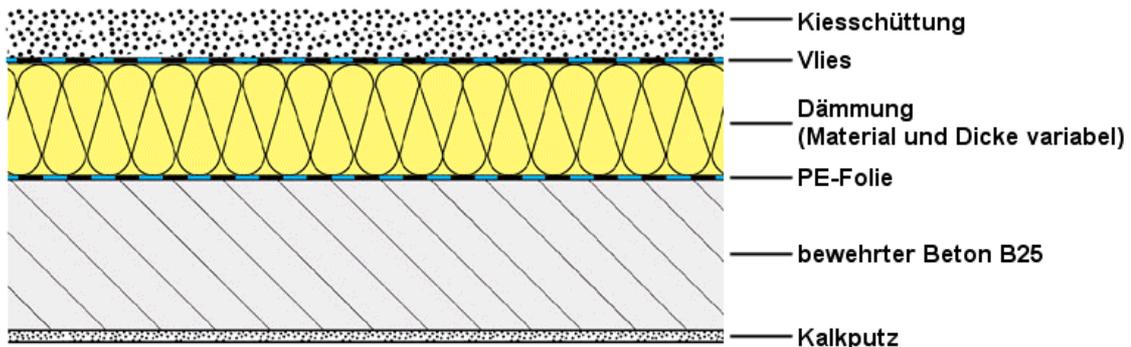


Abbildung 16: Grundaufbau der Flachdächer

#### Steildach mit Aufsparrendämmung

Im Gegensatz zu den Bodenplatten, Geschossdecken und Flachdächern erfolgte bei den Steildächern zusätzlich zur Variation der Dämmung auch eine Variation der Dachdeckung. Als Dachdeckung wurde dabei Dachstein (Pfanne) und Ziegel (Pfanne, Biberschwanz, Mönch und Nonne) mit entsprechender Trag- und Konterlattung berücksichtigt. Analog zu den in der GEMIS-Standarddatenbank vorhandenen Steildach-Konstruktionen wurde der Materialinput durch Metalle

(Dachrinnen, etc.) zu 1,1 kg Zink je Quadratmeter Dachfläche abgeschätzt. Der Abstand der Sparren (Querschnitt 10/16) liegt bei 80 cm. Der Grundaufbau der Steildächer mit Aufsparrendämmung ist in folgender Abbildung dargestellt.

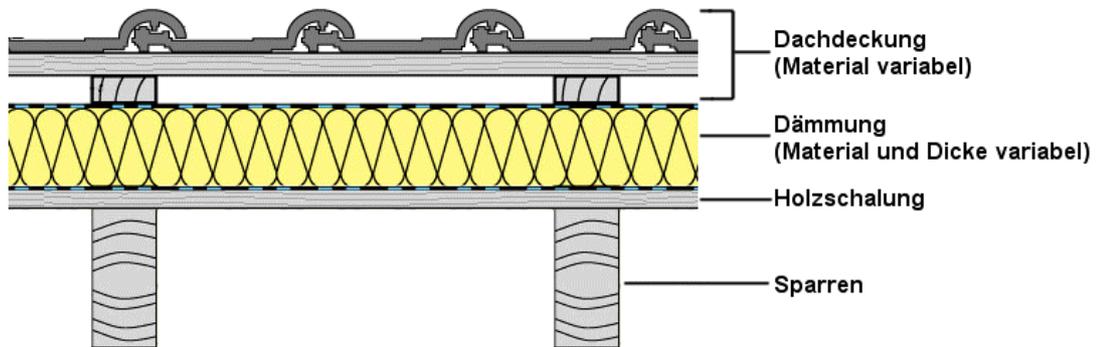


Abbildung 17: Grundaufbau der Steildächer mit Aufsparrendämmung

Die Dicken der Aufsparrendämmung liegen im Bereich zwischen 120 und 240 mm. Als Dämmstoffvarianten wurden PUR-Hartschaum mit beidseitiger Aluminium Kaschierung, Steinwolle mit oberseitigem diffusionsoffenem Vlies und unterseitiger Dampfbremse aus PE-Folie, sowie EPS mit unterseitiger Dampfbremse aus PE-Folie berücksichtigt.

#### Steildach mit Vollsparrendämmung

Analog zu den Steildächern mit Aufsparrendämmung wurden auch hier die Dachdeckungen variiert. Als Dämmstoff wird hier jedoch grundsätzlich Glaswolle der WLG 035 gewählt. Eine weitere Unterscheidung erfolgt in Konstruktionen mit und ohne zusätzlicher Untersparrendämmung. Die Untersparrendämmung besteht aus einer 4 cm starken Glaswollschicht. Der Materialinput durch Metalle wurde wie bei den Steildächern mit Aufsparrendämmung zu 1,1 kg Zink je Quadratmeter Dachfläche abgeschätzt. In den folgenden beiden Abbildungen sind die Grundkonstruktionen der Vollsparren-Steildächer dargestellt. Analog zu den Steildächern mit Aufsparrendämmung liegt der Sparrenabstand bei jeweils 80 cm, wobei jedoch hier die Sparrenhöhe der jeweiligen Dämmschichtdicke angepasst wurde. Die Dicke der Dämmschicht variiert zwischen 140 mm und 240 mm.

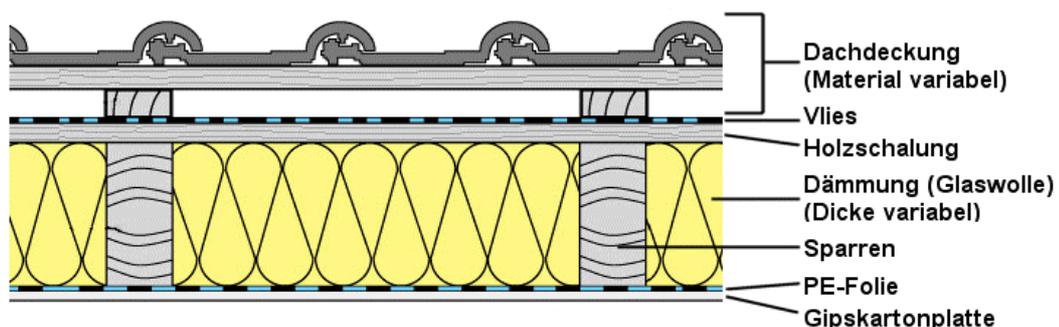


Abbildung 18: Steildach-Vollsparrendämmung ohne Untersparrendämmung

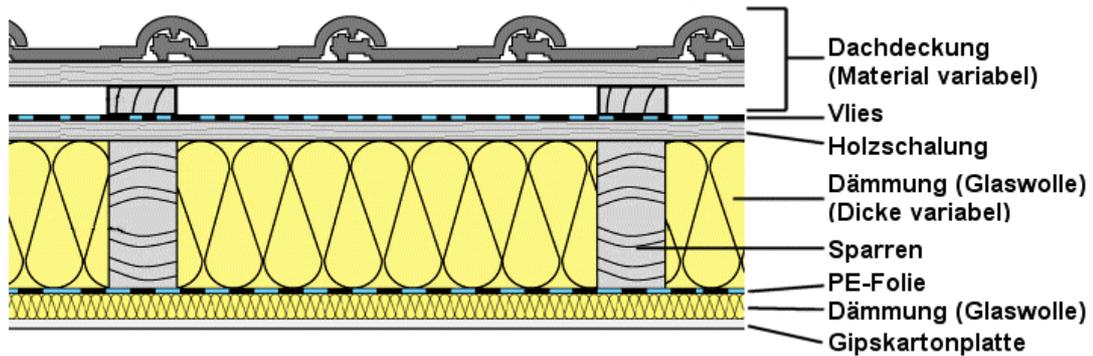


Abbildung 19: Steildach-Vollsparrengedämmt mit Untersparrendämmung

#### 4.3.4 Fenster

In der GEMIS-Standarddatenbank sind zur Berechnung der Emissionen und des Ressourcenbedarfs aus der Herstellung von Fenstern bereits verschiedene Prozesse definiert. Darin wird grundsätzlich zwischen den Rahmenmaterialien Holz und PVC unterschieden. Für jede Materialart der Rahmen wird nochmals in Standardfenster und gedämmte Fenster unterteilt. Bei Standardfenstern wird von einem Glasanteil von 20 kg je Quadratmeter Fensterfläche ausgegangen. Bei den gedämmten Fenstern von 30 kg je Quadratmeter Fensterfläche. Ausgehend von einer Dichte des Glases von  $2500 \text{ kg/m}^3$  ergibt sich daraus für die Standardfenster eine 2-fach Verglasung mit einer Scheibenstärke von 4 mm. Für die gedämmten Fenster kann von einer 3-fach Verglasung mit ebenfalls 4 mm starken Scheiben ausgegangen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden in GEMIS keine neuen Prozesse für Fenster definiert, sondern die vorhandenen der Standard-Datenbank verwendet. Da in GEMIS jedoch keine Angaben zum Wärmedämmverhalten der modellierten Fenster enthalten sind, werden dazu die nachfolgend beschriebenen Annahmen getroffen.

Nach [EN ISO 10077-1] ermittelt sich der Wärmedurchgangskoeffizient  $U_w$  für ein Fenster in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten  $U_g$  der Verglasung und  $U_f$  des Rahmens. Für PVC-Rahmen kann danach ein  $U_f$ -Wert von 2,0 bis 2,2  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  angenommen werden. Verschiedene Hersteller von PVC-Fenstern geben jedoch auch  $U_f$ -Werte bis 1,2  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  an. Bei den Holzrahmenfenstern wird nach Norm in Weichholz und Hartholz unterschieden. Da in GEMIS für die Berechnung der Holzrahmen ein Prozess zur Bereitstellung von Schnittholz aus Fichte verwendet wird, ist für die Ermittlung des  $U_f$ -Wertes von Weichholz auszugehen. Neben der Abhängigkeit des  $U_f$ -Wertes von der Holzart hat auch die Rahmendicke einen Einfluss. Nach [Ziegel, 2002] liegen die Rahmendicken bei Holzfenstern üblicherweise bei 66 mm, bei Einsatz von 3-fach Verglasungen bei durchschnittlich 95 mm. Damit ergibt sich aus [EN ISO 10077-1] ein durchschnittlicher  $U_f$ -Wert von 1,8  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  für 2-fach und von 1,5  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  für 3-fach verglaste Holzfenster. Jedoch sind auch  $U_f$ -Werte von 1,0  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  bei

entsprechend größeren Rahmendicken zu erreichen. Die Größe des  $U_g$ -Wertes der Verglasung hängt zum einen von der Art des Gaszwischenraumes (Luft, Argon,  $SF_6$  etc.) ab, zum anderen wie breit der jeweilige Gaszwischenraum zwischen den einzelnen Scheiben ist. Außerdem spielt die Art der Beschichtung der Gläser eine Rolle. Da in GEMIS diesbezüglich keine Angaben enthalten sind werden die in der folgenden Tabelle angegebenen Annahmen zu den Wärmedämmeigenschaften der Fenster zugrundegelegt. Dabei werden bewusst auch sehr niedrige  $U_w$ -Werte angenommen, um bei einem Variantenstudium den Einfluss hochdämmender Fenster auf den Energieverbrauch eines Gebäudes simulieren zu können.

*Tabelle 9: Wärmedämmeigenschaften der modellierten Fenster*

Rahmen	Verglasung	$U_g$ W/(m <sup>2</sup> *K)	$U_f$ W/(m <sup>2</sup> *K)	$U_w$ W/(m <sup>2</sup> *K)
PVC	2-fach	2,7	1,8	2,5
		1,9		2,0
		1,2		1,5
	3-fach	2,2	1,2	2,0
		1,5		1,6
		1,0		1,2
		0,7		1,0
Holz	2-fach	2,7	1,8	2,5
		1,9		2,0
		1,2		1,5
	3-fach	2,3	1,0	2,0
		1,6		1,6
		1,1		1,2
		0,5		0,8

#### 4.3.5 Mauersteine

Die Standarddatenbank von GEMIS enthält bereits Prozesse für verschiedene Mauersteine und auch für Mörtel. In der derzeit verfügbaren Version des Modellierungswerkzeuges ADT 3.3 (vgl. Kapitel 6.1.1) ist es jedoch nicht möglich Mauersteine und Mörtel als getrennte Objekte im Produktmodell abzubilden. Die Wärmedämmeigenschaften einer Mauerschicht hängen jedoch maßgeblich von der Kombination aus Mauerstein und Mörtel ab. Daher wurden in GEMIS neue Prozesse unter Berücksichtigung beider Baustoffe modelliert und berechnet. Mit den zusätzlich

ermittelten bauphysikalischen Daten der verschiedenen Mauerstein-Mörtel Kombinationen wird es damit ermöglicht, diese als komplettes Bauteil in das Produktmodell zu importieren. In der folgenden Tabelle sind die für die Datenbank berechneten Kombinationen aus Mauerstein und Mörtel angegeben.

*Tabelle 10: Modellierte Mauerstein-Mörtel Kombinationen*

Mauerstein	Stein-Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Mörtelart	Mörtelbedarf [l/m <sup>3</sup> ]
Kalksandstein (Planstein)	1000 bis 2200	DB	6,0
Leichtbeton Hohlblock / Vollblock	500 bis 1200	NM	64
	500 bis 800	LM21	
		LM36	
Leichtbeton Vollstein	500 bis 1200	NM	146
	500 bis 1000	LM21	
		LM36	
Ziegel (Planziegel)	600 bis 1000	DM	6,0
Ziegel (Vollziegel)	1200 bis 2400	NM	125
Ziegel (Zahnziegel)	600 bis 1000	NM	75
		LM21	
		LM36	
Ziegel (Normalziegel)	600 bis 1000	NM	125
		LM21	
		LM36	
Porenbetonstein	400 bis 800	DB	6,0

#### 4.3.6 Anlagen zur Raumwärmegewinnung

Für verschiedene Anlagen zur Gewinnung von Raumwärme und Warmwasser sind in der Standarddatenbank des Programmsystems GEMIS Datensätze zur Ermittlung von Emissionen und Ressourcenverbrauch enthalten. Diese beinhalten neben den entsprechenden Energieträgern (z.B. Öl, Gas, Holz etc.) auch die Materialleistungen zur Herstellung der Anlagen (z.B. Stahl, Kunststoff etc.) sowie den Hilfsenergiebedarf (el. Strom). Bei einer Berechnung der Emissionen und des Ressourcenverbrauch aus der Bereitstellung von Raumwärme durch eine Öl-Zentralheizung wird also in GEMIS neben dem Verbrennungsprozess auch die Herstellung des Heizöls, der Transport zum Verbraucher, die Herstellung der Heizungsanlage und der benötigte

Hilfsstrom zum Betrieb der Anlage berücksichtigt. Infolge der Berechnungssystematik innerhalb des Programmsystem GEMIS konnten jedoch diese Standardprozesse nicht direkt und ohne Modifikationen in die hier entwickelte Datenbank übernommen werden. Weiterhin sind in der GEMIS-Standarddatenbank keine Raumluftechnischen Anlagen berücksichtigt. Diese werden jedoch in modernen Gebäuden vermehrt eingesetzt. Es mussten daher die in GEMIS vorhandenen Prozesse zur Gewinnung von Raumwärme modifiziert und zusätzlich eine Modellierungsmöglichkeit von Raumluftechnischen Anlagen innerhalb des Produktmodells entwickelt werden.

### *Heizungsanlagen*

Die durch Materialeinsatz beim Bau von Heizungsanlagen entstehenden Umwelteffekte werden in den vorhandenen GEMIS-Datensätzen bilanziert, indem die bei einer Anlage nachgefragte Energiemenge ins Verhältnis zu der während ihrer Lebensdauer bereitgestellten Energiemenge gesetzt wird. Die während der Lebensdauer einer Anlage umgesetzte Energiemenge ergibt sich dabei durch Multiplikation von installierter Leistung, Lebensdauer und jährlicher Betriebszeit (in Volllaststunden). Die Kennwerte der Anlage sowie die Materialleistungen können dabei in GEMIS modifiziert werden. Die dort vorgegebenen Ausgangswerte für den Materialverbrauch stellen jedoch nur eine grobe Abschätzung dar. Zusätzlich ändern sich die in GEMIS berechneten Emissionen und der Ressourcenverbrauch bei Änderung der nachgefragten Raumwärme sowie der Auslegungsdaten der Heizungsanlage, wie zum Beispiel Anlagenleistung, Nutzungsdauer oder Lebensdauer. Aus diesen Gründen wurde bei den Berechnungen mit GEMIS für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Datenbank auf eine Berücksichtigung der Emissionen und des Ressourcenbedarfs aus der Herstellung der Heizungsanlagen verzichtet. In den entsprechenden Eingabefeldern in GEMIS werden daher alle Einträge der Stofflieferanten zur Herstellung der Anlagen zu Null gesetzt.

Heizungssysteme benötigen für die Bereitstellung von Raumwärme auch Hilfsenergie in Form von elektrischen Strom für Pumpen, Brenner und andere Bauteile. Dieser Hilfsenergieeinsatz wird in GEMIS durch einen spezifischen Strombedarf je kWh bereitgestellter Raumwärme berücksichtigt. In den Standard-Datensätzen der Heizungsanlagen wird dabei jedoch nur Strom aus einem Kraftwerksmix für Deutschland berücksichtigt. Dieser setzt sich aus einer Mischung verschiedener Energieträger wie Kohle, Atom, Müll oder Wind zusammen. Eine Unterscheidung in Strom aus regenerativen und nicht regenerativen Energiequellen erfolgt nicht. Soll nun im Rahmen einer Variantenstudie für ein Gebäude der Einfluss des Anteils von Hilfsstrom aus erneuerbaren Energieträgern untersucht werden, wären zunächst sämtliche Kombinationen für Strom aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energiequellen in GEMIS durchzurechnen und anschließend in die hier entwickelte Datenbank einzugeben. Ein Planer müsste dann beim Import der Daten in das Produktmodell eine umfangreiche Liste von identischen Heizungssystemen mit

---

lediglich unterschiedlichen Strommixen durchsuchen und den für seine Simulationsrechnungen gewünschten Prozess auswählen. Um diese Problematik zu umgehen wurde daher die Hilfsenergie in GEMIS aus den Heizungsprozessen herausgelöst und getrennt betrachtet. Dies bedeutet dass in GEMIS für die Heizungsprozesse zunächst lediglich die Emissionen und der Ressourcenverbrauch aus der Bereitstellung des entsprechenden Heiz-Energieträgers und dessen Umwandlung in Raumwärme ermittelt wurden. Die Berücksichtigung des Hilfsstromverbrauches erfolgt erst wieder innerhalb des in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Softwaremoduls LCA-Chart über einen dem gewählten Anlagentyp zugehörigen spezifischen Hilfsenergiebedarf.

Auf Grundlage der beschriebenen Randbedingungen wurden folgende Heizungs-systeme in GEMIS modelliert und berechnet:

- Gas-Zentralheizung (atmosphärischer Brenner) mit 85 % Nutzungsgrad
- Gas-Zentralheizung (atmosphärischer Brenner) mit 91 % Nutzungsgrad
- Gas-Zentralheizung (Brennwerttechnik) mit 100 % Nutzungsgrad
- Gas-Zentralheizung (Brennwerttechnik) mit 107 % Nutzungsgrad
- Holz-Pellet-Zentralheizung mit 80 % Nutzungsgrad
- Öl-Zentralheizung (atmosphärischer Brenner) mit 85 % Nutzungsgrad
- Öl-Zentralheizung (atmosphärischer Brenner) mit 91 % Nutzungsgrad
- Solarkollektor mit 25 % Wirkungsgrad
- Elektrische Wärmepumpe (Grundwasser) mit einer Jahresarbeitszahl von 5,0
- Elektrische Wärmepumpe (Luft) mit einer Jahresarbeitszahl von 3,8
- Dezentrale Elektro-Nachtspeicher-Heizung mit 99 % Nutzungsgrad

Im Anhang A 3 ist der den einzelnen Anlagen zugehörige Hilfsenergiebedarf sowie eine genauere Beschreibung der Anlagen angegeben.

#### *Lüftungsanlagen*

In [DIN V 4701-10] ist die Methodik zur Berechnung des Beitrages von Lüftungsanlagen zur Deckung des Jahres-Heizwärmebedarfes eines Gebäudes angegeben. Der Jahres-Heizwärmebedarf  $Q_h$  setzt sich dabei aus den Beiträgen der Trinkwassererwärmung  $Q_{h,TW}$ , der Lüftung  $Q_{h,L}$  sowie der Heizung  $Q_{h,H}$  zusammen (jeweils kWh/a). Eine grundsätzliche Modellierungsmöglichkeit der Auswirkungen einer Lüftungsanlage wird durch eine entsprechende Option im Softwaretool gegeben (siehe Abbildung 32). Bei Nutzung dieser Option werden analog zu den Heizungsanlagen keine Emissionen und Ressourcenverbrauch aus der Herstellung der Lüftungsanlage berücksichtigt. Es ist jedoch möglich einen Flächenbezogenen

---

Beitrag einer Lüftungsanlage zur Deckung des Jahres-Heizwärmebedarfes  $q_{h,L}$  sowie einen Flächenbezogenen Hilfsenergie-Bedarf zum Betrieb der Lüftungsanlage  $q_{L,HE}$  nach [DIN V 4701-10] anzugeben und dadurch die grundsätzlichen Auswirkungen einer solchen Anlage zu simulieren. Der Beitrag der Lüftung  $Q_{h,L}$  wird automatisch innerhalb des Softwaremoduls LCA-Chart durch Multiplikation von  $q_{h,L}$  mit der Nutzfläche  $A_N$  des Gebäudes berechnet, welche aus dem Produktmodell abgeleitet wird.

Damit ergibt sich im Softwaremodul LCA-Chart folgende Berechnungsweise des durch die Heizungsanlagen abzudeckenden Anteils am Jahres-Heizwärmebedarf:

$$Q_{h,H} = Q_h - Q_{h,L} - Q_{h,TW}$$

Aus dem Flächenbezogenen Hilfsenergiebedarf der Lüftungsanlage  $q_{L,HE}$  werden unter Berücksichtigung der Nutzfläche  $A_N$  die daraus entstehenden Emissionen und der Ressourcenbedarf ermittelt und in die Bilanz des gesamten Heizungssystems eingerechnet.

#### *Hilfsenergie für Betrieb von Heizung und Lüftungsanlage*

Um die Auswirkungen des Anteils erneuerbarer Energieträger am Hilfsstromverbrauch modellieren zu können, werden in GEMIS zunächst zwei unterschiedliche Strommixe betrachtet. Einmal die Bereitstellung von Strom aus regenerativen und einmal aus nicht erneuerbaren Energiequellen. Die Bereitstellung von Strom beinhaltet dabei die Erzeugung, die Transformation sowie die Leitung zum Endverbraucher. Die Anteile der verschiedenen Energieträger zum jeweiligen Strommix sind in Tabelle 11 angegeben. Die genaue Definition der Strom Prozesse in GEMIS kann dem Anhang A 3 entnommen werden. Wie in Abbildung 32 dargestellt, kann im Softwaremodul LCA-Chart der gewünschte prozentuale Anteil der jeweiligen Stromart eingegeben und damit die Auswirkung des Anteils erneuerbarer Energieträger auf die Emissionen und den Ressourcenbedarf aus der Bereitstellung von Raumwärme simuliert werden.

*Tabelle 11: Prozentuale Anteile am Strommix*

[%]	Steinkohle	Braunkohle	Gas	Öl	Müll	Atom	Wasser	Wind
nicht erneuerbar	29,6	26,0	9,51	1,0	2,75	31,14	-	-
regenerativ	-	-	-	-	-	-	85,0	15,0

## 5 AUSWAHL UND ANPASSUNG DER BILANZIERUNGSMETHODEN

### 5.1 Auswahl der Methoden und Sachbilanzparameter

#### 5.1.1 Bewertungsmethoden

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Integration der ökologischen Bilanzierung in den normalen Planungsablauf von Gebäuden. Damit soll den Planern eine Entscheidungshilfe für oder wider bestimmte Planungsvarianten zur Verfügung gestellt und damit eine ökologische Optimierung des gesamten Gebäudeentwurfs vereinfacht werden (vgl. Kapitel 1.3). Ein Planer verfügt in der Regel aber nicht über das erforderliche Wissen, selbstständig eine Wirkungsanalyse auf Basis der Ergebnisse einer Sachbilanz durchzuführen und daraus die ökologischen Schwachpunkte des Gebäudeentwurfes zu identifizieren. Daher ist es notwendig ihm integrierte Bewertungsmethoden zur Verfügung zu stellen, die diesen Schritt automatisiert durchführen können. Wie in Kapitel 2.4 dargestellt gibt es verschiedene Methoden zur Abschätzung der Umweltauswirkungen eines Produktes. Dabei existiert nach [ETH, 1998] jedoch keine einzelne Bewertungsmethode, die alle Anforderungen der Ökobilanzierung nach der Normenreihe EN ISO 14040 ff. vollständig erfüllt. Zum ökologischen Vergleich von Produktvarianten sollten danach immer mehrere Methoden herangezogen werden, damit methodische Defizite einzelner Ansätze nicht die ökologische Optimierung in eine falsche Richtung führen.

Da die Durchführung der Wirkungsabschätzung und Bewertung automatisiert im Rahmen einer computergestützten Berechnung erfolgen soll, scheidet eine Implementierung von verbal-argumentativen Methoden aus. Die automatische Erstellung einer verbalen Bewertung der Sachbilanzergebnisse in Textform, ist nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht möglich. Neben dieser Anforderung von Seiten der Softwaretechnischen Umsetzung sollten die ausgewählten Methoden zusätzlich international akzeptiert und auch den Anforderungen der EN ISO 14040 weitgehend gerecht werden. Nachfolgend werden daher die in Kapitel 2.4 vorgestellten Bewertungsmethoden hinsichtlich der genannten Anforderungen überprüft.

#### *Kumulierter Energieaufwand KEA*

Nach [Jenseit, 1999] kann der Kumulierte Energie Aufwand KEA zur Bewertung von Produkten und Dienstleistungen als ein zusätzlicher Indikator im Rahmen von Ökobilanzen nach ISO-Norm oder als alleiniger Indikator im Rahmen einer „Screening“-Ökobilanz herangezogen werden. Einsatzgebiet einer solchen Kurz-Ökobilanz wäre zum Beispiel bei einer Einzeldiskussion von Produkt-Varianten zu sehen. Soll der KEA jedoch als alleiniger Indikator zur Abschätzung der Umweltwirkungen herangezogen werden, ist sicherzustellen, dass er als Leitindikator eine Richtungssicherheit hinsichtlich anderen Leitindikatoren aufweist. Dies bedeutet,

---

dass die Bewertung eines Produktes anhand des KEA der Bewertung nach anderen Leitindikatoren folgt. Für das zu untersuchende Produkt muss daher zunächst festgestellt werden welche Indikatoren das Umweltverhalten des Produktes maßgeblich beeinflussen.

Bei der ökologischen Bewertung von Gebäuden dominieren das Treibhaus- und das Versauerungspotential [Jenseit, 1999]. Bei ökologischen Betrachtungen von Gebäudevarianten sollte daher die Bewertung auf Basis des KEA in die gleiche Richtung wie die Bewertung über Treibhaus- und Versauerungspotential zeigen. Das Treibhauspotential wird dabei mit der KEA-Komponente  $KEA_{\text{nicht erneuerbar}}$  in Beziehung gesetzt, da aus den anderen KEA Untergruppen keine Treibhausgase freigesetzt werden. Das Versauerungspotential wird dem  $KEA_{\text{gesamt}}$  gegenübergestellt. In [Jenseit, 1999] wurde diese Richtungssicherheit für eine Bilanzierung von Gebäuden bestätigt. Damit ist der Einsatz des KEA als Leitindikator in Rahmen von Kurz-Ökobilanzen für Gebäude sinnvoll.

#### *Methode der ökologischen Knappheit*

Nach [BUWAL, 1998] erfüllt die Methode die Anforderungen nach EN ISO 14040 ff., wobei jedoch die Interpretation der mit dieser Methode ermittelten Resultate als sehr wichtig erachtet wird. Neben dem vollaggregierten Endergebnis sind auch die zugrundeliegenden Annahmen und Randbedingungen im Rahmen einer Schlussbewertung der Umweltauswirkungen zu berücksichtigen, um die nach Norm geforderte Transparenz der Ergebnisse zu erreichen. Weiterhin besitzt die Methode den Vorteil, dass sie grundsätzlich für alle gegenwärtigen Umweltprobleme anwendbar, sowie hinsichtlich der Aufnahme neuer Aspekte flexibel ist. Wie in Kapitel 2.4.3 dargestellt wird die Methode nicht nur in der Schweiz, sondern nach einer entsprechenden Anpassung der Ökofaktoren auch international angewendet.

#### *CML-Methode*

Die CML-Methode [Heijungs, 1992] basiert auf dem Ansatz einer auswirkungsorientierten Klassifizierung von Umwelteinwirkungen. Dieser Ansatz wurde in die Normenreihe EN ISO 14040 ff. übernommen. Dies bedeutet, dass der Aufbau der CML-Methodik, nämlich die Trennung in die Schritte Sach- und Wirkungsanalyse, den Vorgaben der Normenreihe entspricht. Dementsprechend findet die Methode weltweit Anerkennung und ist in den meisten Softwareanwendungen zur Ökobilanzierung verfügbar.

#### *Ecoindicator 95 Methode*

Wie in Kapitel 2.4.5 beschrieben, basiert die Ecoindicator 95 Methode auf dem Ansatz der CML-Methode, wobei jedoch eine weitergehende Aggregation der Wirkungsindikatoren zu einem einzigen Kennwert durchgeführt wird. Diese Methode entspricht daher den Anforderungen der ISO-Norm. Auf internationaler Ebene ist die Ecoindicator 95 Methode ebenfalls sehr weit verbreitet [Stahl, 1998].

---

### *Ergebnis*

Als Ergebnis des Vergleichs der unterschiedlichen Bewertungsmethoden kann festgestellt werden, dass die hier vorgestellten Methoden die Anforderungen bezüglich ISO-Konformität und internationaler Akzeptanz erfüllen. Daher werden diese für eine Implementierung in die Bilanzierungssoftware ausgewählt.

#### **5.1.2 Sachbilanzgrößen und Bezugsraum**

Jede der in Kapitel 5.1.1 genannten Methoden, berücksichtigt in ihrer jeweiligen Originalfassung eine unterschiedliche Auswahl an Sachbilanzgrößen und Wirkungskategorien. Weiterhin wurden die Methoden UBP und Ecoindicator 95 für verschiedene Bezugsräume entwickelt. Dies bedeutet, dass die Bewertung der Sachbilanzergebnisse auf Basis eines unterschiedlichen Zustands der Umwelt, sowie unterschiedlicher Umweltschutz-Zielvorgaben durchgeführt wird (vgl. Kapitel 1.2). Daraus ergibt sich, dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus den Originalmethoden nicht zielführend ist, da diese auf Grundlage unterschiedlicher Randbedingungen ermittelt wurden. Um eine Vergleichbarkeit zu erreichen ist es damit notwendig einen gemeinsamen Bezugsraum festzulegen und daraus eine einheitliche Bewertung der Umweltwirkungen abzuleiten.

Neben den unterschiedlichen Bezugsräumen, stammen die jeweils zur Bewertung verwendeten Daten aus statistischen Erhebungen und umweltpolitischen Zielsetzungen welche zum Zeitpunkt der Entwicklung der Methoden aktuell waren. Diese sind jedoch meist veraltet. Um eine dem aktuellen Zustand der Umwelt entsprechende Bewertung zu erreichen ist daher eine Aktualisierung dieser Daten notwendig. Zusätzlich zur Wahl eines einheitlichen Bezugsraumes und zugehörigen aktuellen Umweltdaten ist weiterhin die selbe Auswahl an berücksichtigten ökologischen Parametern zugrunde zulegen. Diese Auswahl ist wiederum von den Umweltwirkungen abhängig, welche zur Bewertung des ökologischen Gesamtverhaltens des betrachteten Produktes verwendet werden. Die Anforderungen an den Bezugsraum sind somit eine der Parameterwahl entsprechende Datenverfügbarkeit zum aktuellen Zustand der Umwelt sowie klar definierte Zielvorgaben hinsichtlich des zukünftigen Umweltschutzes. Weiterhin sollte das für die Sachbilanz verwendete Ökoinventar auf Grundlage von Erhebungen im Bezugsraum erstellt worden sein.

An dieser Stelle wird daher Deutschland als Bezugsraum gewählt, da zum einen die in GEMIS (vgl. Kapitel 4) enthaltenen Baustoff- und Energieprozesse überwiegend aus Erhebungen in Deutschland stammen und zum anderen eine sehr gute Datenverfügbarkeit zum aktuellen Zustand der Umwelt für diesen Raum vorliegt [UBA, 2002]. In Rückkopplung mit den berücksichtigten Umweltwirkungen (Kapitel 5.2.1), der Datenverfügbarkeit für den Bezugsraum Deutschland und den von GEMIS ausgegebenen Parametern, werden daher die folgenden Emissionsparameter für eine Aufnahme in die ökologische Datenbank ausgewählt:

---

Tabelle 12: Ausgewählte Emissionsparameter

<b>Emission</b>	<b>chem. Formel</b>
Ammoniak	NH <sub>3</sub>
chem. Sauerstoffbedarf	(CSB)
Distickstoffmonoxid	N <sub>2</sub> O
Flußsäure	HF
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>
Kohlenmonoxid	CO
Methan	CH <sub>4</sub>
Nicht-Methan KW	(NMVOC)
Perfluorethan	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>
Perfluormethan	CF <sub>4</sub>
Salzsäure	HCl
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>
Schwefelwasserstoff	H <sub>2</sub> S
Stickstoff	N
Stickstoffoxide	NO <sub>x</sub>

Zusätzlich zu diesen Emissionsparametern werden auch die kumulierten Sachbilanzgrößen KEA und KSA erfasst. Obwohl diese nicht unmittelbar einer Umweltwirkung zugeordnet werden können geben diese trotzdem einen Hinweis auf das Umweltverhalten des betrachteten Produktsystems und sind somit neben den Wirkungsindikatoren eine weitere Basis für den Prozess der Auswertung (vgl. Kapitel 2.4.1 und 5.1.1).

Tabelle 13: Ausgewählte Ressourcenparameter

<b>Ressourcenbedarf</b>	<b>Abkürzung</b>
Kumulierter Energieaufwand aus nicht erneuerbaren, erneuerbaren und anderen Quellen	KEA <sub>nicht erneuerbar</sub>
	KEA <sub>erneuerbar</sub>
	KEA <sub>andere</sub>
Kumulierter Stoffaufwand aus nicht erneuerbaren, erneuerbaren und anderen Quellen	KSA <sub>nicht erneuerbar</sub>
	KSA <sub>erneuerbar</sub>
	KSA <sub>andere</sub>

## 5.2 Anpassung der Bewertungsmethoden

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, müssen die Bewertungsmethoden CML, UBP und Ecoindicator 95 auf Basis des gewählten Bezugsraumes Deutschland, sowie der in der Datenbank vorhandenen Emissions- und Ressourcenparameter angepasst werden. Die prinzipielle Methodik bleibt dabei jeweils unverändert. Lediglich die vom Bezugsraum abhängenden Daten bezüglich Normierung und Gewichtung werden angepasst. Im folgenden werden diese Anpassungen beschrieben und die entsprechenden Daten zu Bewertung hergeleitet.

### 5.2.1 CML-Methode

Bei Anwendung der CML-Methode werden einzelne Schadstoffemissionen eines Produktes oder Prozesses in sogenannte Wirkungskategorien (Klassen) eingeteilt (vgl. Kapitel 2.2.3). Im Anschluss an die Ermittlung der Wirkungspotentiale erfolgt eine Normalisierung der erhaltenen Ergebnisse bezüglich des gewählten Bezugsraumes der Ökobilanz-Studie. Eine explizite Gewichtung der einzelnen Wirkungskategorien zueinander wurde in der ursprünglichen CML-Methode nicht entwickelt. Vielmehr wurden verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen um Gewichtungsfaktoren zu ermitteln. Aus Basis dieser Vorschläge sind drei weiterführende Ansätze in den Niederlanden entwickelt worden, die aufbauend auf der CML-Systematik eine Gesamtbewertung beschreiben. Nach der NSAEL-Methode (No significant adverse effect level) wird für jede Wirkungskategorie ein Gewichtungsfaktor dadurch errechnet, indem die Gesamtbelastung innerhalb einer Wirkungskategorie pro Jahr in Relation zu der gerade noch tolerierbaren Belastung gesetzt wird (jeweils bezüglich des Bezugsraumes) [Kortmann, 1994]. Dies entspricht

dem sogenannten Distance-to target Prinzip. Die tolerierbare Belastung ist dabei jene Belastung, bei der keine ökologischen Schäden bekannt sind. Nach der PANEL-Methode werden die Gewichtungsfaktoren durch einen ausgewählten Personenkreis festgelegt, der auf Basis gleicher Informationen sich über die Bewertungskriterien einigt. Im Rahmen der MET-Methode wurden anstelle der ökologisch tolerierbaren Belastungsmengen der NSAEL-Methode die Zielgrößen der niederländischen Umweltpolitik verwendet [Braunschweig, 1994].

Seit der Veröffentlichung der CML-Methode wurde eine Vielzahl von Wirkungskategorien vorgeschlagen. Jedoch ist die Methodik der Wirkungsabschätzung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen, sondern wird permanent weiterentwickelt. Viele dieser Wirkungskategorien sind wissenschaftlich noch nicht abgesichert. Insbesondere sind die Toxizitätspotentiale sowie die Inanspruchnahme von Naturraum betroffen. Zusätzlich soll die Auswahl der jeweils einzubeziehenden Wirkungskategorien nach EN ISO 14040 ff. mit der Zieldefinition der jeweiligen Ökobilanzstudie übereinstimmen.

#### *Auswahl der Wirkungskategorien*

Im Rahmen dieser Arbeit ist es das Ziel einen Softwareprototyp zu entwickeln, mit dem eine ökologische Analyse eines Bauwerksentwurfes in der frühen Planungsphase durchgeführt werden kann (vgl. Kapitel 1.3). Das Softwarekonzept soll dabei so flexibel aufgebaut werden, dass eine Erweiterung und Änderung hinsichtlich berücksichtigter Sachbilanzparameter, Bewertungsmethoden und Umweltwirkungen ohne großen Aufwand möglich ist. Auf Basis dieser Zielsetzung werden daher an dieser Stelle solche Umweltwirkungen für eine Integration ausgewählt, die zum einen das Umweltverhalten des Produktes Gebäude maßgeblich bestimmen [Jenseit, 1999] und zum anderen zu den in fast allen Ökobilanzstudien verwendeten Wirkungskategorien zählen [Guinée, 2001]. Ein weiteres Selektionskriterium sind die im verwendeten Ökoinventar GEMIS verfügbaren Einzelparameter aus denen die Wirkungskategorien zusammengesetzt sind. Für den Schritt der Normierung und einer weiterführenden Gewichtung mit der Ecoindicator 95 Methode (Kapitel 5.2.3) müssen zudem die entsprechenden statistischen Daten für den Bezugsraum Deutschland vorliegen. Aufgrund dieses Selektionsprozesses werden für eine Implementierung zunächst die folgenden Wirkungskategorien berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.3):

- Treibhauspotential, Global Warming Potential (GWP) in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent
  - Versauerungspotential, Acidification Potential (AP) in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent
  - Eutrophierungspotential, Nutrifcation Potential (NP) in kg PO<sub>4</sub>-Äquivalent
  - Photooxidantienbildungspotential, Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) in kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-Äquivalent
-

Aufgrund des seit 1995 in Deutschland geltenden Produktionsverbots von FCKW 11, sowie mangels verfügbarer Daten zu anderen sich auf das ODP beziehenden Emissionen wird dieses Potential im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben ist das POCP in Fachkreisen sehr umstritten, da es zum einen auf einer Änderung bestehender Ozonkonzentrationen aufbaut und zum anderen für regional weiträumige Ausbreitungs-Rechnungen entwickelt wurde [UBA, 2000a]. Daher wird an dieser Stelle das POCP durch Ozonvorläuferpotential TOPP (Tropospherical Ozone Precursor Potential) ersetzt. Dieses umgeht die Schwachstellen des POCP dadurch, indem lediglich die bodennahen Ozonvorläufer erfasst werden und nicht ein Potential zur Ozonbildung selbst errechnet wird [Euro, 2000]. Im Gegensatz zum POCP werden zur Bestimmung des TOPP die einzelnen relevanten Emissionen auf die Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe NMVOC (non-methane volatile organic compounds) normiert. Diese NMVOC stellen dabei bereits einen Summenparameter verschiedener einzelner Emissionen dar. Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe gehören einer großen Gruppe von chemisch und ökotoxikologisch verschieden wirkenden Substanzen an. Die wichtigsten anthropogenen Quellen sind die Verdunstung von Lösungsmitteln (Ethanol, Propanol, Aceton, Toluol), die Verbrennung von Biomasse und Kohle (Formaldehyd, Acetaldehyd, Ethen) und Emissionen aus dem Straßenverkehr (Benzol, Toluol). In folgender Tabelle sind die Äquivalenzfaktoren für die Berechnung des TOPP nach [Euro, 2000] angegeben:

*Tabelle 14: Ozonvorläuferpotential ausgewählter Stoffe*

Stoff	chem. Formel	TOPP <sub>i</sub> in kg NMVOC-equiv./kg
NMVOC	-	1,0
Stickstoffoxide	NO <sub>x</sub>	1,22
Kohlenmonoxid	CO	0,11
Methan	CH <sub>4</sub>	0,014

Die Berechnung des gesamten TOPP erfolgt aus den Äquivalenzwerten TOPP<sub>i</sub> der einzelnen Emissionen nach folgender Gleichung [Gemis, 2002]:

$$\text{TOPP}_{\text{Äq.}} = \sum_i (\text{TOPP}_i \cdot e_i)$$

mit  $e_i$ : Masse des Emission  $i$  in kg

### Charakterisierungsfaktoren

In Tabelle 15 sind die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Emissionen mit deren Charakterisierungsfaktoren für die Berechnung der ausgewählten Wirkungskategorien angegeben. Für den Schritt der Normalisierung werden für den Bezugsraum Deutschland die zugehörigen Normalisierungsfaktoren benötigt. Die Ermittlung dieser Faktoren ist im Kapitel 5.2.3 dargestellt. Eine weitere Aggregation der Wirkungskategorien im Rahmen der CML-Methode (z.B. NSAEL, PANEL, MET) erfolgt an dieser Stelle nicht.

*Tabelle 15: verwendete Emissionen und deren Charakterisierungsfaktoren*

Emission	chem. Formel	Charakterisierungsfaktor	Quelle
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	NP= 0,35 PO <sub>4</sub> -equiv.	[Heijungs, 1992]
		AP = 1,88 SO <sub>2</sub> -equiv.	[Hauschild, 1998]
chem. Sauerstoffbedarf	(CSB)	NP = 0,022 PO <sub>4</sub> -equiv.	[Heijungs, 1992]
Distickstoffmonoxid	N <sub>2</sub> O	GWP <sub>100</sub> = 296 CO <sub>2</sub> -equiv.	[IPCC, 2001]
Flußsäure	HF	AP = 1,60 SO <sub>2</sub> -equiv.	[Hauschild, 1998]
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	GWP <sub>100</sub> = 1,0 CO <sub>2</sub> -equiv.	[IPCC, 2001]
Kohlenmonoxid	CO	TOPP = 0,11 NMVOC-equiv.	[Euro, 2000]
Methan	CH <sub>4</sub>	GWP <sub>100</sub> = 23 CO <sub>2</sub> -equiv.	[IPCC, 2001]
		TOPP = 0,014 NMVOC-equiv	[Euro, 2000]
Nicht-Methan KW	(NMVOC)	TOPP = 1,0 NMVOC-equiv.	[Euro, 2000]
Perfluorethan	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	GWP <sub>100</sub> = 11900-equiv.	[IPCC, 2001]
Perfluormethan	CF <sub>4</sub>	GWP <sub>100</sub> = 5700-equiv.	[IPCC, 2001]
Salzsäure	HCl	AP = 0,88 SO <sub>2</sub> -equiv.	[Hauschild, 1998]
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>	AP = 1,0 SO <sub>2</sub> -equiv.	[Hauschild, 1998]
Schwefelwasserstoff	H <sub>2</sub> S	AP = 0,98 SO <sub>2</sub> -equiv.	[GEMIS, 2002]
Stickstoff	N	NP = 0,42 PO <sub>4</sub> -equiv.	[Heijungs, 1992]
Stickstoffoxide	NO <sub>x</sub>	TOPP = 1,22 NMVOC-equiv.	[Euro, 2000]
		NP = 0,13 PO <sub>4</sub> -equiv.	[Heijungs, 1992]
		AP = 0,70 SO <sub>2</sub> -equiv.	[Hauschild, 1998]

### 5.2.2 Methode der ökologischen Knappheit

Analog dem Verständnis der Knappheit in der Ökonomie (Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage) wird die ökologische Knappheit als Verhältnis zwischen der tatsächlichen Belastung der Natur und ihrer eingeschränkten Belastbarkeit definiert. Diese Methode ermöglicht es, die Ergebnisse der Sachbilanz mittels sogenannter Ökofaktoren vergleichend zu gewichten. Dabei wird das „Distance-to-target“-Prinzip angewendet, d.h. der aktuelle Fluss eines Stoffes zu seinem Zielwert (kritischer Fluss) in Relation gesetzt. Daraus kann dann ein Ökofaktor als Maß für die ökologische Relevanz der entsprechenden Emission errechnet werden. In [BUWAL 1990] wurden Ökofaktoren bezüglich der damaligen ökologischen Situation in der Schweiz berechnet. Im Zuge einer Überarbeitung wurde die Methode im Jahr 1997 aktualisiert [BUWAL, 1998] und für die Schweiz die aktuellen Ökofaktoren ermittelt. Die Berechnung der Ökofaktoren erfolgt auf Basis der folgenden Formel für die verschiedenen Emissionen:

$$\text{Ökofaktor} = \frac{1}{F_k} * \frac{F}{F_k} * c$$

mit  $F$  = aktuelle jährliche Fracht einer Umwelteinwirkung  
 $F_k$  = kritische jährliche Fracht einer Umwelteinwirkung  
 $c$  =  $10^{12}/a$

Im Gegensatz zu anderen Methoden, die ebenfalls auf dem „Distance-to-target“ Ansatz basieren geht der kritische Fluss  $F_k$  bei dieser Methode im Quadrat ein. Damit wird erreicht, dass je größer der Abstand von vorhandener jährlicher Fracht zur kritischen Fracht einer Emission ist, diese auch umso stärker gewichtet wird.

Um mit dieser Methode ein Produkt endgültig zu bewerten, müssen zunächst die Ergebnisse aus der Sachbilanz mit den zugehörigen Ökofaktoren multipliziert werden. Somit ergeben sich für jede Emission Umweltbelastungspunkte, die anschließend zu einem einzigen Wert aufaddiert werden. Die Berechnung der Umweltbelastungspunkte aus den Ökofaktoren lautet damit:

$$\text{UBP}^D = \sum_i (\text{Ökofaktor}_i \cdot e_i)$$

mit  $\text{UBP}^D$  = Umweltbelastungspunkte auf Basis der in dieser Arbeit zugrundegelegten Daten  
 $e_i$  = Masse der Emission  $i$  in g

Je größer der erhaltene Wert ist, umso größer sind auch die Umweltbelastungen die durch das betrachtete Produkt verursacht werden. Die kritischen Flüsse werden in der Regel auf wissenschaftlich begründete, politisch verbindliche Zielsetzungen abgestützt. Dies sind in erster Linie gesetzlich festgelegte Schutzziele. Fehlen gesetzliche oder politische Vorgaben trotz eines Handlungsbedarfs, werden auf Expertenebene konsolidierte naturwissenschaftlich abgestützte Ziele herangezogen.

Da die in [BUWAL, 1998] berechneten Ökofaktoren auf den in der Schweiz vorhandenen aktuellen Flüssen und nationalen Zielsetzungen basieren, können diese nicht ohne eine entsprechende Anpassung auf Deutschland angewendet werden. Daher werden nachfolgend für die hier verwendeten Emissionen (vgl. Kapitel 5.1.2) die entsprechenden aktuellen und kritischen Flüsse für Deutschland ermittelt, sowie die zugehörigen Ökofaktoren für ein kurzfristiges und ein langfristiges Szenario zur Reduktion der Emissionen berechnet.

#### *Kohlendioxid CO<sub>2</sub>*

Der aktuelle Fluss von CO<sub>2</sub> für Deutschland betrug im Jahr 1999 nach [UBA, 2002] etwa 859.000 Kilotonnen. Im Rahmen des Kyoto-Protokolls verpflichteten sich die Industrieländer zu einer Emissionsminderung der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O (Bezugsjahr 1990) um mindestens 5% bis zum Zeitraum 2008-2012. Die Europäische Union übernimmt darin die Verpflichtung, die Emissionen um 8% zu reduzieren. Diese Mindestverpflichtung wurde innerhalb der EU im Rahmen eines Lastenausgleich (EU-burden-sharing) auf Basis der nationalen Besonderheiten in unterschiedliche Minderungsziele auf die 15 EU-Mitgliedsländer aufgeteilt. Deutschland hat danach seine Emissionen an Treibhausgasen bis 2008-2010 um 21% (Bezugsjahr 1990) zu reduzieren. Die Deutsche Bundesregierung hat darüber hinaus eine Reduktion der CO<sub>2</sub> Emissionen bis zum Jahr 2005 um 25% (Bezugsjahr 1990) beschlossen [BMU, 1996]. Das kurzfristige Ziel bis 2005 entspricht somit einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland auf 760.500 Kilotonnen pro Jahr. Im Jahr 1992 wurde in Rio de Janeiro das Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen unter anderem durch die Europäische Gemeinschaft unterzeichnet. Das Ziel dieser Konvention besteht darin „... die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird“. Eine Reduktion des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstosses auf ca. 5,5 Gigatonnen C/a würde zu einer CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre führen, welche unterhalb des doppelten Wertes der vorindustriellen Zeit liegt [IPCC, 1996]. Nach [BUWAL, 1998] kann dies in erster Näherung als Niveau angesehen werden, welches eine Anpassung von Siedlungsräumen und Ökosystemen an ein verändertes Klima ohne signifikante Gefährdung von Menschen und Biosphäre erlaubt. Unter der Annahme, dass jeder Mensch das gleiche Recht auf die Emission von CO<sub>2</sub> hat, ergibt sich bei einer angenommenen Bevölkerung von 8 Milliarden im Jahr 2050 eine maximale Emission von etwa 2 t CO<sub>2</sub> pro Jahr und Einwohner. Für Deutschland ergibt sich damit bei einer Einwohnerzahl von 82 Millionen als langfristiges Ziel ein jährlicher kritischer Fluss von 164.000 Kilotonnen CO<sub>2</sub>. Dies entspricht etwa dem in [Walz,1996] angegeben langfristigem Ziel einer Reduktion um 80% gegenüber dem Stand von 1987 (1.082.000 kt) auf etwa 216.000 Kilotonnen CO<sub>2</sub>.

---

### *Methan CH<sub>4</sub>*

Der aktuelle Fluss von CH<sub>4</sub> für Deutschland betrug im Jahr 1999 etwa 3.041 Kilotonnen [UBA, 2002]. Nach [BMU, 2000] ist bis zum Jahr 2005 eine Reduktion der CH<sub>4</sub> Emissionen auf 2.871 Kilotonnen und bis zum Jahr 2008-2012 auf 2.628 Kilotonnen geplant. In [Enquete, 1990] wird jedoch eine Reduktion um 30% bis zum Jahr 2005 und um 80% bis zum Jahr 2050 empfohlen (Bezugsjahr jeweils 1987 mit 5.753 kt nach [Walz, 1996]). Daraus errechnet sich eine angestrebte CH<sub>4</sub>-Emission von 4.027 Kilotonnen für das Jahr 2005 und 1.151 Kilotonnen für das Jahr 2050. In [BUWAL, 1998] wird die Bestimmung der Ökofaktoren für alle Treibhausgase an den Ökofaktor für CO<sub>2</sub> gekoppelt. Dies erfolgt durch Multiplikation des Ökofaktors von CO<sub>2</sub> mit dem Äquivalenzwert der entsprechenden Emission. Als kurzfristiges Ziel bis 2010 ist somit eine Reduktion auf 2.628 Kilotonnen CH<sub>4</sub> und als langfristiges Ziel bis 2050 eine Reduktion auf 1.151 Kilotonnen CH<sub>4</sub> zu sehen.

### *Distickstoffmonoxid N<sub>2</sub>O*

Im Jahr 1999 betrug der aktuelle Fluss an N<sub>2</sub>O 194 Kilotonnen [UBA, 2002]. Im Klimaschutzprogramm für Deutschland [BMU, 2000] wird eine Reduktion auf 159 Kilotonnen N<sub>2</sub>O bis zum Jahr 2005 angestrebt. Bis zum Jahr 2008-2012 eine weitere Verringerung auf 157 Kilotonnen. Längerfristige Reduktionsziele bis 2050 sind noch nicht geplant. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch analog zur langfristigen Reduktion von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> eine Reduktion von N<sub>2</sub>O um 80% bis 2050 gegenüber dem Stand von 1987 (210 kt N<sub>2</sub>O nach [Walz, 1996]) angenommen. Daraus resultiert damit als langfristiges Reduktionsziel von N<sub>2</sub>O eine Menge von 42 kt bis zum Jahr 2050.

### *Perfluorethan C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>*

Nach [UBA, 2000b] betrug der jährliche Fluss an Perfluorethan 46 Tonnen für das Jahr 1999. Bis zum Jahr 2005 wird nach [BMU, 2000] eine Reduktion auf 11 Tonnen angestrebt. Weitere längerfristige Reduktionsziele sind derzeit nicht geplant. Da C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> zum Treibhauseffekt beiträgt, wird an dieser Stelle ebenfalls eine langfristige Reduktion bis 2050 um 80% gegenüber dem Stand von 1987 angesetzt. Da keine Daten zum Jahr 1987 verfügbar sind wird die Berechnung auf Basis des Jahres 1990 durchgeführt (42 t/a, [UBA, 2000b]). Daraus ergibt sich als langfristiges Ziel eine Obergrenze der C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>-Emissionen von etwa 8 t/a in Deutschland. Die Ermittlung des Ökofaktors für Perfluorethan in [BUWAL, 1998] erfolgt analog CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O über den CO<sub>2</sub>-Äquivalenzwert.

### *Perfluormethan CF<sub>4</sub>*

Der aktuelle jährliche Fluss von CF<sub>4</sub> betrug im Jahr 1999 nach [UBA, 2000b] 186 Tonnen. Nach [BMU, 2000] ist bis zum Jahr 2005 eine Reduktion auf 105 Tonnen vorgesehen. Längerfristige Reduktionsziele sind bisher nicht geplant. Analog zu C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> wird auch für CF<sub>4</sub> eine Reduktion um 80% bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Stand

---

von 1990 (355 t/a nach [UBA, 2000b]) angenommen. Danach errechnet sich das Ziel von etwa 70 t/a bis zum Jahr 2050. In [BUWAL, 1998] wird der Ökofaktor für  $\text{CF}_4$  wieder aus dem Ökofaktor für  $\text{CO}_2$  über den zugehörigen  $\text{CO}_2$ -Äquivalenzwert hochgerechnet. Analog zu  $\text{C}_2\text{F}_6$  ist der nach [BMU, 2000] errechnete Ökofaktor sehr viel höher als die Abschätzung über den  $\text{CO}_2$ -Äquivalenzwert.

### *Ammoniak $\text{NH}_3$*

Im Jahr 1999 betrug der aktuelle jährliche Fluss an  $\text{NH}_3$  624 Kilotonnen [UBA, 2002]. Im Rahmen der EU-Richtlinie zu nationalen Emissionsobergrenzen besteht für Deutschland die Verpflichtung die  $\text{NH}_3$ -Emissionen bis zum Jahr 2010 auf 550 Kilotonnen zu reduzieren [UBA, 2002; UN-ECE, 1999]. Um die kritische Schadstoffbelastung der Wälder langfristig zu unterschreiten wird in [Enquete, 1994] eine langfristige Reduktion von  $\text{NH}_3$  um 80% gegenüber dem Stand von 1995 vorgeschlagen. Dies entspricht einer Minderung auf 130 kt/a bis zum Jahr 2050.

### *Chemischer Sauerstoffbedarf CSB*

Die Ermittlung des aktuellen Flusses für CSB basiert auf folgender Abschätzung: Nach [UBA, 2000b] lag im Jahr 1995 die in Deutschland behandelte Abwassermenge bei 9.847 Millionen  $\text{m}^3$ . Gleichzeitig zeigt ein Leistungsvergleich von Kläranlagen, dass die mittlere Ablaufkonzentration an CSB im Jahre 1994 etwa 44 mg/l und im Jahre 1996 etwa 42 mg/l betragen hat [ATV, 1999]. Unter Annahme eines Mittelwertes von 43 mg/l lässt sich daraus eine aus den Kläranlagen abgeleitete CSB Jahresfracht von etwa 423.000 Tonnen CSB abschätzen. Analog dem Vorgehen in [BUWAL, 1998] wird der kritische Fluss an CSB wie folgt abgeschätzt. Aus ökologischer Sicht sollte unterhalb von Einleiterstellen im Mittel maximal 30% des im Wasser gelösten Sauerstoffes gezehrt werden. In [BUWAL, 1998] wird der durchschnittliche Sauerstoffgehalt im Flusswasser auf 10 mg/l geschätzt. Somit beträgt die maximal zulässige Zehrung 3  $\text{mgO}_2/\text{l}$  und damit die zulässige Belastung 3 gCSB/l. Nach Daten von [UBA, 2000b] liegt das langjährige Mittel der mittleren Jahresabflüsse MQ der großen Flüsse in Deutschland bei etwa 7.800  $\text{m}^3/\text{s}$ . Daraus errechnet sich ein kritischer Fluss an CSB von etwa 738.000 t/a.

### *Stickstoff N*

Nach [UBA, 2002] lagen die in Oberflächengewässer abgeleiteten Stickstoff-Frachten in den Jahren 1993 bis 1997 bei 820.000 t/a. Im Rahmen der 3. Nordseeschutzkonferenz, haben sich die Nordseeanrainerstaaten dazu verpflichtet ihre Stickstoff-Emissionen bis zum Jahr 1995 gegenüber dem Stand von 1985 zu halbieren [BMU, 1993]. Nach [UBA, 2002] entspricht der aktuelle Fluss einer Reduktion von 25% gegenüber dem Stand von 1985. Als Zielgröße ergibt sich daraus für Deutschland eine angestrebte Minderung der N-Emissionen auf etwa 550.000 t/a. Dieses Ziel wurde bisher nicht erreicht. In [Enquete, 1994] wird als langfristiges Ziel eine Reduktion der Stickstoffemissionen um 80% gegenüber 1995

---

empfohlen, um die kritische Schadstoffbelastung für Waldökosysteme nicht mehr zu überschreiten. Daraus resultiert als langfristiges Reduktionsziel für Stickstoff eine Obergrenze von 164.000 t/a.

#### *Stickoxide NO<sub>x</sub>*

Im Jahr 1999 wurden im Bilanzraum Deutschland 1.676 Kilotonnen NO<sub>x</sub> (berechnet als NO<sub>2</sub>) emittiert [UBA, 2002]. Im "Göteborg-Protokoll zur Vermeidung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon" von 1999 [UN-ECE, 1999] wurde unter der Federführung der United Nations Economic Commission for Europe (UN-ECE) Reduktionsziele bis zum Jahr 2010 für einzelne Staaten bzw. Staaten-gruppen festgelegt. Diese orientieren sich an wissenschaftlichen Wirkungsanalysen sowie an vorhandenen Vermeidungsoptionen. Für Deutschland wurden dabei Reduktionsvorgaben von 90 % (SO<sub>2</sub>), 60 % (NO<sub>x</sub>) und 28 % (NH<sub>3</sub>) gegenüber dem Stand von 1990 festgelegt. Entsprechend eines Beschlusses des EU-Umweltrates vom 22.6.2000 ist es damit das Ziel bis zum Zeitraum 2008 bis 2012 die NO<sub>x</sub>-Emissionen in Deutschland auf 1.051 Kilotonnen zu reduzieren [BMU, 2000]. Nach [Enquete, 1990] sollten die NO<sub>x</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 90% gegenüber dem Stand von 1987 (3.177 Kilotonnen) reduziert werden. Dies entspricht einer Menge von 317 Kilotonnen NO<sub>x</sub> (als NO<sub>2</sub>).

#### *Flußsäure HF*

Die hauptsächliche ökologische Wirksamkeit von HF besteht im Beitrag zur Übersäuerung der Böden. Nach [BUWAL, 1998] wird daher der Ökofaktor für HF aus einem Vergleich des Säurebildungspotentials mit SO<sub>2</sub> berechnet. Nach [Hauschild, 1998] beträgt dieser 1,60 SO<sub>2</sub>-equiv./kg. Somit ist der Ökofaktor für HF unabhängig vom aktuellen Fluss. Weitere ökologische Auswirkungen (z.B. Toxizität für Pflanzen) werden daher durch diesen Ansatz nicht abgebildet. Insbesondere bei Prozessen mit einer hohen HF-Emission ist diese Unterschätzung der ökologischen Gesamtwirkung zu berücksichtigen.

#### *Salzsäure HCl*

Analog dem Vorgehen bei der Flußsäure wird der Ökofaktor für HCl in [BUWAL, 1998] aus dem Vergleich des Säurebildungspotentials mit SO<sub>2</sub> ermittelt. Dieser beträgt nach [Hauschild, 1998] 0,88 SO<sub>2</sub>-equiv./kg. Es sind daher dieselben Ungenauigkeiten in der ökologischen Gesamtwirkung von HCl zu berücksichtigen wie für die Flußsäure.

#### *Schwefeldioxid SO<sub>2</sub>*

Nach [UBA, 2002] sind im Jahr 1999 im Bilanzraum Deutschland 804.000 t SO<sub>2</sub> emittiert worden. Wie auch bei den Stickoxiden, wurde in einem Beschluss des EU-Umweltrates vom 22.6.2000 eine Reduktion der SO<sub>2</sub>-Emissionen auf 520.000 t bis zum Zeitraum 2008 bis 2012 festgelegt [BMU, 2000]. Dies entspricht einer Reduktion

---

der SO<sub>2</sub>-Emissionen um 90% gegenüber dem Stand von 1990. Weitergehende Minderungen sind derzeit nicht in der Diskussion.

#### *Schwefelwasserstoff H<sub>2</sub>S*

Aufgrund fehlender statistischer Angaben über die aktuellen Emissionen an Schwefelwasserstoff in Deutschland wird an dieser Stelle der Ökofaktor für H<sub>2</sub>S analog zu Flußsäure und Salzsäure aus einem Vergleich mit dem Säurebildungspotential von SO<sub>2</sub> ermittelt. Der Äquivalenzfaktor von H<sub>2</sub>S bezüglich SO<sub>2</sub> beträgt nach [GEMIS, 2002] 0,98 SO<sub>2</sub>-equiv./kg. Die ökologische Gesamtwirkung von H<sub>2</sub>S wird daher analog zu HCl und HF tendenziell unterschätzt.

#### *Kohlenmonoxid CO*

Nach [UBA, 2000b] lag die jährliche Emission an Kohlenmonoxid im Jahr 1999 bei 4.952 Kilotonnen. Nach [BMU, 2000] war bis zum Jahr 2005 eine Reduktion der CO-Emissionen auf 5.400 Kilotonnen vorgesehen. Dieses Ziel wurde somit bereits erreicht. Nach [Enquete, 1990] ist bis 2050 eine langfristige Reduktion um 90% gegenüber dem Stand von 1987 (8.000 kt/a für BRD ohne DDR) nötig. Daraus errechnet sich unter Einbeziehung der neuen Länder ein langfristiges Ziel von etwa 1.000 kt/a bis zum Jahr 2050.

#### *Nicht-Methan Kohlenwasserstoffe NMVOC*

Im Jahr 1999 lagen die NMVOC Emissionen in Deutschland bei 1.651 Kilotonnen [UBA, 2000b]. Nach dem Beschluss des EU-Umweltrates vom 22.6.2000 ist bis zum Zeitraum 2008 bis 2012 eine Reduktion auf 995 Kilotonnen geplant [BMU, 2000]. Nach [Enquete, 1990] wird eine langfristige Reduktion um 95% gegenüber dem Jahr 1987 (1.500 kt/a für BRD ohne DDR) bis zum Jahr 2050 empfohlen. Dies ergibt eine Obergrenze von etwa 100 kt/a (inklusive neue Bundesländer).

#### *Zusammenfassung*

In Tabelle 16 werden die aktuellen und kritischen Flüsse beider Szenarien zusammengefasst angegeben und die entsprechenden Ökofaktoren für den Bezugsraum Deutschland berechnet. Für Emissionen deren Ökofaktor nicht aus aktuellem und kritischem Fluss sondern über die Abschätzung aus dem Äquivalenzwert erfolgt, ist dieser anstelle der Flüsse angegeben.

---

Tabelle 16: Ermittlung der Ökofaktoren

Emission	aktueller Fluss F [kt/a]	kritischer Fluss F <sub>k</sub> [kt/a]		Ökofaktor [UBP <sup>D</sup> /g Emission]	
		2005-2010	2050	2005-2010	2050
CO <sub>2</sub>	859.000	760.500	164.000	0,0015	0,0319
CH <sub>4</sub>	3.041	2.628	1.151	0,44	2,29
N <sub>2</sub> O	194	157	42	7,87	110
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	0,046	0,011	0,008	380165	718750
CF <sub>4</sub>	0,186	0,105	0,07	16871	37959
NH <sub>3</sub>	624	550	130	2,06	36,92
CSB	423	738	738	0,78	0,78
N	820	550	164	2,71	30,49
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	1.676	1051	317	1,52	16,68
HF	1,6 SO <sub>2</sub> -equiv./kg			4,76	4,75
HCl	0,88 SO <sub>2</sub> -equiv./kg			2,62	2,62
SO <sub>2</sub>	804	520	520	2,97	2,97
H <sub>2</sub> S	0,98 SO <sub>2</sub> -equiv./kg			2,91	2,91
CO	4.952	5.400	1.000	0,17	4,95
NM VOC	1.651	995	100	1,67	165

### 5.2.3 Ecoindicator 95 Methode

Die Ecoindicator 95 Methode wurde in den Niederlanden entwickelt und im Jahr 1995 veröffentlicht [Goedkoop, 1995]. Damit können ökologische Aspekte einfach und schnell in den Konstruktionsprozess integriert werden. Dies bedeutet, dass ein Planer dieses Instrument während seiner normalen Produkt-Entwicklungstätigkeit benutzen kann. Für diesen Zweck muss die Ökobilanz ein klares Ergebnis erzeugen und nicht nur eine Anzahl von Wirkpotentialen, die schwer zu interpretieren sind [Goedkoop 1995]. Anwendungsbereich der Methode ist innerhalb von Unternehmen in der Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeit der Ingenieure zu sehen. Sie wurde nicht für einen öffentlichen Vergleich von Produktalternativen oder für die Vergabe von Umweltzeichen entwickelt. Der Ecoindicator Ansatz trennt zwischen Sachbilanz, Wirkungsanalyse und Bewertung. Als Endergebnis werden für einzelne Materialien und Prozess-Schritte Ökopunkte angegeben, so dass der Entwickler, ohne die einzelnen Schritte der Ökobilanz nachvollziehen zu müssen, die benötigten Mengen und Prozesse mit den Ökopunkten multiplizieren und zu einer Kennzahl aufaddieren

kann. Die Bewertung erfolgt in zwei Schritten. Die Ergebnisse der Wirkungsanalyse werden zu den jeweiligen Belastungsdaten des Bezugsraumes in Bezug gesetzt (Normalisierung) und im nächsten Schritt mit Gewichtungsfaktoren multipliziert und aufaddiert. In der Original-Methode wird als Bezugsraum Europa verwendet. Für die Ermittlung der Normalisierungsdaten mussten aufgrund fehlender statistischer Daten für einige Kategorien und bestimmte Länder, vor allem für Osteuropa, Extrapolationen durchgeführt werden. Dies erfolgte auf Basis des Energieverbrauchs da angenommen wurde, dass dieser die Industriestruktur eines Landes und seine Emissionen am besten widerspiegelt. Die Gewichtungsfaktoren werden wie bei der Methode der ökologischen Knappheit durch den Distance-to-target-Ansatz gewonnen, indem versucht wird, die Wirkungen auf vergleichbare Schäden zu beziehen. Die Umweltqualitätsziele wurden dabei so gewählt, dass aufgrund der Umweltwirkungen nur ein Toter auf 1 Million Menschen zu beklagen ist, keine Sommer- oder Wintersmog-Perioden auftreten die zu Gesundheitsschäden führen und in einer Dekade das Ökosystem "nur" um fünf Prozent geschädigt wird. In der ursprünglichen Veröffentlichung wurden Indikatoren für etwa 100 Materialien und Prozesse berechnet und angegeben.

Für eine Verwendung der Methode im Rahmen dieser Arbeit müssen jedoch die Indikatoren für die verschiedenen Baumaterialien automatisiert berechnet werden. Im Folgenden wird daher das schrittweise Vorgehen im Zuge der Ermittlung der Indikatoren beschrieben.

Aus dem Ergebnis der Sachbilanz über ein Gebäude sind die Massen der einzelnen Emissionen bekannt. Zunächst werden die Emissionen klassifiziert und zu Wirkungspotentialen aggregiert (vgl. Kapitel 5.2.1). Daraus erhält man die folgenden Wirkungspotentiale bezüglich des betrachteten Gebäudes ( $WP_i^{\text{Gebäude}}$ ):

$GWP^{\text{Gebäude}}$	in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente
$AP^{\text{Gebäude}}$	in kg SO <sub>2</sub> -Äquivalente
$NP^{\text{Gebäude}}$	in kg P-Äquivalente
$TOPP^{\text{Gebäude}}$	in kg NMVOC-Äquivalente

Im nächsten Schritt werden die errechneten Potentiale normalisiert. Dies geschieht durch Division der ermittelten Potentiale durch die aktuellen Potentiale des betrachteten Bezugsraumes. Die allgemeine Formel für diese Normalisierung lautet:

$$NWP_i = \frac{WP_i^{\text{Gebäude}}}{WP_i^{\text{Bezugsraum}}}$$

mit  $NWP_i$  = Normalisiertes Wirkungspotential i

$WP_i^{\text{Gebäude}}$  = Wirkungspotential i des Gebäudes

$WP_i^{\text{Bezugsraum}}$  = Wirkungspotential i des Bezugsraumes

Da die Ergebnisse dieser Normalisierung schlecht handhabbare Zahlen liefern (die Wirkungspotentiale des Bezugsraumes sind um ein Vielfaches größer als die Wirkungspotentiale des betrachteten Gebäudes) werden diese noch mit den Einwohnerzahlen des Bezugsraumes multipliziert. Dies entspricht einer Normalisierung der Wirkungspotentiale auf einen Einwohner des Bezugsraumes. Aus diesen normalisierten Wirkungspotentialen ist für den Planer jedoch noch kein direkter Variantenvergleich eines Gebäudes möglich, da er die Wichtigkeit der einzelnen Wirkungspotentiale untereinander in der Regel nicht kennt. Es muss somit noch eine Gewichtung der Potentiale zueinander erfolgen, um die Gesamtheit der Potentiale zu einem einzigen Wert aggregieren zu können. Diese Gewichtung erfolgt wiederum auf Basis des distance-to-target Prinzips, d.h. dem Abstand zwischen den vorhandenen Emissionen im Bezugsraum und den Zielwert der Emissionen. Je größer der Abstand zwischen diesen beiden Werten, desto mehr Gewicht wird der entsprechenden Emission zugeordnet. Die Gewichtung der einzelnen Wirkungspotentiale in der Originalmethode erfolgte in [Goedkoop, 1995] auf Basis umfangreicher Daten des RIVM [RIVM, 1992], der OECD [OECD, 1993], der WHO [WHO, 1987] und Eurostat [Eurostat, 1991]. Daraus ergab sich eine Gewichtung von GWP : NP : AP : POCP mit 2,5 : 5 : 10 : 2,5. Im Gegensatz zur Originalmethode wird in dieser Arbeit anstelle des POCP das TOPP verwendet (vgl. Kapitel 5.2.1) Des weiteren wird hier der Bezugsraum Deutschland betrachtet. Die Anwendung der selben Gewichtungsfaktoren würde jedoch eine ähnliche Umweltbelastungssituation für Deutschland wie für ganz Europa unterstellen. Dies entspricht jedoch nicht den tatsächlichen Verhältnissen. Auch sind mittlerweile weitergehende Reduktionsziele für verschiedene Emissionen definiert worden. Daher werden nachfolgend die Gewichtungsfaktoren für den Bezugsraum Deutschland neu berechnet. Im Hinblick auf die lange Lebensdauer von Gebäuden werden als Zielwerte die in Tabelle 16 angegebenen langfristigen Reduktionsziele für Deutschland bis zum Jahr 2050 zugrundegelegt. Analog zum Vorgehen in der Originalmethode werden aus dem Verhältnis zwischen Stand und Ziel jedes Potentiales die Gewichtungsfaktoren  $G_i$  für den Bezugsraum Deutschland nach folgender Formel ermittelt:

$$G_i = \frac{P_i^{\text{Stand}}}{P_i^{\text{Ziel}}}$$

mit  $G_i$  = Gewichtungsfaktor des Wirkpotentials  $i$

$P_i^{\text{Stand}}$  = aktueller Stand des Wirkpotentials  $i$

$P_i^{\text{Ziel}}$  = Ziel für das Wirkungspotential  $i$

Der Öko-Indikator des Gebäudes errechnet sich abschließend wie folgt:

$$\text{Eco95}^D = \sum (\text{NWP}_i * G_i)$$

mit  $\text{Eco95}^D$  = Öko-Indikator des Gebäudes auf Basis der in dieser Arbeit zugrundegelegten Daten

Tabelle 17: Wirkungspotentiale und Gewichtungsfaktoren für Deutschland

Emission	Referenz- äquivalent	Stand 1998/99 [kt/a]	Ziel 2050 [kt/a]	Stand Potential [kt/a]	Ziel Potential [kt/a]	Gewichtung G <sub>i</sub>
CO <sub>2</sub>	1,0	859.000	164.000	859.000	164.000	
CH <sub>4</sub>	23	3.041	1.151	69.943	26.473	
N <sub>2</sub> O	296	194	42	57.424	12.432	
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	11.900	0,046	0,008	547	95	
CF <sub>4</sub>	5.700	0,186	0,07	1.060	399	
<b>GWP</b>				<b>987.974</b>	<b>203.399</b>	<b>4,86</b>
NH <sub>3</sub>	0,35	624	130	218	46	
CSB	0,022	423	738	9	16	
N	0,42	820	164	344	69	
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	0,13	1.676	317	218	41	
<b>NP</b>				<b>789</b>	<b>172</b>	<b>4,60</b>
SO <sub>2</sub>	1,0	804	520	804	520	
NH <sub>3</sub>	1,88	624	130	1.173	244	
HF	1,6	-	-	-	-	
HCl	0,88	-	-	-	-	
H <sub>2</sub> S	0,98	-	-	-	-	
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	0,7	1.676	317	1.173	222	
<b>AP</b>				<b>3.150</b>	<b>986</b>	<b>3,19</b>
NMVOG	1,0	1.651	100	1.651	100	
CO	0,11	4.952	1.000	545	110	
CH <sub>4</sub>	0,014	3.041	1.151	43	16	
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	1,22	1.676	317	2.045	387	
<b>TOPP</b>				<b>4.284</b>	<b>613</b>	<b>6,99</b>

---

## 6 KOPPLUNG VON ÖKOBILANZ UND PRODUKTMODELL

### 6.1 Grundkonzeption und Wahl der Hilfsmittel

Wie in der Zielsetzung für diese Arbeit formuliert, soll durch eine Verknüpfung von ökologischen Bilanzierungsmethoden und der Produktmodellierung eine ökologische Analyse und damit Optimierung eines Gebäudeentwurfes im Rahmen des normalen Planungsablaufes ermöglicht werden. Grundlage für eine solche Bilanzierung ist dabei ein Ökoinventar in dem die Informationen zum Umweltverhalten der Baustoffe enthalten sind. Im Gegensatz zu den vorhandenen Lösungsansätzen sollen dabei die ökologischen und bauphysikalischen Daten der Baustoffe aus einer entsprechenden Datenbank direkt in das Produktmodell übertragen werden können, um den Aufwand dafür zu minimieren. Aufgrund der Veränderungen in der Baustoffproduktion und der ständigen Weiterentwicklung der Produktpalette ist die Erstellung eines solchen Ökoinventars jedoch nie abgeschlossen. Vielmehr ist eine ständige Überarbeitung und Anpassung an die jeweils aktuellen Verhältnisse erforderlich. Diese Aufgabe kann aufgrund der Komplexität der eigentlichen Datenerhebung nur von einem Zusammenschluss aus Baustoffherstellern und den im Bereich der Ökobilanzierung und Abfallwirtschaft tätigen Institutionen übernommen werden. Um den Planern von Gebäuden eine jederzeit aktuelle Datenbasis zur Verfügung stellen zu können, ist es daher erforderlich das Ökoinventar zentral zu verwalten. Um zu vermeiden, dass alle Nutzer nach jeder Aktualisierung des Ökoinventars ein update auf ihrem lokalen Arbeitsplatzrechner installieren müssen, bietet es sich an, dass alle auf die zentrale Datenbank zugreifen und nur die jeweils benötigten Datensätze in ihr lokales Produktmodell übertragen. Für den Zugriff auf eine solche zentrale Datenbank bieten sich dabei die Möglichkeiten des Internet gestützten Datentransfers unter Nutzung des ifcXML-Standards an.

Nachdem das Produktmodell durch Übertragung der entsprechenden Datensätze definiert ist, wird dieses von Analysemodulen weiterverarbeitet. Zum einen sollen wärmetechnische Berechnungen auf Basis der Energieeinsparverordnung (EnEV) durchgeführt werden können, zum anderen Analyse und Auswertoptionen für die Durchführung einer Ökobilanz. Die Analysewerkzeuge werden dabei exemplarisch in ein ausgesuchtes dreidimensionales CAD Programm integriert, um die Möglichkeiten und Vorteile einer Produktmodell basierten Planung aufzuzeigen. Dies erfolgt jedoch immer vor dem Hintergrund einer relativ einfachen Übertragbarkeit der verwendeten Techniken zu anderen CAD-Anwendungen auf Basis des Standards der IFC. In Abbildung 20 ist die zentrale Position der CAD-Software und deren Integration in das Gesamtkonzept im Rahmen der vorgestellten Arbeit dargestellt. Das gesamte Konzept der Software gliedert sich dabei grundsätzlich in zwei Phasen. Zunächst wird das Produktmodell durch Übertragung der ökologischen Datensätze via Internet definiert. Anschließend erfolgt die Analyse des Produktmodells.

---

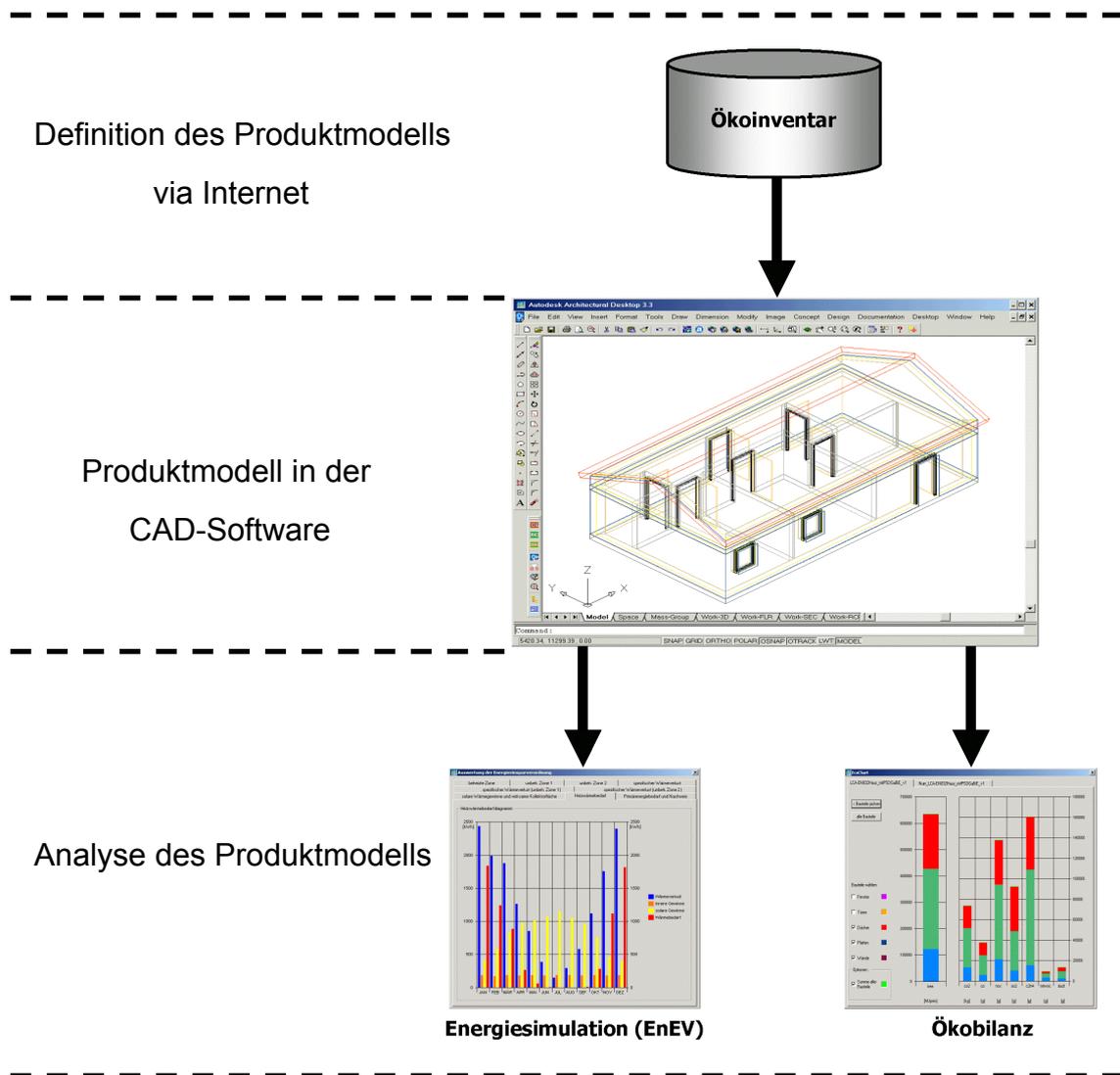


Abbildung 20: Grundkonzept der Softwaretechnischen Umsetzung

### 6.1.1 Auswahl des Modellierungswerkzeugs

Die Palette an Programmsystemen, die für einen Einsatz als Modellierungswerkzeug im Rahmen dieser Arbeit in Frage kamen, konnte auf folgende drei Programmsysteme reduziert werden:

- Architectural Desktop, Version 3.3; Autodesk GmbH
- AllPlan FT, Version 16; Nemetschek AG
- ArchiCAD, Version 7; Graphisoft GmbH

Diese Systeme besitzen alle grundlegenden Eigenschaften und Funktionalitäten für eine dreidimensionale Modellierung von Bauwerken und unterstützen vor allem die Erstellung eines IFC basierten Produktmodells. Ein Austausch von Produktmodell-daten zwischen diesen Programmsystemen kann über eine Import- und Exportschnittstelle im IFC-Dateiformat erfolgen. Damit kann ein bestehendes

Bauwerksmodell in jedem dieser drei Systeme eingelesen und bearbeitet werden. Eine Präferenz für eines dieser Systeme konnte aus dieser Eigenschaft nicht abgeleitet werden.

Die Betriebssysteme Windows NT 4.0 und Windows 2000 werden von allen drei Herstellern unterstützt. Autodesk bietet den Architectural Desktop ausschließlich für die Windows Plattform an. Die beiden anderen Hersteller unterstützen teilweise Unix Plattformen oder auch MacOS. Da in der Regel Windows Betriebssysteme zur Verfügung stehen, wäre der Einsatz aller drei Systeme denkbar. Das entscheidende Kriterium ist aber die Existenz einer leistungsfähigen Programmierschnittstelle, die einen Zugriff auf die Produktmodellldaten eines Gebäudemodells erlaubt. Dabei stellte sich heraus, dass der ADT als einziges System die Möglichkeit bietet, auf das Produktmodell zu zugreifen und es zu verändern oder zu erweitern. Dazu wird von Autodesk die C++ Programmierschnittstelle OMF (Object Modeling Framework) angeboten. Die beiden anderen Systeme verfügen über keine nennenswerten oder vergleichbaren höherwertigen Programmierschnittstellen.

Im Rahmen einer Studie der Firma TechConsult GmbH aus dem Jahr 2000 wurde festgestellt, „dass bis Ende 2001 das Investitionsvolumen für CAD-Lösungen rund 79.000 Lizenzen umfassen wird. Autodesk wird hiervon den größten Anteil auf sich vereinigen. Vor allem in Büros mit bis zu 99 Mitarbeitern wird heute schon mehrheitlich mindestens ein Autodesk-Produkt eingesetzt“ [Autodesk, 2000]. Im Rahmen einer Online-Umfrage nach dem verwendeten CAD-System durch das Internetportal archmatic.com im Jahr 2002 haben 1995 Personen teilgenommen und bestätigen damit diesen Trend.

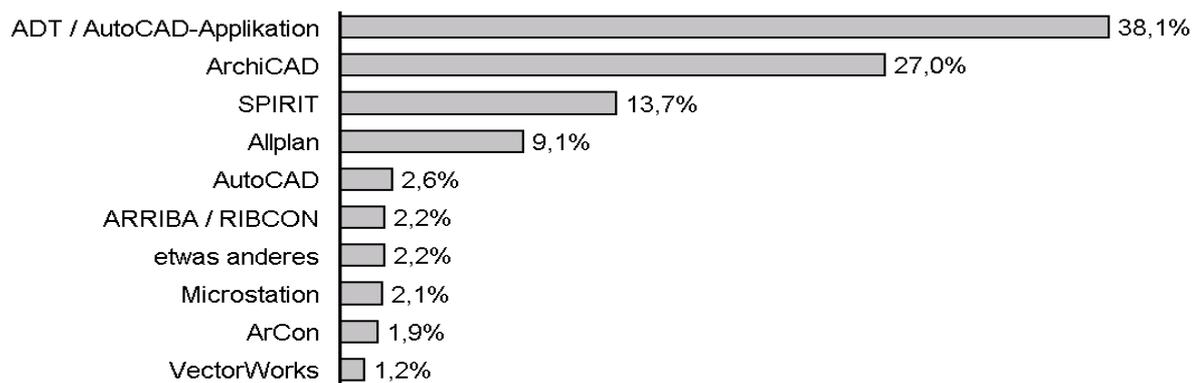


Abbildung 21: Marktanteile von CAD-Systemen

Die Auswahl für das Modellierungswerkzeug fiel daher auf das Programmsystem Architectural Desktop (ADT) von Autodesk in der derzeitigen Version 3.3.

#### *Das Programmsystem „Architectural Desktop 3.3“ (ADT)*

Eines der bekanntesten Produkte der Firma Autodesk ist das CAD-System AutoCAD. Die aktuelle Version mit dem Namen AutoCAD 2002 stellt als CAD-Plattform ein

Grundgerüst für die Erstellung von zwei- und dreidimensionalen geometrischen Modellen zur Verfügung. AutoCAD wird zur Zeit interdisziplinär von mehreren konstruktiven Bereichen, wie dem Maschinenbau, der Elektrotechnik oder dem Bauwesen genutzt.

Um AutoCAD sinnvoll und effektiv im Bauwesen einzusetzen, existieren das Grundsystem erweiternde Applikationen. Diese stammen überwiegend von Fremdherstellern und werden für die einzelnen Fachgebiete speziell entwickelt. Beispiele hierfür sind FEM-Programme oder Bewehrungsmodule. Dabei handelt es sich nicht um eigenständig lauffähige Programme, sondern um Zusatzapplikationen, welche von AutoCAD aus gestartet werden und auf die bereitgestellte Grundfunktionalität zugreifen. Der Anwender benötigt daher neben der eigentlichen Zusatzapplikation immer noch AutoCAD als Grundsystem. Jede dieser Applikationen verwendet dabei seine eigene Sicht auf das geometrische Modell. Das Problem dieser Zusatzapplikationen ist es, einen durchgängigen Datenaustausch zwischen den einzelnen Programmen sicherzustellen. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass die für die Durchführung eines Projekts benötigten einzelnen Aufgabenstellungen mit verschiedenen Zusatzapplikationen bearbeitet werden und diese nicht untereinander kompatibel sind. Somit können lediglich die unter AutoCAD erstellten Grunddaten in diesen Applikationen bearbeitet werden. Die Daten, die dem geometrieorientierten Modell durch einzelne Zusatzapplikationen hinzugefügt werden, können jedoch nicht ohne Probleme von den Applikationen anderer Fachbereiche gelesen werden.

Diese Problematik greift Autodesk auf, um mit dem Architectural Desktop (ADT) im AEC-Bereich (AEC = Architecture, Engineering and Construction) einen neuen Weg zu gehen. Das Programm versteht sich als eigenständiges Produkt, das auf der Grundlage von AutoCAD entwickelt wurde. AutoCAD dient dabei als Grundsystem, in das die bauspezifischen Module des ADT dynamisch hinzugefügt werden. Der ADT 3.3 nützt damit alle Funktionen von AutoCAD 2002 und ist gleichzeitig ein Versuch, den Planungsprozess von der Idee bis hin zur Nutzung des Gebäudes mit einer einzigen Software zu unterstützen. Er zielt dabei auf zwei Hauptgruppen ab. Die eine Gruppe bilden die Anwender der Software. Sie sehen den ADT als „CAD-System für Architekten“, das dabei als leistungsfähiges Tool zur Erstellung Bauteil orientierter Modelle dient. Die andere Gruppe besteht aus den von Autodesk lizenzierten Softwareentwicklern (Autodesk Developer Network ADN). Diese sehen im ADT eine erweiterte Entwicklungsplattform, um die Eigenschaften eines Produktmodells erweitern und modifizieren zu können. Das Bauteil orientierte Modell dient dabei als ein von den CAD-Systemen kommender Ansatz, der das Produktmodell auf der geometrischen Grundlage zu beschreiben versucht. Zusatzapplikationen für den ADT besitzen gegenüber denen des AutoCAD den Vorteil, den Zugriff auf umfassende Bauteilobjekte des Produktmodells, wie zum Beispiel Wände, Fenster und Türen, nutzen zu können.

---

### *Der ADT als Plattform für die Erstellung eines Produktmodells*

Mit fachunabhängiger CAD-Software können in der Regel nur dreidimensionale geometrische Modelle erstellt werden. Dies führt dazu, dass einige der für den AEC-Bereich wichtigen Daten und semantische Informationen nur mit erheblichen Mehraufwand dem geometrischen Modell hinzugefügt werden können. Zu diesem Zweck muss der Planer neue Eigenschaften definieren, die von anderen am Planungsprozess beteiligten nicht mehr verarbeitet werden können, da keine einheitliche Basis für eine Definition existiert. Wie in Kapitel 3.4 bereits erläutert besteht ein Lösungsansatz in der Einführung eines Produktmodells. Um eine Produktmodellierung im Planungsprozess zu unterstützen, liefert Autodesk mit dem ADT einen erweiterten Objekt orientierten Ansatz zur Erstellung von Bauteil orientierten Modellen. Die individuellen Teile eines Gebäudes stehen dabei in einer intelligenten Beziehung zueinander. Zum Beispiel werden Türen und Fenster direkt einzelnen Wänden zugeordnet. Bei der Verschiebung eines Fensters ändert sich so nicht nur die Position des Fensters, sondern ebenfalls die Rohbauöffnung der Wand. Eigenschaften und Attribute der einzelnen Bauteilobjekte werden diesen direkt oder über Stilobjekte zugewiesen und stehen für eine weitere Bearbeitung zur Verfügung. Der ADT ist so strukturiert, dass der Anwender bei der Bearbeitung des Bauteil orientierten Modells nahtlos von einer Hauptphase des Planungsprozesses in die nächste übergehen kann, indem die Informationen der einen Phase in die nächsten Planungsabschnitte mit einfließen können.

### *Die IFC-Schnittstelle im Architectural Desktop*

Das Bauteil orientierte Gebäudemodell wird im Bauwesen von mehreren Stellen bearbeitet. Um den reibungslosen Datenaustausch zwischen den einzelnen Firmen zu ermöglichen, besitzt der Architectural Desktop in der Version 3.3 neben der DXF-Schnittstelle als Austauschformat für reine Geometriedaten unter anderem auch eine IFC-Schnittstelle auf der Grundlage des Standards IFC 1.5.1. Diese abstrakte Definition eines Produktdatenmodells durch die IFC beinhaltet, dass Bauteile wie z.B. Wände, Fenster oder Türen u.a. durch sogenannte ‚Stil-Objekte‘ genauer definiert werden. Dies hat den Vorteil, dass ein bereits definierter Stil auf mehrere gleichartige Bauteile angewandt werden kann. Damit das Produktmodell dynamisch um Zusatzinformationen erweitert werden kann, gibt es die Möglichkeit Listen mit Variablen an Stil- oder Bauteilobjekte anzuhängen. Dieses Konzept wird in der IFC durch die Definition von ‚Property Sets‘ umgesetzt und steht dem Programmierer im ADT zur Verfügung. Property Sets sind im ifcXML Format definiert und stellen somit einen offenen Standard dar. Damit ist es möglich, einen Großteil aller Zusatzinformationen für die Durchführung einer Energiesimulation oder ökologischen Bilanzierung im Produktmodell abzubilden.

Der Export einer IFC-Datei erfolgt über die Selektion der zu exportierenden Bauteile in einem Auswahlmenü. Ebenso werden beim Import einer IFC-Datei über eine

---

Auswahl die zu importierenden Bauteile selektiert. Zusätzlich können noch die Schlüsselnamen der einzelnen Layer modifiziert werden, sowie die Darstellung der Bauteile gesteuert werden. Daten, die beim Import einer IFC-Datei nicht vom ADT interpretiert werden können, werden entweder durch Proxyobjekte (Platzhalter für unbekannt Objekttypen) angezeigt oder bleiben, falls dies nicht möglich ist, unberücksichtigt.

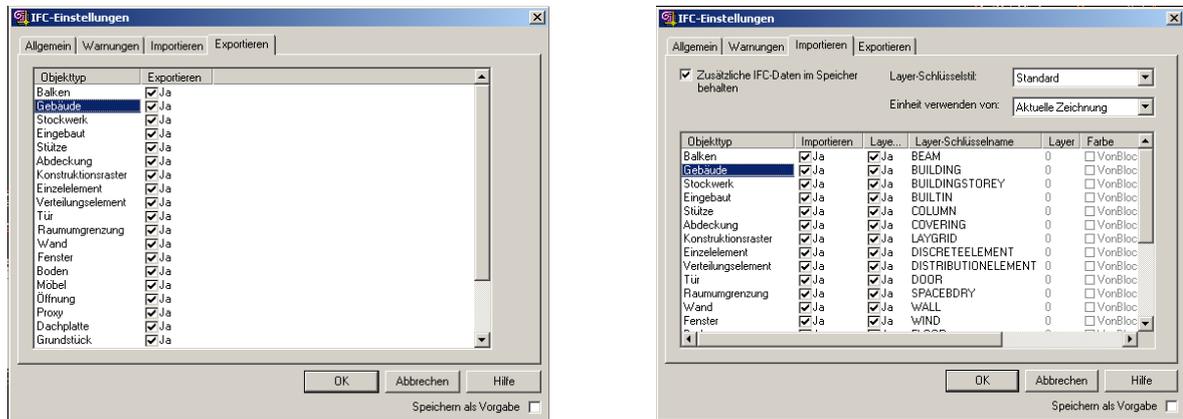


Abbildung 22: Export und Import über die IFC-Schnittstelle

### 6.1.2 Webserver und Datenbanksystem

Für die Umsetzung des Ökoinventars wurde das relationale Datenbanksystem MySQL [MYSQL, 2001] ausgewählt. Es ist für verschiedene Serverplattformen (Windows, Linux, verschiedene UNIX Systeme etc.) verfügbar und für einen nichtkommerziellen Einsatz frei einsetzbar. Zusätzlich liegt der Quellcode des Datenbanksystems offen (Open Source). Damit ein Datenbankzugriff über beliebige Standard-Webbrowser erfolgen kann, sind weiterhin eine Webserver-Software und eine entsprechende Schnittstelle zur Datenbank nötig. Dazu wurde die Software APACHE [APACHE, 2001] und die serverseitige Skriptsprache PHP [PHP, 2001] gewählt. Diese Software ist ebenfalls frei erhältlich und als Quellcodeversion verfügbar. Der APACHE Webserver ist zurzeit auf 60 % aller Webserver installiert, wie eine aktuelle Statistik von Netcraft belegt [netcraft, 2003]. Diese ist in Abbildung 23 dargestellt. Vor allem die hohe Stabilität im Betrieb und die wesentlich bessere Sicherheit verglichen mit den Webserverprodukten von Microsoft waren für diese Auswahl Ausschlag gebend. Die drei Softwareprodukte MySQL, APACHE und PHP sind für Linux, Windows und verschiedene andere Betriebssysteme verfügbar.

PHP ist eine in HTML eingebettete, serverseitige Skriptsprache und als solche eine Erweiterung für Internetserver, die es ermöglicht, mit verhältnismäßig geringen Aufwand dynamische Webseiten für Multimedia- oder E-Commerce-Anwendungen im Internet zu erstellen. Sie besitzt eine große Anzahl an Standard-Funktionsbibliotheken, insbesondere Funktionen zur Anbindung von MySQL Datenbanken. Damit stehen leistungsfähige, sichere und stabile Softwarekomponenten zur Verfügung. Der PHP Code wird in HTML-Seiten eingebunden. Der Aufrufer (Client)

einer derartigen Seite bekommt von diesem Code allerdings nichts zu sehen, da dieser bereits serverseitig interpretiert und in HTML-Code umgewandelt wird. Hierzu startet der Webserver den PHP-Interpreter, der das angeforderte Dokument übersetzt und den PHP-Sourcecode der Seite ausführt. Die enthaltenen Befehle werden interpretiert und das Resultat findet seinen Platz als HTML-Ausgabe an Stelle der Sourcecodes im gleichen Dokument. Nach der Übersetzung wird die modifizierte Seite zum Client geschickt und dort durch den Browser dargestellt. Ob das vom Client aufgerufene Dokument PHP-Programmcode enthält, erkennt der Webserver an der von reinen HTML-Seiten abweichenden Dateiendung. Die Webseite wird also auf diese Weise dynamisch, d.h. erst zum Zugriffszeitpunkt durch den Client erstellt und kann daher in Abhängigkeit von einer Benutzerinteraktion noch vor dem Versenden an den Client modifiziert werden. Aufgrund der für den Vorgang der serverseitigen Interpretation des PHP-Codes erforderlichen Zeit sind PHP-Seiten langsamer als statische HTML-Seiten.

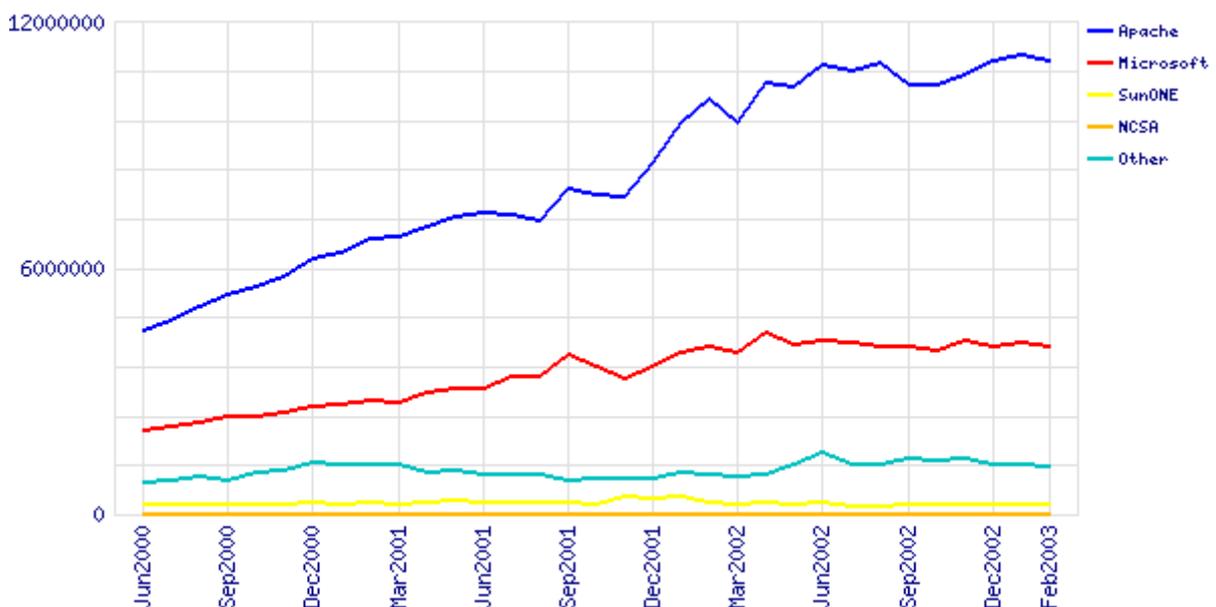


Abbildung 23: Aktive Webserver weltweit

### 6.1.3 Erstellung der Internetdatenbank

Um die mit GEMIS berechneten ökologischen Daten der Baustoffe in das relationale Datenbanksystem MySQL zu integrieren, war eine Bearbeitung der Datensätze in mehreren Schritten erforderlich. Nach Modellierung aller Prozesse in GEMIS besteht zum einen die Möglichkeit die Ergebnisse ausgewählter Prozesse in Form von einzelnen html-Seiten aus GEMIS exportieren zu lassen. Eine Weiterbearbeitung und Datenextraktion aus diesen wäre jedoch nur durch Programmierung einer zusätzlichen Abfragesoftware möglich. Eine zweite Möglichkeit ist der Export der Berechnungsergebnisse aller Prozesse in eine MS-Access Datenbank. Damit stehen die ökologischen Daten zur Weiterverarbeitung und Ergänzung durch die bauphysikalischen Parameter direkt zur Verfügung. Um den Aufwand zu umgehen,

ein zusätzliches Abfragemodul zu entwickeln, wurde die zweite Möglichkeit zum Datenexport gewählt. In der folgenden Abbildung sind die einzelnen Schritte zur Übernahme und Aufbereitung der Daten dargestellt.

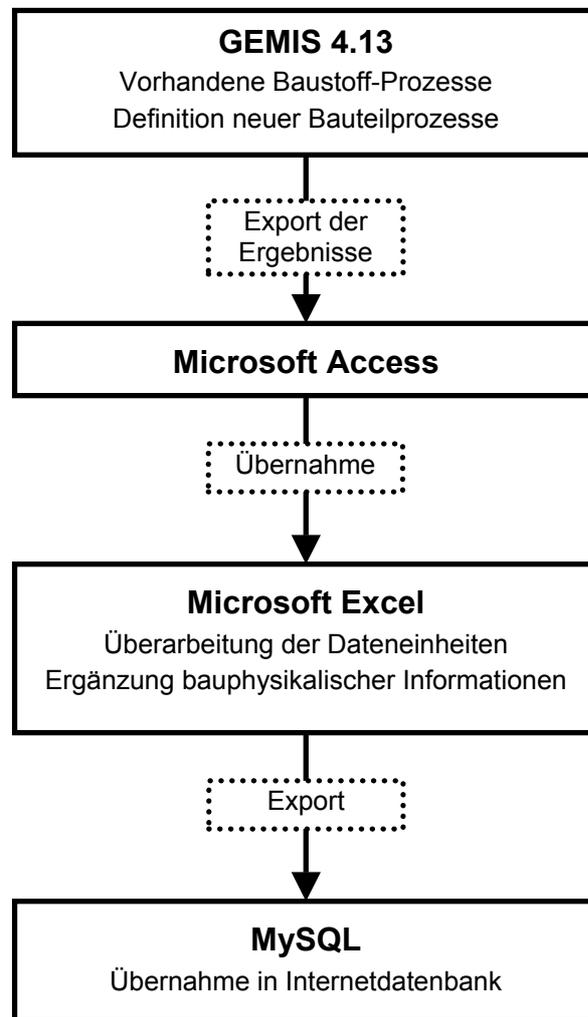


Abbildung 24: Vorgehen zur Erstellung der Internetdatenbank-Inhalte

## 6.2 Entwickelte Softwaremodule

### 6.2.1 Definition des Produktmodells via Internet

Das bereitgestellte Ökoinventar sollte auf einfachste Weise so vielen Nutzern wie möglich zugänglich sein. Für die Entwicklung der zentralen Datenbank wurden daher Internet basierte Servertechnologien gewählt. Das Ökoinventar wird somit für die Planer über das Internet verfügbar. Der Nutzer erstellt dabei zunächst das Gebäudemodell in seiner gewohnten Arbeitsumgebung innerhalb des ADT 3.3. Die im ADT vorhandene Standarddefinition der Bauteilstile (z.B. Wandstil) wurde um die Option „EcoData“ erweitert. Um einzelnen Stilen zusätzliche ökologische und bauphysikalische Eigenschaften zuzuweisen, wird der Anwender direkt aus der

ADT 3.3 Umgebung über das Internet mit der MySQL-Datenbank verbunden (Abbildung 25). Diese wird durch einen Server innerhalb des Lehrstuhls für Bauinformatik der TU München bereitgestellt. Dabei stellt die obere Hälfte des Programmfensters einen voll funktionsfähigen Webbrowser auf der Basis des Internet Explorers von Microsoft dar. Über dynamische Webseiten wird er weiter zu den gewünschten Daten geleitet, kann entsprechende Datensätze auswählen und diese auf sein Gebäudemodell übertragen. Das Format der übertragenen Daten ist dabei ifcXML. Der Aufbau der Tabellen der einzelnen Baustoffe erfolgt hierbei dynamisch auf Grund von Werten, die in der relationalen Datenbank (MySQL) abgelegt sind. Dabei werden die Materialkennwerte nicht einem einzelnen Bauteil, sondern einem Bauteilstil zugeordnet. Erst dieser Stil wird dann einem oder mehreren Bauteilen zugeordnet. Somit ist es nun möglich, durch eine einzige Internetanfrage und Werteübernahme all diejenigen Bauteile zu definieren, denen dieser Stil zugeordnet ist. Die Speicherung der übertragenen Datensätze erfolgt in den zu jedem Stil zugehörigen statistischen Sätzen von Bauteileigenschaften, den sogenannten „property sets“.

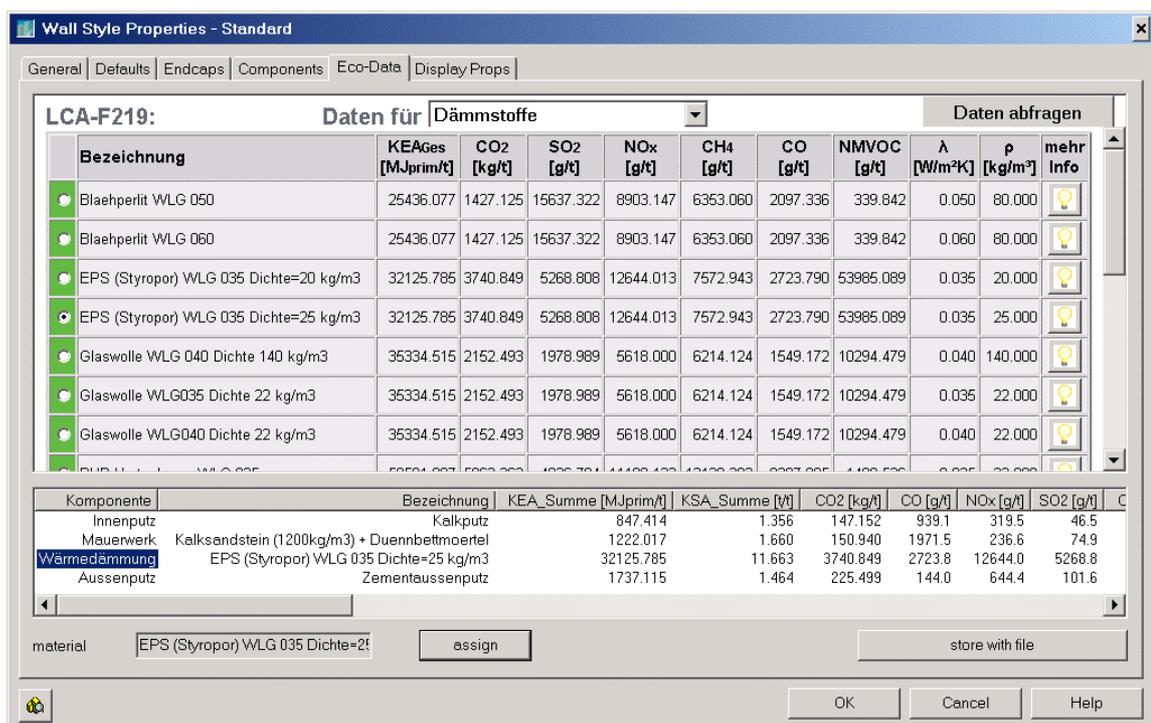


Abbildung 25: Importdialog EcoData

## 6.2.2 Analyse des Produktmodells nach der EnEV

Zur Durchführung der Berechnungen nach Energie-Einsparverordnung wurde das Softwaremodul „EnEV“ entwickelt, das auf die im Planungsprozess vorhandenen Informationen eines im ADT 3.3 erstellten Produktmodells zurückgreifen kann [Neuberg, 2003]. Im Folgenden werden das dabei entwickelte Konzept und die dazugehörigen Softwarekomponenten kurz vorgestellt.

### Implementierung der EnEV-Nachweisverfahren

Der Aufbau und der Datenfluss des Programms zur Durchführung eines Nachweises nach der Energieeinsparverordnung ist in folgender Abbildung dargestellt.

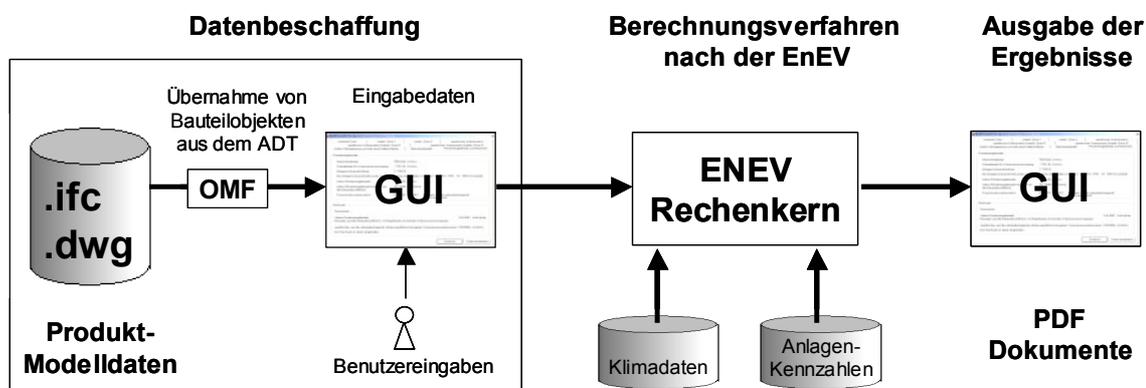


Abbildung 26: Design der Softwarekomponenten

Jede der drei Softwarekomponenten bildet für sich eine abgeschlossene Einheit. Für die Implementierung der Softwarekomponenten zur Datenbeschaffung wurde der ADT 3.3 und die C++ Programmierschnittstelle OMF verwendet, um Zugriff auf das Produktmodell zu erlangen. Da das Produktmodell nicht sämtliche Informationen für die Durchführung einer Berechnung liefert (z.B. Verschattungsfaktoren), werden weitere Informationen benötigt. Deshalb wurde es vorgesehen, dass ergänzende Angaben interaktiv vom Benutzer eingegeben werden können. Die Eingabedialoge (Abbildung 27) zur Datenbeschaffung sind durch die Verwendung der OMF an den ADT gebunden. Die Berechnungsverfahren nach der EnEV sind in einem eigenständigen Rechenkern implementiert, der unabhängig von der Datenquelle oder der Ausgabeart in anderen Programmen eingesetzt werden kann. Denkbar wäre an dieser Stelle zum Beispiel die direkte Anbindung der Berechnungsverfahren an ein Produktmodell über eine IFC-Schnittstelle. Der Rechenkern ermittelt z.B. nach einem Monatsbilanzverfahren den Jahres-Primärenergiebedarf und vergleicht diesen mit dem aus der Gebäudenutzfläche ermittelten Grenzwert. Die Berechnungsergebnisse sowie eine Zusammenfassung der wichtigsten Eingangswerte werden anschließend detailliert ausgegeben (Abbildung 28 und Abbildung 29).

### Definition des Standorts des Gebäudes

Die Berechnungsverfahren der EnEV erfordern eine Berücksichtigung der Ausrichtung der Flächen der Gebäudehülle nach den Himmelsrichtungen und monatliche Klimainformationen zum Gebäudestandort. Die Ausrichtung des Gebäudes wird durch ein Benutzerkoordinatensystem im ADT definiert. Damit ist eine automatische Zuordnung der Flächenanteile zu der jeweiligen Himmelsrichtung möglich. Der Einfluss des Standorts des Gebäudes ist bei der Ermittlung der monatlichen Klimadaten relevant. Diese werden in einer externen relationalen

Datenbank gespeichert. Eine automatische Erfassung der unmittelbaren Gebäudeumgebung (z.B. Nachbarbebauung, Bäume etc. ) und deren Einfluss (z.B. Verschattung) auf das zu analysierende Gebäudemodell wurde nicht implementiert. Prinzipiell ist jedoch eine Berücksichtigung dieser Faktoren auf der Grundlage des hier vorgestellten Softwarekonzeptes möglich.

### Eingabedialog der Analyseapplikation EnEV

Nachdem ein Gebäude als Produktmodell innerhalb des ADT durch Import der bauphysikalischen und ökologischen Kennwerte der Baustoffe definiert wurde, gelangt man durch den Start der Zusatzapplikation EnEV in den zugehörigen Eingabedialog. Dieser verfügt über insgesamt vier Registerkarten, wobei in jeder Registerkarte eine bestimmte Gruppe an Parametern gemäß der Energie-Einsparverordnung einzugeben sind. Informationen zu Gebäudeform, Gebäudetyp oder dem Heizanlagentyp sind dabei manuell einzutragen, da diese nicht direkt aus dem Produktmodell gelesen werden können. Um die beheizte Zone zu definieren, sind im Produktmodell lediglich die Wände zu markieren, die diese Zone begrenzen. Die enthaltenen Informationen zu Öffnungen, Fenster oder Türen werden automatisch übernommen (Abbildung 27). Zusätzlich wird die Möglichkeit gegeben, weitere unbeheizte Zonen zu definieren. Dabei werden Trennwände der Zonen untereinander automatisch erkannt.

The screenshot shows a software dialog box titled "Eingabe der benötigten Daten nach der Energieeinsparverordnung". It has four tabs: "Allg. Gebäudedaten", "Wände und Fenster" (selected), "beheiztes Gebäudevolumen", and "unbeheizte Zonen".

Under "Bauteile der beheizten Zone:", there is a dropdown for "Unbeheizte Zone:" set to "1". To the right, "Trennwände zur unbeheizten Zone:" are listed with area and U-value fields for Nord, Ost, Süd, and West.

	Fläche [m²] innen/außen:	U-Wert [W/(m²K)]:	Fläche [m²] innen/unbeh.:	U-Wert [W/(m²K)]:	Fläche [m²] innen/unbeh.:	U-Wert [W/(m²K)]:
Nordfenster:	4.0	1.9	0	0	Nord:	0
Ostfenster:	3.0	1.9	0	0	Ost:	0
Südfenster:	9.0	1.9	8.0	1.9	Süd:	7.0
Westfenster:	3.0	1.9	0	0	West:	0
Wände:	91.4	0.20				

Below this, "Begrenzungen wählen:" includes a "< Picken" button and an "Automatisch" button with the text "automatische Auswahl der äußeren Begrenzung des Gebäudemodells durch den ADT".

There are four sections for selecting factors:

- Abminderungsfaktor Fc von Sonnenschutzvorrichtungen:** Radio buttons for "1.0 pauschal nach DIN V 4108-6, Tabelle D.3" and "alternativ nach DIN V 4108-6, Tabelle 7:" with a value of 1.0.
- Gesamtenergiedurchlassgrad transparenter Bauteile:** Radio buttons for "0,87 für Einfachverglasung", "alternativ:" with a value of 0.7, and "0,75 für Doppelverglasung (siehe DIN V 4108-6, Tabelle 6)".
- Verschattungsfaktor Fs:** Radio buttons for "0,9 pauschal nach DIN V 4108-6, Tabelle D.3" and "nach DIN V 4108-6, Tabellen 9 bis 11:" with a value of 1.0.
- Rahmenfaktor Ff:** Radio buttons for "0,7 pauschal nach DIN V 4108-6, Tabelle D.3" and "alternativ nach DIN 4108-6, Abs. 6.4.2:" with a value of 0.8.

At the bottom, "Vereinfachtes Nachweisverfahren:" has an "Anwenden" button and a note: "bei Wohngebäuden, deren Fensterflächenanteil 30 vom Hundert nicht überschreitet darf nach EnEV § 3, Abs. 2, Nr. 1 nach dem vereinfachten Verfahren gerechnet werden".

Abbildung 27: Eingabedialog für eine beheizte Gebäudezone

### Ergebnisse der Analyse nach EnEV

Nach der Analyse des Produktmodells mit der EnEV Software stehen dem Anwender sehr detaillierte Ausgabedialoge zur Verfügung. Darin werden getrennt für jede Zone die aus dem Produktmodell übernommenen Daten und in einer weiteren Seite der jeweilige spezifische Wärmeverlust der Zone aufgelistet. Man kann auch ablesen, wie sich diese Verluste aufteilen: z.B. Wände an Außenluft grenzend, Fenster, Lüftungsverluste. Die Auswertungen für das Gesamtgebäude sind aufgeteilt in „solare Wärmegewinne und wirksame Kollektorfläche“, „Heizwärmebedarf“ und „Primärenergiebedarf und Nachweis“. Die thermischen Verluste und Gewinne, aus denen sich der Wärmebedarf errechnet, werden für jeden Monat unter Berücksichtigung der Klimadaten des Referenzstandortes ermittelt und ausgegeben. Die Ausgabe erfolgt dabei sowohl in tabellarischer als auch in graphischer Form (Abbildung 28). Dies erleichtert dem Planer einen Gesamteindruck des aktuellen Gebäudemodells hinsichtlich Ergebnisse nach EnEV zu erhalten.

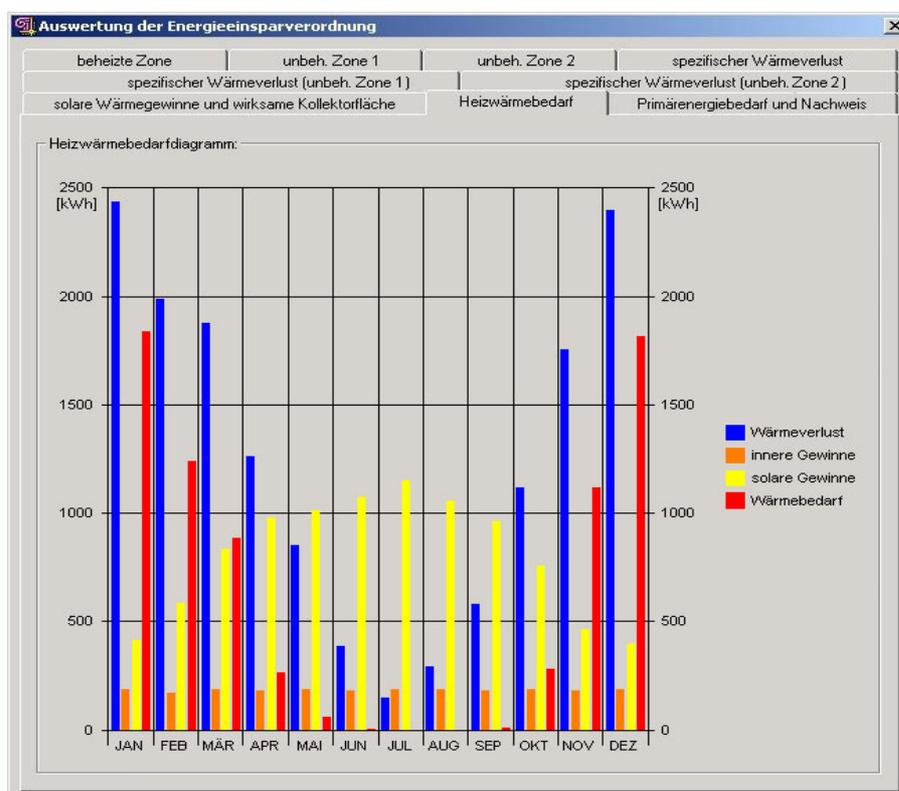


Abbildung 28: Graphische Ausgabe Monatsbilanzverfahren

In Abbildung 29 ist der Ausgabedialog „Primärenergiebedarf und Nachweis“ dargestellt. Hier werden die Ergebnisse für das Gesamtgebäude zusammengefasst angegeben. Neben dem Heizwärmebedarf und dem Wärmebedarf für die Trinkwarmwasserversorgung nach DIN V 4108-6 sind hier auch die ermittelte Anlagenaufwandszahl sowie der Primärenergiebedarf nach DIN V 4701-10 inklusive der jeweils einzuhaltenden Grenzwerte angegeben.

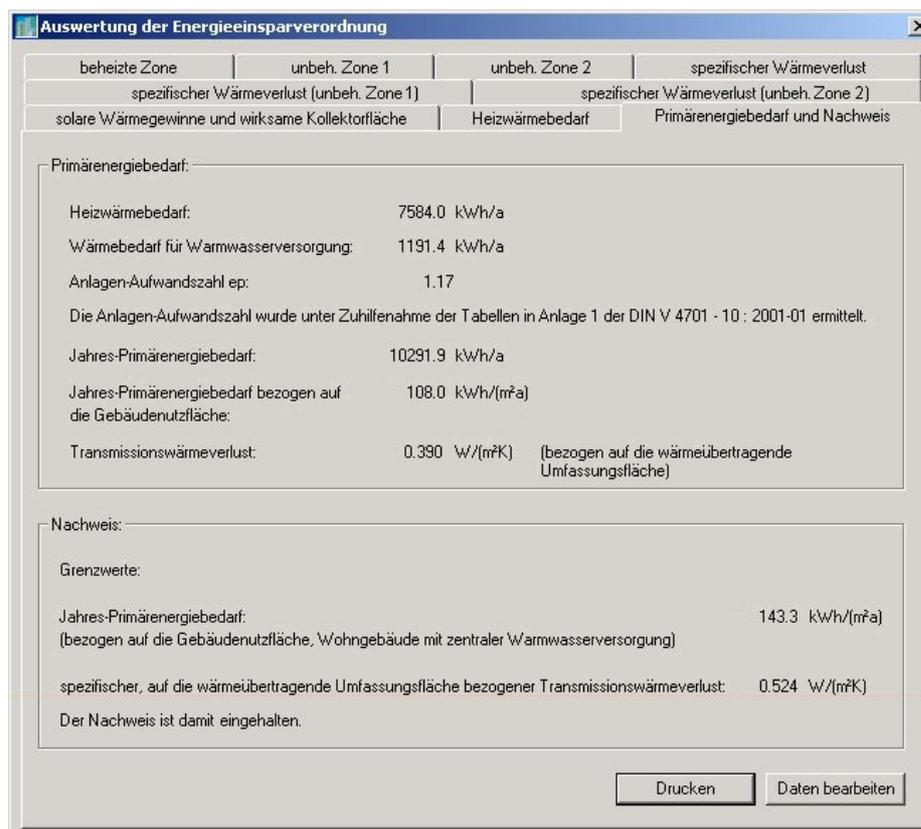


Abbildung 29: Ausgabedialog „Primärenergiebedarf und Nachweis“

### 6.2.3 Analyseapplikation „LCA-Chart“

Analog der Auswertung nach EnEV kann das um ökologische Daten erweiterte Produktmodell mit dem Analysewerkzeug „LCA-Chart“ im Rahmen einer Ökobilanz analysiert werden. Die Auswertung erfolgt dabei analog den Schritten nach der Normenreihe EN ISO 14040 ff: mit getrennter Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Bewertung. Auf Basis der erhaltenen Ergebnisse kann der Planer die Schwachstellen des gegenwärtigen Entwurfes ermitteln und bei der Entwurfsoptimierung berücksichtigen. Änderungen bedürfen dabei nur eines minimalen Aufwandes. Soll beispielsweise der Aufbau der Wände hinsichtlich verwendetem Material und Schichten geändert werden, muss innerhalb des ADT 3.3 lediglich der verwendete Wandstil modifiziert werden. Dies kann mit Hilfe der in Kapitel 6.1.3 beschriebenen Internetschnittstelle „EcoData“ schnell und unkompliziert erfolgen. Die aus dem Ökoinventar übertragenen Daten werden als Bauteileigenschaften (Property Sets) im zugehörigen Bauteilstil (z.B. Wandstil) gespeichert. Die an diesen Stil gekoppelten Elemente (z.B. Wände) werden dabei automatisch mit den neuen Eigenschaften besetzt und aktualisiert. Eine manuelle Neuberechnung kann daher vollständig entfallen. Ändert sich neben den zugewiesenen Baustoffen auch die Geometrie eines Bauteilobjektes (z.B. Vergrößerung eines Fensters) werden automatisch die Emissionswerte dynamisch neu berechnet, da eine Verknüpfung des Bauteilobjektes mit den im Bauteilstil gespeicherten ökologischen Daten besteht. Ändert sich die

Geometrie bzw. Bauteilvolumen, so ändert sich auch das Bauteilgewicht und somit der Betrag der Emissionen und des Ressourcenbedarfs.

### Sachbilanz

In der Registerkarte Sachbilanz des Analysewerkzeuges „LCA-Chart“ sind die entsprechenden Ergebnisse aus der Analyse des Produktmodells tabellarisch angegeben. Die kumulierten Schadstoffemissionen und der Energieaufwand können dabei nicht nur in ihrer Summe bezogen auf das gesamte Gebäude dargestellt werden. Zusätzlich werden auch die entsprechenden Werte für die einzelnen Bauteilgruppen (Fenster, Wände, Dächer etc.) ausgegeben. Diese werden sowohl in einem Diagramm als auch numerisch für das gesamte Gebäude ausgewertet (Abbildung 30).

In dem Eingabefeld „Simulationszeitraum“ kann die Dauer der gewünschten Simulation in Jahren eingegeben werden. Sämtliche Emissionen und der Ressourcenbedarf aufgrund von Bauteilerneuerungen sowie aus der Raumwärmegewinnung werden dadurch für den eingegeben Zeitraum automatisch errechnet und im Anzeigefenster aktualisiert. Neben dieser tabellarischen Ausgabe ist es weiterhin möglich, die Ergebnisse der Sachbilanz aus der Zeitreihensimulation in Zeitreihendiagrammen darzustellen (Abbildung 31). Jeder Parameter der Sachbilanz kann dabei ausgewählt und angezeigt werden. Dominiert ein Bauteil oder die Heizung die Zeitreihen so stark, dass die Darstellung der anderen Bauteile in den Hintergrund gedrängt wird (Abbildung 31 links), so kann durch Entfernen des Häkchens neben dem dominierenden Bauteil dieses ausgeblendet werden. Der Maßstab der Darstellung passt sich anschließend automatisch an und die restlichen Bauteile werden genauer dargestellt (Abbildung 31 rechts).

Bauteile	KEA_nichterneuerbar [M.]	KEA_erneuerbar [M.]	KEA_andere [M.]	KEA_Summe [M.]	KSA_nichterneuerbar...	KSA_er...
Wände	224583.7	1326.4	2533.6	228443.6		124.3
Platten	190783.7	1177.3	9373.9	201334.9		128.3
Dächer	137621.7	1111.2	6578.5	145311.3		16.4
Türen	2792.2	23.9	783.8	3599.9		0.1
Fenster	61869.5	1205.2	3761.3	66835.9		4.1
Fassadenele...	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
Träger	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
Stützen	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
Streben	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
Heizung	1680646.3	502146.8	11446.7	2194242.6		1.4
Summe	2298297.1	506990.7	34477.6	2839768.3		274.5

Bauteile	Volumen [...]	Masse...	Fläche [m2]
Wände	117.6	108.4	353.1
Platten	70.2	121.3	280.7
Dächer	39.8	13.9	162.6
Türen	0.0	0.4	34.5
Fenster	0.0	1.5	36.3
Fassaden...	0.0	0.0	0.0
Träger	0.0	0.0	0.0
Stützen	0.0	0.0	0.0
Streben	0.0	0.0	0.0
Summe	227.6	245.4	867.2

Abbildung 30: Analyseapplikation LCA-Chart - Sachbilanz numerisch

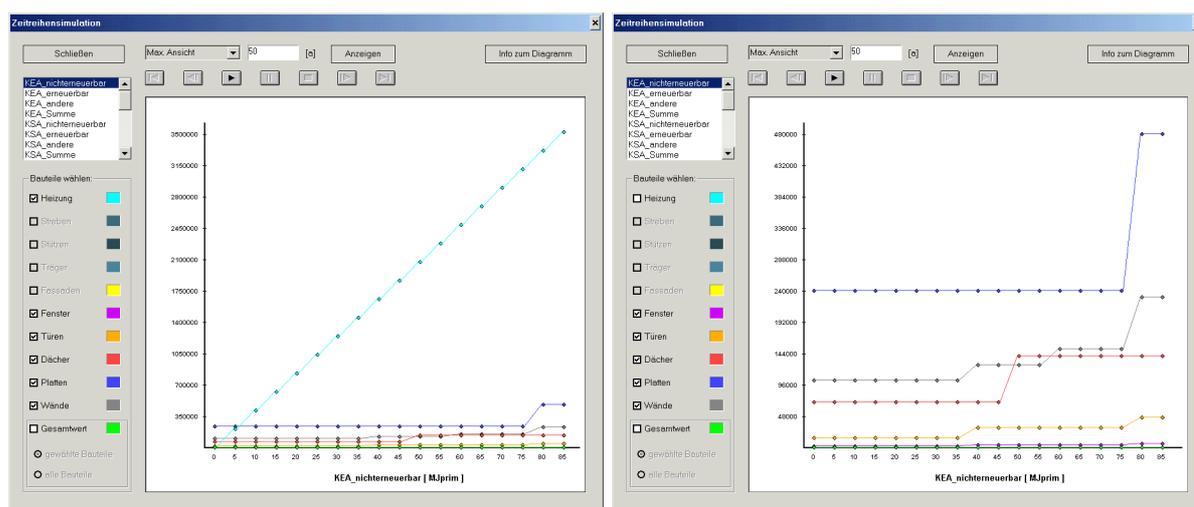


Abbildung 31: Analysemodul LCA-Chart - Sachbilanz Zeitreihendiagramm

### Definition der Anlagen zur Raumwärmegewinnung

In der zweiten Registerkarte des Analysewerkzeuges LCA-Chart können Angaben zum verwendeten Heizungssystem, einer eventuellen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung sowie des zugrundegelegten Strommixes für den Hilfsenergiebedarf dieser Anlagen gemacht werden (vgl. Kapitel 4.3.6). Dabei ist zunächst der Jahresheizwärmebedarf zuzüglich der Verluste aus Übergabe, Verteilung und Speicherung und abzüglich etwaiger Gutschriften aus der Trinkwarmwasserbereitung einzugeben. Weiterhin muss der Trinkwarmwasserbedarf zuzüglich der Verluste des Trinkwarmwassersystems eingegeben werden. Die einzelnen Werte ergeben sich im Zuge der Berechnung der Anlagentechnik nach DIN V 4701-10. Im nächsten Schritt ist der gewünschte Strommix für den Hilfsenergiebedarf der Anlagen einzugeben. Wie in Kapitel 4.3.6 beschrieben kann der Anteil des elektrischen Stromes aus erneuerbaren Energiequellen von 0 bis 100% frei gewählt werden. Der Anteil aus nicht erneuerbaren Quellen wird automatisch ergänzt. Damit ist es möglich, die ökologischen Auswirkungen des Strombedarfs der Anlagen zur Raumwärmegewinnung zu simulieren. Im folgenden Schritt kann optional eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zugeschaltet werden, wobei die zurückgewonnene Heizwärme und der Hilfsenergiebedarf dieser Anlage vom Planer selbst einzugeben sind. Als letztes ist noch die Heizungsanlage selbst zu definieren. Dabei ist es möglich, aus einer Liste mit verschiedenen Anlagen bis zu drei verschiedene Typen zu einer multivalenten Heizungsanlage mit entsprechendem Deckungsanteil zu kombinieren (vgl. Kapitel 4.3.6). Werden Eingaben in dieser Registerkarte geändert, erfolgt automatisch eine Aktualisierung sämtlicher Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung.

The screenshot shows the 'LifeCycleAssessment - Chart' software interface. The title bar reads 'Neubau KS+PUR - KFW40 - mit S-L'. The main window has tabs for 'Sachbilanz', 'Heizung', 'KEA & KSA', 'CML & ECO95', 'UBP', and 'Datenexport'. The 'Heizung' tab is active, showing the 'Heizungsanlagendatenbank' set to 'C:\Programme\F219Software\Datenbanken\AR\F219\_2003\_01\_22.mdb'. Below this, the 'Ergebnis aus EnEV - Berechnung' section displays:
 

- Q<sub>h</sub>-Q<sub>h,tw</sub>+Q<sub>h,ce</sub>+Q<sub>h,d</sub>+Q<sub>h,s</sub> in [kWh/a]: 7353
- Q<sub>tw</sub>+Q<sub>tw,ce</sub>+Q<sub>tw,d</sub>+Q<sub>tw,s</sub> in [kWh/a]: 4329
- Gebäudenutzfläche A<sub>n</sub> in [m<sup>2</sup>]: 244.6
- Summe in [kWh/a]: 11682

 There are buttons for 'EnEV - Ergebnisse aus Zeichnung importieren' and a note 'Es liegen EnEV - Ergebnisse in der Zeichnungsdatei vor!'. The '1. Wähle Stromversorgung' section has a slider for 'Anteil in [%]' with values 95 (nicht erneuerbar) and 5 (erneuerbar), and a '100' button. The '2. Lüftungsanlage mit WRG durch WÜT' section has radio buttons for 'nein' and 'ja', and input fields for 'Zurückgewonnene Heizwärme q<sub>HL</sub> in [kWh/(m<sup>2</sup> a)]' (5.37) and 'Hilfsenergiebedarf der Lüftungsanlage q<sub>LHE</sub> in [kWh/(m<sup>2</sup> a)]' (0.54). The '3. Heizsystem' section has a dropdown menu with 'Gas Brennwert zentral mit 100% Systemnutzungsgrad' selected, and columns for 'Anteil in [%]' and 'Anteil in [kWh/a]'. The values are:
 

System	Anteil in [%]	Anteil in [kWh/a]
Gas Brennwert zentral mit 100% Systemnutzungsgrad	73.27	7597
Solar Kollektor	26.73	2771.5
Bitte wählen	0	0
-> verbleibender gesamter Wärmebedarf in [kWh/a]		10368.496

 Buttons for 'Info zur Stromversorgung', 'Info zum Heizsystem', and 'Info zur Lüftungsanlage' are also visible.

Abbildung 32: Analysemodul LCA-Chart - Definition der Raumwärmegewinnung

### Wirkungsabschätzung

In den folgenden Registerkarten des Analysemoduls „LCA-Chart“ werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auf Basis der implementierten Bewertungsmethoden angegeben (vgl. Kapitel 5.1.1). In der Registerkarte „KEA&KSA“ werden die kumulierten Sachbilanzgrößen tabellarisch und als Säulendiagramme getrennt nach den einzelnen Bauteilgruppen sowie der Raumwärmegewinnung dargestellt (Abbildung 33). Im Rahmen einer Screening-Ökobilanz können so bereits sogenannte Hot-Spots des Gebäudeentwurfes lokalisiert und dementsprechend Modifikationen des Entwurfes durchgeführt werden. In der nächsten Registerkarte „CML&ECO95“ sind die Ergebnisse nach der CML- und der Ecoindicator95-Methode angegeben (Abbildung 34).

Dabei sind im oberen Ausgabebereich die Ergebnisse der Analyse nach der CML-Methodik zu sehen. Die errechneten Wirkpotentiale werden wahlweise nach Bauteilgruppen oder Emissionen getrennt, sowie normiert oder nicht normiert angegeben. Um die wichtigsten zugrundeliegenden Annahmen der Methode mit darzustellen, werden die berücksichtigten Emissionsparameter sowie deren Charakterisierungsfaktoren ebenfalls mit dargestellt (vgl. Tabelle 15). Da die Ecoindicator95-Methode auf den Ergebnissen der CML-Methode basiert, werden auf dieser Registerkarte zusätzlich die ermittelten Öko-Indikatoren getrennt nach Wirkungspotentialen, sowie der gesamte Öko-Indikator des Gebäudes angegeben. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sind die der Berechnung zugrundeliegenden Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren mit ausgegeben (vgl. Tabelle 17). Eine Darstellung der Ergebnisse als Diagramm ist ebenfalls möglich.

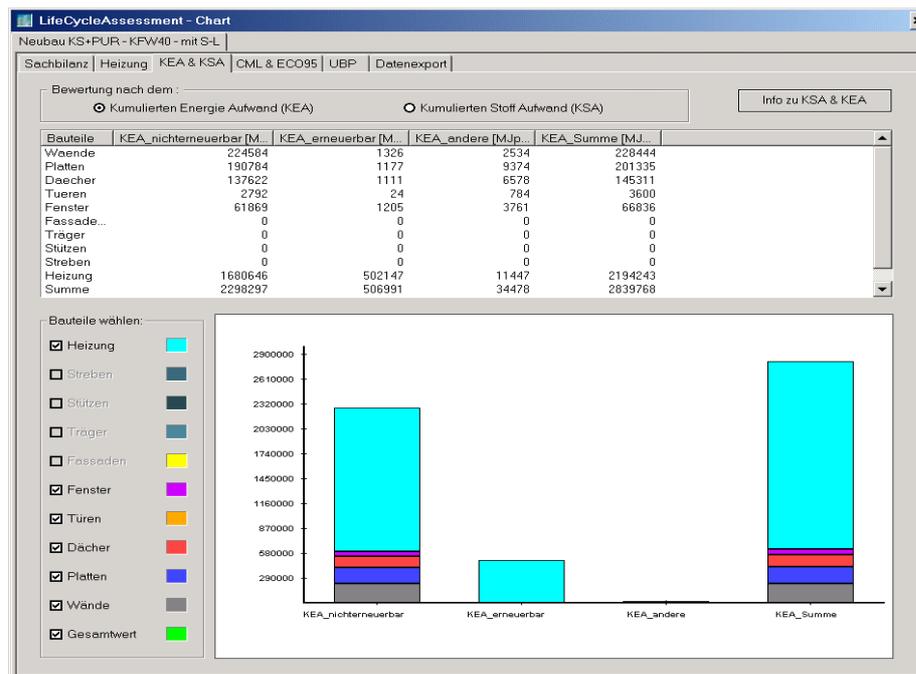


Abbildung 33: Analyseapplikation LCA-Chart - Auswertung von KEA&amp;KSA

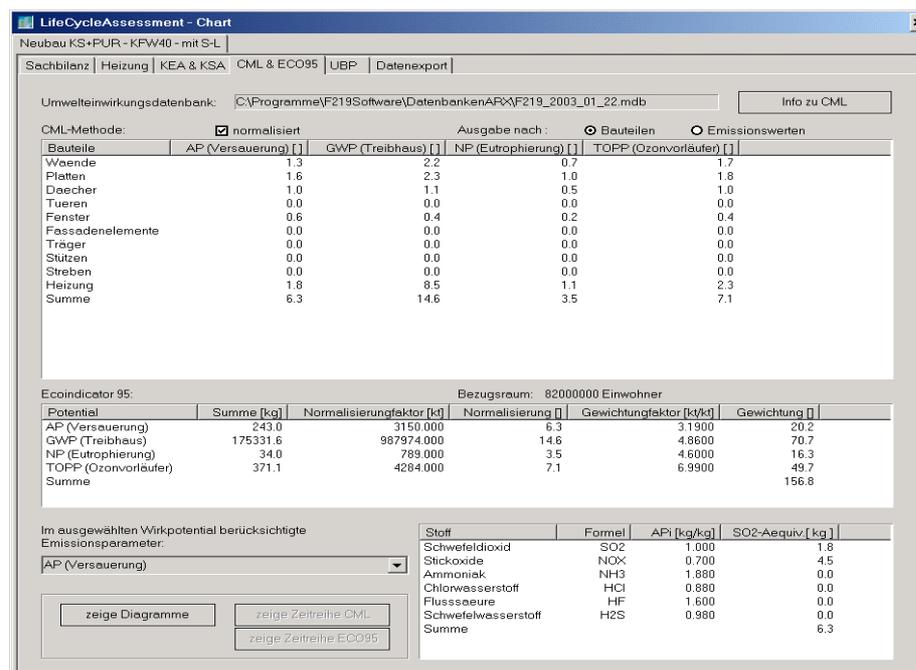


Abbildung 34: Analyseapplikation LCA-Chart - CML und Ecoindicator95

In der Registerkarte „UBP“ werden die Ergebnisse der Auswertung nach der UBPMethode sowohl graphisch als auch numerisch dargestellt (Abbildung 35). Dabei kann zwischen den beiden in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Szenarien gewählt werden. Analog der graphischen Ausgabe der Zeitreihensimulation innerhalb der Sachbilanz sowie der graphischen Ausgabe von KEA und KSA können auch hier einzelne Bauteilgruppen oder die Heizung ausgeblendet werden.

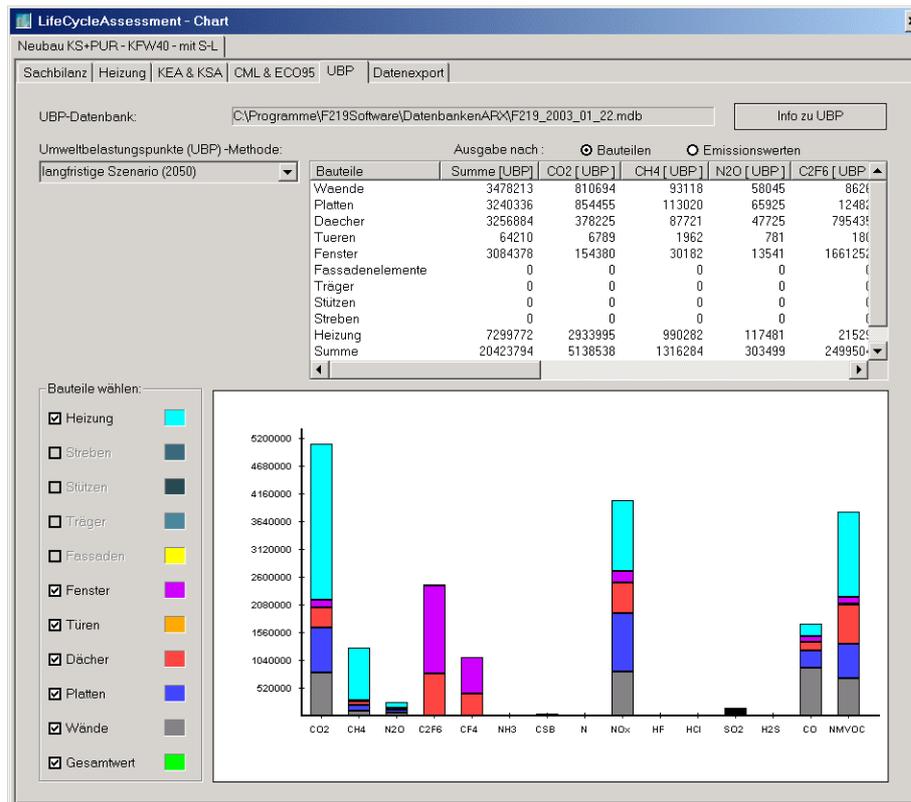


Abbildung 35: Analyseapplikation LCA-Chart - UBP-Methode

## 7 BEISPIELBERECHNUNGEN

In diesem Kapitel werden Varianten eines Beispielgebäudes hinsichtlich der Auswirkungen auf die ökologische Gesamtbilanz über einen längeren Zeitraum untersucht. Zum einen erfolgt ein Vergleich unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen für einen Altbau. Zum anderen werden Varianten eines Neubaus einander gegenübergestellt. Als funktionelle Einheit der ökologischen Bilanzierungen wird jeweils das gesamte Gebäude zugrundegelegt.

### 7.1 Allgemeine Definition des Beispielgebäudes

Das untersuchte Gebäude ist ein Wohnhaus mit zwei Vollgeschossen und einem ausgebauten Dachraum. Sämtliche Räume sind beheizt. Die beheizte Zone umfasst somit den von der Bodenplatte, den Außenwänden und dem Dach umschlossenen Raum inklusive dem jeweiligen Eigenvolumen der Bauteile. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 36 bis Abbildung 39) ist das Gebäude als dreidimensionales Modell und in Form von zweidimensionalen Schnitten dargestellt.

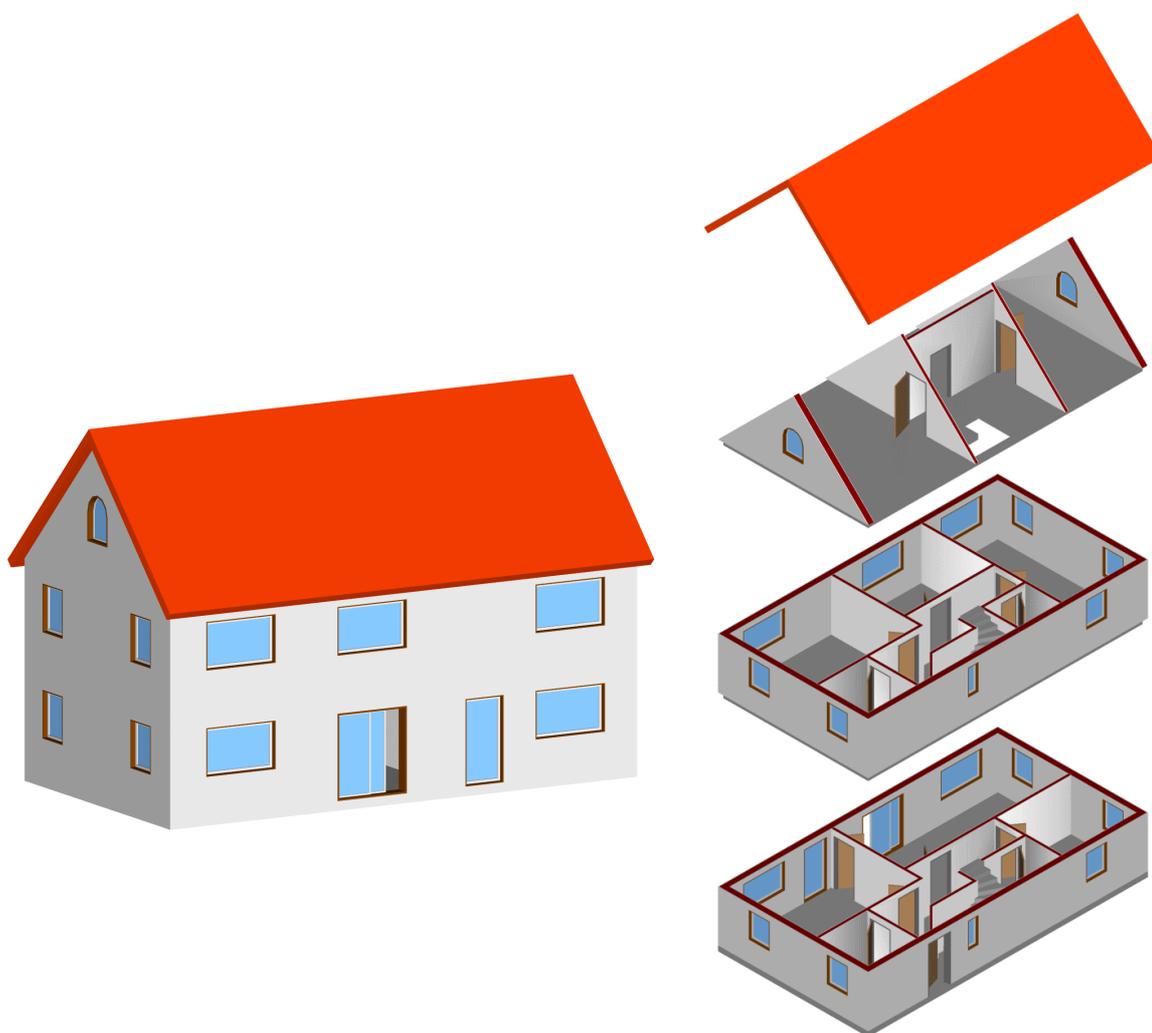
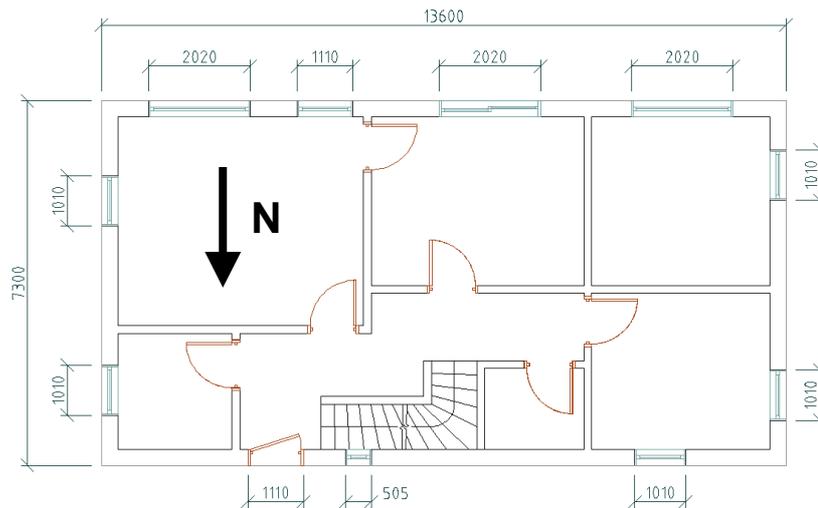
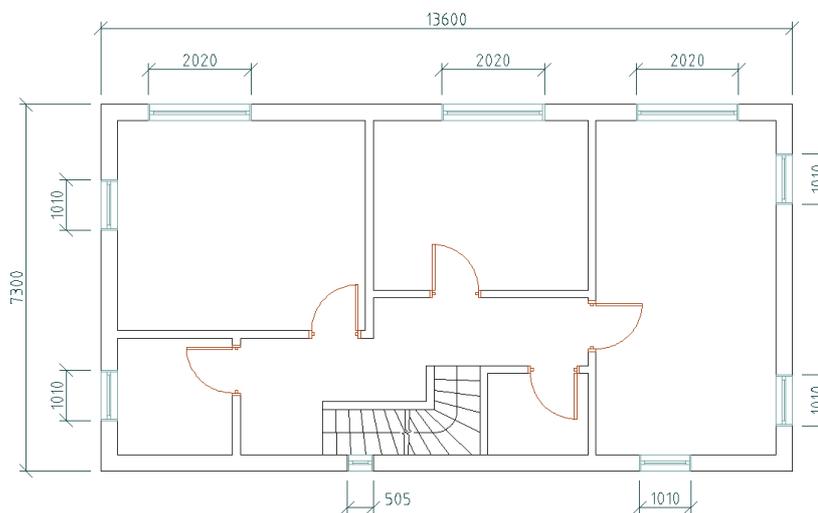


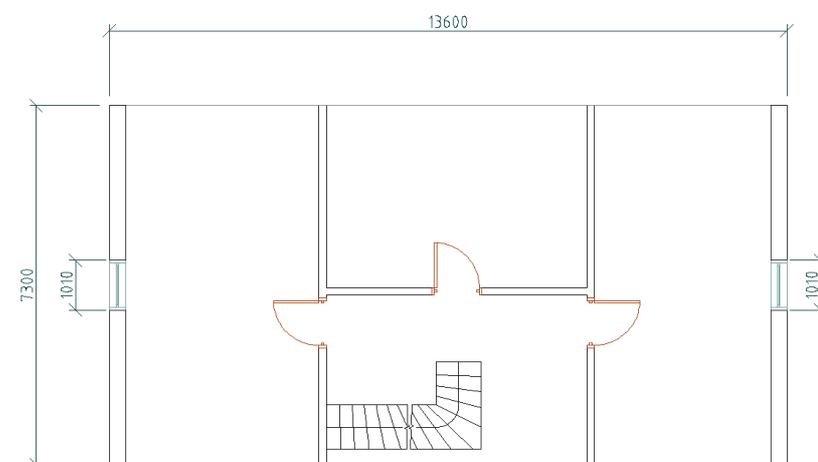
Abbildung 36: Dreidimensionales Modell des Beispielgebäudes



**Abbildung 37: Schnitt des Erdgeschosses**



**Abbildung 38: Schnitt des Obergeschosses**



**Abbildung 39: Schnitt des Dachgeschosses**

## 7.2 Altbausanierung

### 7.2.1 Gebäudebeschreibung

Das im vorhergehenden Abschnitt dargestellte Gebäude wurde zur Abschätzung der ökologischen Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen zunächst im ADT als typischer Altbau im unsanierten Zustand modelliert. Das Gebäude weist als Ausgangspunkt einen Dämmstandard auf, wie er vor etwa 30 Jahren dem Stand der Technik entsprach. Die Außenwände bestehen aus einschaligem Ziegelmauerwerk ( $\lambda = 0,45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) mit Gipsputz als Innen- und Zementputz als Außenputz. Die Fenster sind als Holzfenster mit 2-Scheiben-Isolierverglasung ausgeführt. Die Bodenplatte besteht aus einer Stahlbetonplatte mit Fußbodendämmung. Das Satteldach ist Zwischensparren gedämmt. Als bestehende Anlagentechnik wird ein Niedertemperaturkessel zur zentralen Erzeugung von Raumwärme und Trinkwarmwasser angenommen. In nachfolgender Tabelle 18 sind die wichtigsten Kennwerte des Gebäudes angegeben.

*Tabelle 18: Definition des Altbaus*

<b>Gebäude</b>			
Beheiztes Volumen	$V_e$	764,5	$\text{m}^3$
Nutzfläche	$A_N$	244,6	$\text{m}^2$
Anlagentechnik	NT-Kessel ( $\eta = 91\%$ ), zentrale Warmwasserbereitung mit Zirkulation		
<b>Bauteil</b>	<b>U-Wert [W/(m<sup>2</sup>*K)]</b>		<b>Fläche [m<sup>2</sup>]</b>
Wand (2 cm Gipsputz / 30 cm HLz / 3 cm Zementputz)	1,14		217,9
Dach (8 cm Zwischensparrendämmung WLG 040)	0,58		140,4
Bodenplatte (20 cm Stahlbeton / 3cm Dämmung WLG 035)	0,49		99,3
Fenster (Holzfenster 2-fach Verglasung)	2,5		36,1

### 7.2.2 Sanierungsmaßnahmen

Zur Simulation der Auswirkung verschiedener Sanierungsmaßnahmen auf die ökologische Gesamtbilanz des Gebäudes werden einzelne Bauteile des im vorherigen Kapitel beschriebenen Altbaues hinsichtlich ihrer Dämmeigenschaften verbessert. Als erste Sanierungsvariante (Variante F) sollen die vorhandenen Fenster durch moderne 3-fach verglaste Holzfenster ersetzt werden. Die zweite Sanierungsvariante zielt auf eine Verbesserung der Dämmung der Dachkonstruktion durch Einbau einer zusätzlichen Untersparrendämmung (Variante D). Als dritte Variante wird auf die Außenwände eine vollflächige Außendämmung aufgebracht (Variante W).

Abschließend werden schließlich alle drei Einzelmaßnahmen gleichzeitig durchgeführt (Variante FDW). In Tabelle 19 sind die jeweiligen Sanierungsoptionen zusammengefasst beschrieben.

Tabelle 19: Sanierungsvarianten

Bauteil	Variante F	Variante D	Variante W
Fenster	Neue Holzfenster mit 3-fach Verglasung, $U_W = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	-	-
Dach	-	4 cm Untersparrendämmung mit PUR-Hartschaumplatten der WLG 030, $U_{\text{Dach}} = 0,32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	-
Wand	-	-	5 cm Außendämmung mit PUR-Hartschaumplatten der WLG 030 $U_{\text{Wand}} = 0,39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

### 7.2.3 Berechnungsmethodik

Der in Kapitel 7.2.1 beschriebene Altbau wird zunächst als Produktmodell im ADT modelliert. Auf Basis dieses Modells erfolgt anschließend eine Berechnung des Jahresheizwärmebedarfes mit dem vereinfachten Verfahren nach EnEV [DIN V 4108-6]. Das daraus erhaltene Ergebnis dient als Eingangswert zur Ermittlung der Anlagenaufwandszahl nach DIN V 4701-10 und damit des Jahresprimärenergieaufwands  $Q_P$ . Die aus diesen Berechnungen ermittelten Daten werden anschließend in die entsprechenden Eingabefelder der Registerkarte „Heizung“ des Softwaremoduls LCA-Chart eingegeben (vgl. Kapitel 6.2.3) und die ökologische Bilanzierung durchgeführt. Der zugrundegelegte Zeithorizont für die Simulation des Altbaus und sämtlicher Sanierungsvarianten beträgt 30 Jahre. Dies wird an dieser Stelle als Mindest-Restnutzungsdauer des Gebäudes angenommen. Bei der Simulationsrechnung für den unsanierten Zustand werden lediglich die Sachbilanzparameter aus der Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser berücksichtigt. Die bereits vorhandenen Baustoffe und Bauteile des Altbaues haben keinen Einfluss auf die Bilanz.

Die Simulation der einzelnen Sanierungsvarianten wird analog zum Vorgehen für den Altbau durchgeführt, wobei jedoch die jeweils neu eingebauten Bauteile und Baustoffe sowie der veränderte Jahresheizwärmebedarf in der Bilanzierung berücksichtigt werden. Für jede Variante erfolgt damit eine komplette Berechnung nach der Energieeinsparverordnung. Sämtliche Ergebnisse und Berechnungsgänge nach EnEV und LCA-Chart können dem Anhang A 3 entnommen werden.

### 7.2.4 Ergebnisse und Vergleich

Wie in Kapitel 3.3 dargestellt erfolgt die Berechnung des Primärenergieaufwandes nach EnEV auf Basis von Primärenergiefaktoren und Aufwandszahlen in Abhängigkeit von den verwendeten Energieträgern und der eingesetzten Anlagentechnik. Die Primärenergiefaktoren stammen dabei aus Berechnungen des  $KEA_{\text{Summe}}$  mit dem Computerprogramm GEMIS. Da im Zuge der Berechnungen nach EnEV der Anteil aus regenerativen Energiequellen (z.B. solare Trinkwassererwärmung, Heizung durch Grundwasser-Wärmepumpe) über die Aufwandszahlen wieder herausgerechnet wird, ist der letztendlich ermittelte Primärenergieaufwand  $Q_P$  vergleichbar mit  $KEA_{nE}$ . In Abbildung 40 sind die Ergebnisse der Berechnungen für die einzelnen Varianten bezüglich des jeweiligen Primärenergieaufwandes  $Q_P$  nach EnEV und des  $KEA_{nE}$  der Heizung graphisch dargestellt. Der Vergleich zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung. Die Abweichungen resultieren dabei aus den für  $Q_P$  nach DIN V 4701-10 jeweils exakt ermittelten Erzeugeraufwandszahlen und den im Softwaremodul LCA-Chart immer als konstant eingehenden Wirkungsgraden der Heizanlagen.

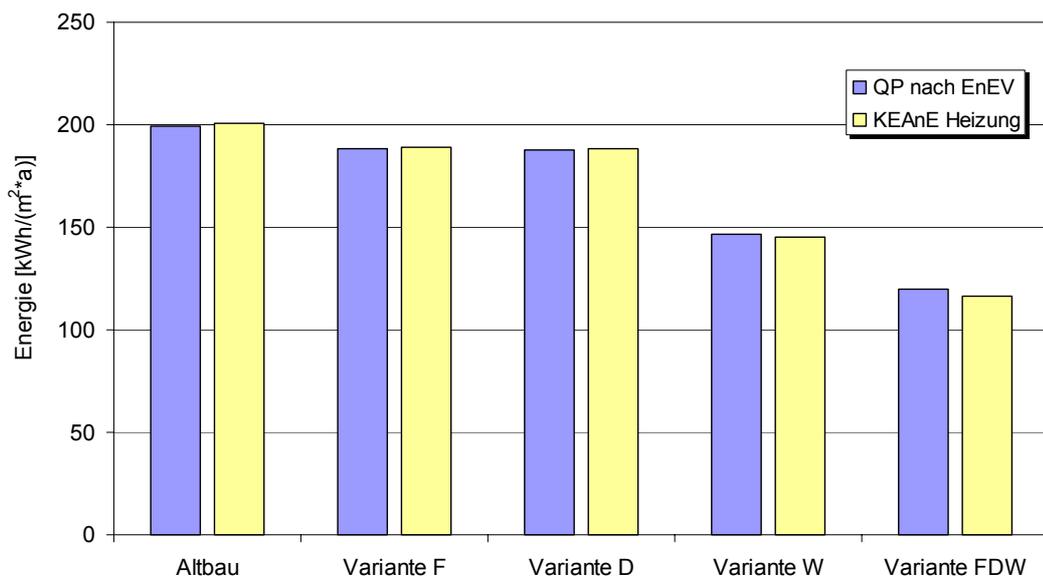


Abbildung 40: Primärenergiebedarf und  $KEA_{nE}$  der Heizung pro Jahr

Damit kann für die weiteren Vergleiche der Varianten bezüglich Emissionen und Ressourcenbedarf der Primärenergieaufwand  $Q_P$  durch den  $KEA_{nE}$  ersetzt werden. Dies ermöglicht eine vergleichende Bilanzierung des gesamten Gebäudes (Heizung und Baustoffe) auf Basis des  $KEA_{nE}$ .

Um den Anteil der Baustoffe für die Sanierung an der Gesamtbilanz für das Gebäude festzustellen, wird in Abbildung 41 der Anteil der Heizung am  $KEA_{nE}$  für das gesamte Gebäude bezogen auf den Simulationszeitraum von 30 Jahren dargestellt. Als Ergebnis ergibt sich, dass im Falle der hier betrachteten Altbausanierung der Einfluss der verwendeten Baustoffe auf den  $KEA_{nE}$  des gesamten Gebäudes bei einer

Nutzungsdauer von 30 Jahren vernachlässigbar klein ist. Selbst bei der mit dem höchsten Baustoffeinsatz und gleichzeitig größter Verringerung des Heizwärmebedarfes verbundenen Sanierungsvariante FDW liegt der Anteil der Baustoffe an der Gesamtbilanz bezüglich des  $KEA_{nE}$  bei unter 2%.

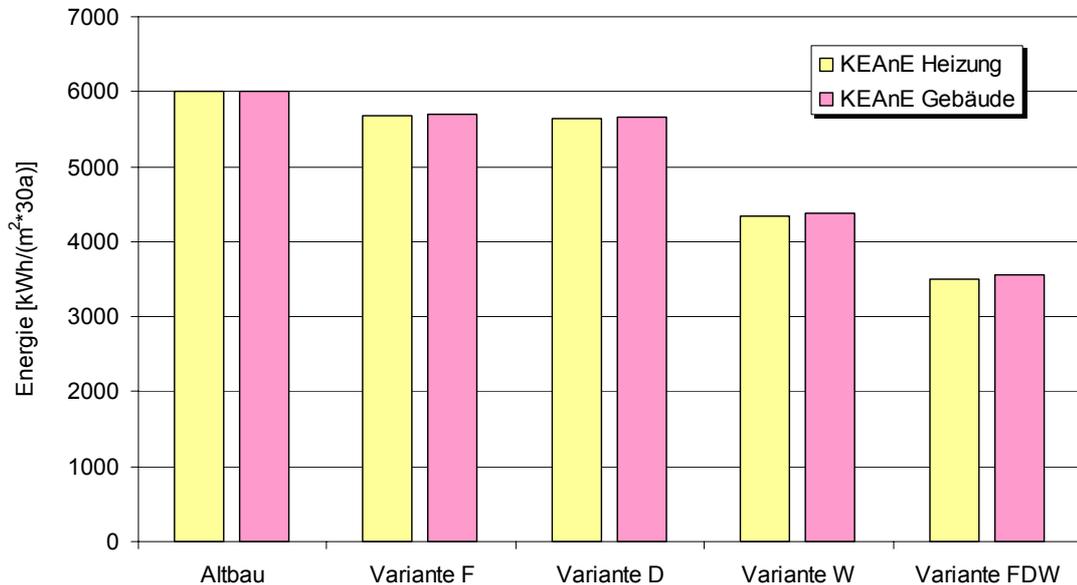


Abbildung 41: Vergleich von  $KEA_{nE}$  aus Heizung und des Gesamtgebäudes

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Betrachtung der Emissionen und der daraus errechneten Wirkungspotentiale Versauerung (AP), Treibhauseffekt (GWP), Eutrophierung (NP) und Ozonvorläufer (TOPP) nach der CML-Methode (Abbildung 42).

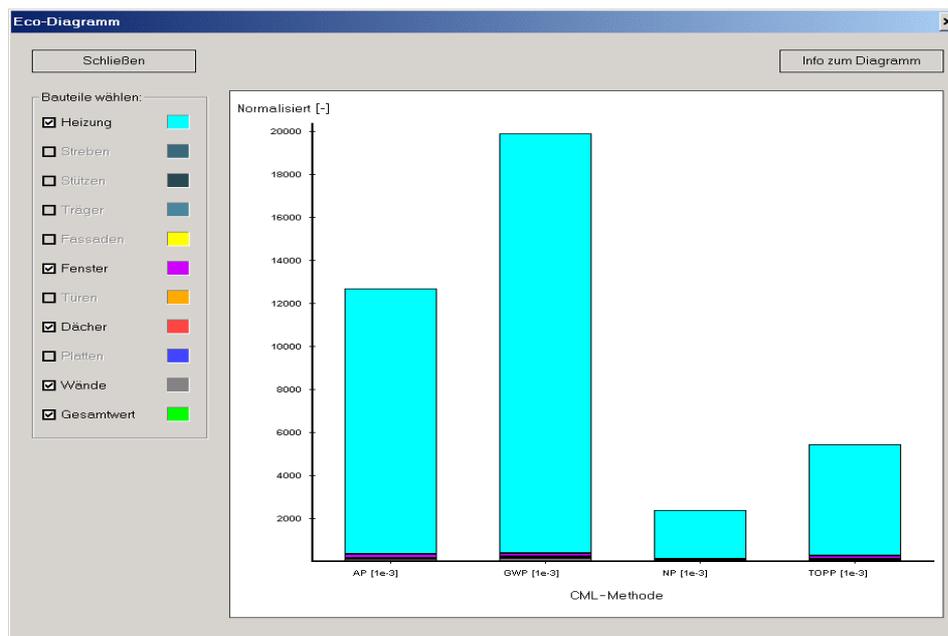


Abbildung 42: Normalisierte Wirkungspotentiale der Variante FDW

Dies bedeutet, dass bei dem hier vorgestellten Beispiel die Emissionen und der Ressourcenverbrauch infolge der Erzeugung von Raumwärme auf die weitere Nutzungsdauer des Gebäudes sehr viel größer sind als die der eingesetzten Baustoffe. Auch eine Änderung der Anlagentechnik auf einen modernen Brennwertkessel ergibt diesbezüglich keine Verschiebung der Verhältnisse. Im Falle der Sanierung des beschriebenen Altbaues ist für eine ökologische Optimierung des gesamten Gebäudes daher nur die Dämmwirkung der eingesetzten Baustoffe von Bedeutung.

In folgender Abbildung werden nun die betrachteten Varianten auf Basis der jeweiligen Verbesserung gegenüber dem unsanierten Altbau bezüglich des  $KEA_{nE}$ , des Ecoindikators  $Eco95^D$  und der Umweltbelastungspunkte  $UBP^D$  miteinander verglichen.

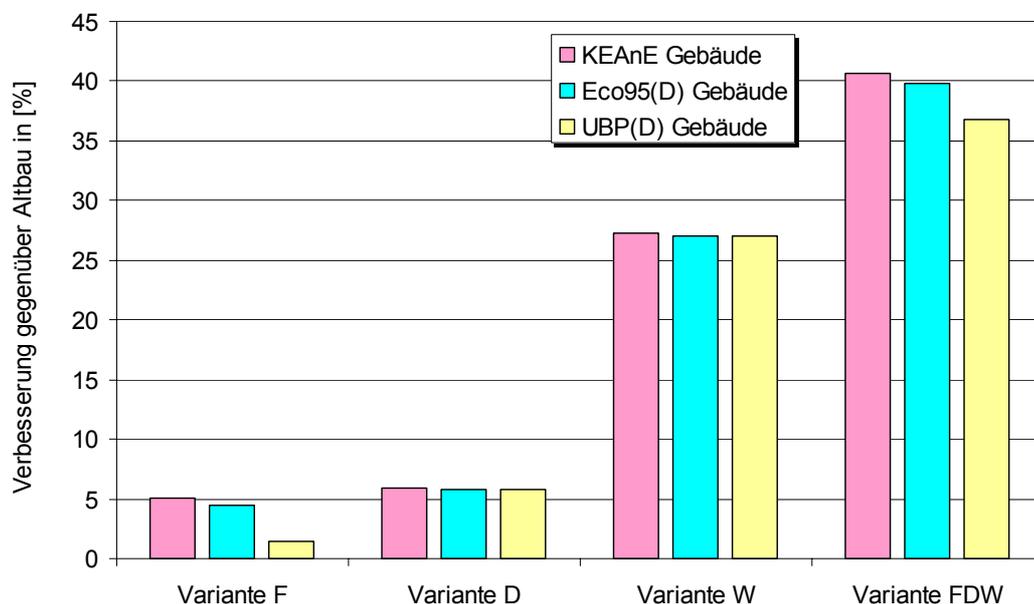


Abbildung 43: Verbesserung der einzelnen Varianten gegenüber Altbau

Es zeigt sich, dass die Varianten F und D hinsichtlich der ökologischen Optimierung des gesamten Gebäudes ungefähr gleich abschneiden. Jedoch liegt die Verbesserung gegenüber dem Altbau bei nur etwa 5 %. Das größte Potential weist die Variante W mit 27 % auf. Kombiniert man alle drei Maßnahmen ergibt sich eine Verbesserung gegenüber dem unsanierten Zustand von ungefähr 40 %. Es fällt auf, dass die ökologische Bewertung bezüglich Emissionen nach  $Eco95^D$  praktisch identisch zur rein energetischen Bewertung nach  $KEA_{nE}$  ausfällt. Das bedeutet, dass in diesem Fall eine rein energetische Bewertung von Sanierungsmaßnahmen nach  $KEA_{nE}$  (und damit nach  $Q_P$ ) auch die ökologische Gesamtoptimierung widerspiegelt.

Die Bewertung nach  $UBP^D$  weicht bei der Variante F augenscheinlich von den beiden anderen Methoden ab. Eine diesbezügliche Analyse der Einzelbewertung nach

Bauteilen und Emissionen im Softwaremodul LCA-Chart ergab, dass die Ursache in der sehr hohen Bewertung von Perfluorethan und Perfluormethan innerhalb der  $UBP^D$ -Methode liegt. Diese beiden Emissionen weisen aufgrund des relativ großen Abstandes zwischen aktuellem und kritischem Fluss und damit überproportionalen Bewertung in der  $UBP^D$ -Methode (der kritische Fluss geht bei dieser Methode im Quadrat ein) einen sehr großen Einfluss auf die Gesamtbewertung auf (vgl. Kapitel 5.2.2). Da diese beiden Emissionen vorwiegend bei der Herstellung von Fenstern auftreten, erklärt sich auch die geringere Verbesserung der Variante F bei Bewertung nach  $UBP^D$ .

Grundsätzlich weisen jedoch alle drei Bewertungsansätze die gleiche Tendenz auf und zeigen, dass in diesem Fall eine Sanierung durch eine zusätzliche Wärmedämmung der Außenwände mit PUR-Hartschaumplatten aus ökologischer Sicht die größten Vorteile aufweist.

### 7.3 Neubau

#### 7.3.1 Berechnungsmethodik und Variantenüberblick

Das im Kapitel 7.1 beschriebene Gebäude wird nun als Neubau modelliert. Dies bedeutet, dass sämtliche Baustoffe zur Herstellung des Gebäudes von Anfang an in der Bilanzierung berücksichtigt werden und auch die in der Datenbank hinterlegten Lebensdauern einzelner Bauteile eingehen. Der zugrundegelegte Simulationszeitraum beträgt nun 50 Jahre. Neben der Variation des Dämmstandards werden auch verschiedene Anlagentechniken zur Deckung des Raumwärme- und Trinkwarmwasser-Bedarfes, sowie unterschiedliche Baustoffkombinationen untersucht. Dies bedeutet, dass für jede Variante eine Berechnung des Jahresheizwärmebedarfes mit dem Monatsbilanzverfahren nach DIN V 4108-6 sowie die Ermittlung des Jahresprimärenergieaufwands  $Q_P$  nach DIN V 4701-10 durchgeführt wird. Die daraus jeweils erhaltenen Ergebnisse dienen wiederum als Eingangswerte für die ökologische Bilanzierung mit dem Softwaremodul LCA-Chart. Alle Varianten basieren auf dem gleichen geometrischen Gebäudemodell und weisen damit ein identisches beheiztes Gebäudevolumen  $V_e$  und die gleiche Nutzfläche  $A_N$  auf (vgl. Kapitel 7.2.1). Als Ausgangspunkt wurde das Gebäude so modelliert, dass es die Anforderungen nach EnEV bezüglich Dämmstandard und Jahresprimärenergiebedarf mit einer möglichst einfachen Anlagentechnik gerade noch erfüllt. In der Folge erfolgt eine kontinuierliche Verbesserung des Dämmstandards und der Anlagentechnik bezüglich der Bewertung nach EnEV. Das Anforderungsniveau orientiert sich dabei an den derzeit gültigen Förderbedingungen der Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW im Rahmen des KfW-Programms zur  $CO_2$ -Minderung [KfW, 2003]. Diese gewährt für die Errichtung von Gebäuden, die bestimmte Obergrenzen beim Jahresprimärenergieaufwand einhalten, zinsvergünstigte Kredite.

---

In Tabelle 20 wird ein Überblick über die untersuchten Neubauvarianten gegeben. Die Bezeichnung der einzelnen Varianten setzt sich dabei aus dem erreichten Standard nach EnEV bzw. KfW, der Baustoffkombination der Wand- und Dämmstoffe, sowie der Anlagentechnik zusammen. Die Ergebnisse nach EnEV und LCA-Chart können dem Anhang A 3 entnommen werden.

*Tabelle 20: Neubauvarianten*

Variante	Standard	Anlagentechnik	Baustoffkombination
E-G-K/P	EnEV	Gas-Brennwertkessel	Wandbaustoff KS Dämmstoff PUR
E-G/S-K/P	EnEV	Gas-Brennwertkessel Solarkollektor	Wandbaustoff KS Dämmstoff PUR
60-G-K/P	KfW 60	Gas-Brennwertkessel	Wandbaustoff KS Dämmstoff PUR
60-G/S/L-K/P	KfW 60	Gas-Brennwertkessel Solarkollektor Lüftungsanlage mit WRG	Wandbaustoff KS Dämmstoff PUR
60-G-K/E	KfW 60	Gas-Brennwertkessel	Wandbaustoff KS Dämmstoff EPS
60-G-Z/P	KfW 60	Gas-Brennwertkessel	Wandbaustoff Ziegel Dämmstoff PUR
60-G-H/S	KfW 60	Gas-Brennwertkessel	Wandbaustoff Holzrahmen Dämmstoff Steinwolle
40-G/S/L-K/P	KfW 40	Gas-Brennwertkessel Solarkollektor Lüftungsanlage mit WRG	Wandbaustoff KS Dämmstoff PUR
40-WP/S/L-K/P	KfW 40	Wasser-Wärmepumpe Solarkollektor Lüftungsanlage mit WRG	Wandbaustoff KS Dämmstoff PUR

### 7.3.2 Variantenbeschreibung

#### *Varianten E-G-K/P und E-G/S-K/P*

Diese beiden Modelle basieren auf einer identischen Gebäudehülle. Der Unterschied liegt lediglich in der Anlagentechnik. Im Gegensatz zur Variante E-G-K/P bei der die Gewinnung von Heizwärme und Trinkwarmwasser vollständig durch eine zentrale Gas-Brennwertheizung erreicht wird, verfügt Variante E-G/S-K/P zusätzlich über eine Solarthermische Anlage zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung. Damit soll der Einfluss einer solchen Anlage auf die ökologische Bilanz des Gesamtgebäudes untersucht werden. Die Auslegung der Solaranlage erfolgt dabei nach den in der DIN V 4701-10 angegebenen Standardwerten, woraus sich ein solarer Deckungsanteil an der Trinkwassererwärmung von 64 % ergibt.

In der folgenden Tabelle werden die einzelnen Bauteile bezüglich der verwendeten Baustoffe für beide Modelle beschrieben. Sperrschichten wie Dampfsperren und diffusionsoffene Vliese sind hier nicht explizit angegeben, wurden jedoch bei der Modellierung berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.3).

*Tabelle 21: Bauteilbeschreibung Varianten E-G-K/P und E-G/S-K/P*

Bauteil	Baustoffe und U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	
Außenwände (AW)	2 cm Kalkputz 17,5 cm KS 7cm PUR <sup>WLG 030</sup> 3 cm Zementputz	0,36
Innenwände (IW)	Beidseitiger Putz: 2cm Kalkputz 11,5 cm KS	-
Decken	14 cm bewehrter Stahlbeton	-
Bodenplatte (BP)	5 cm Zementestrich 3 cm Trittschalldämmung PUR <sup>WLG 035</sup> 20 cm Stahlbeton 2 cm PUR <sup>WLG 030</sup> (Perimeterdämmung)	0,36
Fenster	Holzfenster 2-fach verglast	1,5
Außentür	Massivholz	2,1
Innentüren	Massivholz	-
Dach	Ziegeldeckung (Pfannen) 7 cm PUR <sup>WLG 030</sup> Aufsparrendämmung Holzsparrendach	0,38

#### *Varianten 60-G-K/P und 60-G/S/L-K/P*

Diese Varianten erfüllen die Anforderungen an das Energiesparhaus 60 nach den Anforderungen der KfW. Der maximal zulässige Jahreprimärenergieaufwand von 60 kWh/(m<sup>2</sup>a) wird dabei bei Variante 60-G-K/P durch eine besonders gut gedämmte Gebäudehülle in Verbindung mit einer einfachen Anlagentechnik (nur Gas-Brennwertkessel) erreicht. Im Vergleich dazu ist bei Variante 60-G/S/L-K/P die Dämmung des Gebäudes reduziert, was aber durch eine aufwändigere Anlagentechnik wieder ausgeglichen wird. Zum einen verfügt diese über eine Solarthermische Anlage zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung (Deckungsanteil 64%), zum anderen über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung durch einen Wärmetauscher (Anlagenluftwechsel  $n_A=0,4$  1/h). Damit erfolgt ein Vergleich der beiden grundlegenden Strategien zur Erreichung des Standards eines KFW60 Energiesparhauses. In Tabelle 22 sind die Kenndaten der jeweiligen Varianten angegeben, wobei die nicht aufgeführten Bauteile analog zu den vorherigen Modellen modelliert wurden.

Tabelle 22: Bauteilbeschreibung Varianten 60-G-K/P und 60-G/S/L-K/P

Bauteil	Baustoffe und U-Wert [ $W/(m^2K)$ ]			
	60-G-K/P		60-G/S/L-K/P	
AW	25 cm PUR <sup>WLG 030</sup> sonst wie E-G-K/P	0,11	8 cm PUR <sup>WLG030</sup> sonst wie E-G-K/P	0,32
BP	16 cm PUR <sup>WLG 030</sup> sonst wie E-G-K/P	0,13	4 cm PUR <sup>WLG 030</sup> sonst wie E-G-K/P	0,28
Fenster	Holzfenster 3-fach verglast	0,8	Holzfenster 3-fach verglast	0,8
Außentür	Holz mit Kerndämmung	1,0	Holz mit Kerndämmung	1,0
Dach	24 cm PUR <sup>WLG 030</sup> sonst wie E-G-K/P	0,12	10 cm PUR <sup>WLG 030</sup> sonst wie E-G-K/P	0,28

## Varianten 60-G-K/E, 60-G-Z/P, 60-G-H/S und 60-G-K/P

Durch eine Gegenüberstellung dieser vier Modelle wird die Auswirkung unterschiedlicher Baustoffkombinationen auf die Gesamtbilanz des Gebäudes untersucht. Basis dafür ist, dass alle Varianten die gleiche Anforderung bezüglich des Jahresprimärenergieaufwandes erfüllen (KfW60). Dies bedeutet, dass zum einen die Gebäudehülle einen vergleichbaren Dämmstandard aufweist und darüber hinaus die identische Anlagentechnik eingesetzt wird. Ungeachtet der Ergebnisse aus den vorherigen Vergleichen wird der KfW60 Standard hier durch eine Kombination aus einfacher Anlagentechnik mit einer hochgedämmten Gebäudehülle erreicht. Damit wird der Anteil der Baustoffe auf die Gesamtbilanz erhöht und etwaige Unterschiede werden besser herausgehoben. Die Bauteile Fenster und Türen sind für alle hier verglichenen Modelle identisch.

Tabelle 23: Bauteilbeschreibung Varianten 60-G-K/E, 60-G-Z/P und 60-G-H/S

Bauteil	Baustoffe und U-Wert [ $W/(m^2K)$ ]					
	60-G-K/E		60-G-Z/P		60-G-H/S	
AW	36 cm EPS <sup>WLG 035</sup> sonst wie 60-G-K/P	0,09	24 cm Ziegel (WDZ) 23 cm PUR <sup>WLG 030</sup> sonst wie 60-G-K/P	0,11	1,2 cm Gipskarton 20 cm H/S <sup>1)</sup> 1,3 cm Spanplatte 30 cm H/S <sup>1)</sup> 1,3 cm Holzweichfaser	0,10
IW	wie 60-G-K/P		2 cm Kalkputz 11 cm Ziegel 2 cm Kalkputz		1,2 cm Gipskarton 10 cm H/S <sup>1)</sup> 1,2 cm Gipskarton	
Decken	wie 60-G-K/P		wie 60-G-K/P		Holzdecke mit Trittschalldämmung <sup>2)</sup>	
BP	16 cm EPS <sup>WLG 035</sup> sonst wie 60-G-K/P	0,15	wie 60-G-K/P		0,13	wie 60-G-K/P
Dach	24 cm EPS <sup>WLG 035</sup> sonst wie 60-G-K/P	0,14	wie 60-G-K/P		0,12	wie 60-G-K/P

<sup>1)</sup> H/S: Holzrahmenkonstruktion mit Steinwolle (WLG 040) als Dämmung im Gefach

<sup>2)</sup> Zementestrich / Steinwolle / Spanplatte / Holzbalken mit Steinwolle / Lattung / Gipskartonplatte

### Varianten 40-G/S/L-K/P und 40-WP/S/L-K/P

Abschließend soll mit diesen Varianten das Potential einer hochgedämmten Gebäudehülle in Verbindung mit einer aufwendigen Anlagentechnik aufgezeigt werden. Die Solar- und Lüftungsanlage weisen dabei jeweils die gleichen Eigenschaften auf wie in Variante 60-G/S/L-K/P. Die Gebäudehülle entspricht jedoch dem Modell 60-G-K/P.

Anstelle der Gas-Brennwert Heizung wird bei der Variante 40-WP/S/L-K/P der Wärmebedarf, der nicht durch die Solar- und Lüftungsanlage gedeckt werden kann, über eine Grundwasser-Wärmepumpe erzeugt. Der für den Betrieb der Wärmepumpe notwendige Haushaltsstrom wird wie bei allen anderen Modellen durch einen Mix von 95% Strom aus nicht erneuerbaren und 5% aus erneuerbaren Quellen (vgl. Kapitel 4.3.6) modelliert. Um den Einfluss des Strommixes auf die Gesamtbilanz des Gebäudes abzuschätzen, wird in einem zusätzlichen Szenario (WP-Strommix-50:50) dieser im Softwaremodul LCA-Chart auf 50% Strom aus erneuerbaren und 50% aus nicht erneuerbaren Energiequellen eingestellt.

### 7.3.3 Ergebnisse und Vergleich

Analog zum Fall der Altbausanierung wird zunächst ein Vergleich zwischen dem nach EnEV berechneten Jahresprimärenergiebedarf  $Q_P$  und dem Kumulierten Energieaufwand aus nicht erneuerbaren Energiequellen  $KEA_{nE}$  der Heizungsanlage über alle Varianten durchgeführt. Dies gibt einerseits einen Überblick über die Bewertung der einzelnen Varianten nach der derzeit gültigen Norm und zeigt andererseits die Modellierungsgenauigkeit des Softwaremoduls LCA-Chart bezüglich der Anlagentechnik.

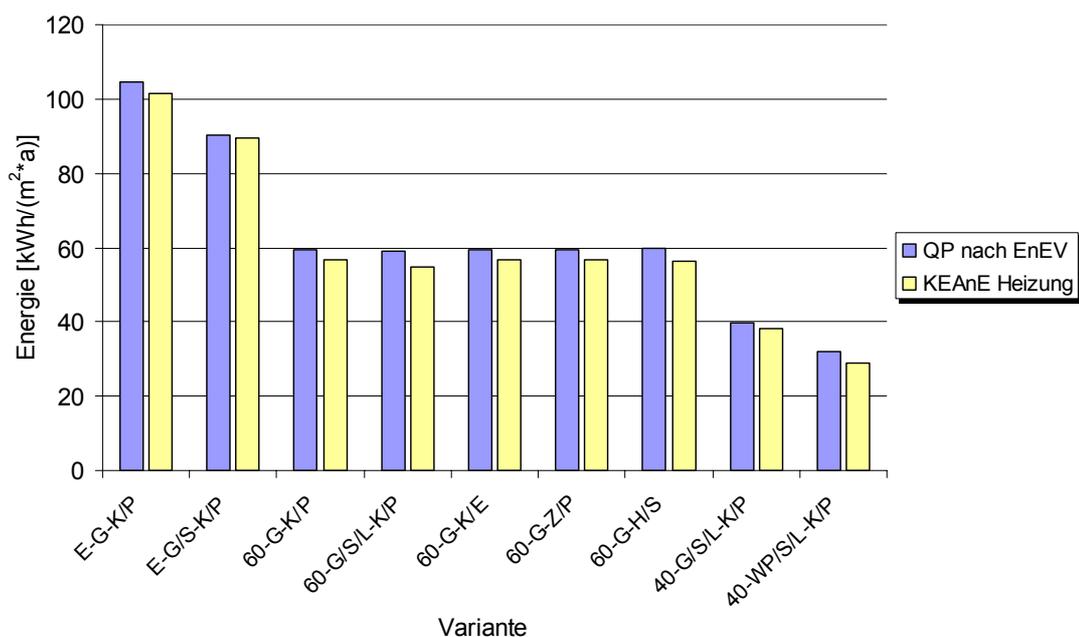
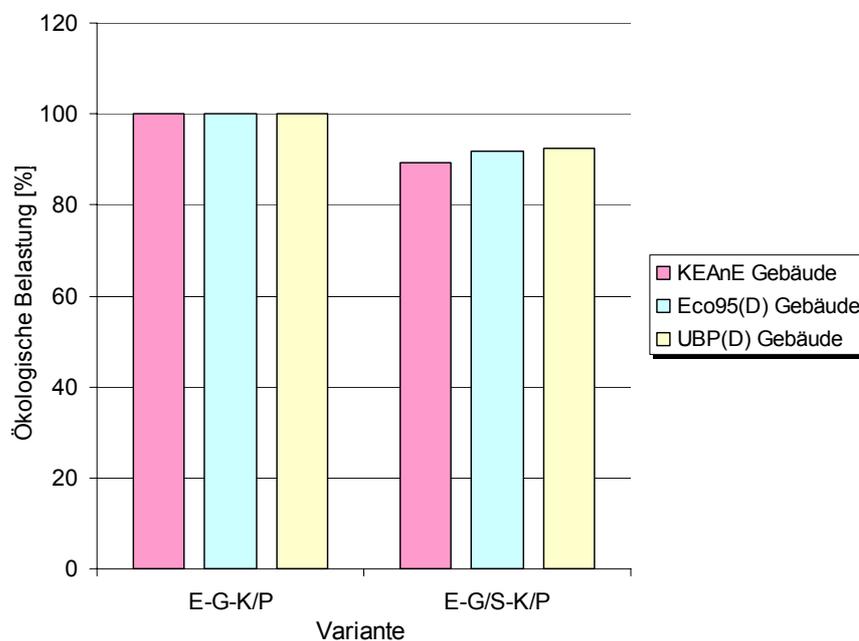


Abbildung 44: Primärenergiebedarf und  $KEA_{nE}$  der Varianten für die Heizung

Es zeigt sich analog zur Altbausanierung wieder eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Werten. Lediglich bei Variante 40-WP/S/L-K/P existierte eine größere Differenz. Eine diesbezügliche Überprüfung ergab, dass die Effizienz der im Softwaremodul LCA-Chart wählbaren Grundwasser-Wärmepumpe gegenüber der Berechnung nach EnEV höher war. Das bedeutet, dass nach LCA-Chart weniger elektrische Energie zum Betrieb der Wärmepumpe eingerechnet wurde, was sich in diesem Fall stark auf die Gesamtbilanz ausgewirkt hat. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die im Zuge der Berechnung nach EnEV ermittelten Hilfsenergiebedarfe genauer sind als die ursprünglich in GEMIS geschätzten Werte zur Effizienz der Wärmepumpe. Daher erfolgte eine Korrektur der Variante 40-WP/S/L-K/P durch Eingabe eines erhöhten Hilfsenergiebedarfes für die Wärmepumpe im Softwaremodul LCA-Chart. Die Erhöhung wurde dabei so gewählt, dass der  $KEA_{nE}$  der gesamten Heizungsanlage in ähnlicher Übereinstimmung zu  $Q_P$  liegt wie bei den anderen Varianten.

#### *Einfluss Solarthermische Anlage: Varianten E-G-K/P und E-G/S-K/P*

Wie in Abbildung 44 dargestellt, vermindert eine Solaranlage den Jahresprimärenergiebedarf nach EnEV um etwa 14 %. Führt man für beide Varianten eine ökologische Bewertung des gesamten Gebäudes über den Simulationszeitraum von 50 Jahren durch und definiert die Ausgangsvariante E-G-K/P zu 100 % ergibt sich folgendes Bild.



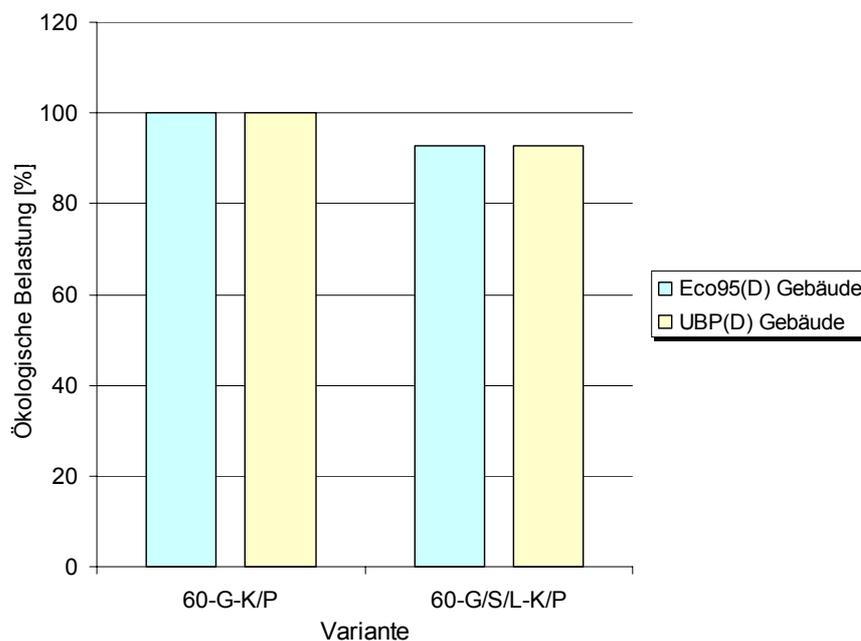
*Abbildung 45: Einfluss der Solaranlage auf die Gesamtbilanz*

Auch hier wirkt sich eine zusätzliche Solarthermische Anlage zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung mit einer Verbesserung im Bereich von 10 % aus, wobei bei einer rein energetischen Betrachtung durch den  $KEA_{nE}$  die Optimierung noch bei

11 % liegt, bei einer Analyse nach UBP dagegen nur bei 8 %. Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass eine Solaranlage bei diesem Beispiel doch eine merkliche Verbesserung bezüglich der Umweltauswirkungen des Gesamtgebäudes darstellt.

#### *Strategien zur Erreichung des KfW60-Standards: 60-G-K/P und 60-G/S/L-K/P*

Nach EnEV werden diese beiden Varianten als gleichwertig betrachtet. Beide werden durch die KfW gleich gefördert, da eine Einstufung rein auf Basis des Jahresprimärenergieaufwands erfolgt und beide den Grenzwert von 60 kWh/(m<sup>2</sup>a) einhalten (vgl. Abbildung 44). Eine Bilanzierung des gesamten Gebäudes mit den Methoden Eco95<sup>D</sup> und UBP<sup>D</sup> ergibt folgendes Bild (Variante 60-G-K/P entspricht 100%):



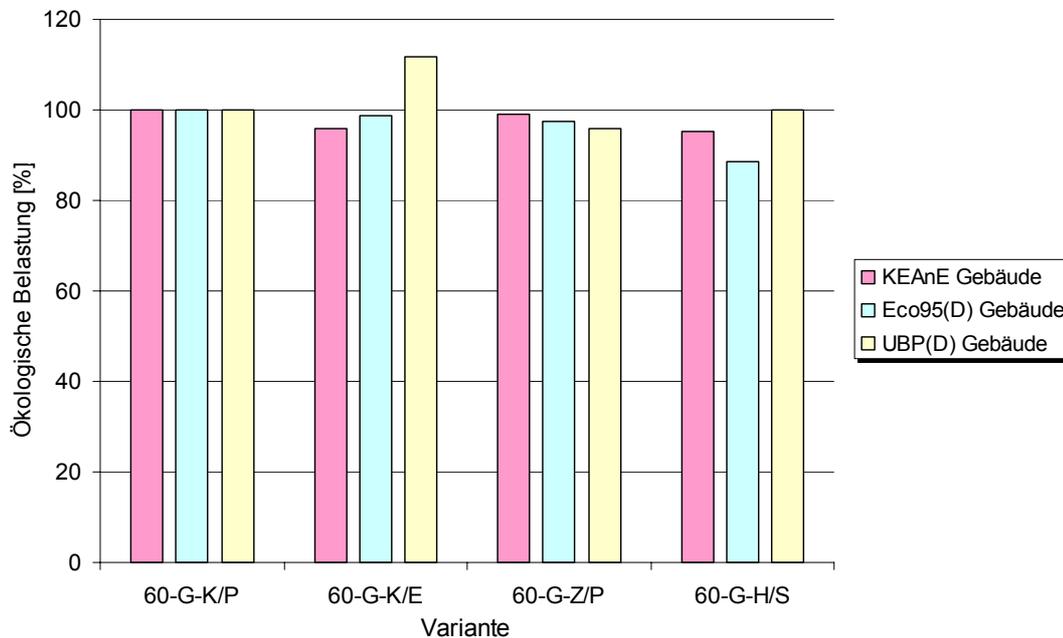
*Abbildung 46: Bewertung der Varianten 60-G-K/P und 60-G/S/L-K/P*

Nach beiden Methoden ergibt sich für die Variante mit dem Schwerpunkt Anlagentechnik ein etwa 7 % günstigerer Wert als bei der Variante mit dem Schwerpunkt Gebäudehülle. Ähnliches gilt für eine Bewertung auf Basis KEA<sub>nE</sub> für das gesamte Gebäude. Grund dafür ist zum einen, dass die Baustoffe bei einer Bewertung auf Basis der Emissionen bereits etwa die Hälfte der Gesamtbilanz ausmachen. Zum anderen liegt der zusätzliche Hilfsenergiebedarf für den Betrieb der Solar- und Lüftungsanlage bei etwa nur 5 % des Heizwärmebedarfes. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass in dieser Bilanz keine Materialaufwendungen zur Herstellung der Anlagentechnik berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.3.6). Weiterhin bewirkt der Einsatz von Baustoffen mit einem günstigeren Umweltprofil eine zusätzliche Verschiebung der Verhältnisse. Damit kann festgestellt werden, dass beide Strategien zur Erreichung des KfW60-Standards für das hier vorgestellte Beispielgebäude nicht nur bezüglich der primärenergetischen Bewertung des Dämmwertes

und der Anlagentechnik, sondern auch unter Berücksichtigung der Baustoffe und Schademissionen als gleichwertig zu betrachten sind.

*Baustoffkombinationen: 60-G-K/P, 60-G-K/E, 60-G-Z/P und 60-G-H/S*

Die Gebäudehülle der vier Varianten wurden so modelliert, dass sich auf Basis einer identischen Anlagentechnik jeweils ein Jahresprimärenergiebedarf von  $60 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  ergibt. Da die einzelnen Baustoffe unterschiedliche Dämmeigenschaften aufweisen, ergeben sich unterschiedliche Schichtdicken des jeweiligen Mauerwerks und der Dämmschichten. Eine ökologische Gesamtbilanz aller vier Varianten zeigt, dass sich Unterschiede bezüglich der Baustoffkombinationen und der Ergebnisse der Bewertungsmethoden ergeben. In folgender Abbildung sind die Varianten einander gegenüber gestellt. Dabei wurde die Variante 60-G-K/P als Referenzvariante gewählt (100% Umweltbelastung) und die anderen Varianten dazu in Relation gestellt.



*Abbildung 47: Vergleich der Baustoffvariationen*

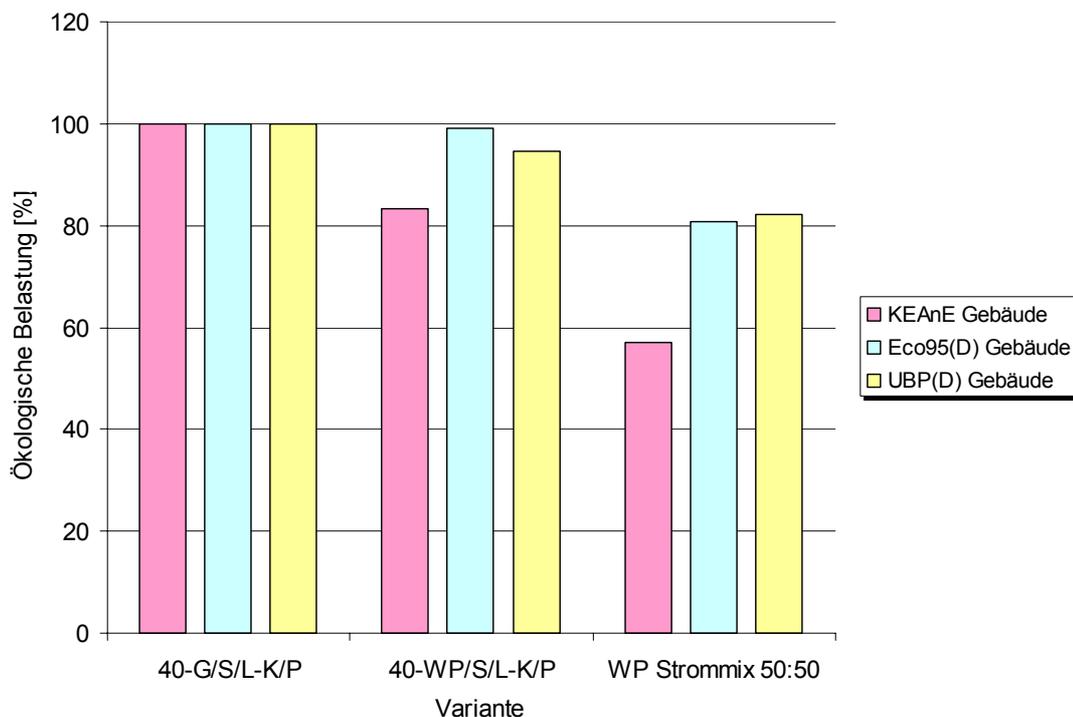
Als erstes wird deutlich, dass die Variante K/E gegenüber der Variante K/P zwar bei einer Bewertung nach  $\text{KEA}_{\text{rE}}$  und  $\text{Eco95}^{\text{D}}$  geringfügig besser abschneidet, jedoch bei einer Bewertung nach  $\text{UBP}^{\text{D}}$  ein schlechteres Ergebnis liefert. Eine Analyse dieses Sachverhalts zeigte, dass diese Diskrepanz überwiegend durch die NMVOC-Emissionen aus der EPS-Produktion verursacht werden. Dabei wird durch das verwendete Treibmittel Pentan und das Zwischenprodukt Styrol im Vergleich zu anderen Dämmstoffen sehr viel mehr NMVOC emittiert. Diese Emission wird aufgrund der Berechnungsmethodik der UBPD-Methode sehr viel stärker gewichtet, was auf die Bilanz für das Gesamtgebäude durchschlägt. Es ist weiterhin anzumerken, dass im Zuge der Modellierung des Dämmstoffes EPS innerhalb von GEMIS die während der Produktion entstehenden NMVOC-Emissionen im Vergleich

zum Originaldatensatz bereits verringert wurden. Grund dafür war, dass ein Vergleich der im GEMIS-Stammdatensatz „Kunststoffe/EPS“ angegebene Emissionswert von NMVOC im Vergleich zum Stammdatensatz „Kunststoffe/EPS-APME“ stark überhöht war. Da der zweite Datensatz laut GEMIS aus einer neueren Erhebung stammt und die darin enthaltenen Werte in etwa mit denen einer weiteren Datenquelle übereinstimmen ([FfE, 1999]), erfolgte die Modifikation des ursprünglichen Datensatzes. Es kann damit festgestellt werden, dass nach den vorliegenden Ergebnissen für dieses Beispielgebäude aus ökologischer Sicht kein maßgebender Unterschied zwischen den hier modellierten Dämmstoffalternativen PUR und EPS vorliegt. Ebenso verhält es sich mit der Kombination aus Ziegel und PUR im Vergleich zur Kombination KS und PUR.

Als letzte Variante weist die Variante mit Holzrahmenkonstruktion und einer Dämmung aus Steinwolle bezüglich der Eco95<sup>D</sup>-Methode eine Verbesserung um etwa 10% auf. Jedoch zeigt sich auch hier, dass aufgrund der höheren NMVOC-Emissionen aus der Steinwolle-Produktion das Ergebnis nach der UBP<sup>D</sup>-Methode in eine andere Richtung deutet. Aufgrund fehlender Daten zu den heute vermehrt eingesetzten Holzrahmenkonstruktionen mit eingeblasenen Zellulosefasern als Dämmstoff, konnte eine solche Variante leider nicht modelliert werden.

#### *Hohe Dämmung und aufwendige Anlagentechnik: 40-G/S/L-K/P und 40-WP/S/L-K/P*

In folgender Abbildung 48 sind die KfW40 Varianten einander gegenübergestellt. Als Referenzmodell dient dabei die Variante 40-G/S/L-K/P mit dem Gas-Brennwertkessel (100% Umweltbelastung).



*Abbildung 48: Vergleich der KfW40 Varianten*

Die Varianten 40-G/S/L-K/P und 40-WP/S/L-K/P werden nach EnEV unterschiedlich eingestuft. Beide verfügen zwar über eine identische Gebäudehülle und damit den gleichen Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf. Durch die günstigere Anlagenaufwandszahl des Wärmepumpen-Systems schneidet jedoch diese Variante gegenüber dem Gas-Brennwertkessel bezüglich des Jahresprimenergieaufwandes um etwa 20 % besser ab. Wie in Abbildung 48 zu sehen, verhält es sich analog mit  $KEA_{nE}$  für das Gesamtgebäude. Ein Vergleich auf Basis der Emissionen mit den Bewertungsmethoden Eco95<sup>D</sup> und UBP<sup>D</sup> ergibt ein anderes Bild. Hier weist die Variante mit Wärmepumpe ein um lediglich 1 bis 5 % besseres Verhalten auf, was keine eindeutige Entscheidung für oder wider einer bestimmten Variante zulässt. Die Ursache dafür lässt sich aus einer Gegenüberstellung der normalisierten Wirkungspotentiale nach der CML-Methode finden (Abbildung 49).

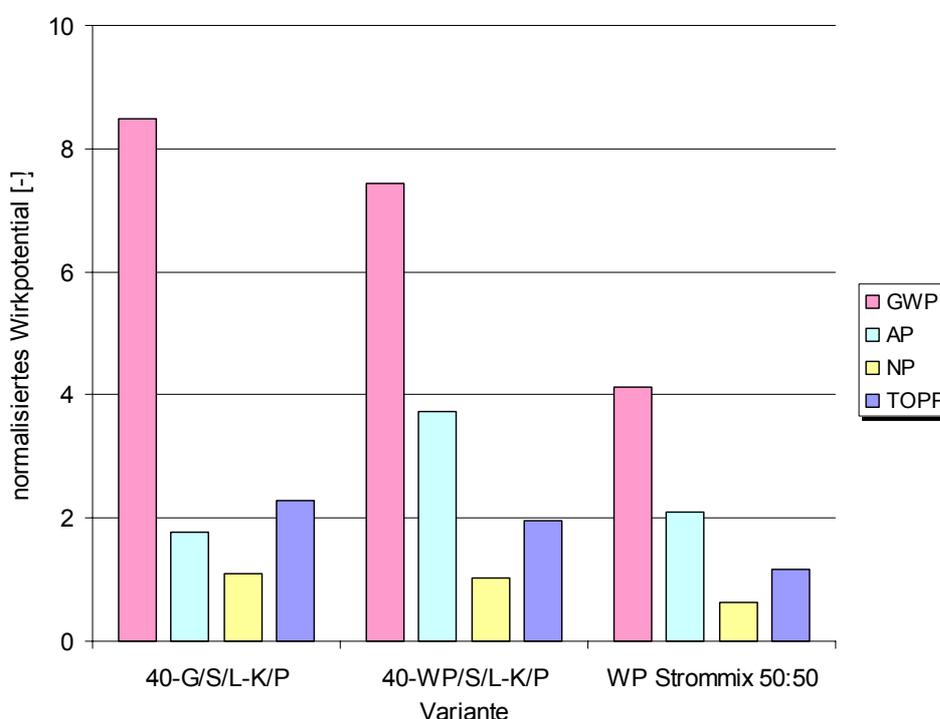


Abbildung 49: KFW40-Varianten: Wirkpotentiale

Wie man erkennen kann, schneidet die Variante mit Wärmepumpe in den Kategorien GWP und TOPP um etwa 13 % und der Kategorie NP um 7 % günstiger ab als die Variante mit Gas-Brennwertkessel. Beim Versauerungspotential AP liegt das Wärmepumpen-System jedoch um über 100 % schlechter. Eine Analyse der Einzulemissionen zeigt, dass der Hauptgrund dafür in den vergleichsweise sehr hohen  $SO_2$ -Emissionen aus der Stromproduktion zu suchen ist. Dies bedeutet, dass für das hier dargestellte Gebäude auf Grundlage des derzeit durchschnittlichen Strommixes für Deutschland eine Wärmepumpenanlage bezüglich der bewerteten Emissionen nur geringfügig günstiger abschneidet als ein Gas-Brennwertkessel. Wird jedoch die Endlichkeit fossiler Energieträger und der wachsende Anteil von

elektrischem Strom aus erneuerbaren Energiequellen berücksichtigt, ergeben sich insgesamt jedoch weitaus größere Vorteile für die Wärmepumpentechnik. Dies wird durch die Variante WP-Strommix-50:50 bereits ansatzweise deutlich. Hier ergibt sich ein Vorteil des Wärmepumpen-Systems von etwa 20 % bezüglich der bewerteten Emissionen und 40 % bezüglich des  $KEA_{nE}$ .

#### Einfluss der Baustoffe auf die Gesamtbilanz

Nach EnEV erfolgt die Bewertung eines Gebäudes ausschließlich auf Basis des Jahresprimärenergiebedarfes  $Q_P$ . Wie in den vorhergehenden Abschnitten dargestellt entspricht dieser dem kumulierten Energieaufwand aus nicht erneuerbaren Quellen für die Heizungsanlage. Folgende Grafik stellt nun den  $KEA_{nE}$  des Gesamtgebäudes über einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren unter Einbeziehung der Baustoffe dar.

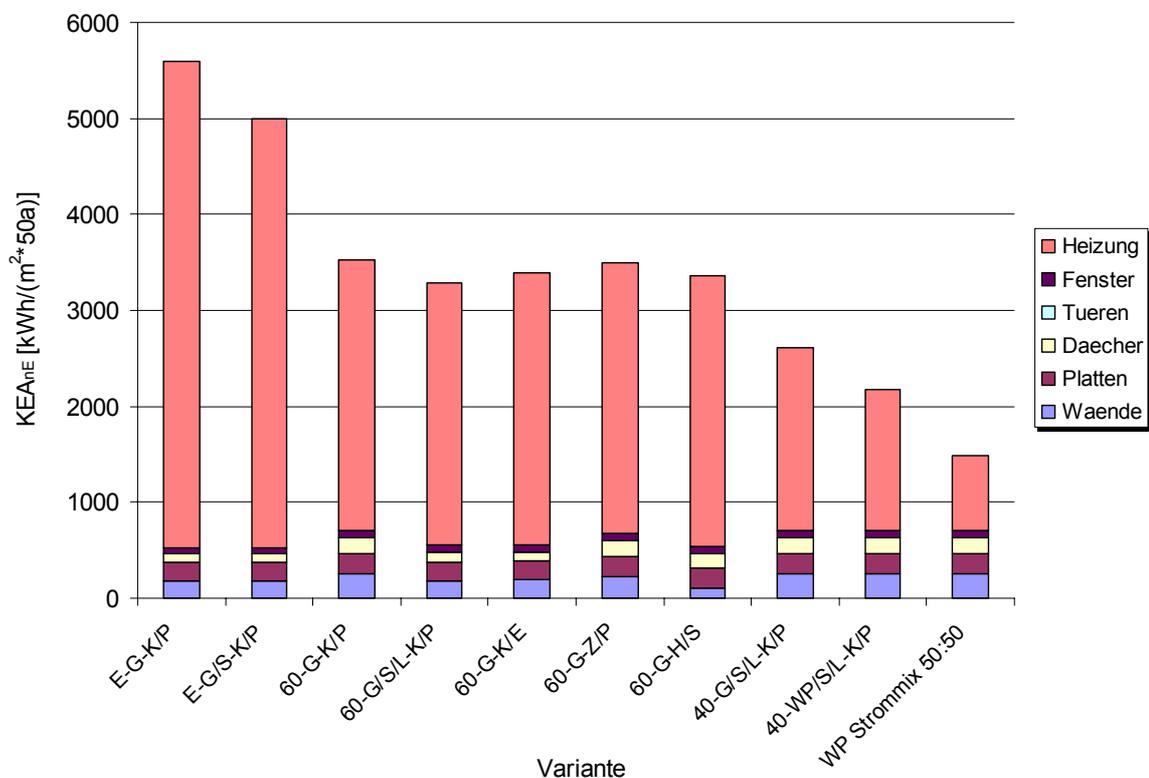


Abbildung 50: Neubauvarianten:  $KEA_{nE}$  der Bauteile

Bei den Modellen, welche die Anforderungen nach EnEV gerade erfüllen, liegt der Einfluss der Baustoffe auf den  $KEA_{nE}$  bei nur etwa 10 %. Für Varianten nach dem KfW60-Standard erhöht sich dieser Anteil auf 15 bis 20 % und weiter auf 25 bis 30 % für die KfW40 Varianten.

Führt man eine solche Gegenüberstellung auf Basis der bewerteten Emissionsparameter durch, ergibt sich ein viel höherer Einfluss der Baustoffe auf die Gesamtbilanz. Dies ist in Abbildung 51 für eine Bewertung nach Eco95<sup>D</sup> dargestellt.

Hier liegt bei den dem EnEV-Standard entsprechenden Varianten der Anteil der Baustoffe bereits bei etwa 30 %. Dieser Anteil wächst auf etwa 45 % bei KfW60 und weiter auf 60 % bei Varianten nach dem KfW40-Standard.

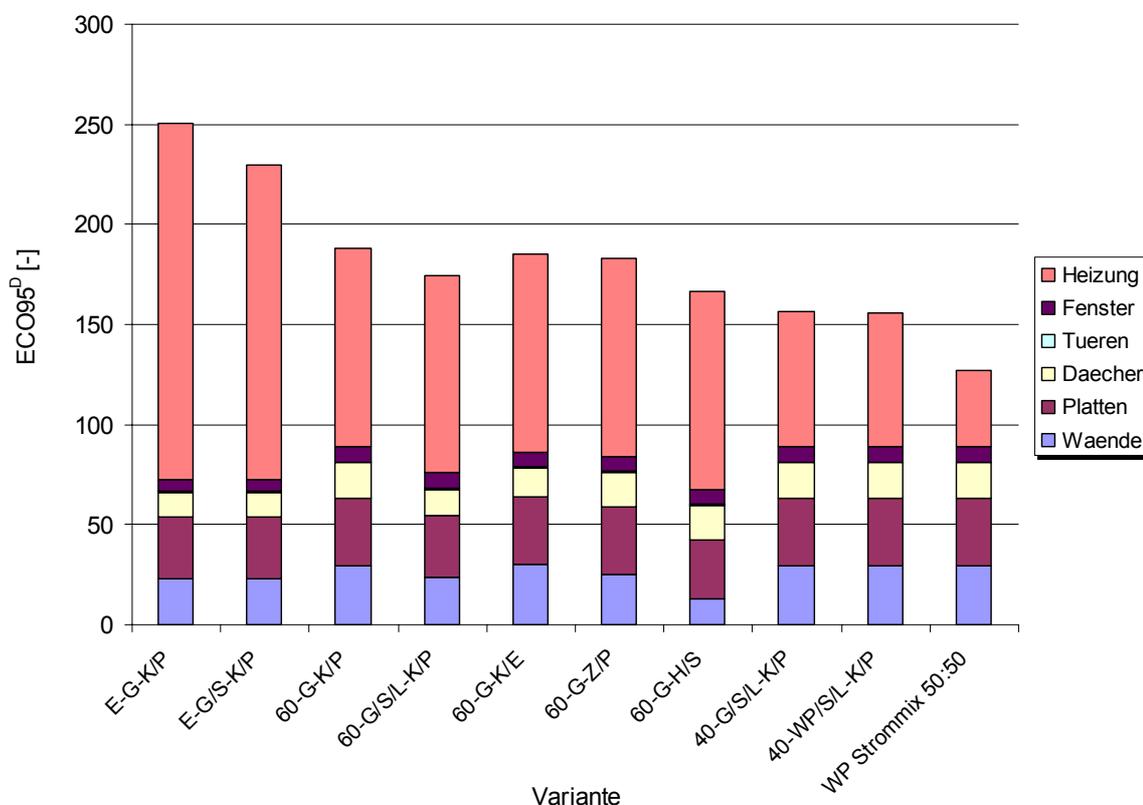


Abbildung 51: Neubauvarianten: Eco95<sup>D</sup> der Bauteile

Es lässt sich damit feststellen, dass der Gesamteinfluss der Baustoffe auch bei den Varianten nach EnEV-Standard bereits in einer Größenordnung liegt, bei der eine entsprechende Baustoffwahl die Gesamtbilanz des Gebäudes merklich beeinflusst. Bei den hier vorgestellten Varianten eines Beispielgebäudes kann an dieser Stelle kein eindeutiger Vorteil für oder gegen einen bestimmten Baustoff bezüglich der Emissionen und des kumulierten Energieaufwandes festgestellt werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die in der zugrundegelegten Datenbank GEMIS enthaltenen Datensätze aus teilweise 10 Jahre alten Erhebungen stammen, welche zudem im Hinblick auf die Datenqualität Unterschiede aufweisen. Derzeit sind jedoch im Rahmen des Deutschen Netzwerk Lebenszyklusdaten Bestrebungen im Gange, ähnlich zu dem Projekt Ecoinvent 2000 in der Schweiz einen qualitativ hochwertigen Bestand an deutschen Sachbilanzdaten zu schaffen der fortlaufend aktualisiert und erweitert werden soll [FZK, 2002]. Aufgrund der Flexibilität des in dieser Arbeit verwendeten Softwarekonzeptes (vgl. Kapitel 6), wäre es ohne großen Aufwand möglich den Internet-basierten Datenimport auf diese und andere zukünftige Datenquellen zu erweitern.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

### 8.1 Zusammenfassung

Wie in Kapitel 1 dargestellt wurde, hat der Bausektor in Deutschland einen erheblichen Anteil an den Abfallströmen, dem Ressourcenverbrauch und den Schadstoffemissionen. Damit verbunden sind entsprechend große negative Auswirkungen auf die Umwelt. Um diese zu reduzieren, werden vor allem die Anforderungen bezüglich Dämmstandard und Anlagentechnik im Gebäudebereich stetig erhöht. Zuletzt durch die Einführung der Energie-Einsparverordnung (EnEV) welche auf eine Reduktion des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes für Raumwärmeerzeugung und Trinkwassererwärmung zielt. Damit soll eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Gebäudebetrieb erreicht werden. Umweltwirkungen aus anderen Schadstoffemissionen sowie die Einflüsse aus der Produktion der Baustoffe werden dabei nicht berücksichtigt. Für eine nachhaltige Gebäudeplanung ist es jedoch notwendig, eine ganzheitliche Bewertung unter Einbeziehung unterschiedlicher Umweltaspekte durchzuführen. Dies kann mit dem Instrument der ökologischen Bilanzierung geschehen, da damit ein Gebäude auf Basis verschiedener Umweltwirkungen analysiert und optimiert werden kann. Für die Bewertung der einzelnen Umweltwirkungen zueinander existieren dabei mehrere Methoden, die sich zum einen in der Berechnungsmethodik selbst sowie zum anderen hinsichtlich der verwendeten Datengrundlage unterscheiden (vgl. Kapitel 2.4)

Die Durchführung einer Ökobilanz für ein komplexes Produkt wie ein Gebäude ist nur mit Computerunterstützung praktikabel. Wie in Kapitel 3.2 dargestellt existieren zwar verschiedene Softwareanwendungen, die eine Durchführung solcher Bilanzen in Teilbereichen unterstützen. Diese bisherigen Lösungen haben aber den Nachteil, dass sie nicht in den normalen Planungsablauf integriert sind und damit für den Planer zu einem untragbaren Mehraufwand führen. Vor allem in frühen Planungsphasen, in denen sich Entwürfe häufig ändern, aber trotzdem zu einem Großteil über das zukünftige Umweltverhalten eines Gebäudes über seinen gesamten Lebenszyklus entschieden wird, fehlt eine integrierte Softwarelösung zur ökologischen Bilanzierung.

Die moderne Planung von Gebäuden erfolgt immer mehr unter Zuhilfenahme von CAD-Software. Jedoch werden derzeit noch mehrere fachspezifische Modelle für ein Gebäude auf Basis unterschiedlicher CAD-Plattformen erstellt. Eine Kommunikation und der direkte Datentransfer zwischen den einzelnen Modellen ist in der Regel unmöglich. Dadurch sind die das Gebäude beschreibenden Daten mehrfach in den verschiedenen Modellen enthalten, was bei Änderungen des Gebäudeentwurfs zu uneinheitlichen Informationsständen führen kann. Eine Lösung dieser Problematik stellt die Produktmodellierung dar. Dabei werden sämtliche im Bauwesen einge-

---

setzten Einzelmodelle in einem einzigen umfassenden Modell zusammengefasst. Das Produktmodell enthält dabei nicht nur die Daten zum Design und zur Herstellung eines Gebäudes, sondern alle Informationen, die während des Entstehungsprozesses und des weiteren Lebenslaufs anfallen. Durch die IAI (International Alliance for Interoperability) wird mit den Industry Foundation Classes (IFC) ein Quasi-Standard im Bauwesen festgelegt, so dass IFC-konforme Modelle Plattformübergreifend ausgetauscht und weiterbearbeitet werden können (Kapitel 3.4).

In der vorliegenden Arbeit wurde nun ein Konzept vorgestellt, dass die Verknüpfung der CAD basierten Planung mit einer ökologischen Bilanzierung sowie einer Berechnung nach Energie-Einsparverordnung (EnEV) auf Basis der Produktmodellierung darstellt. Dies vereinfacht die Abschätzung der Umweltauswirkungen eines Gebäudeentwurfes in der frühen Planungsphase und unterstützt den Planer bei einer entsprechenden Entwurfsoptimierung. Dazu wurde zunächst ein zentrales Ökoinventar erstellt, welches neben den ökologischen Informationen zu Baustoffen und Bauteilen auch die benötigten bauphysikalischen Parameter beinhaltet (Kapitel 4). Die Ermittlung der Baustoffspezifischen Sachbilanzdaten erfolgte dabei durch Berechnungen mit dem Programmsystem GEMIS. Das so erhaltene Ökoinventar wird in Form einer über das Internet abrufbaren MySQL-Datenbank bereitgestellt, wobei das Datenformat zur Übertragung im ifcXML-Format konzipiert ist. Durch Auswahl und Import der entsprechenden Datensätze kann damit das Produktmodell innerhalb der CAD-Anwendung definiert werden. Als Modellierungswerkzeug selbst wurde in dieser Arbeit das CAD-System Architectural Desktop von Autodesk gewählt (vgl. Kapitel 6).

Für die Analyse des Produktmodells wurden zwei Softwaremodule entwickelt (Kapitel 6). Zum einen ist es möglich, eine Berechnung nach der Energie-Einsparverordnung EnEV durchzuführen (Analysemodul EnEV). Zum anderen kann eine ökologische Bilanz des Gebäudeentwurfes erstellt werden (Analysemodul LCA-Chart). Im Zuge der ökologischen Bilanzierung wird zunächst eine Sachbilanz für die verschiedenen Bauteilgruppen sowie die Gebäudeheizung erstellt. Berücksichtigt werden dabei verschiedene Emissionsparameter, sowie der Kumulierte Energie- und Stoffaufwand zur Abbildung des Ressourcenbedarfes. Anschließend werden die Ergebnisse der Sachbilanz bewertet. Als Bewertungsmethoden wurden die Ansätze nach CML, Ecoindikator 95 und UBP in das Analysemodul implementiert (Kapitel 5). Es erfolgte dabei eine Aufbereitung der Methoden entsprechend der verfügbaren Sachbilanzdaten in GEMIS sowie der aktuellen Datenbasis für den Bezugsraum Deutschland. Dies ermöglicht zum einen Vergleich der erhaltenen Ergebnisse in unterschiedlichen Aggregationsstufen und vermeidet zum anderen eine Fehlinterpretation aufgrund methodischer Defizite der einzelnen Bewertungsmethoden. Das gesamte Konzept ist dabei so ausgelegt, dass eine Anknüpfung an andere Ökoinventare mit einer Datenbereitstellung im ifcXML-Format leicht möglich ist. Beispiel hierfür wäre die Datenbank ECOINVENT 2000 aus

---

der Schweiz. Auch die Aufnahme zusätzlicher Sachbilanzdaten oder eine Änderung der Bewertungsmethoden ist ohne großen Aufwand möglich.

Abschließend wurde eine exemplarische Analyse anhand eines Beispielgebäudes durchgeführt (Kapitel 7). Als erstes erfolgte ein Vergleich verschiedener Varianten einer Altbausanierung über einen Zeitraum von 30 Jahren. Dabei konnte gezeigt werden, wie die aus ökologischer Sicht beste Sanierungsvariante mit den Ergebnissen aus dem Analysemodul LCA-Chart identifiziert werden kann und wie die Ergebnisse nach den einzelnen Bewertungsmethoden miteinander korrelieren. Als zweites wurden verschiedene Varianten eines Neubaus über einen Simulationszeitraum von 50 Jahren untersucht. Dabei wurde neben dem Dämmstandard auch die Art der verwendeten Baustoffe und Anlagentechnik variiert. Es stellte sich heraus, dass der Einfluss aus der Herstellung der Baustoffe bei einer ökologischen Bilanzierung der Varianten nach EnEV-Standard bereits in einer Größenordnung von 30 % liegt. Für Varianten nach den Förderbedingungen der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW 60 und KfW 40-Energiesparhaus) steigt dieser Anteil auf etwa 60% an. Für eine nachhaltige Gebäudeplanung ist daher notwendig, nicht nur den nach EnEV ermittelten Primärenergiebedarf als Grundlage zur ökologischen Einstufung heranzuziehen, sondern parallel dazu eine ökologische Bilanzierung unter Berücksichtigung der Baustoffproduktion durchzuführen.

## 8.2 Ausblick

Die verfügbaren Datensätze zu Baustoffen in den derzeit vorhandenen Ökoinventaren basieren auf teilweise zehn Jahre alten Erhebungen. Diese spiegeln somit den derzeitigen Stand der Baustoffproduktion nicht mehr aktuell wieder. Mit dem Deutschen Netzwerk Lebenszyklusdaten [FZK, 2002] sind jedoch Aktivitäten im Gange, ein aktuelles Ökoinventar für Baustoffe zu schaffen und dieses anschließend zentral, ähnlich dem schweizerischen Projekt ECOINVENT 2000, den verschiedenen Nutzern zur Verfügung zu stellen. Die Planungen beinhalten dabei eine konstante Pflege und Weiterentwicklung der Datenbank. Dies bedeutet, dass zukünftig eine Vielzahl von Untersuchungen und Erhebungen im Bereich der Baustoffproduktion nötig sind, um das geplante Ökoinventar des Netzwerks Lebenszyklusdaten mit entsprechenden Datensätzen füllen zu können. Weiterhin müsste für Deutschland oder auf europäischer Ebene für eine Ökobilanzierung von Gebäuden ein einheitliches Konzept der zu berücksichtigenden Wirkungskategorien und der darin verrechneten Emissionsparameter entwickelt werden. Dies hätte zur Folge, dass die einzelnen Ökobilanzstudien untereinander vergleichbar wären und damit in Zukunft das Konzept der Ökobilanz über die derzeitige Energie-Einsparverordnung hinaus auch in gesetzlichen Anforderungen umgesetzt werden kann. Für den Schritt der Bewertung ist es damit zusätzlich notwendig, für jeden einzelnen Emissionsparameter ein eindeutiges Ziel hinsichtlich der zukünftig angestrebten Reduktion zu definieren.

---

Das in dieser Arbeit verwendete Konzept der Produktmodellierung erlaubt es, neben der hier vorgestellten Verknüpfung mit dem Verfahren der Ökobilanzierung, weitere Anwendungen aus den verschiedenen Gebieten des Bauwesens zu integrieren. Neben einer Integration der Kostenplanung sind dabei auch Anwendungen zur Simulation von Luftströmungen oder statische Berechnungsmodule denkbar. Ein erster Ansatz zur Implementierung weiterer Modellierungs- und Anwendungsmöglichkeiten wird aktuell im Rahmen des BayFORREST Schwerpunktes Bauwerke umgesetzt. Hierbei ist unter anderem geplant, neben der Gebäudehülle auch die technische Gebäudeausstattung mit entsprechenden Analysewerkzeugen in das Produktmodell zu integrieren. Ein weiterer denkbarer Ansatz im Bereich der Bestandsaufnahme von Gebäuden wäre eine Kopplung mit Methoden des 3D-Laseraufmasses. Dies bedeutet, dass das Produktmodell eines Gebäudes in Zukunft als zentrale Planungsplattform für alle am Bau beteiligten Gewerke dienen kann.

---

## 9 LITERATURVERZEICHNIS

APACHE (2001): <http://www.apache.org>

ATV (1999): Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen. <http://www.atv.de>

Autodesk (2000): <http://www.autodesk.de>

BMU (1993): Bericht über die Umsetzung der Beschlüsse der 3. Internationalen Nordseeschutz-Konferenz. zitiert in: Stahl, B.: Methodenvergleich und Methodenentwicklung zur Lösung der Bewertungsproblematik in produktbezogenen Ökobilanzen. Dissertation, Universität Bremen

BMU (1996): Schritte zu einer nachhaltigen, umweltgerechten Entwicklung - Umweltziele und Handlungsschwerpunkte in Deutschland. Bonn, 1996

BMU (2000): Nationales Klimaschutzprogramm. Zeitschrift Umwelt Nr. 11, 2000

Bossel, H. (1994): Umweltwissen - Daten, Fakten, Zusammenhänge. 2.Auflage, Springer Verlag, Heidelberg

Boustead I.; Hancock, G.F. (1979): Handbook of Industrial Energy Analysis. Ellis Horwood Ltd., John Wiley & Sons, New York/Chichester/Brisbane/Toronto

Braunschweig, A. (1994): Evaluation und Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden für Ökobilanzen - Erste Ergebnisse. IWÖ-Diskussionsbeitrag Nr. 19, St. Gallen

BUND (1996): Zukunftsfähiges Deutschland – Ein Beitrag zur global nachhaltigen Entwicklung. Studie des Wuppertal Institutes für Klima, Energie und Umwelt, Birkhäuser Verlag, Basel

BUWAL (1990): Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung. Schriftenreihe Umwelt Nr. 133, Bern

BUWAL (1998): Bewertung in Ökobilanzen mit Hilfe der Methode der ökologischen Knappheit. Schriftenreihe Umwelt Nr. 297, Bern

De Haes, U. (1996): Towards a methodology for Life Cycle Impact Assessment. SETAC Europe, Brüssel

De Leeuw, F. (1993): Assessment of the atmospheric hazards and risks of new chemicals - Procedures to estimate hazard potentials. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Chemosphere, Vol. 27, No. 8

DIN V 4108-6 (2000): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

---

- DIN V 4701-10 (2001): Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen - Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- Dreyer H.P. (1995): Treibhaus Erde. ETH-Leitprogramm Physik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Fachdidaktik Physik, Zürich
- ECOBIS (2000): Ökologisches Baustoffinformationssystem. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und Bayerische Architektenkammer, Berlin/München
- Ecoinvent (2000): ECOINVENT 2000 - the Swiss National Life Cycle Inventory Database. <http://www.ecoinvent.org>
- DIN EN ISO 10077-1 (2000): Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten. Deutsche Fassung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- EN ISO 14040 (1997): Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Deutsche Fassung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- EN ISO 14041 (1998): Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. Deutsche Fassung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- EN ISO 14042 (2000): Ökobilanz – Wirkungsabschätzung; Deutsche Fassung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- EN ISO 14043 (2000): Ökobilanz – Auswertung. Deutsche Fassung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- EnEV (2001): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV). Bundesgesetzblatt vom 16. November 2001
- Enquete (1990): Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik. Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt, Economica Verlag, Bonn
- Enquete (1994):: Schutz der grünen Erde – Klimaschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft und Erhalt der Wälder. Enquete-Kommission Schutz der Erdatmosphäre, Economica Verlag, Bonn
- Enquete (1999): Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt, Springer-Verlag, Berlin
- Frischknecht, R.; Hofstetter, P.; Knöpfel, I.; Dones, R. und Zollinger, E. (1994): Ökoinventare für Energiesysteme. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
-

- ETH (1998): Ökobilanz-Bewertungsmethoden. Eidgenössische Technische Hochschule, Nachbearbeitung des 6. Diskussionsforums Ökobilanzen, ETH Zentrum UNK, Zürich
- ETH (2000): Energy Related Environmental Impact of Buildings. IEA CBS Annex 31, Eidgenössische Technische Hochschule, Schlussbericht, Dübendorf
- Euro (2000): Environmental signals 2000 - regular indicator report. European Environment Agency Office for Official Publications of the European Communities, Kopenhagen
- Eurostat (1991): Environmental Statistics. Eurostat, 1991
- Eyerer, P.; Reinhardt, H.W. (2000): Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden – Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung. Birkhäuser Verlag, Basel
- FfE (1999): Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen - Teil IV Kunststoffe. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, <http://www.ffe.de>
- Fink, P. (1992): Ökobilanzen - Grenzen und Möglichkeiten. GDI-Fachtagung Ökobilanzen, Gottlieb Duttweiler Institut, Rüschlikon /Zürich
- Friege, H. (1997): Management von Stoffströmen im Bereich Bauen und Wohnen: Beratungen in der Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt. In: Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.), Nachhaltige Baupolitik zwischen Ökonomie und Ökologie, Tagungsband, Bonn
- Frischknecht, R. (2000): Methoden der Bewertung von Umwelttechnik - Ökobilanzen. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
- FZK (2002): Deutsches Netzwerk Lebenszyklusdaten - Integration von nutzungsspezifischen Anforderungen des Bauwesens. Forschungszentrum Karlsruhe, Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme - Institut für Technische Chemie, Karlsruhe
- GaBiE (1999): Analyse von Energie- und Stoffströmen – Basisdaten für die ökologische Bewertung von Unternehmen, Wirtschaftsgütern und Dienstleistungen. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, <http://www.ffe.de>
- Gebler, W. (1992): Ökobilanzen in der Abfallwirtschaft. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Bericht 42, 2. Auflage, Bielefeld
- GEMIS (2002): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme. Öko-Institut, Freiburg, <http://www.oeko.de/service/gemis>
- Goedkoop, M. (1995): The ecoindicator 95. Final Report, NOH report 9523, Amersfoort
-

- Guinée, J. (2001): Life cycle assessment - An operational guide to the ISO standards. Final Report, LCA Centrum voor Milieukunde Leiden (CML), Leiden
- Hauschild, M.; Wenzel, H. (1998): Environmental Assessment of products - Volume 2, Scientific background. Chapman & Hall, London
- Heijungs, R. (1992): Environmental life cycle assessment of products - Guide and Backgrounds. LCA Centrum voor Milieukunde Leiden (CML), Leiden
- Heinecke, A.M.; Fleßner, C.H. (1994): Auswirkungen des Objektorientierten Modellierens auf die Arbeit des Konstrukteurs und die Gestaltung der Benutzungsoberflächen. In: Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und der Mathematik in Architektur und Bauwesen, Weimar
- Hunt, R. G.; Franklin, W. E.; Welch, R. O.; Cross, J. A. and Woodall, A. E. (1974): Resource and Environmental Profile Analysis of Nine Beverage Container Alternatives. EPA/530/SW-91c, United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste Management Programs, Washington
- IAI (1999): IFC Object Model Guide. International Alliance for Interoperability, IFC Release 2.0 Member CD
- IAIWEB (2003): International Alliance for Interoperability, <http://iai-international.org>
- ifib (1995): Baustoffdaten – Ökoinventare. Institut für industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe, HAB Weimar, ETH Zürich, Karlsruhe
- IKP (2003): Ganzheitliche Bilanzierung - GaBi. Institut für Kunststoffkunde IKP, Universität Stuttgart, <http://www.ikpgabi.uni-stuttgart.de>
- IPCC (1996): Climate Change 1995 - The science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press
- IPCC (2001): Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)", Technical Summary, Cambridge University Press
- KfW (2003): KfW-Programm zur CO2-Minderung Nr. 123. Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), <http://www.kfw.de>
- Kohler, N. (1997): Stand der Ökobilanzierung von Gebäuden und Gebäudebeständen. In: Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.), Nachhaltige Baupolitik zwischen Ökonomie und Ökologie. Tagungsband, Bonn
- Kortmann, J. (1994): Towards a single indicator for emissions - an exercise in aggregating environmental effects. Amsterdam
- Kowalczyk, W. (1997): Ein interaktiver Modellierer für evolutionäre Produktmodelle. Dissertation, Lehrstuhl für Bauinformatik, TU München
-

- Kreißig, J.; Baitz, M.; Betz, M.; Eyerer, P. und Reinhardt, H. W. (1997): Leitfaden zur Erstellung von Sachbilanzen in Betrieben der Steine-Erden-Industrie. Bundesverband Steine und Erden
- MPI (2002): Wie funktioniert der Treibhauseffekt? Max-Planck-Institut für Meteorologie, <http://www.mpimet.mpg.de>
- Müller-Wenk, R. (1974): Ein Vorschlag zur einzelwirtschaftlichen Sicht zur Realisierung einer umweltkonformen Wirtschaft. In: Wirtschaftspolitik in der Umweltkrise, Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart
- MYSQL (2001): Relationale Datenbank MySQL. <http://www.mysql.com>
- netcraft (2003): <http://www.netcraft.com/survey>
- Neuberg, F. (2003): Ein Softwarekonzept zur Internet-basierten Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken. Dissertation, Technische Universität München
- Nordic (1994): LCA-Nordic Technical Reports No. 10 and Special Reports No. 1-2. Nordic Council of Ministers, Copenhagen
- OECD (1993): Environmental data. Compendium, Zitiert in: Goedkoop, M. (1995): The ecoindicator 95. Final Report, NOH report 9523, Amersfoort
- PHP (2001): Skriptsprache PHP. <http://www.php.net>
- Pick, E.; Gürzenich, D. und Langer, A. (1999): Vergleich ausgewählter Methoden zur Wirkungsbilanzierung als Teil der Ökobilanz. Arbeitsbericht, Universität GH Essen
- Pré (2003): SimaPro 5.1. <http://www.pre.nl/simapro>
- RIVM (1992): „The Environment in Europe: a Global Perspective“, report nr. 481505001, Bilthoven, 1992, zitiert in (Goedkoop, 1995)
- Schäfer, H. (1974): Fundamentals and methodology of investigating specific energy consumption. EG-Auftrag Nr. 145-74-ECIC, Brüssel
- SETAC (1991): A Technical Framework for Life Cycle Assessment. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Washington
- Sedlbauer, K.; Woerle, G. (1998): Ökobilanzierung von Bauprodukten - ohne Nutzungsphase nutzlos? Bauphysik 20, Nr.6
- Spold (2001): The SPOLD'99 format for life-cycle inventory data. Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development (SPOLD), <http://www.spold.org>
- Stahl, B. (1998): Methodenvergleich und Methodenentwicklung zur Lösung der Bewertungsproblematik in produktbezogenen Ökobilanzen. Dissertation, Universität Bremen
-

- Fritsche, R.; Jenseit, W. und Hochfeld, C. (1999): Methodikfragen bei der Berechnung des kumulierten Energieaufwandes (KEA). Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E Vorhabens Nr. 104 01 123, Öko-Institut, Darmstadt
- Jenseit, W.; Lützkendorf, T. und Eiermann, O. (1999): Der kumulierte Energieaufwand (KEA) im Baubereich. Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E Vorhabens Nr. 104 01 123, Öko-Institut, Darmstadt
- UBA (2000a): Ökobilanz für Getränkeverpackungen II. Umweltbundesamt, Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 296 92 504, UBA Texte 37/00, Berlin
- UBA (2000b): Daten zur Umwelt 2000. Umweltbundesamt, Berlin, <http://www.umweltbundesamt.de>
- UBA (2000c): Handreichung Bewertung in Ökobilanzen - Hintergrundpapier. Umweltbundesamt, Berlin, <http://www.umweltbundesamt.de>
- UBA (2002): Umweltdaten Deutschland 2002. Umweltbundesamt, Berlin, <http://www.umweltbundesamt.de>
- UN-ECE (1999): Convention on Long-range Transboundary Air Pollution – Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. United Nations Economic Commission for Europe, Göteborg
- VDI 4600 (1997): Kumulierter Energieaufwand, Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin
- Walz, R. (1996): Weiterentwicklung von Indikatorensystemen für die Umweltberichterstattung. Abschlußbericht, UBA-Texte 37/97, Karlsruhe
- WHO (1997): Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe  
Zitiert in: Goedkoop, M. (1995): The ecoindicator 95. Final Report, NOH report 9523, Amersfoort
- WMO (1992): Scientific Assessment of Ozone Depletion 1991. World Meteorological Organization (WMO), Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 25, Geneva
- WMO (1999): Scientific assessment of ozone depletion 1998. World Meteorological Organisation (WMO), Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 44, Geneva
- Wolpensinger, H. (2001): Ökobilanzierung im Wohnungs- und Siedlungsbau. Studienarbeit, Institut für industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe
- Ziegel (2002): EnEV – Energie Einsparverordnung. Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V., Bonn
-

---

# *Anhang*

---

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>A 1 VERZEICHNISSE</b> .....	<b>A1</b>
A 1.1 Abbildungsverzeichnis.....	A1
A 1.2 Tabellenverzeichnis.....	A3
<b>A 2 BAUTEIL- UND ANLAGENMODELLIERUNG IN GEMIS</b> .....	<b>A4</b>
A 2.1 Bauteile .....	A4
A 2.1.1 Bodenplatten.....	A4
A 2.1.2 Geschossdecken - Beton.....	A4
A 2.1.3 Geschossdecken - Holz.....	A5
A 2.1.4 Flachdächer.....	A5
A 2.1.5 Steildächer - Dachdeckungen.....	A6
A 2.1.6 Steildächer - Aufsparrendämmung.....	A6
A 2.1.7 Steildächer - Vollsparrendämmung.....	A7
A 2.2 Anlagen und elektrischer Strom .....	A8
A 2.2.1 Heizungs-Anlagen.....	A8
A 2.2.2 Elektrischer Strom aus nicht erneuerbaren Quellen.....	A9
A 2.2.3 Elektrischer Strom aus regenerativen Quellen.....	A10
<b>A 3 BERECHNUNGSERGEBNISSE BEISPIELVARIANTEN</b> .....	<b>A11</b>
A 3.1 Altbausanierung .....	A11
A 3.1.1 Unsanierter Zustand.....	A11
A 3.1.2 Variante F.....	A14
A 3.1.3 Variante D.....	A17
A 3.1.4 Variante W.....	A20
A 3.1.5 Variante FDW.....	A23
A 3.2 Neubau.....	A26
A 3.2.1 Variante E-G-K/P.....	A26
A 3.2.2 Variante E-G/S-K/P.....	A29
A 3.2.3 Variante 60-G-K/P.....	A32
A 3.2.4 Variante 60-G/S/L-K/P.....	A35
A 3.2.5 Variante 60-G-K/E.....	A38
A 3.2.6 Variante 60-G-Z/P.....	A41
A 3.2.7 Variante 60-G-H/S.....	A44
A 3.2.8 Variante 40-G/S/L-K/P.....	A47
A 3.2.9 Variante 40-WP/S/L-K/P.....	A50
A 3.2.10 Variante 40-WP/S/L-K/P 50:50 Strommix.....	A52

---

---

## A 1 Verzeichnisse

### A 1.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Massenanteile am Gesamtabfallaufkommen in Deutschland 1998 .....	2
Abbildung 2: Anteile am Gesamt-Endenergieverbrauch in Deutschland 1998 .....	2
Abbildung 3: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland.....	3
Abbildung 4: Bestandteile einer Ökobilanz nach EN ISO 14040 .....	8
Abbildung 5: Klassifizierung von Emissionen .....	12
Abbildung 6: Bestandteile der Auswertung nach EN ISO 14043 .....	14
Abbildung 7: Prinzip des Treibhauseffekts .....	16
Abbildung 8: Ozon- und Druckverteilung in der Atmosphäre.....	18
Abbildung 9: Prozesskettenbild aus Gemis für den Baustoff „Gipsplatte“ .....	30
Abbildung 10: Programmfenster ECOBIS 2000 .....	31
Abbildung 11: Lage des Produktmodells zwischen den Projektbeteiligten .....	37
Abbildung 12: Modellbasierte Planung im Architectural Desktop .....	39
Abbildung 13: Aufbau der in GEMIS berechneten Bodenplatten.....	43
Abbildung 14: Grundaufbau der Beton-Geschossdecken .....	43
Abbildung 15: Grundaufbau der Holz-Geschossdecken.....	44
Abbildung 16: Grundaufbau der Flachdächer.....	44
Abbildung 17: Grundaufbau der Steildächer mit Aufsparrendämmung .....	45
Abbildung 18: Steildach-Vollsparrengedämmt ohne Untersparrendämmung .....	45
Abbildung 19: Steildach-Vollsparrengedämmt mit Untersparrendämmung .....	46
Abbildung 20: Grundkonzept der Softwaretechnischen Umsetzung.....	71
Abbildung 21: Marktanteile von CAD-Systemen.....	72
Abbildung 22: Export und Import über die IFC-Schnittstelle .....	75
Abbildung 23: Aktive Webserver weltweit.....	76
Abbildung 24: Vorgehen zur Erstellung der Internetdatenbank-Inhalte .....	77
Abbildung 25: Importdialog EcoData .....	78
Abbildung 26: Design der Softwarekomponenten .....	79
Abbildung 27: Eingabedialog für eine beheizte Gebäudezone .....	80
Abbildung 28: Graphische Ausgabe Monatsbilanzverfahren .....	81

---

---

Abbildung 29: Ausgabedialog „Primärenergiebedarf und Nachweis“ .....	82
Abbildung 30: Analyseapplikation LCA-Chart - Sachbilanz numerisch.....	83
Abbildung 31: Analysemodul LCA-Chart - Sachbilanz Zeitreihendiagramm.....	84
Abbildung 32: Analysemodul LCA-Chart - Definition der Raumwärmegewinnung ....	85
Abbildung 33: Analyseapplikation LCA-Chart - Auswertung von KEA&KSA .....	86
Abbildung 34: Analyseapplikation LCA-Chart - CML und Ecoindicator95 .....	86
Abbildung 35: Analyseapplikation LCA-Chart - UBP-Methode .....	87
Abbildung 36: Dreidimensionales Modell des Beispielgebäudes.....	88
Abbildung 37: Schnitt des Erdgeschosses .....	89
Abbildung 38: Schnitt des Obergeschosses .....	89
Abbildung 39: Schnitt des Dachgeschosses .....	89
Abbildung 40: Primärenergiebedarf und KEAnE der Heizung pro Jahr .....	92
Abbildung 41: Vergleich von KEAnE aus Heizung und des Gesamtgebäudes .....	93
Abbildung 42: Normalisierte Wirkungspotentiale der Variante FDW .....	93
Abbildung 43: Verbesserung der einzelnen Varianten gegenüber Altbau .....	94
Abbildung 44: Primärenergiebedarf und KEAnE der Varianten für die Heizung .....	99
Abbildung 45: Einfluss der Solaranlage auf die Gesamtbilanz .....	100
Abbildung 46: Bewertung der Varianten 60-G-K/P und 60-G/S/L-K/P .....	101
Abbildung 47: Vergleich der Baustoffvariationen.....	102
Abbildung 48: Vergleich der KfW40 Varianten .....	103
Abbildung 49: KfW40-Varianten: Wirkpotentiale .....	104
Abbildung 50: Neubauvarianten: KEAnE der Bauteile.....	105
Abbildung 51: Neubauvarianten: Eco95D der Bauteile .....	106

---

---

## A 1.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meilensteine in der Entwicklung ökologischer Bilanzen .....	7
Tabelle 2: Beispiele an funktionellen Einheiten im Baubereich .....	10
Tabelle 3: Übersicht der derzeit vom UBA verwendeten Wirkungskategorien .....	15
Tabelle 4: Treibhauspotentiale für einen Zeitraum von 100 Jahren .....	17
Tabelle 5: Ozonabbaupotentiale ausgewählter Stoffe .....	19
Tabelle 6: Eutrophierungspotential ausgewählter Stoffe .....	20
Tabelle 7: Säurebildungspotentiale ausgewählter Stoffe .....	21
Tabelle 8: Überblick über Bewertungsmethoden .....	22
Tabelle 9: Wärmedämmeigenschaften der modellierten Fenster .....	47
Tabelle 10: Modellierte Mauerstein-Mörtel Kombinationen .....	48
Tabelle 11: Prozentuale Anteile am Strommix .....	51
Tabelle 12: Ausgewählte Emissionsparameter .....	55
Tabelle 13: Ausgewählte Ressourcenparameter .....	56
Tabelle 14: Ozonvorläuferpotential ausgewählter Stoffe .....	58
Tabelle 15: verwendete Emissionen und deren Charakterisierungsfaktoren .....	59
Tabelle 16: Ermittlung der Ökofaktoren .....	66
Tabelle 17: Wirkungspotentiale und Gewichtungsfaktoren für Deutschland .....	69
Tabelle 18: Definition des Altbaus .....	90
Tabelle 19: Sanierungsvarianten .....	91
Tabelle 20: Neubauvarianten .....	96
Tabelle 21: Bauteilbeschreibung Varianten E-G-K/P und E-G/S-K/P .....	97
Tabelle 22: Bauteilbeschreibung Varianten 60-G-K/P und 60-G/S/L-K/P .....	98
Tabelle 23: Bauteilbeschreibung Varianten 60-G-K/E, 60-G-Z/P und 60-G-H/S .....	98

---

## A 2 Bauteil- und Anlagenmodellierung in GEMIS

### A 2.1 Bauteile

#### A 2.1.1 Bodenplatten

GEMIS Prozessname		Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	Dicke [mm]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m*K)]
Steine-Erden\Zementestrich		100	50	2000	1,4
Kunststoffe\Dampfbremse-PE		0,16	0,2	820	-
Kunststoff\PUR-Hartschaum		0,96	30	32	0,035
Steine-Erden\Beton-B25		480	200	2400	2,1
Metall\Stahl-D-WarmWalz		7,00	-	-	-
Chem-Org\Bitumendichtungsbahn		1,20	1	1200	0,17
Perimeter- dämmung	Kunststoff\EPS	1,80 - 4,80	60 - 160	30	0,035
	Kunststoff\Vlies	0,19	40 - 160	32	0,030
	Kunststoff\PUR-Hartschaum	1,28 - 5,12			
	Kunststoff\Vlies	0,19			
Steine-Erden\Schaumglas		6,60 - 17,60	60 - 160	110	0,045

#### A 2.1.2 Geschossdecken - Beton

GEMIS Prozessname		Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	Dicke [mm]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m*K)]
Steine-Erden\Zementestrich		100	50	2000	1,4
Kunststoffe\Dampfbremse-PE		0,164	0,2	820	-
Dämmung	Kunststoff\PUR-Hartschaum	0,64 - 8,96	20 - 280	32	0,030 / 0,035
	Kunststoff\EPS	0,6 - 8,4	20 - 280	30	0,035
	Steine-Erden\Steinwolle	4 - 28	40 - 280	100	0,035
	HolzWirtschaft\Weichfaserplatte	2,1	8	160	0,040
	Steine-Erden\Bläherlit	4,4	40	110	0,050
HolzWirtschaft\Weichfaserplatte		3,2 - 9,6	20 - 60	160	0,045
Steine-Erden\Beton-B25		336 / 480	140 / 200	2400	2,1
Metall\Stahl-D-WarmWalz		7,00	-	-	-
Steine-Erden\Putz-Kalkputz		20	10	2000	-

## A 2.1.3 Geschossdecken - Holz

<b>GEMIS Prozessname</b>		<b>Masse [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Dicke [mm]</b>	<b>Dichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>λ [W/(m*K)]</b>
HolzWirtschaft\Spanplatte		9,6	16	600	0,13
Dämmung	Kunststoff\PUR-Hartschaum	2,56 - 8,96	80 - 280	32	0,025 / 0,030
	Kunststoff\EPS	2 - 5,6	100 - 280	20	0,035
	Steine-Erden\Steinwolle	4,8 - 12,8	120 - 320	40	0,035
HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (20%)		20	200	500	0,13
Kunststoffe\Dampfbremse-PE		0,16	0,2	820	-
Steine-Erden\Gipsplatte		11,25	12,5	900	0,25

## A 2.1.4 Flachdächer

<b>GEMIS Prozessname</b>		<b>Masse [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Dicke [mm]</b>	<b>Dichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>λ [W/(m*K)]</b>
Xtra-Abbau\Kies-D		100	50	2000	-
Kunststoff\Vlies		0,19	-	-	-
Dämmung	Kunststoff\PUR-Hartschaum	3,2 - 7,68	100 - 240	32	0,025 / 0,030
	Kunststoff\EPS	2,4 - 4,8	120 - 240	20	0,035
	Steine-Erden\Schaumglas	16,8 - 28,8	140 - 240	120	0,045
Kunststoffe\Dampfbremse-PE		0,16	0,2	820	-
Steine-Erden\Beton-B25		480	200	2400	2,1
Metall\Stahl-D-WarmWalz		30	-	-	-
Steine-Erden\Putz-Kalkputz		20	10	2000	-

## A 2.1.5 Steildächer - Dachdeckungen

GEMIS Prozessname		Masse [kg/m <sup>2</sup> ]
Dachstein Falzziegel	Steine-Erden\Dachstein	45
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Traglattung 30/50)	2,25
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Konterlattung 30/50)	0,94
Ziegel Falzziegel	Steine-Erden\Tonziegel	47
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Traglattung 30/50)	2,25
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Konterlattung 30/50)	0,94
Ziegel Biberschwanz	Steine-Erden\Tonbiber	68,3
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Traglattung 30/50)	2,25
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Konterlattung 30/50)	0,94
Ziegel Mönch-Nonne	Steine-Erden\Tonziegel	62,7
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Traglattung 40/60)	3,6
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Konterlattung 40/60)	1,5
Metall\Zink		1,1

## A 2.1.6 Steildächer - Aufsparrendämmung

GEMIS Prozessname		Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	Dicke [mm]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m*K)]
Dachdeckung variiert					
Dämmung	Metall\Aluminium-D	0,135	0,05	2700	0,025 - 0,035
	Kunststoff\PUR-Hartschaum	3,84 - 7,68	120 - 240	32	
	Metall\Aluminium-D	0,135	0,05	2700	
	Kunststoff\EPS	2,4 - 4,8	120 - 240	20	0,035
	Kunststoffe\Dampfbremse-PE	0,16	0,2	820	
	Kunststoff\Vlies	0,19	-	-	
	Steine-Erden\Steinwolle	9,1 - 15,6	140 - 240	65	0,035
	Kunststoffe\Dampfbremse-PE	0,16	0,2	820	
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Schalung)	10	20	500	0,13
	HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Sparren 10/16)	16	160	500	-

## A 2.1.7 Steildächer - Vollsparrendämmung

<b>GEMIS Prozessname</b>	<b>Masse [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Dicke [mm]</b>	<b>Dichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>λ [W/(m*K)]</b>
Dachdeckung variiert				
Kunststoff\Vlies	0,19	-	-	-
HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Schalung)	9	18	500	0,13
HolzWirtschaft\Schnittholz-mix-Trok-Fichte (Sparren)	14 - 24	140 - 240	500	0,13
Steine-Erden\Glaswolle	2,46 - 4,22	140 - 240	22	0,035
Kunststoffe\Dampfbremse-PE	0,16	0,2	820	-
Steine-Erden\Gipsplatte	11,25	12,5	900	0,25

## A 2.2 Anlagen und elektrischer Strom

### A 2.2.1 Heizungs-Anlagen

Name	Beschreibung	Hilfsenergiebedarf [kWh <sub>el.Strom</sub> / kWh <sub>Wärme</sub> ]
Gas atmosphärisch zentral mit 85 % Nutzungsgrad	Zentralheizung für Erdgas mit atmosphärischem Brenner	0,01
Gas atmosphärisch zentral mit 91 % Nutzungsgrad	Zentralheizung für Erdgas mit atmosphärischem Brenner	0,01
Gas Brennwert zentral mit 100 % Nutzungsgrad	Zentrale Brennwertheizung für Erdgas mit atmosphärischem Brenner	0,01
Gas Brennwert zentral mit 107 % Nutzungsgrad	Zentrale Brennwertheizung für Erdgas mit atmosphärischem Brenner	0,01
Holz-Pellet zentral mit 80% Nutzungsgrad	Holz-Pellet Heizung; Nutzungsgrad 80%	0,04
Öl atmosphärisch zentral mit 85 % Nutzungsgrad	Zentralheizung für leichtes Heizöl mit atmosphärischem Brenner	0,01
Öl atmosphärisch zentral mit 91 % Nutzungsgrad	Zentralheizung für leichtes Heizöl mit atmosphärischem Brenner	0,01
Solar Kollektor	Solarkollektor (flach oder Vakuumröhre) zur Warmwasser-Gewinnung	0,02
El. Wärmepumpe mit Wasser als Wärmequelle	Elektrische Wärmepumpe für Heizsystem mit 35°C Vorlauf- und 28°C Rücklauf-temperatur, Wärmequelle Grundwasser, Jahresarbeitszahl 5,0	0,2175 (0,2 + 0,0175)
El. Wärmepumpe mit Umgebungsluft als Wärmequelle	Elektrische Wärmepumpe mit drehzahl-geregeltem Verdichter für Heizsystem mit 35°C Vorlauf- und 28°C Rücklauf-temperatur, Wärmequelle Luft, Jahresarbeitszahl = 3,8	0,2807 (0,263 + 0,0175)
Elektroheizung dezentral	Elektro-Nachtspeicher-Heizung; Nutzungsgrad 99% nach [ÖKO, 1994]	1,02 (1,01 + 0,01)

## A 2.2.2 Elektrischer Strom aus nicht erneuerbaren Quellen

<b>GEMIS Prozess</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Anteil [%]</b>
Kohle-KW-DT-D	großes Steinkohlekraftwerk mit Dampfturbine für Vollwert-Steinkohle in Deutschland	24,65
Kohle-KW-DT-D-Ballast	Ballaststeinkohle-Kraftwerk mit Schmelzkammerfeuerung und Dampfturbine (DT) in Westdeutschland	4,40
Kohle-KW-DT-D-Küste	Kohle-Kraftwerk (Importkohle) Küstenstandort	0,55
BrK-KW-DT-D-rheinisch	Rohbraunkohle-Kraftwerk (KW) mit Dampfturbine (DT), westdeutsche Rohbraunkohle im rheinischen Revier	18,59
BrK-KW-DT-D-Lausitz	neues Rohbraunkohle-Kraftwerk (KW) mit Dampfturbine (DT), ostelbische Kohle (Lausitz)	1,33
BrK-KW-DT-D-Lausitz-saniert	Rohbraunkohle-Kraftwerk (KW) mit Dampfturbine (DT), ostelbische Kohle (Lausitz).	4,00
BrK-KW-DT-D-Leipzig	Rohbraunkohle-Kraftwerk (KW) mit Dampfturbine (DT), westelbische Kohle (Leipzig)	2,08
Gas-KW-GT-D	großes gasbefeuertes Gasturbinen- (GT) Kraftwerk (KW) für Spitzenlast in Deutschland	0,95
Gas-KW-DT-D	großes gasbefeuertes Dampfturbinen- (DT) Kraftwerk (KW) mit Low-NOx-Brenner	4,56
Gas-KW-GuD-D-Ost	großes gasbefeuertes Gas-und-Dampfturbinen- (GuD) Kraftwerk (KW) in Ostdeutschland, mit Low-NOx-Brennkammer	3,00
Gas-KW-GuD-D-mittel	mittleres gasbefeuertes Gas- und Dampfturbinen- (GuD) Kraftwerk (KW) in Deutschland mit Low-NOx-Brennkammer	1,00
Öl-schwer-KW-DT-D	Dampfturbinen-Kraftwerk für schweres Heizöl	1,00
Müll-KW-DT-D	Müllverbrennungsanlage als Kraftwerk	2,75
U-KW-DWR-D	Druckwasserreaktor (DWR) der "Baureihe 80", mögliche Änderungen (Hochabbrand, MOX-Brennelemente) wurden außer Betracht gelassen. Zwischen- und Endlagerung der Brennelemente sowie Abriss der Anlage und Lagerung der entstehenden Reststoffe sind NICHT einbezogen, da hierzu keine verlässlichen Daten vorliegen	31,14
Summe		100,00

---

### A 2.2.3 Elektrischer Strom aus regenerativen Quellen

<b>GEMIS Prozess</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Anteil [%]</b>
Wind-KW-Park-gross-D	Windturbinen als Park mit 10 Anlagen a 1000-kW, exkl. Kabel und Transformatoren	15,00
Wasser-KW-gross-D	großes Laufwasser-Kraftwerk in Deutschland	85,00
Summe		100,00

---

## A 3 Berechnungsergebnisse Beispielvarianten

### A 3.1 Altbausanierung

#### A 3.1.1 Unsaniertes Zustand

##### A 3.1.1.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/30a	0	0	0	0	0	1470573,1	1470573,1
KEA <sub>E</sub>	kWh/30a	0	0	0	0	0	1640,6	1640,6
KEA <sub>andere</sub>	kWh/30a	0	0	0	0	0	4310,4	4310,4
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/30a	0	0	0	0	0	1476516,4	1476516,4
KSA <sub>nE</sub>	t/30a	0	0	0	0	0	2,7	2,7
KSA <sub>E</sub>	t/30a	0	0	0	0	0	87,2	87,2
KSA <sub>andere</sub>	t/30a	0	0	0	0	0	0,24	0,2
KSA <sub>Summe</sub>	t/30a	0	0	0	0	0	90,2	90,2
CO <sub>2</sub>	t/30a	0	0	0	0	0	393,3	393,3
CO	kg/30a	0	0	0	0	0	188,0	188,0
NOx	kg/30a	0	0	0	0	0	284,1	284,1
SO <sub>2</sub>	kg/30a	0	0	0	0	0	614,6	614,6
CH <sub>4</sub>	kg/30a	0	0	0	0	0	406,3	406,3
NMVOG	kg/30a	0	0	0	0	0	92,5	92,5
HCl	g/30a	0	0	0	0	0	1449,2	1449,2
HF	g/30a	0	0	0	0	0	112,2	112,2
H <sub>2</sub> S	mg/30a	0	0	0	0	0	58,1	58,1
NH <sub>3</sub>	mg/30a	0	0	0	0	0	7031,3	7031,3
N <sub>2</sub> O	g/30a	0	0	0	0	0	3919,0	3919,0
CF <sub>4</sub>	mg/30a	0	0	0	0	0	243,5	243,5
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/30a	0	0	0	0	0	30,6	30,6
N	mükg/30a	0	0	0	0	0	0,0	0,0
CSB	kg/30a	0	0	0	0	0	25,7	25,7

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	0	0	0	0	0	33,52	33,52
<b>AP</b>	0	0	0	0	0	21,21	21,21
<b>NP</b>	0	0	0	0	0	3,90	3,90
<b>TOPP</b>	0	0	0	0	0	8,91	8,91
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	0	0	0	0	0	310,8	310,8
<b>UBP<sup>D</sup></b>	0	0	0	0	0	36718249	36718249

## A 3.1.1.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	611,57	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	1,14	1	78,06	W/K	
	Ost	47,22	1,14	1	53,83	W/K	
	Süd	55,00	1,14	1	62,70	W/K	
	West	47,22	1,14	1	53,83	W/K	
Fenster	Nord	3,82	2,50	1	9,55	W/K	
	Ost	6,25	2,50	1	15,63	W/K	
	Süd	19,80	2,50	1	49,50	W/K	
	West	6,25	2,50	1	15,63	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	2,10	1	5,27	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,58	1	40,72	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,58	1	40,72	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,49	0,6	29,19	W/K	
$\Sigma A: 496,22$					$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	454,63	W/K
<b>Wärmebrücken (pauschal)</b>				$H_{WB} = A \cdot 0,1$	49,62	W/K	
<b>Transmissions- wärmeverlust</b>	$H_T$ - spezifisch			$H_T = \Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	504,25	W/K	
	$Q_T$ - absolut			$Q_T = 66 \cdot H_T$	33280,50	kWh/a	
<b>Lüftungswärme- verlust</b>	$H_V$ - spezifisch ( $n_{50} < 3,0 \text{ h}^{-1}$ )			$H_V = 0,163 \cdot V_e$	124,61	W/K	
	$Q_V$ - absolut			$Q_V = 66 \cdot H_V$	8224,26	kWh/a	
<b>Hüllflächenfaktor</b>				$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$	
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	Strahlungs- faktor			
	Fenster Nord	3,82	0,75	100	162,4	kWh/a	
	Fenster Ost	6,25	0,75	155	412,0	kWh/a	
	Fenster Süd	19,80	0,75	270	2273,4	kWh/a	
Fenster West	6,25	0,75	155	412,0	kWh/a		
$\Sigma Q_S$					3259,8	kWh/a	
<b>Interne Wärmegewinne</b>				$Q_i = 22 \cdot A_N$	5381,8	kWh/a	
<b>Nutzbare Gesamtgewinne</b>				$Q_g = 0,95 \cdot (Q_S + Q_i)$	8209,5	kWh/a	
<b>Jahresheizwärmebedarf</b>				$Q_h$	33295,3	kWh/a	
				$q_h$	136,1	kWh/( $m^2 \cdot a$ )	

## A 3.1.1.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	185	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.057,50	kWh/a	$Q_h$	33.295,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	136,10	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 2K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, mit Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, ungeregelte Pumpe					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			-					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Öl zentral NT55/45°C			Öl zentral NT55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	4,85	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	131,25	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	6.435,43	kWh/a	$Q_{H,E}$	36.124,51	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		205,46	kWh/a		420,76	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	7.695,12	kWh/a	$Q_{H,P}$	40.999,99	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	42.559,94	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	626,22	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	48.695,11	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,34	[-]

## A 3.1.2 Variante F

## A 3.1.2.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/30a	0	0	0	0	8593,0	1387545,8	1396138,8
KEA <sub>E</sub>	kWh/30a	0	0	0	0	167,4	1548,0	1715,4
KEA <sub>andere</sub>	kWh/30a	0	0	0	0	522,4	4067,1	4589,5
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/30a	0	0	0	0	9282,7	1393153,9	1402436,6
KSA <sub>nE</sub>	t/30a	0	0	0	0	2,0	2,5	4,6
KSA <sub>E</sub>	t/30a	0	0	0	0	23,4	82,3	105,7
KSA <sub>andere</sub>	t/30a	0	0	0	0	0,02	0,23	0,2
KSA <sub>Summe</sub>	t/30a	0	0	0	0	25,4	85,1	110,6
CO <sub>2</sub>	t/30a	0	0	0	0	2,4	371,1	373,5
CO	kg/30a	0	0	0	0	11,4	177,4	188,7
NOx	kg/30a	0	0	0	0	7,0	268,1	275,0
SO <sub>2</sub>	kg/30a	0	0	0	0	5,6	579,9	585,6
CH <sub>4</sub>	kg/30a	0	0	0	0	6,6	383,4	390,0
NMVOG	kg/30a	0	0	0	0	0,4	87,3	87,7
HCl	g/30a	0	0	0	0	65,1	1367,4	1432,4
HF	g/30a	0	0	0	0	23,4	105,9	129,3
H <sub>2</sub> S	mg/30a	0	0	0	0	9,5	54,8	64,4
NH <sub>3</sub>	mg/30a	0	0	0	0	49,2	6634,3	6683,5
N <sub>2</sub> O	g/30a	0	0	0	0	61,6	3697,7	3759,2
CF <sub>4</sub>	mg/30a	0	0	0	0	9195,4	229,7	9425,2
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/30a	0	0	0	0	1155,7	28,8	1184,5
N	mükg/30a	0	0	0	0	221,3	0,0	221,3
CSB	kg/30a	0	0	0	0	3,3	24,2	27,6

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	0	0	0	0	0,22	31,62	31,84
<b>AP</b>	0	0	0	0	0,28	20,02	20,29
<b>NP</b>	0	0	0	0	0,10	3,68	3,78
<b>TOPP</b>	0	0	0	0	0,20	8,41	8,60
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	0	0	0	0	3,8	293,2	297,0
<b>UBP<sup>D</sup></b>	0	0	0	0	1542189	34645171	36187360

### A 3.1.2.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	1,14	1	78,06	W/K	
	Ost	47,22	1,14	1	53,83	W/K	
	Süd	55,00	1,14	1	62,70	W/K	
	West	47,22	1,14	1	53,83	W/K	
Fenster	Nord	3,82	1,20	1	4,58	W/K	
	Ost	6,25	1,20	1	7,50	W/K	
	Süd	19,80	1,20	1	23,76	W/K	
	West	6,25	1,20	1	7,50	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	2,10	1	5,27	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,58	1	40,72	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,58	1	40,72	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,49	0,6	29,19	W/K	
$\Sigma A: 496,22$					$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	407,66	W/K
<b>Wärmebrücken (pauschal)</b>				$H_{WB} = A \cdot 0,1$	49,62	W/K	
<b>Transmissions- wärmeverlust</b>	$H_T$ - spezifisch			$H_T = \Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	457,28	W/K	
	$Q_T$ - absolut			$Q_T = 66 \cdot H_T$	30180,48	kWh/a	
<b>Lüftungswärme- verlust</b>	$H_V$ - spezifisch ( $n_{50} < 3,0 \text{ h}^{-1}$ )			$H_V = 0,163 \cdot V_e$	124,61	W/K	
	$Q_V$ - absolut			$Q_V = 66 \cdot H_V$	8224,26	kWh/a	
<b>Hüllflächenfaktor</b>				$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$	
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	Strahlungs- faktor			
	Fenster Nord	3,82	0,53	100	114,8	kWh/a	
	Fenster Ost	6,25	0,53	155	291,1	kWh/a	
	Fenster Süd	19,80	0,53	270	1606,5	kWh/a	
Fenster West	6,25	0,53	155	291,1	kWh/a		
$\Sigma Q_S$					2303,5	kWh/a	
<b>Interne Wärmegewinne</b>				$Q_i = 22 \cdot A_N$	5381,8	kWh/a	
<b>Nutzbare Gesamtgewinne</b>				$Q_g = 0,95 \cdot (Q_S + Q_i)$	7301,0	kWh/a	
<b>Jahresheizwärmebedarf</b>				$Q_h$	31103,7	kWh/a	
				$q_h$	127,1	kWh/( $m^2 \cdot a$ )	

## A 3.1.2.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	185	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.057,50	kWh/a	$Q_h$	31.104,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	127,10	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 2K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, mit Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, ungeregelte Pumpe					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			-					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Öl zentral NT55/45°C			Öl zentral NT55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	4,85	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	122,25	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	6.435,43	kWh/a	$Q_{H,E}$	33.734,48	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		205,46	kWh/a		420,76	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	7.695,12	kWh/a	$Q_{H,P}$	38.370,22	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	40.169,91	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	626,22	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	46.065,34	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,35	[-]

## A 3.1.3 Variante D

## A 3.1.3.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/30a	0	0	2743,5	0	0	1380152,2	1382895,8
KEA <sub>E</sub>	kWh/30a	0	0	23,9	0	0	1539,7	1563,7
KEA <sub>andere</sub>	kWh/30a	0	0	6,9	0	0	4045,4	4052,3
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/30a	0	0	2774,4	0	0	1385730,3	1388504,7
KSA <sub>nE</sub>	t/30a	0	0	0,5	0	0	2,5	3,0
KSA <sub>E</sub>	t/30a	0	0	15,7	0	0	81,9	97,6
KSA <sub>andere</sub>	t/30a	0	0	0,00	0	0	0,22	0,2
KSA <sub>Summe</sub>	t/30a	0	0	16,2	0	0	84,7	100,9
CO <sub>2</sub>	t/30a	0	0	0,9	0	0	369,1	370,0
CO	kg/30a	0	0	1,4	0	0	176,4	177,9
NOx	kg/30a	0	0	1,9	0	0	266,6	268,5
SO2	kg/30a	0	0	0,8	0	0	576,8	577,7
CH4	kg/30a	0	0	2,1	0	0	381,3	383,4
NMVOG	kg/30a	0	0	0,2	0	0	86,8	87,0
HCl	g/30a	0	0	13,2	0	0	1360,1	1373,3
HF	g/30a	0	0	0,8	0	0	105,3	106,1
H <sub>2</sub> S	mg/30a	0	0	4,1	0	0	54,5	58,6
NH3	mg/30a	0	0	4,2	0	0	6599,0	6603,1
N2O	g/30a	0	0	20,6	0	0	3678,0	3698,6
CF <sub>4</sub>	mg/30a	0	0	4,1	0	0	228,5	232,6
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/30a	0	0	0,5	0	0	28,7	29,2
N	mükg/30a	0	0	568,1	0	0	0,0	568,1
CSB	kg/30a	0	0	0,1	0	0	24,1	24,2

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	0	0	0,08	0	0	31,46	31,53
<b>AP</b>	0	0	0,06	0	0	19,91	19,97
<b>NP</b>	0	0	0,03	0	0	3,66	3,68
<b>TOPP</b>	0	0	0,05	0	0	8,36	8,41
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	0	0	1,0	0	0	291,7	292,7
<b>UBP<sup>D</sup></b>	0	0	115731	0	0	34460558	34576289

### A 3.1.3.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	1,14	1	78,06	W/K	
	Ost	47,22	1,14	1	53,83	W/K	
	Süd	55,00	1,14	1	62,70	W/K	
	West	47,22	1,14	1	53,83	W/K	
Fenster	Nord	3,82	2,50	1	9,55	W/K	
	Ost	6,25	2,50	1	15,63	W/K	
	Süd	19,80	2,50	1	49,50	W/K	
	West	6,25	2,50	1	15,63	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	2,10	1	5,27	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,32	1	22,46	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,32	1	22,46	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,49	0,6	29,19	W/K	
$\Sigma A: 496,22$					$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	418,11	W/K
<b>Wärmebrücken (pauschal)</b>				$H_{WB} = A \cdot 0,1$	49,62	W/K	
<b>Transmissions- wärmeverlust</b>	$H_T$ - spezifisch			$H_T = \Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	467,73	W/K	
	$Q_T$ - absolut			$Q_T = 66 \cdot H_T$	30870,18	kWh/a	
<b>Lüftungswärme- verlust</b>	$H_V$ - spezifisch ( $n_{50} < 3,0 \text{ h}^{-1}$ )			$H_V = 0,163 \cdot V_e$	124,61	W/K	
	$Q_V$ - absolut			$Q_V = 66 \cdot H_V$	8224,26	kWh/a	
<b>Hüllflächenfaktor</b>				$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$	
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	Strahlungs- faktor			
	Fenster Nord	3,82	0,75	100	162,4	kWh/a	
	Fenster Ost	6,25	0,75	155	412,0	kWh/a	
	Fenster Süd	19,80	0,75	270	2273,4	kWh/a	
Fenster West	6,25	0,75	155	412,0	kWh/a		
$\Sigma Q_S$					3259,8	kWh/a	
<b>Interne Wärmegewinne</b>				$Q_i = 22 \cdot A_N$	5381,8	kWh/a	
<b>Nutzbare Gesamtgewinne</b>				$Q_g = 0,95 \cdot (Q_S + Q_i)$	8209,5	kWh/a	
<b>Jahresheizwärmebedarf</b>				$Q_h$	30884,9	kWh/a	
				$q_h$	126,3	kWh/( $m^2 \cdot a$ )	

## A 3.1.3.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	185	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{tw}$	3.057,50	kWh/a	$Q_h$	30.885,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{tw}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	126,30	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 2K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, mit Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, ungeregelte Pumpe					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			-					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Öl zentral NT55/45°C			Öl zentral NT55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	4,85	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	121,45	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	6.435,43	kWh/a	$Q_{H,E}$	33.524,10	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		205,46	kWh/a		420,76	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	7.695,12	kWh/a	$Q_{H,P}$	38.137,82	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	39.959,53	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	626,22	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	45.832,94	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,35	[-]

## A 3.1.4 Variante W

## A 3.1.4.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/30a	5584,0	0	0	0	0	1063660,6	1069244,7
KEA <sub>E</sub>	kWh/30a	48,7	0	0	0	0	1186,6	1235,3
KEA <sub>andere</sub>	kWh/30a	14,1	0	0	0	0	3117,7	3131,8
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/30a	5646,8	0	0	0	0	1067959,5	1073606,3
KSA <sub>nE</sub>	t/30a	1,0	0	0	0	0	1,9	2,9
KSA <sub>E</sub>	t/30a	32,0	0	0	0	0	63,1	95,1
KSA <sub>andere</sub>	t/30a	0,00	0	0	0	0	0,17	0,2
KSA <sub>Summe</sub>	t/30a	33,0	0	0	0	0	65,3	98,2
CO <sub>2</sub>	t/30a	1,8	0	0	0	0	284,5	286,2
CO	kg/30a	2,9	0	0	0	0	136,0	138,9
NO <sub>x</sub>	kg/30a	3,9	0	0	0	0	205,5	209,3
SO <sub>2</sub>	kg/30a	1,7	0	0	0	0	444,6	446,3
CH <sub>4</sub>	kg/30a	4,2	0	0	0	0	293,9	298,1
NM <sub>VOC</sub>	kg/30a	0,5	0	0	0	0	66,9	67,4
HCl	g/30a	26,9	0	0	0	0	1048,2	1075,1
HF	g/30a	1,7	0	0	0	0	81,1	82,8
H <sub>2</sub> S	mg/30a	8,3	0	0	0	0	42,0	50,3
NH <sub>3</sub>	mg/30a	8,5	0	0	0	0	5085,7	5094,2
N <sub>2</sub> O	g/30a	41,9	0	0	0	0	2834,6	2876,4
CF <sub>4</sub>	mg/30a	8,4	0	0	0	0	176,1	184,5
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/30a	1,1	0	0	0	0	22,1	23,2
N	mükg/30a	1156,3	0	0	0	0	0,0	1156,3
CSB	kg/30a	0,3	0	0	0	0	18,6	18,8

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	0,15	0	0	0	0	24,24	24,40
<b>AP</b>	0,12	0	0	0	0	15,34	15,46
<b>NP</b>	0,05	0	0	0	0	2,82	2,87
<b>TOPP</b>	0,11	0	0	0	0	6,44	6,55
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	2,1	0	0	0	0	224,8	226,9
<b>UBP<sup>D</sup></b>	235552	0	0	0	0	26558189	26793741

### A 3.1.4.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	0,39	1	26,70	W/K	
	Ost	47,22	0,39	1	18,42	W/K	
	Süd	55,00	0,39	1	21,45	W/K	
	West	47,22	0,39	1	18,42	W/K	
Fenster	Nord	3,82	2,50	1	9,55	W/K	
	Ost	6,25	2,50	1	15,63	W/K	
	Süd	19,80	2,50	1	49,50	W/K	
	West	6,25	2,50	1	15,63	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	2,10	1	5,27	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,58	1	40,72	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,58	1	40,72	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,49	0,6	29,19	W/K	
$\Sigma A: 496,22$					$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	291,20	W/K
<b>Wärmebrücken (pauschal)</b>				$H_{WB} = A \cdot 0,1$	49,62	W/K	
<b>Transmissions- wärmeverlust</b>	$H_T$ - spezifisch			$H_T = \Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	340,82	W/K	
	$Q_T$ - absolut			$Q_T = 66 \cdot H_T$	22494,12	kWh/a	
<b>Lüftungswärme- verlust</b>	$H_V$ - spezifisch ( $n_{50} < 3,0 \text{ h}^{-1}$ )			$H_V = 0,163 \cdot V_e$	124,61	W/K	
	$Q_V$ - absolut			$Q_V = 66 \cdot H_V$	8224,26	kWh/a	
<b>Hüllflächenfaktor</b>				$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$	
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	Strahlungs- faktor			
	Fenster Nord	3,82	0,75	100	162,4	kWh/a	
	Fenster Ost	6,25	0,75	155	412,0	kWh/a	
	Fenster Süd	19,80	0,75	270	2273,4	kWh/a	
Fenster West	6,25	0,75	155	412,0	kWh/a		
$\Sigma Q_S$					3259,8	kWh/a	
<b>Interne Wärmegewinne</b>				$Q_i = 22 \cdot A_N$	5381,8	kWh/a	
<b>Nutzbare Gesamtgewinne</b>				$Q_g = 0,95 \cdot (Q_S + Q_i)$	8209,5	kWh/a	
<b>Jahresheizwärmebedarf</b>				$Q_h$	22508,9	kWh/a	
				$q_h$	92,0	kWh/( $m^2 \cdot a$ )	

## A 3.1.4.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	185	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.057,50	kWh/a	$Q_h$	22.509,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	92,00	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 2K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, mit Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, ungeregelte Pumpe					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			-					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Öl zentral NT55/45°C			Öl zentral NT55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	4,85	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	87,15	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	6.435,43	kWh/a	$Q_{H,E}$	24.418,97	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		205,46	kWh/a		420,76	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	7.695,12	kWh/a	$Q_{H,P}$	28.122,66	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	30.854,40	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	626,22	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	35.817,78	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,40	[-]

## A 3.1.5 Variante FDW

## A 3.1.5.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/30a	5584,0	0	2743,5	0	7400,7	856074,0	871802,3
KEA <sub>E</sub>	kWh/30a	48,7	0	23,9	0	165,4	955,1	1193,0
KEA <sub>andere</sub>	kWh/30a	14,1	0	6,9	0	497,8	2509,3	3028,1
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/30a	5646,8	0	2774,4	0	8063,9	859533,7	876018,8
KSA <sub>nE</sub>	t/30a	1,0	0	0,5	0	1,5	1,5	4,4
KSA <sub>E</sub>	t/30a	32,0	0	15,7	0	18,3	50,8	116,7
KSA <sub>andere</sub>	t/30a	0,00	0	0,00	0	0,02	0,14	0,2
KSA <sub>Summe</sub>	t/30a	33,0	0	16,2	0	19,7	52,5	121,4
CO <sub>2</sub>	t/30a	1,8	0	0,9	0	2,0	229,0	233,6
CO	kg/30a	2,9	0	1,4	0	9,2	109,4	123,0
NOx	kg/30a	3,9	0	1,9	0	5,3	165,4	176,5
SO <sub>2</sub>	kg/30a	1,7	0	0,8	0	4,7	357,8	365,1
CH <sub>4</sub>	kg/30a	4,2	0	2,1	0	5,6	236,5	248,5
NMVOC	kg/30a	0,5	0	0,2	0	0,4	53,8	55,0
HCl	g/30a	26,9	0	13,2	0	63,9	843,6	947,6
HF	g/30a	1,7	0	0,8	0	23,3	65,3	91,1
H <sub>2</sub> S	mg/30a	8,3	0	4,1	0	7,4	33,8	53,6
NH <sub>3</sub>	mg/30a	8,5	0	4,2	0	46,2	4093,2	4152,0
N <sub>2</sub> O	g/30a	41,9	0	20,6	0	55,5	2281,4	2399,3
CF <sub>4</sub>	mg/30a	8,4	0	4,1	0	9195,0	141,7	9349,3
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/30a	1,1	0	0,5	0	1155,6	17,8	1175,0
N	mükg/30a	1156,3	0	568,1	0	218,5	0,0	1942,9
CSB	kg/30a	0,3	0	0,1	0	2,8	15,0	18,2

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	0,15	0	0,08	0	0,19	19,51	19,93
<b>AP</b>	0,12	0	0,06	0	0,22	12,35	12,75
<b>NP</b>	0,05	0	0,03	0	0,08	2,27	2,43
<b>TOPP</b>	0,11	0	0,05	0	0,15	5,19	5,50
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	2,1	0	1,0	0	3,1	180,9	187,1
<b>UBP<sup>D</sup></b>	235552	0	115731	0	1483217	21375023	23209523

## A 3.1.5.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit
Aussenwand	Nord	68,47	0,39	1	26,70	W/K
	Ost	47,22	0,39	1	18,42	W/K
	Süd	55,00	0,39	1	21,45	W/K
	West	47,22	0,39	1	18,42	W/K
Fenster	Nord	3,82	1,20	1	4,58	W/K
	Ost	6,25	1,20	1	7,50	W/K
	Süd	19,80	1,20	1	23,76	W/K
	West	6,25	1,20	1	7,50	W/K
Haustürelement	Nord	2,51	2,10	1	5,27	W/K
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,32	1	22,46	W/K
	Süd 45°	70,2	0,32	1	22,46	W/K
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,49	0,6	29,19	W/K
$\Sigma A$ : 496,22				$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	207,71	W/K
<b>Wärmebrücken (pauschal)</b>				$H_{WB} = A \cdot 0,1$	49,62	W/K
<b>Transmissions- wärmeverlust</b>	$H_T$ - spezifisch			$H_T = \Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	257,33	W/K
	$Q_T$ - absolut			$Q_T = 66 \cdot H_T$	16983,78	kWh/a
<b>Lüftungswärme- verlust</b>	$H_V$ - spezifisch ( $n_{50} < 3,0 \text{ h}^{-1}$ )			$H_V = 0,163 \cdot V_e$	124,61	W/K
	$Q_V$ - absolut			$Q_V = 66 \cdot H_V$	8224,26	kWh/a
<b>Hüllflächenfaktor</b>				$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	Strahlungs- faktor		
	Fenster Nord	3,82	0,75	100	162,4	kWh/a
	Fenster Ost	6,25	0,75	155	412,0	kWh/a
	Fenster Süd	19,80	0,75	270	2273,4	kWh/a
	Fenster West	6,25	0,75	155	412,0	kWh/a
$\Sigma Q_S$					3259,8	kWh/a
<b>Interne Wärmegewinne</b>				$Q_i = 22 \cdot A_N$	5381,8	kWh/a
<b>Nutzbare Gesamtgewinne</b>				$Q_g = 0,95 \cdot (Q_S + Q_i)$	8209,5	kWh/a
<b>Jahresheizwärmebedarf</b>				$Q_h$	16998,5	kWh/a
				$q_h$	69,5	kWh/( $m^2 \cdot a$ )

## A 3.1.5.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	185	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.057,50	kWh/a	$Q_h$	16.999,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	69,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 2K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, mit Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, ungeregelte Pumpe					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			-					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Öl zentral NT55/45°C			Öl zentral NT55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	4,85	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	64,65	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	6.435,43	kWh/a	$Q_{H,E}$	18.447,55	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		205,46	kWh/a		420,76	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	7.695,12	kWh/a	$Q_{H,P}$	21.554,35	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	24.882,98	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	626,22	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	29.249,47	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,46	[-]

## A 3.2 Neubau

### A 3.2.1 Variante E-G-K/P

#### A 3.2.1.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	44145,7	45843,8	23990,9	721,3	14801,4	1240219,6	1369722,7
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	203,3	264,7	184,6	6,2	330,7	1169,0	2158,5
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	675,0	2586,0	1791,6	228,9	995,6	3439,8	9717,0
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	45024,1	48693,7	25966,9	956,5	16127,8	1244830,7	1381599,5
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	125,2	127,0	13,9	0,1	2,9	3,5	272,6
KSA <sub>E</sub>	t/50a	95,4	119,4	53,8	3,6	36,5	63,4	372,1
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	0,00	0,67	0,03	0,02	0,05	0,32	1,1
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	220,6	247,0	99,5	3,8	39,5	67,2	677,5
CO <sub>2</sub>	t/50a	19,9	24,5	7,4	0,2	4,1	241,8	297,9
CO	kg/50a	179,3	64,4	25,2	2,3	18,4	131,1	420,6
NOx	kg/50a	38,0	61,2	25,1	0,6	10,7	210,2	345,8
SO <sub>2</sub>	kg/50a	10,4	14,2	9,0	0,3	9,5	15,9	59,3
CH <sub>4</sub>	kg/50a	26,7	44,0	27,6	0,8	11,3	1172,3	1282,7
NMVOc	kg/50a	2,7	3,3	3,3	0,2	0,8	26,4	36,7
HCl	g/50a	118,5	154,9	334,1	1,8	127,7	533,3	1270,3
HF	g/50a	7,2	8,5	20,1	0,1	46,6	37,6	120,2
H <sub>2</sub> S	mg/50a	44,2	7,1	68,0	0,2	14,7	9159,3	9293,5
NH <sub>3</sub>	mg/50a	2578,1	3661,4	110,5	5,1	92,4	80,8	6528,3
N <sub>2</sub> O	g/50a	392,2	545,7	327,1	6,9	111,0	2384,7	3767,7
CF <sub>4</sub>	mg/50a	68,0	127,6	11026,7	2,0	18390,0	209,7	29824,0
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	8,5	16,1	1104,0	0,2	2311,2	26,4	3466,4
N	mükg/50a	3558,2	56623,8	1669,8	28,1	437,0	0,0	62316,9
CSB	kg/50a	2,0	65,2	2,8	2,3	5,6	27,8	105,6

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	1,71	2,13	0,68	0,02	0,37	22,37	27,28
<b>AP</b>	0,97	1,49	0,70	0,02	0,45	4,26	7,88
<b>NP</b>	0,52	0,98	0,35	0,01	0,16	2,90	4,91
<b>TOPP</b>	1,32	1,64	0,71	0,02	0,31	6,00	10,01
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	23,0	31,1	12,1	0,4	6,1	177,6	250,3
<b>UBP<sup>D</sup></b>	2738726	2938479	2656423	63712	2966435	19275638	30639414

### A 3.2.1.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	0,36	1	24,65	W/K	
	Ost	47,22	0,36	1	17,00	W/K	
	Süd	55,00	0,36	1	19,80	W/K	
	West	47,22	0,36	1	17,00	W/K	
Fenster	Nord	3,82	1,50	1	5,73	W/K	
	Ost	6,25	1,50	1	9,38	W/K	
	Süd	19,80	1,50	1	29,70	W/K	
	West	6,25	1,50	1	9,38	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	2,10	1	5,27	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,38	1	26,68	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,38	1	26,68	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,36	0,6	21,44	W/K	
$\Sigma A:$ 496,22					$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	212,71	W/K

<b>Wärmebrücken</b> (detaillierte Ermittlung)	$H_{WB} = A \cdot 0,025$	12,41	W/K
-----------------------------------------------	--------------------------	-------	-----

<b>Transmissionswärmeverlust <math>H_T</math></b>	$\Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	225,12	W/K
---------------------------------------------------	----------------------------------------	--------	-----

<b>Lüftungswärmeverlust <math>H_V</math></b> (Luftdichtheit $n_{50} < 3,0$ 1/h)	$0,34 \cdot 0,6 \cdot V$	118,52	W/K
---------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	--------	-----

<b>Hüllflächenfaktor</b>	$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$
--------------------------	---------	------	----------

Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	$F_F$ $F_S$ $F_C$			spezifischer Gewinn	
			$F_F$	$F_S$	$F_C$		
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	Fenster Nord	3,82	0,53	0,7	0,9	1	1,148
	Fenster Ost	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
	Fenster Süd	19,80	0,53	0,7	0,9	1	5,950
	Fenster West	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878

Bauteil	Absorptionsgrad	Formfaktor
	$\alpha$	FF
Aussenwände	0,5	0,5
Dach	0,6	1

<b>Interne Wärmegewinne</b> (flächenspezifisch)	$q_i = 5 \text{ W/m}^2$	1223,15	W
-------------------------------------------------	-------------------------	---------	---

<b>spez. Wärmekapazität</b> (massive Bauweise)	$50 \text{ Wh}/(m^3 \cdot K) \cdot V_e$	38223	Wh/K
------------------------------------------------	-----------------------------------------	-------	------

<b>Jahresheizwärmebedarf</b>	$Q_h$	16833	kWh/a
	$q_h$	68,8	$kWh/(m^2 \cdot a)$

### A 3.2.1.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

#### I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	182	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.058,00	kWh/a	$Q_h$	16.833,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	68,80	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

#### II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 1K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, ohne Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, geregelt Pumpe					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			Pufferspeicher innerhalb therm. Hülle					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Gas Brenn- wert 55/45°C			Gas Brenn- wert 55/45°C					

#### III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	2,74	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	66,06	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	5.213,07	kWh/a	$Q_{H,E}$	16.715,57	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		58,71	kWh/a		413,42	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	5.910,26	kWh/a	$Q_{H,P}$	19.626,66	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	21.928,64	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	472,13	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	25.536,92	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,28	[-]

### A 3.2.1.4 Nachweis nach EnEV

spez. Transmissionswärmeverlust	vorhanden	$H_{T',vorh.}$	0,45	W/(m <sup>2</sup> *K)
	zulässig	$H_{T',zul.}$	0,53	W/(m <sup>2</sup> *K)
spezifischer Primärenergiebedarf	vorhanden	$Q''_{P,vorh.}$	104,5	kWh/(m <sup>2</sup> *a)
	zulässig	$Q''_{P,zul.}$	107,4	kWh/(m <sup>2</sup> *a)

## A 3.2.2 Variante E-G/S-K/P

## A 3.2.2.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	44145,7	45843,8	23990,9	721,3	14801,4	1092797,8	1222300,9
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	203,3	264,7	184,6	6,2	330,7	139810,7	140800,2
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	675,0	2586,0	1791,6	228,9	995,6	3588,4	9865,5
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	45024,1	48693,7	25966,9	956,5	16127,8	1236198,5	1372967,3
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	125,2	127,0	13,9	0,1	2,9	3,1	272,2
KSA <sub>E</sub>	t/50a	95,4	119,4	53,8	3,6	36,5	67,2	375,9
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	0,00	0,67	0,03	0,02	0,05	0,29	1,1
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	220,6	247,0	99,5	3,8	39,5	70,5	680,9
CO <sub>2</sub>	t/50a	19,9	24,5	7,4	0,2	4,1	213,4	269,4
CO	kg/50a	179,3	64,4	25,2	2,3	18,4	115,3	404,8
NOx	kg/50a	38,0	61,2	25,1	0,6	10,7	185,5	321,1
SO <sub>2</sub>	kg/50a	10,4	14,2	9,0	0,3	9,5	15,8	59,1
CH <sub>4</sub>	kg/50a	26,7	44,0	27,6	0,8	11,3	1030,4	1140,7
NMVOC	kg/50a	2,7	3,3	3,3	0,2	0,8	23,2	33,5
HCl	g/50a	118,5	154,9	334,1	1,8	127,7	521,2	1258,2
HF	g/50a	7,2	8,5	20,1	0,1	46,6	36,3	118,9
H <sub>2</sub> S	mg/50a	44,2	7,1	68,0	0,2	14,7	8017,1	8151,3
NH <sub>3</sub>	mg/50a	2578,1	3661,4	110,5	5,1	92,4	71,8	6519,4
N <sub>2</sub> O	g/50a	392,2	545,7	327,1	6,9	111,0	2151,7	3534,6
CF <sub>4</sub>	mg/50a	68,0	127,6	11026,7	2,0	18390,0	231,9	29846,2
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	8,5	16,1	1104,0	0,2	2311,2	29,2	3469,2
N	mükg/50a	3558,2	56623,8	1669,8	28,1	437,0	0,0	62316,9
CSB	kg/50a	2,0	65,2	2,8	2,3	5,6	24,4	102,2

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	1,71	2,13	0,68	0,02	0,37	19,73	24,64
<b>AP</b>	0,97	1,49	0,70	0,02	0,45	3,80	7,42
<b>NP</b>	0,52	0,98	0,35	0,01	0,16	2,56	4,57
<b>TOPP</b>	1,32	1,64	0,71	0,02	0,31	5,30	9,30
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	23,0	31,1	12,1	0,4	6,1	156,8	229,5
<b>UBP<sup>D</sup></b>	2738726	2938479	2656423	63712	2966435	16997405	28361180

### A 3.2.2.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	0,36	1	24,65	W/K	
	Ost	47,22	0,36	1	17,00	W/K	
	Süd	55,00	0,36	1	19,80	W/K	
	West	47,22	0,36	1	17,00	W/K	
Fenster	Nord	3,82	1,50	1	5,73	W/K	
	Ost	6,25	1,50	1	9,38	W/K	
	Süd	19,80	1,50	1	29,70	W/K	
	West	6,25	1,50	1	9,38	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	2,10	1	5,27	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,38	1	26,68	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,38	1	26,68	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,36	0,6	21,44	W/K	
$\Sigma A$ : 496,22				$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	212,71	W/K	
<b>Wärmebrücken</b> (detaillierte Ermittlung)				$H_{WB} = A \cdot 0,025$	12,41	W/K	
<b>Transmissionswärmeverlust <math>H_T</math></b>				$\Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	225,12	W/K	
<b>Lüftungswärmeverlust <math>H_V</math></b> (Luftdichtheit $n_{50} < 3,0$ 1/h)				$0,34 \cdot 0,6 \cdot V$	118,52	W/K	
<b>Hüllflächenfaktor</b>				$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$	
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	<b>Bauteil und Orientierung</b>	<b>Fläche A [<math>m^2</math>]</b>	<b>Gesamtenergie- durchlassgrad g</b>	$F_F$	$F_S$	$F_C$	<b>spezifischer Gewinn</b>
	Fenster Nord	3,82	0,53	0,7	0,9	1	1,148
	Fenster Ost	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
	Fenster Süd	19,80	0,53	0,7	0,9	1	5,950
	Fenster West	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
<b>Solare Gewinne opaker Bauteile</b>	<b>Bauteil</b>	<b>Absorptionsgrad <math>\alpha</math></b>	<b>Formfaktor FF</b>				
	Aussenwände	0,5	0,5				
	Dach	0,6	1				
<b>Interne Wärmegewinne</b> (flächenspezifisch)				$q_i = 5 \text{ W/m}^2$	1223,15	W	
<b>spez. Wärmekapazität</b> (massive Bauweise)				$50 \text{ Wh}/(m^3 \cdot K) \cdot V_e$	38223	Wh/K	
<b>Jahresheizwärmebedarf</b>				$Q_h$	16833	kWh/a	
				$q_h$	68,8	$kWh/(m^2 \cdot a)$	

## A 3.2.2.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	182	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.058,00	kWh/a	$Q_h$	16.833,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	68,80	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 1K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, ohne Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, geregelter Pumpe					
Speicherung	bivalenter Solarspeicher; Aufstellung innerhalb therm.Hülle			Pufferspeicher innerhalb therm. Hülle					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	0,36	0,64		1,00					
Erzeuger	Gas Brenn- wert 55/45°C	Solar- kollektor		Gas Brenn- wert 55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	2,30	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	66,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	1.793,14	kWh/a	$Q_{H,E}$	16.823,21	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		88,07	kWh/a		413,42	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	2.235,92	kWh/a	$Q_{H,P}$	19.746,53	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	18.616,35	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	501,49	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	21.982,45	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_P$	1,11	[-]

## A 3.2.3 Variante 60-G-K/P

## A 3.2.3.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	62384,2	52995,3	38228,1	775,6	17185,9	691575,0	863144,2
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	368,4	327,0	308,7	6,7	334,8	651,9	1997,4
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	703,8	2603,8	1827,3	217,7	1044,8	1918,1	8315,6
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	63456,4	55926,2	40364,1	1000,0	18565,5	694146,1	873458,3
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	124,3	128,3	16,4	0,1	4,1	1,9	275,1
KSA <sub>E</sub>	t/50a	204,9	160,4	135,3	4,0	46,8	35,4	586,7
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	0,01	0,67	0,03	0,03	0,04	0,18	1,0
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	329,2	289,3	151,7	4,1	50,9	37,4	862,7
CO <sub>2</sub>	t/50a	25,4	26,8	11,9	0,2	4,8	134,8	203,9
CO	kg/50a	182,6	68,1	32,7	2,3	22,7	73,1	381,5
NOx	kg/50a	50,5	66,1	34,9	0,6	13,9	117,2	283,2
SO <sub>2</sub>	kg/50a	16,1	16,4	13,4	0,3	11,3	8,9	66,4
CH <sub>4</sub>	kg/50a	40,7	49,4	38,3	0,9	13,2	653,7	796,1
NMVOC	kg/50a	4,3	3,9	4,5	0,2	0,9	14,7	28,5
HCl	g/50a	209,6	189,3	402,7	2,1	130,1	297,4	1231,1
HF	g/50a	13,0	10,7	24,4	0,1	46,8	21,0	116,0
H <sub>2</sub> S	mg/50a	71,8	17,6	89,1	0,3	19,1	5107,5	5305,4
NH <sub>3</sub>	mg/50a	2581,2	3672,4	132,2	5,2	98,4	45,0	6534,3
N <sub>2</sub> O	g/50a	527,7	599,3	433,9	7,1	123,1	1329,8	3020,9
CF <sub>4</sub>	mg/50a	95,6	138,1	11048,1	2,0	18390,9	117,0	29791,7
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	12,0	17,4	1106,7	0,2	2311,3	14,7	3462,3
N	mükg/50a	7516,7	58108,8	4617,4	43,1	442,6	0,0	70728,6
CSB	kg/50a	2,8	65,5	3,4	2,3	6,7	15,5	96,2

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	2,20	2,33	1,07	0,02	0,44	12,47	18,54
<b>AP</b>	1,34	1,64	0,99	0,02	0,55	2,37	6,92
<b>NP</b>	0,69	1,04	0,48	0,01	0,20	1,62	4,05
<b>TOPP</b>	1,66	1,78	0,98	0,02	0,39	3,35	8,18
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	29,7	33,8	17,5	0,4	7,6	99,0	187,9
<b>UBP<sup>D</sup></b>	3478213	3240336	3256884	64210	3084378	10748536	23872558

### A 3.2.3.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	0,11	1	7,53	W/K	
	Ost	47,22	0,11	1	5,19	W/K	
	Süd	55,00	0,11	1	6,05	W/K	
	West	47,22	0,11	1	5,19	W/K	
Fenster	Nord	3,82	0,80	1	3,06	W/K	
	Ost	6,25	0,80	1	5,00	W/K	
	Süd	19,80	0,80	1	15,84	W/K	
	West	6,25	0,80	1	5,00	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	1,00	1	2,51	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,12	1	8,42	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,12	1	8,42	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,13	0,6	7,74	W/K	
$\Sigma A:$ 496,22					$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	79,95	W/K

**Wärmebrücken** (detaillierte Ermittlung)  $H_{WB} = A \cdot 0,025$  12,41 W/K

**Transmissionswärmeverlust  $H_T$**   $\Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$  92,36 W/K

**Lüftungswärmeverlust  $H_V$**  (Luftdichtheit  $n_{50} < 3,0$  1/h)  $0,34 \cdot 0,6 \cdot V$  118,52 W/K

**Hüllflächenfaktor**  $A/V_e$  0,65  $m^{-1}$

Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	$F_F$ $F_S$ $F_C$			spezifischer Gewinn	
			$F_F$	$F_S$	$F_C$		
Solare Gewinne transp. Bauteile	Fenster Nord	3,82	0,53	0,7	0,9	1	1,148
	Fenster Ost	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
	Fenster Süd	19,80	0,53	0,7	0,9	1	5,950
	Fenster West	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878

Bauteil	Absorptionsgrad $\alpha$	Formfaktor FF
	Aussenwände	0,5
Dach	0,6	1

**Interne Wärmegewinne** (flächenspezifisch)  $q_i = 5$  W/ $m^2$  1223,15 W

**spez. Wärmekapazität** (massive Bauweise)  $50$  Wh/( $m^3 K$ ) $\cdot V_e$  38223 Wh/K

**Jahresheizwärmebedarf**  $Q_h$  7138 kWh/a

$q_h$  29,2 kWh/( $m^2 \cdot a$ )

## A 3.2.3.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	46,5	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.058,00	kWh/a	$Q_h$	7.138,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	29,20	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 1K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, ohne Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, geregelt Pumpen					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			Pufferspeicher innerhalb therm. Hülle					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Gas Brenn- wert 55/45°C			Gas Brenn- wert 55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	0,70	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	28,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	5.487,05	kWh/a	$Q_{H,E}$	7.304,65	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		58,71	kWh/a		105,19	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	6.211,16	kWh/a	$Q_{H,P}$	8.351,67	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	12.791,70	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	163,90	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	14.562,83	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,43	[-]

## A 3.2.4 Variante 60-G/S/L-K/P

## A 3.2.4.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	45040,4	46865,5	26512,4	775,6	17185,9	668654,2	805034,0
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	212,1	273,5	206,6	6,7	334,8	140565,5	141599,2
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	674,2	2588,3	1799,3	217,7	1044,8	7132,4	13456,7
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	45926,8	49727,4	28518,4	1000,0	18565,5	816353,0	960091,0
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	124,6	127,2	14,3	0,1	4,1	2,1	272,5
KSA <sub>E</sub>	t/50a	101,4	125,2	68,2	4,0	46,8	141,3	486,8
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	0,00	0,67	0,03	0,03	0,04	0,17	0,9
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	226,1	253,1	82,5	4,1	50,9	143,6	760,2
CO <sub>2</sub>	t/50a	20,1	24,9	8,2	0,2	4,8	133,0	191,2
CO	kg/50a	178,7	64,9	26,5	2,3	22,7	68,6	363,8
NOx	kg/50a	38,6	61,9	26,8	0,6	13,9	116,1	258,0
SO2	kg/50a	10,7	14,5	9,8	0,3	11,3	25,0	71,6
CH4	kg/50a	27,4	44,7	29,5	0,9	13,2	607,3	722,9
NMVOC	kg/50a	2,7	3,4	3,5	0,2	0,9	13,6	24,3
HCl	g/50a	123,4	159,8	346,3	2,1	130,1	773,1	1534,7
HF	g/50a	7,5	8,8	20,9	0,1	46,8	50,2	134,3
H <sub>2</sub> S	mg/50a	45,6	8,5	71,7	0,3	19,1	4431,4	4576,7
NH3	mg/50a	2573,8	3663,0	114,3	5,2	98,4	49,8	6504,4
N2O	g/50a	398,6	553,3	346,0	7,1	123,1	1762,7	3190,9
CF <sub>4</sub>	mg/50a	69,4	129,2	11030,6	2,0	18390,9	559,2	30181,2
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	8,7	16,3	1104,5	0,2	2311,3	70,3	3511,3
N	mükg/50a	3774,8	56838,3	2190,1	43,1	442,6	0,0	63289,0
CSB	kg/50a	2,0	65,2	2,9	2,3	6,7	14,5	93,5

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	1,73	2,16	0,75	0,02	0,44	12,24	17,35
<b>AP</b>	0,99	1,51	0,75	0,02	0,55	2,79	6,61
<b>NP</b>	0,53	0,99	0,37	0,01	0,20	1,60	3,70
<b>TOPP</b>	1,34	1,66	0,76	0,02	0,39	3,28	7,45
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	23,3	31,5	13,0	0,4	7,6	98,7	174,5
<b>UBP<sup>D</sup></b>	2771162	2981588	2762543	64210	3084378	10515551	22179433

### A 3.2.4.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	0,32	1	21,91	W/K	
	Ost	47,22	0,32	1	15,11	W/K	
	Süd	55,00	0,32	1	17,60	W/K	
	West	47,22	0,32	1	15,11	W/K	
Fenster	Nord	3,82	0,80	1	3,06	W/K	
	Ost	6,25	0,80	1	5,00	W/K	
	Süd	19,80	0,80	1	15,84	W/K	
	West	6,25	0,80	1	5,00	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	1,00	1	2,51	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,28	1	19,66	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,28	1	19,66	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,28	0,6	16,68	W/K	
$\Sigma A:$ 496,22				$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	157,14	W/K	
<b>Wärmebrücken</b> (detaillierte Ermittlung)				$H_{WB} = A \cdot 0,025$	12,41	W/K	
<b>Transmissionswärmeverlust <math>H_T</math></b>				$\Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	169,55	W/K	
<b>Lüftungswärmeverlust <math>H_V</math></b> (Luftdichtheit $n_{50} < 3,0$ 1/h)				$0,34 \cdot 0,6 \cdot V$	118,52	W/K	
<b>Hüllflächenfaktor</b>				$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$	
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	<b>Bauteil und Orientierung</b>	<b>Fläche A [<math>m^2</math>]</b>	<b>Gesamtenergie- durchlassgrad g</b>	$F_F$	$F_S$	$F_C$	<b>spezifischer Gewinn</b>
	Fenster Nord	3,82	0,53	0,7	0,9	1	1,148
	Fenster Ost	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
	Fenster Süd	19,80	0,53	0,7	0,9	1	5,950
	Fenster West	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
<b>Solare Gewinne opaker Bauteile</b>	<b>Bauteil</b>	<b>Absorptionsgrad <math>\alpha</math></b>	<b>Formfaktor FF</b>				
	Aussenwände	0,5	0,5				
	Dach	0,6	1				
<b>Interne Wärmegevinne</b> (flächenspezifisch)				$q_i = 5 \text{ W/m}^2$	1223,15	W	
<b>spez. Wärmekapazität</b> (massive Bauweise)				$50 \text{ Wh}/(m^3 \cdot K) \cdot V_e$	38223	Wh/K	
<b>Jahresheizwärmebedarf</b>				$Q_h$	12657	kWh/a	
				$q_h$	51,7	$kWh/(m^2 \cdot a)$	

## A 3.2.4.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	166,5	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.058,00	kWh/a	$Q_h$	12.657,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	51,70	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 1K			Wohnungslüftungsanlage mit Lufttemp. unter 20°C		
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, ohne Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, geregelt Pumpe			Zu- und Abluftleitungen innerhalb therm. Hülle		
Speicherung	bivalenter Solarspeicher; Aufstellung innerhalb therm. Hülle			Pufferspeicher innerhalb therm. Hülle					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	0,36	0,64		1,00					
Erzeuger	Gas Brenn- wert 55/45°C	Solar- kollektor		Gas Brenn- wert 55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	2,11	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	33,33	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$	16,26	kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	1.807,82	kWh/a	$Q_{H,E}$	8.703,94	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		102,74	kWh/a		379,18	kWh/a		469,69	kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	2.297,08	kWh/a	$Q_{H,P}$	10.712,35	kWh/a	$Q_{L,P}$	1.409,07	kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	10.511,76	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	951,61	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	14.418,50	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	0,92	[-]

## A 3.2.5 Variante 60-G-K/E

## A 3.2.5.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	47381,0	48655,4	22026,0	775,6	17185,9	691575,0	827599,0
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	220,2	282,9	148,6	6,7	334,8	651,9	1645,0
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	1135,9	2738,0	1812,7	217,7	1044,8	1918,1	8867,2
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	48737,1	51676,3	23987,3	1000,0	18565,5	694146,1	838112,3
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	120,0	127,6	13,9	0,1	4,1	1,9	267,7
KSA <sub>E</sub>	t/50a	63,0	118,0	23,2	4,0	46,8	35,4	290,3
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	0,01	0,67	0,01	0,03	0,04	0,18	0,9
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	183,0	246,3	37,1	4,1	50,9	37,4	558,9
CO <sub>2</sub>	t/50a	22,2	25,9	7,8	0,2	4,8	134,8	195,7
CO	kg/50a	168,9	65,0	18,8	2,3	22,7	73,1	350,9
NOx	kg/50a	50,2	66,1	29,6	0,6	13,9	117,2	277,6
SO <sub>2</sub>	kg/50a	15,6	16,2	7,8	0,3	11,3	8,9	60,1
CH <sub>4</sub>	kg/50a	31,2	46,6	28,3	0,9	13,2	653,7	773,8
NMVOC	kg/50a	19,9	8,6	12,2	0,2	0,9	14,7	56,5
HCl	g/50a	121,0	165,4	314,6	2,1	130,1	297,4	1030,5
HF	g/50a	8,4	9,4	17,6	0,1	46,8	21,0	103,3
H <sub>2</sub> S	mg/50a	34,2	6,5	60,3	0,3	19,1	5107,5	5227,9
NH <sub>3</sub>	mg/50a	2528,8	3660,2	100,3	5,2	98,4	45,0	6437,9
N <sub>2</sub> O	g/50a	459,0	580,1	338,4	7,1	123,1	1329,8	2837,4
CF <sub>4</sub>	mg/50a	65,6	129,6	43,8	2,0	18390,9	117,0	18748,9
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	8,2	16,3	5,5	0,2	2311,3	14,7	2356,3
N	mükg/50a	9423,2	13349,6	4236,6	43,1	442,6	0,0	27495,2
CSB	kg/50a	2,3	65,3	0,7	2,3	6,7	15,5	92,7

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	1,91	2,25	0,71	0,02	0,44	12,47	17,80
<b>AP</b>	1,32	1,63	0,75	0,02	0,55	2,37	6,65
<b>NP</b>	0,68	1,04	0,40	0,01	0,20	1,62	3,96
<b>TOPP</b>	1,92	1,86	0,97	0,02	0,39	3,35	8,51
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	30,1	33,9	14,5	0,4	7,6	99,0	185,5
<b>UBP<sup>D</sup></b>	5844854	3956395	2982489	64210	3084378	10748536	26680863

### A 3.2.5.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit
Aussenwand	Nord	68,47	0,09	1	6,16	W/K
	Ost	47,22	0,09	1	4,25	W/K
	Süd	55,00	0,09	1	4,95	W/K
	West	47,22	0,09	1	4,25	W/K
Fenster	Nord	3,82	0,80	1	3,06	W/K
	Ost	6,25	0,80	1	5,00	W/K
	Süd	19,80	0,80	1	15,84	W/K
	West	6,25	0,80	1	5,00	W/K
Haustürelement	Nord	2,51	1,00	1	2,51	W/K
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,14	1	9,83	W/K
	Süd 45°	70,2	0,14	1	9,83	W/K
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,15	0,6	8,94	W/K

$\Sigma A: 496,22$   $\Sigma A \cdot U \cdot F_x$  79,62 W/K

**Wärmebrücken** (detaillierte Ermittlung)  $H_{WB} = A \cdot 0,025$  12,41 W/K

**Transmissionswärmeverlust  $H_T$**   $\Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$  92,03 W/K

**Lüftungswärmeverlust  $H_V$**  (Luftdichtheit  $n_{50} < 3,0$  1/h)  $0,34 \cdot 0,6 \cdot V$  118,52 W/K

**Hüllflächenfaktor**  $A/V_e$  0,65  $m^{-1}$

Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	$F_F$ $F_S$ $F_C$			spezifischer Gewinn	
			$F_F$	$F_S$	$F_C$		
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	Fenster Nord	3,82	0,53	0,7	0,9	1	1,148
	Fenster Ost	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
	Fenster Süd	19,80	0,53	0,7	0,9	1	5,950
	Fenster West	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878

Solare Gewinne opaker Bauteile	Bauteil	Absorptionsgrad $\alpha$	Formfaktor FF
	Aussenwände	0,5	0,5
	Dach	0,6	1

**Interne Wärmegewinne** (flächenspezifisch)  $q_i = 5$  W/ $m^2$  1223,15 W

**spez. Wärmekapazität** (massive Bauweise)  $50$  Wh/( $m^3 K$ ) $\cdot V_e$  38223 Wh/K

**Jahresheizwärmebedarf**  $Q_h$  7123 kWh/a

$q_h$  29,1 kWh/( $m^2 \cdot a$ )

## A 3.2.5.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	46,5	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.058,00	kWh/a	$Q_h$	7.123,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	29,10	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 1K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, ohne Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, geregeltte Pumpe					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			Pufferspeicher innerhalb therm. Hülle					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Gas Brenn- wert 55/45°C			Gas Brenn- wert 55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	0,70	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	28,40	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	5.487,05	kWh/a	$Q_{H,E}$	7.280,19	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		58,71	kWh/a		105,19	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	6.211,16	kWh/a	$Q_{H,P}$	8.324,76	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	12.767,24	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	163,90	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	14.535,92	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,43	[-]

## A 3.2.6 Variante 60-G-Z/P

## A 3.2.6.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	55184,3	52995,3	38228,1	775,6	17185,9	691575,0	855944,3
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	353,8	327,0	308,7	6,7	334,8	651,9	1982,8
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	6445,2	2603,8	1827,3	217,7	1044,8	1918,1	14057,1
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	61983,3	55926,2	40364,1	1000,0	18565,5	694146,1	871985,2
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	85,9	128,3	16,4	0,1	4,1	1,9	236,7
KSA <sub>E</sub>	t/50a	165,9	160,4	135,3	4,0	46,8	35,4	547,7
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	0,01	0,67	0,03	0,03	0,04	0,18	1,0
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	251,9	289,3	151,7	4,1	50,9	37,4	785,4
CO <sub>2</sub>	t/50a	20,7	26,8	11,9	0,2	4,8	134,8	199,2
CO	kg/50a	47,5	68,1	32,7	2,3	22,7	73,1	246,4
NOx	kg/50a	48,5	66,1	34,9	0,6	13,9	117,2	281,3
SO <sub>2</sub>	kg/50a	15,0	16,4	13,4	0,3	11,3	8,9	65,2
CH <sub>4</sub>	kg/50a	35,1	49,4	38,3	0,9	13,2	653,7	790,5
NMVOC	kg/50a	3,5	3,9	4,5	0,2	0,9	14,7	27,7
HCl	g/50a	581,3	189,3	402,7	2,1	130,1	297,4	1602,8
HF	g/50a	108,8	10,7	24,4	0,1	46,8	21,0	211,8
H <sub>2</sub> S	mg/50a	76,5	17,6	89,1	0,3	19,1	5107,5	5310,1
NH <sub>3</sub>	mg/50a	2518,6	3672,4	132,2	5,2	98,4	45,0	6471,7
N <sub>2</sub> O	g/50a	387,9	599,3	433,9	7,1	123,1	1329,8	2881,1
CF <sub>4</sub>	mg/50a	81,3	138,1	11048,1	2,0	18390,9	117,0	29777,4
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	10,2	17,4	1106,7	0,2	2311,3	14,7	3460,6
N	mükg/50a	5979,8	58108,8	4617,4	43,1	442,6	0,0	69191,7
CSB	kg/50a	2,0	65,5	3,4	2,3	6,7	15,5	95,3

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	1,79	2,33	1,07	0,02	0,44	12,47	18,13
<b>AP</b>	1,29	1,64	0,99	0,02	0,55	2,37	6,87
<b>NP</b>	0,66	1,04	0,48	0,01	0,20	1,62	4,02
<b>TOPP</b>	1,31	1,78	0,98	0,02	0,39	3,35	7,83
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	25,0	33,8	17,5	0,4	7,6	99,0	183,2
<b>UBP<sup>D</sup></b>	2461245	3240336	3256884	64210	3084378	10748536	22855590

## A 3.2.6.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit
Aussenwand	Nord	68,47	0,11	1	7,53	W/K
	Ost	47,22	0,11	1	5,19	W/K
	Süd	55,00	0,11	1	6,05	W/K
	West	47,22	0,11	1	5,19	W/K
Fenster	Nord	3,82	0,80	1	3,06	W/K
	Ost	6,25	0,80	1	5,00	W/K
	Süd	19,80	0,80	1	15,84	W/K
	West	6,25	0,80	1	5,00	W/K
Haustürelement	Nord	2,51	1,00	1	2,51	W/K
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,12	1	8,42	W/K
	Süd 45°	70,2	0,12	1	8,42	W/K
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,13	0,6	7,74	W/K

$\Sigma A$ : 496,22  $\Sigma A \cdot U \cdot F_x$  79,95 W/K

**Wärmebrücken** (detaillierte Ermittlung)  $H_{WB} = A \cdot 0,025$  12,41 W/K

**Transmissionswärmeverlust  $H_T$**   $\Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$  92,36 W/K

**Lüftungswärmeverlust  $H_V$**  (Luftdichtheit  $n_{50} < 3,0$  1/h)  $0,34 \cdot 0,6 \cdot V$  118,52 W/K

**Hüllflächenfaktor**  $A/V_e$  0,65  $m^{-1}$

Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	$F_F$ $F_S$ $F_C$			spezifischer Gewinn	
			$F_F$	$F_S$	$F_C$		
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	Fenster Nord	3,82	0,53	0,7	0,9	1	1,148
	Fenster Ost	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
	Fenster Süd	19,80	0,53	0,7	0,9	1	5,950
	Fenster West	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878

Solare Gewinne opaker Bauteile	Bauteil	Absorptionsgrad $\alpha$	Formfaktor FF
	Aussenwände	0,5	0,5
	Dach	0,6	1

**Interne Wärmegewinne** (flächenspezifisch)  $q_i = 5$  W/m<sup>2</sup> 1223,15 W

**spez. Wärmekapazität** (massive Bauweise)  $50$  Wh/(m<sup>3</sup>K)·V<sub>e</sub> 38223 Wh/K

**Jahresheizwärmebedarf**  $Q_h$  7138 kWh/a

$q_h$  29,2 kWh/(m<sup>2</sup>·a)

## A 3.2.6.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	46,5	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.058,00	kWh/a	$Q_h$	7.138,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	29,20	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 1K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, ohne Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, geregeltte Pumpe					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			Pufferspeicher innerhalb therm. Hülle					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Gas Brenn- wert 55/45°C			Gas Brenn- wert 55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	0,70	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	28,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	5.487,05	kWh/a	$Q_{H,E}$	7.304,65	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		58,71	kWh/a		105,19	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	6.211,16	kWh/a	$Q_{H,P}$	8.351,67	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	12.791,70	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	163,90	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	14.562,83	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,43	[-]

## A 3.2.7 Variante 60-G-H/S

## A 3.2.7.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	26997,1	48444,6	38228,1	775,6	17185,9	690005,6	821636,9
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	208,8	326,9	308,7	6,7	334,8	650,4	1836,2
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	5677,4	6735,0	1827,3	217,7	1044,8	1913,8	17416,0
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	32883,4	55506,5	40364,1	1000,0	18565,5	692570,8	840890,4
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	5,6	84,3	16,4	0,1	4,1	1,9	112,4
KSA <sub>E</sub>	t/50a	82,5	170,9	135,3	4,0	46,8	35,3	474,7
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	1,72	3,77	0,03	0,03	0,04	0,18	5,8
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	89,8	258,9	151,7	4,1	50,9	37,4	592,8
CO <sub>2</sub>	t/50a	7,3	20,9	11,9	0,2	4,8	134,5	179,6
CO	kg/50a	157,4	146,4	32,7	2,3	22,7	72,9	434,4
NO <sub>x</sub>	kg/50a	17,5	52,6	34,9	0,6	13,9	116,9	236,5
SO <sub>2</sub>	kg/50a	12,0	16,7	13,4	0,3	11,3	8,9	62,5
CH <sub>4</sub>	kg/50a	22,5	43,2	38,3	0,9	13,2	652,2	770,4
NM <sub>VO</sub> C	kg/50a	9,2	7,6	4,5	0,2	0,9	14,7	37,1
HCl	g/50a	247,2	206,3	402,7	2,1	130,1	296,7	1285,0
HF	g/50a	18,5	15,2	24,4	0,1	46,8	20,9	126,1
H <sub>2</sub> S	mg/50a	12,6	27,5	89,1	0,3	19,1	5095,9	5244,5
NH <sub>3</sub>	mg/50a	189,9	2594,3	132,2	5,2	98,4	44,9	3064,9
N <sub>2</sub> O	g/50a	375,6	588,5	433,9	7,1	123,1	1326,8	2854,9
CF <sub>4</sub>	mg/50a	70,7	124,0	11048,1	2,0	18390,9	116,7	29752,3
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	8,9	15,6	1106,7	0,2	2311,3	14,7	3457,4
N	mükg/50a	3079,3	58241,7	4617,4	43,1	442,6	0,0	66424,1
CSB	kg/50a	34,5	49,0	3,4	2,3	6,7	15,4	111,3

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	0,66	1,83	1,07	0,02	0,44	12,44	16,46
<b>AP</b>	0,64	1,40	0,99	0,02	0,55	2,37	5,97
<b>NP</b>	0,32	0,82	0,48	0,01	0,20	1,62	3,45
<b>TOPP</b>	0,92	1,69	0,98	0,02	0,39	3,34	7,35
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	13,1	29,0	17,5	0,4	7,6	98,8	166,3
<b>UBP<sup>D</sup></b>	2990609	3788166	3256884	64210	3084378	10724145	23908393

## A 3.2.7.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	0,10	1	6,85	W/K	
	Ost	47,22	0,10	1	4,72	W/K	
	Süd	55,00	0,10	1	5,50	W/K	
	West	47,22	0,10	1	4,72	W/K	
Fenster	Nord	3,82	0,80	1	3,06	W/K	
	Ost	6,25	0,80	1	5,00	W/K	
	Süd	19,80	0,80	1	15,84	W/K	
	West	6,25	0,80	1	5,00	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	1,00	1	2,51	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,12	1	8,42	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,12	1	8,42	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,13	0,6	7,74	W/K	
$\Sigma A:$ 496,22				$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	77,78	W/K	
<b>Wärmebrücken</b> (detaillierte Ermittlung)				$H_{WB} = A \cdot 0,025$	12,41	W/K	
<b>Transmissionswärmeverlust <math>H_T</math></b>				$\Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	90,19	W/K	
<b>Lüftungswärmeverlust <math>H_V</math></b> (Luftdichtheit $n_{50} < 3,0$ 1/h)				$0,34 \cdot 0,6 \cdot V$	118,52	W/K	
<b>Hüllflächenfaktor</b>				$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$	
<b>Solare Gewinne transp. Bauteile</b>	<b>Bauteil und Orientierung</b>	<b>Fläche A [<math>m^2</math>]</b>	<b>Gesamtenergie- durchlassgrad g</b>	<b><math>F_F</math></b>	<b><math>F_S</math></b>	<b><math>F_C</math></b>	<b>spezifischer Gewinn</b>
	Fenster Nord	3,82	0,53	0,7	0,9	1	1,148
	Fenster Ost	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
	Fenster Süd	19,80	0,53	0,7	0,9	1	5,950
	Fenster West	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
<b>Solare Gewinne opaker Bauteile</b>	<b>Bauteil</b>	<b>Absorptionsgrad <math>\alpha</math></b>	<b>Formfaktor FF</b>				
	Aussenwände	0,5	0,5				
	Dach	0,6	1				
<b>Interne Wärmegewinne</b> (flächenspezifisch)				$q_i = 5 \text{ W/m}^2$	1223,15	W	
<b>spez. Wärmekapazität</b> (leichte Bauweise)				$15 \text{ Wh}/(m^3 \cdot K) \cdot V_e$	38223	Wh/K	
<b>Jahresheizwärmebedarf</b>				$Q_h$	7134	kWh/a	
				$q_h$	29,2	$kWh/(m^2 \cdot a)$	

## A 3.2.7.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	62	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.058,00	kWh/a	$Q_h$	7.134,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	29,20	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 1K					
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, ohne Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, geregelt Pumpe					
Speicherung	indirektbeheizter Speicher; Aufstellung innerhalb thermischer Hülle			Pufferspeicher innerhalb therm. Hülle					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	1,00			1,00					
Erzeuger	Gas Brenn- wert 55/45°C			Gas Brenn- wert 55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	0,93	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	28,27	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$		kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	5.440,57	kWh/a	$Q_{H,E}$	7.277,74	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		58,71	kWh/a		141,89	kWh/a			kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	6.159,78	kWh/a	$Q_{H,P}$	8.432,40	kWh/a	$Q_{L,P}$		kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	12.718,31	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	200,60	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	14.592,18	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	1,43	[-]

## A 3.2.8 Variante 40-G/S/L-K/P

## A 3.2.8.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	62384,2	52995,3	38228,1	775,6	17185,9	466844,8	638414,0
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	368,4	327,0	308,7	6,7	334,8	139484,8	140830,3
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	703,8	2603,8	1827,3	217,7	1044,8	3179,6	9577,1
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	63456,4	55926,2	40364,1	1000,0	18565,5	609510,2	788822,4
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	124,3	128,3	16,4	0,1	4,1	1,4	274,5
KSA <sub>E</sub>	t/50a	204,9	160,4	135,3	4,0	46,8	62,1	613,4
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	0,01	0,67	0,03	0,03	0,04	0,12	0,9
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	329,2	289,3	151,7	4,1	50,9	63,6	888,9
CO <sub>2</sub>	t/50a	25,4	26,8	11,9	0,2	4,8	92,0	161,1
CO	kg/50a	182,6	68,1	32,7	2,3	22,7	48,6	357,0
NOx	kg/50a	50,5	66,1	34,9	0,6	13,9	80,1	246,1
SO <sub>2</sub>	kg/50a	16,1	16,4	13,4	0,3	11,3	11,9	69,3
CH <sub>4</sub>	kg/50a	40,7	49,4	38,3	0,9	13,2	432,4	574,8
NMVOC	kg/50a	4,3	3,9	4,5	0,2	0,9	9,7	23,5
HCl	g/50a	209,6	189,3	402,7	2,1	130,1	374,2	1307,9
HF	g/50a	13,0	10,7	24,4	0,1	46,8	24,8	119,8
H <sub>2</sub> S	mg/50a	71,8	17,6	89,1	0,3	19,1	3266,8	3464,8
NH <sub>3</sub>	mg/50a	2581,2	3672,4	132,2	5,2	98,4	32,6	6521,9
N <sub>2</sub> O	g/50a	527,7	599,3	433,9	7,1	123,1	1068,0	2759,1
CF <sub>4</sub>	mg/50a	95,6	138,1	11048,1	2,0	18390,9	238,3	29913,0
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	12,0	17,4	1106,7	0,2	2311,3	30,0	3477,6
N	mükg/50a	7516,7	58108,8	4617,4	43,1	442,6	0,0	70728,6
CSB	kg/50a	2,8	65,5	3,4	2,3	6,7	10,3	91,0

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	2,20	2,33	1,07	0,02	0,44	8,49	14,55
<b>AP</b>	1,34	1,64	0,99	0,02	0,55	1,78	6,33
<b>NP</b>	0,69	1,04	0,48	0,01	0,20	1,11	3,53
<b>TOPP</b>	1,66	1,78	0,98	0,02	0,39	2,28	7,10
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	29,7	33,8	17,5	0,4	7,6	67,9	156,8
<b>UBP<sup>D</sup></b>	3478213	3240336	3256884	64210	3084378	7299772	20423794

### A 3.2.8.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

#### Heizwärmebedarf nach DIN 4108-6

beheiztes Gebäudevolumen	$V_e$	764,46	$m^3$
Nettovolumen ( $0,76 \cdot V_e$ )	$V$	580,99	$m^3$
Gebäudenutzfläche ( $0,32 \cdot V_e$ )	$A_N$	244,63	$m^2$

Bauteil	Bezeichnung	Fläche A $m^2$	U-Wert $W/(m^2 \cdot K)$	Temperatur- korrekturfaktor $F_x$	Wärme- verlust $H_T$	Einheit	
Aussenwand	Nord	68,47	0,11	1	7,53	W/K	
	Ost	47,22	0,11	1	5,19	W/K	
	Süd	55,00	0,11	1	6,05	W/K	
	West	47,22	0,11	1	5,19	W/K	
Fenster	Nord	3,82	0,80	1	3,06	W/K	
	Ost	6,25	0,80	1	5,00	W/K	
	Süd	19,80	0,80	1	15,84	W/K	
	West	6,25	0,80	1	5,00	W/K	
Haustürelement	Nord	2,51	1,00	1	2,51	W/K	
Dach schräg	Nord 45°	70,2	0,12	1	8,42	W/K	
	Süd 45°	70,2	0,12	1	8,42	W/K	
Bodenplatte	an Erdreich	99,28	0,13	0,6	7,74	W/K	
$\Sigma A:$ 496,22					$\Sigma A \cdot U \cdot F_x$	79,95	W/K
Wärmebrücken (detaillierte Ermittlung)					$H_{WB} = A \cdot 0,025$	12,41	W/K
Transmissionswärmeverlust $H_T$					$\Sigma(A \cdot U \cdot F_x) + H_{WB}$	92,36	W/K
Lüftungswärmeverlust $H_V$ (Luftdichtheit $n_{50} < 3,0$ 1/h)					$0,34 \cdot 0,6 \cdot V$	118,52	W/K
Hüllflächenfaktor					$A/V_e$	0,65	$m^{-1}$
Solare Gewinne transp. Bauteile	Bauteil und Orientierung	Fläche A $[m^2]$	Gesamtenergie- durchlassgrad g	$F_F$	$F_S$	$F_C$	spezifischer Gewinn
	Fenster Nord	3,82	0,53	0,7	0,9	1	1,148
	Fenster Ost	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
	Fenster Süd	19,80	0,53	0,7	0,9	1	5,950
	Fenster West	6,25	0,53	0,7	0,9	1	1,878
Solare Gewinne opaker Bauteile	Bauteil	Absorptionsgrad $\alpha$	Formfaktor FF				
	Aussenwände	0,5	0,5				
	Dach	0,6	1				
Interne Wärmegewinne (flächenspezifisch)					$q_i = 5$ W/ $m^2$	1223,15	W
spez. Wärmekapazität (massive Bauweise)					$50$ Wh/( $m^3 \cdot K$ ) $\cdot V_e$	38223	Wh/K
Jahresheizwärmebedarf					$Q_h$	7138	kWh/a
					$q_h$	29,2	kWh/( $m^2 \cdot a$ )

## A 3.2.8.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	46,5	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.058,00	kWh/a	$Q_h$	7.138,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	29,20	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 1K			Wohnungslüftungsanlage mit Lufttemp. unter 20°C		
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, ohne Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, geregelt Pumpe			Zu- und Abluftleitungen innerhalb therm. Hülle		
Speicherung	bivalenter Solarspeicher; Aufstellung innerhalb therm. Hülle			Pufferspeicher innerhalb therm. Hülle					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	0,36	0,64		1,00					
Erzeuger	Gas Brenn- wert 55/45°C	Solar- kollektor		Gas Brenn- wert 55/45°C					

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	0,59	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	23,24	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$	5,37	kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	1.886,10	kWh/a	$Q_{H,E}$	6.039,91	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		88,07	kWh/a		88,07	kWh/a		132,10	kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	2.338,66	kWh/a	$Q_{H,P}$	6.908,35	kWh/a	$Q_{L,P}$	396,30	kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	7.926,01	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	308,24	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	9.643,31	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	0,95	[-]

## A 3.2.9 Variante 40-WP/S/L-K/P

## A 3.2.9.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	62384,2	52995,3	38228,1	775,6	17185,9	360007,6	531576,8
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	368,4	327,0	308,7	6,7	334,8	145613,2	146958,7
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	703,8	2603,8	1827,3	217,7	1044,8	27853,5	34251,0
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	63456,4	55926,2	40364,1	1000,0	18565,5	533474,6	712786,8
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	124,3	128,3	16,4	0,1	4,1	2,3	275,4
KSA <sub>E</sub>	t/50a	204,9	160,4	135,3	4,0	46,8	563,4	1114,7
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	0,01	0,67	0,03	0,03	0,04	0,06	0,8
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	329,2	289,3	151,7	4,1	50,9	565,7	1390,9
CO <sub>2</sub>	t/50a	25,4	26,8	11,9	0,2	4,8	83,7	152,9
CO	kg/50a	182,6	68,1	32,7	2,3	22,7	27,5	335,8
NOx	kg/50a	50,5	66,1	34,9	0,6	13,9	75,3	241,3
SO <sub>2</sub>	kg/50a	16,1	16,4	13,4	0,3	11,3	88,4	145,8
CH <sub>4</sub>	kg/50a	40,7	49,4	38,3	0,9	13,2	214,1	356,5
NMVOG	kg/50a	4,3	3,9	4,5	0,2	0,9	4,6	18,3
HCl	g/50a	209,6	189,3	402,7	2,1	130,1	2625,7	3559,5
HF	g/50a	13,0	10,7	24,4	0,1	46,8	163,0	258,0
H <sub>2</sub> S	mg/50a	71,8	17,6	89,1	0,3	19,1	80,1	278,1
NH <sub>3</sub>	mg/50a	2581,2	3672,4	132,2	5,2	98,4	55,0	6544,3
N <sub>2</sub> O	g/50a	527,7	599,3	433,9	7,1	123,1	3119,4	4810,4
CF <sub>4</sub>	mg/50a	95,6	138,1	11048,1	2,0	18390,9	2331,0	32005,8
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	12,0	17,4	1106,7	0,2	2311,3	292,9	3740,6
N	mükg/50a	7516,7	58108,8	4617,4	43,1	442,6	0,0	70728,6
CSB	kg/50a	2,8	65,5	3,4	2,3	6,7	5,5	86,1

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	2,20	2,33	1,07	0,02	0,44	7,44	13,50
<b>AP</b>	1,34	1,64	0,99	0,02	0,55	3,74	8,29
<b>NP</b>	0,69	1,04	0,48	0,01	0,20	1,03	3,46
<b>TOPP</b>	1,66	1,78	0,98	0,02	0,39	1,96	6,79
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	29,7	33,8	17,5	0,4	7,6	66,5	155,4
<b>UBP<sup>D</sup></b>	3478213	3240336	3256884	64210	3084378	6222413	19346435

## A 3.2.9.2 Heizwärmebedarf nach DIN V 4108-6

Identisch zu Variante 40-G/S/L-K/P!

## A 3.2.9.3 Anlagenbewertung nach DIN V 4701-10

## I. Daten aus DIN 4108-6

Nutzfläche	$A_N$	244,63	m <sup>2</sup>
Heizperiode	$t_{HP}$	46,5	Tage

	TRINKWASSER- ERWÄRMUNG			HEIZUNG			LÜFTUNG		
absoluter Bedarf	$Q_{TW}$	3.058,00	kWh/a	$Q_h$	7.138,00	kWh/a			
spezifischer Bedarf	$q_{TW}$	12,50	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_h$	29,20	kWh/(m <sup>2</sup> a)			

## II. Systembeschreibung

Übergabe	-			Heizkörper im Außenwandbereich, Thermostatventile, 1K			Wohnungslüftungsanlage mit Lufttemp. unter 20°C		
Verteilung	Verteilung innerhalb therm. Hülle, ohne Zirkulation			innerhalb therm. Hülle, Stränge innenliegend, geregelt Pumpe			Zu- und Abluftleitungen innerhalb therm. Hülle		
Speicherung	bivalenter Solarspeicher; Aufstellung innerhalb therm. Hülle			Pufferspeicher innerhalb therm. Hülle					
Erzeugung	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Erzeuger 3	WÜT	L/L-WP	Heiz- register
Deckungsanteil	0,36	0,64			1,00				
Erzeuger	WW Wärmepumpe	Solar- kollektor			WW Wärmepumpe				

## III. Ergebnisse

Deckung von $Q_h$	$q_{h,TW}$	0,59	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,H}$	23,24	kWh/(m <sup>2</sup> a)	$q_{h,L}$	5,37	kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\Sigma$ WÄRME	$Q_{TW,E}$	374,28	kWh/a	$Q_{H,E}$	1.450,66	kWh/a	$Q_{L,E}$		kWh/a
$\Sigma$ HILFSENERGIE		88,07	kWh/a		525,95	kWh/a		132,10	kWh/a
$\Sigma$ PRIMÄRENERGIE	$Q_{TW,P}$	1.387,05	kWh/a	$Q_{H,P}$	5.929,83	kWh/a	$Q_{L,P}$	396,30	kWh/a

ENDENERGIE (Wärme)	$Q_{E,W}$	1.824,94	kWh/a
ENDENERGIE (Hilfsenergie)	$Q_{E,HE}$	746,12	kWh/a
PRIMÄRENERGIE	$Q_P$	7.713,18	kWh/a
ANLAGEN-AUFWANDSZAHL	$e_p$	0,76	[-]

## A 3.2.10 Variante 40-WP/S/L-K/P 50:50 Strommix

## A 3.2.10.1 Sachbilanz und Bewertung

Parameter	Einheit	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
KEA <sub>nE</sub>	kWh/50a	62384,2	52995,3	38228,1	775,6	17185,9	193328,4	364897,6
KEA <sub>E</sub>	kWh/50a	368,4	327,0	308,7	6,7	334,8	207448,9	208794,4
KEA <sub>andere</sub>	kWh/50a	703,8	2603,8	1827,3	217,7	1044,8	14853,3	21250,8
KEA <sub>Summe</sub>	kWh/50a	63456,4	55926,2	40364,1	1000,0	18565,5	415630,5	594942,7
KSA <sub>nE</sub>	t/50a	124,3	128,3	16,4	0,1	4,1	5,1	278,2
KSA <sub>E</sub>	t/50a	204,9	160,4	135,3	4,0	46,8	301,8	853,1
KSA <sub>andere</sub>	t/50a	0,01	0,67	0,03	0,03	0,04	0,07	0,9
KSA <sub>Summe</sub>	t/50a	329,2	289,3	151,7	4,1	50,9	306,9	1132,2
CO <sub>2</sub>	t/50a	25,4	26,8	11,9	0,2	4,8	46,5	115,6
CO	kg/50a	182,6	68,1	32,7	2,3	22,7	19,0	327,4
NO <sub>x</sub>	kg/50a	50,5	66,1	34,9	0,6	13,9	44,9	210,9
SO <sub>2</sub>	kg/50a	16,1	16,4	13,4	0,3	11,3	47,7	105,2
CH <sub>4</sub>	kg/50a	40,7	49,4	38,3	0,9	13,2	116,5	258,8
NM <sub>VO</sub> C	kg/50a	4,3	3,9	4,5	0,2	0,9	2,6	16,3
HCl	g/50a	209,6	189,3	402,7	2,1	130,1	1402,4	2336,2
HF	g/50a	13,0	10,7	24,4	0,1	46,8	89,3	184,3
H <sub>2</sub> S	mg/50a	71,8	17,6	89,1	0,3	19,1	42,4	240,3
NH <sub>3</sub>	mg/50a	2581,2	3672,4	132,2	5,2	98,4	97,6	6586,9
N <sub>2</sub> O	g/50a	527,7	599,3	433,9	7,1	123,1	1695,7	3386,8
CF <sub>4</sub>	mg/50a	95,6	138,1	11048,1	2,0	18390,9	2336,2	32011,0
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	mg/50a	12,0	17,4	1106,7	0,2	2311,3	293,6	3741,2
N	mükg/50a	7516,7	58108,8	4617,4	43,1	442,6	0,0	70728,6
CSB	kg/50a	2,8	65,5	3,4	2,3	6,7	7,2	87,8

	Waende	Platten	Daecher	Tueren	Fenster	Heizung	Gebäude
<b>GWP</b>	2,20	2,33	1,07	0,02	0,44	4,13	10,19
<b>AP</b>	1,34	1,64	0,99	0,02	0,55	2,10	6,64
<b>NP</b>	0,69	1,04	0,48	0,01	0,20	0,62	3,05
<b>TOPP</b>	1,66	1,78	0,98	0,02	0,39	1,17	6,00
<b>Eco95<sup>D</sup></b>	29,7	33,8	17,5	0,4	7,6	37,8	126,7
<b>UBP<sup>D</sup></b>	3478213	3240336	3256884	64210	3084378	3657697	16781719