Ökologische Betrachtung für den Hausbau - Ganzheitliche Energie- und Kohlendioxidbilanzen für zwei verschiedene Holzhauskonstruktionen

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Universität Hamburg
Fachbereich Biologie

vorgelegt von
Cevin Marc Pohlmann
aus Hamburg

Hamburg 2002

Genehmigt vom
Fachbereich Biologie der
Universität Hamburg
auf Antrag von Herrn Professor Dr. A. FRÜHWALD

Weitere Gutachter der Dissertation:
Herr Professor Dr. Dr. habil. Dr. h. c. G. Wegener

Tag der Disputation: 27. Juni 2002

Hamburg, den 10. Juni 2002

Professor Dr. U. Wienand
Dekan

Persönlicher Rückblick

Die vorliegende Arbeit ist am Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg in der Zeit von November 1999 bis Mai 2002 entstanden und wurde mit Mitteln des Senators für Bildung, Wissenschaft, Kunst und Sport der Freien und Hansestadt Bremen und der Bremer Energie-Konsens GmbH gefördert.

Für mich persönlich endet mit der Abgabe dieser Arbeit eine lehrreiche und sehr schöne Zeit.

Prof. Dr. Arno Frühwald hat die Arbeit angeleitet und betreut. Ihm gebührt ganz besonderer Dank, da er mir ein einmaliges Arbeitsklima mit einem „Nischenarbeitsplatz“ ermöglicht hat. Meine fachliche, aber auch meine persönliche Entwicklung hat Herr Prof. Frühwald jederzeit gefördert und durch intensive Diskussionen (heraus-) gefordert. Durch regelmäßige Teilnahme an Fortbildungsveranstaltungen, Tagungen und Messen wurde es mir ermöglicht, die Arbeit zu entwickeln und selbständig durchzuführen.

Prof. Reinhold Bartolles, Doris Gerken und Frank Zarsteck von der Hochschule Bremen, Fachbereich Architektur, danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit in dem durchgeführten Forschungsprojekt. Hierdurch konnte die vorliegende Arbeit erst möglich werden.

Der fachliche und persönliche Austausch über viele Bereiche der Holzwirtschaft mit Dr. Mohammad Scharai-Rad und den Doktoranden des Instituts, ganz besonders den „Kellerkids“ Jörg Hasener und Matthias Gruchot, hat mich auch in andere Themen als den Holzhausbau und die Ökobilanzierung einblicken lassen. Ich werde unsere Gespräche vermissen.

Den wissenschaftlichen Mitarbeitern der BFH und den Ordinariaten der Universität Hamburg danke ich für die stete Diskussionsbereitschaft. Alle auftretenden Fragen konnten schnell und zur vollsten Zufriedenheit beantwortet werden. Den technischen Angestellten danke ich für ein angenehmes Arbeitsklima und die aufmunternden Worte.

Eine schöne Zeit ist aber auch immer auf das private Umfeld zurück zu führen. Ich bin dankbar, dass meine Familie und Freunde Inga und mich begleiten.

Cevin Marc Pohlmann Hamburg, im Mai 2002

Inhaltsangabe

1. ZIEL UND STRUKTUR DER ARBEIT 1

2. EINLEITUNG 8

2.1. Energieeinsparverordnung 12
2.2. Holzbau 16
2.2.1. Stand der Technik 16
2.2.2. Marktsituation 17

3. ÖKOBILANZEN IN DER HOLZWIRTSCHAFT 21

3.1. Hintergrund 21
3.2. Wie erstellt man eine Ökobilanz? 24
3.2.1. Definition von Ziel und Bilanzraum 26
3.2.2. Sachbilanz 26
3.2.3. Wirkungsabschätzung 30
3.2.4. Auswertung 34
3.2.4.1. Verfahrensoptimierung 34
3.2.4.2. Produktvergleich unter ökologischen Gesichtspunkten 35
3.3. Zusammenfassung Ökobilanz 41

4. ENERGIEOPTIMIERTES BAUEN 43

4.1. Wärmedurchgangskoeffizient 44
4.1.1. Einfluß der Wärmedämmung auf die Ökologie/Ökonomie 45
4.1.2. Korrelation Heizenergie und Lüftungsenergie 46
4.2. Energieverbrauch im Hausbau 48
4.3. Energieeinsparmöglichkeiten in der Bauwirtschaft 51
4.3.1. Einsatz geeigneter Fenster 51
4.3.2. Luftdichter Aufbau des Gebäudes 53
4.3.2.1. Nachteile/Probleme der Luftdichtheit 54
4.3.3. Einflüsse auf den Wärmehaushalt eines Gebäudes 55
4.3.4. Verwendung energiesparender Elektrogeräte 57
4.4. Holzhausbau 58
4.5. Planerische Details im Holzrahmenbau 64
4.5.1. Im Holzbau verwendete Materialien 65

4.5.1.1. Dach ... 65
4.5.1.2. Zwischendecken ... 66
4.5.1.3. Wandaufbau ... 67
4.6. Kritische Anmerkungen zum Kapitel 4 ... 69
4.7. Exkurs Kohlenstoffspeicherung ... 71
4.7.1. Wälder und Holzprodukte sind Kohlenstoff-Senken ... 72
4.7.2. Positivhäuser ... 73
5. BERECHNUNGSGRUNDLAGE (ARCHITEKTENTOOL) ... 77
5.1. Datengrundlage ... 79
5.1.1. Angaben aus dem Bauforschungsbericht ... 81
5.1.2. Angaben des Instituts für Kunststoffprüfung ... 83
5.1.3. Angaben der Universität Hamburg ... 84
5.1.4. Eigene Berechnungen ... 85
5.1.5. Berechnung der Fenster ... 87
5.1.6. Berechnung der fossilen Energieträger ... 90
5.1.7. Berechnung erneuerbare Energieträger ... 92
5.1.7.1. Solaranlagen - Sonnenkollektoren ... 93
5.1.7.2. Photovoltaikanlagen ... 95
5.1.7.3. Holzpelletofen ... 100
5.1.8. Transport ... 103
5.2. Zusammenfassung der Datenherkunft ... 105
5.3. Datenqualität der Berechnungsgrundlage ... 106
5.4. Unterteilung eines Hauses in die Lebenswegmodule/ Vorgehensweise bei der Berechnung ... 107
5.4.1. Modul Herstellung ... 108
5.4.2. Modul Errichtung/Produktion ... 109
5.4.2.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage ... 111
5.4.3. Modul Nutzung ... 112
5.4.3.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage ... 112
5.4.4. Modul Instandhaltung ... 115
5.4.4.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage ... 116
5.4.5. Modul Rückbau ... 116
5.4.5.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage ... 117
5.4.6. Modul Transport ... 119

5.4.6.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage 119
5.4.7. Gespeicherte Energie 120
5.4.7.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage 121
5.4.8. Gespeicherter Kohlenstoff 121
5.4.8.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage 122

6. AUFBAU DER BERECHNUNGSGRUNDLAGE 124

6.1. EDV-Berechnungsgrundlagen 124
6.2. Feld Eingabe 128
6.3. Feld Daten 132
6.4. Feld Berechnung 134
6.5. Feld Ergebnisse 136
6.6. Feld Ökobilanz 140
6.6.1. Anwendung für die Praxis 143
6.6.1.1. Orientierungswerte 144
6.7. Schnittstellenproblematik 145
6.7.1. Problemlösung 146

7. BERECHNUNGSBEISPIELE 151

7.1. Haus Würzburg 151
7.1.1. Wandaufbau 153
7.2. Haus in Bremen 154
7.2.1. Wandaufbau 155
7.3. Vergleich Würzburg und Bremen 156
7.3.1. Betriebsenergiebedarf 157
7.4. Sachbilanz 158
7.4.1. Darstellung der einzelnen Massen in den Gebäuden 159
7.4.1.1. Würzburg 160
7.4.1.2. Bremen 162
7.5. Einzelbetrachtung von Bauelementen 164
7.5.1. Betrachtung von vergleichbaren Wandaufbauten 164

8. ERGEBNISSE 169

8.1. Energiebilanz 172
8.1.1. Gesamtenergiebedarf 172

8.1.2. Bedeutung der einzelnen Module an der Gesamtenergie 175
8.1.2.1. Würzburg Normal 178
8.1.2.2. Würzburg Optimiert 179
8.1.2.3. Bremen Normal 179
8.1.2.4. Bremen Optimiert 180
8.1.3. Energiebedarf für die Herstellung der Baustoffe 181
8.1.4. Bedeutung der einzelnen Baustoffe 182
8.2. Kohlendioxidbilanz 186
8.2.1. Gesamte CO_2-Emissionen 187
8.2.2. Bedeutung der einzelnen Lebensabschnitte an den CO_2-Emissionen 189
8.2.2.1. Würzburg Normal 191
8.2.2.2. Würzburg Optimiert 192
8.2.2.3. Bremen Normal 192
8.2.2.4. Bremen Optimiert 193
8.2.3. CO_2-Emissionen bei der Herstellung der Baustoffe 194
8.2.4. Bedeutung der einzelnen Baustoffe 195
8.3. Einfluss der Transportentfernung 199
8.3.1. Energie 200
8.3.2. Kohlendioxid 201
8.4. Optimierung des Bremer Hauses 202
8.4.1. Energie 203
8.4.1.1. Bremen II Normal 204
8.4.1.2. Bremen II Optimiert 205
8.4.1.3. Anteil der Baustoffe an dem Energiebedarf der Herstellung 205
8.4.2. Kohlendioxid 207
8.4.2.1. Bremen II Normal 208
8.4.2.2. Bremen II Optimiert 209
8.4.2.3. Anteile der Baustoffe an den CO_2-Emissionen 209
8.5. Ökobilanz 211
8.5.1. Treibhauspotential 211
8.5.2. Versauerung 213
8.5.3. Überdüngung 215
8.5.4. Sommersmog (Bildung von bodennahem Ozon) 216
8.5.5. Vergleich mit Literaturwerten 218
8.5.5.1. Studie Öko-Institut 218

8.5.5.2. Studie IKP 218
8.5.5.3. Darstellung der Ergebnisse 219

9. ERGEBNISSDISKUSSION-PLANUNGSMETHODEN 221

9.1. Energie 221
9.2. Kohlendioxid 222
9.2.1. Eingesetzte Baustoffe 223
9.2.2. Kennwerte des Gebäudes 223
9.2.3. Verwendete Energieträger 224
9.2.3.1. Erdgas 224
9.2.3.2. Holzpelletofen 225
9.2.3.3. Solaranlagen 225
9.2.3.4. Photovoltaikanlagen 226
9.2.4. Sonstige Faktoren 226
9.2.4.1. Größe der Gebäude 226
9.2.4.2. Zeitraum der Betrachtung 227
9.3. Energieeinsatz – Kohlendioxidemissionen 227
9.4. Variation des Heizenergiebedarfs 228

10. ZUSAMMENFASSUNG 232

10.1. Weiterer Forschungsbedarf 238

11. VERZEICHNISSE 241

11.1. Literaturverzeichnis 241
11.1.1. Normen - Gesetze - Verordnungen 253
11.1.2. Firmenrecherche 254
11.1.3. Internetrecherche 255
11.2. Abbildungsverzeichnis 256
11.3. Tabellenverzeichnis 259

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahr
AETP	Aquatische Ökotoxizität
AGÖF	Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute
AP	Azidifizierungspotential (Versauerungspotential)
atro	absolut trocken (Biomasse); theoretischer Wert, da Holz/Biomasse immer einen Feuchteausgleich mit der Umgebung anstrebt
AV-Verhältnis	Verhältnis der wärmeabstrahlenden Außenfläche zum beheizten Innenvolumen des Hauses
B	Baustoffklasse
BDF	Bundesverband Deutscher Fertigbau
BFH	Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft
BImSchV	Bundesimmissionschutzverordnung
BSH	Brettschichtholz
CAAD	Computer Aided Architectural Design
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Modellation or Manufacturing
°C	Grad Celsius
COST	Cooperation in Sience and Technology
DGfH	Deutsche Gesellschaft für Holzforschung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EEG	Erneuerbare Energiengesetz
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EFH	Einfamilienhaus
el.	elektrisch
EN	Europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung, gültig seit 1. Februar 2002
EP	Eutrophierungspotential (Überdüngung)
ff.	folgende
FE	Funktionale Einheit
g-Wert	Gesamtenergiedurchlasswert
GWP	Global Warming Potential (deutsch: Treibhauspotential)
HDF	High Density Fiberboard
ISO	International Standardisation Organisation
IKP	Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Stuttgart
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

INC	zwischenstaatliches Verhandlungsgremium
k.A.	keine Angabe
K	Kelvin
KfW	Kredit für Wiederaufbau
kg	Gewichtseinheit für Kilogramm
km	Kilometer
kWh	Kilo Watt Stunde (Einheit für den Energiebedarf)
KVH	Konstruktionsvollholz
LCA	Life Cycle Assessment, engl. Synonym für Ökobilanz
MDF	Medium Density Fiberboard; Mitteldichte Faserplatte
MFH	Mehrfamilienhaus
MF	Melamin Formaldehyd Klebstoff
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule (1 kWh ~ 3,6 MJ)
mm; m^2; m^3	Millimeter; Quadratmeter; Kubikmeter
NEH	Niedrigenergiehaus
NH	Nadelholz
OSB	Oriented Strand board, Langspanplatte für den Holzhausbau
PEI	Primärenergie; Energie, die direkt aus der Hydrosphäre, Atmosphäre oder Geosphäre entnommen und noch keiner anthropogenen Umwandlung unterworfen wurde, sozusagen Energie in ihrer Ursprungsform
PE-Folie	Polyethylen-Folie (Dampfsperre im Hausbau)
PF	Phenol-Formaldehyd Klebstoff
PF/PMDI	verleimter Holzwerkstoff mit Phenol-Formaldehyd in der Deckschicht; Isocyanat in der Mittelschicht
PRF	Phenol Resorcin Formaldehyd Klebstoff
PH	Passivhaus; Energiesparhaus mit einem Heizenergiebedarf von 15 kWh/m^2a.
PV	Photovoltaik
t	Gewichtseinheit für Tonne
TGI	Doppel T-Träger für den Hausbau
therm.	thermisch
u	Holzfeuchtegehalt
UBA	Umweltbundesamt
UF	Klebstoff aus Urea (Harnstoff) Formaldehyd
UN	United Nations

uvm.	und vieles mehr
u-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient, angegeben in W/m²K, bezeichnet die Wärmemenge, die durch 1 m² Bauelement in 1 Std. bei einem Temperaturunterschied der angrenzenden Raum- und Außenluft von 1 K hindurchgeht
VP	Versauerungspotential
V20	Spanplatte für den Innenbereich
V100	Spanplatte für den Feuchtbereich
WSV; WSVO	Wärmeschutzverordnung gilt seit 1994/95
z.B.	zum Beispiel

Chemische Abkürzungen

CH_4	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
HCl	Chlorwasserstoff
HF	Fluorwasserstoff
H_2O	Wasser
H_2S	Schwefelwasserstoff
H_2SO_4	Schwefelsäure
HNO_3	Salpetersäure
N_2	Stickstoff
NH_4^+	Amoniumion
NH_3	Ammoniak
NO_x	Stickoxide
N_2	Stickstoff
N_2O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NO	Stickstoffmonoxid
NO_3^-	Stickstoffperoxidion
O	atomarer Sauerstoff
O_2	Sauerstoff
O_3	Ozon
PO_4^{-3}	Phosphation
SO_2	Schwefeldioxid

Ziel und Struktur der Arbeit

1

1. ZIEL UND STRUKTUR DER ARBEIT

Nach vielen Wachstumsjahren des Bausektors in Deutschland mit steigenden Neubauzahlen befindet sich der Baubereich derzeit in einem konjunkturellen Tief. Die Baugenehmigungen im Ein- und Zweifamilienhausbau sind seit drei bis vier Jahren rückläufig.
Eine Besserung ist auch aufgrund politischer Rahmenbedingungen nicht zu erwarten, da die Bundesregierung unter anderem beabsichtigt, die Eigenheimzulage entweder zu streichen oder zu halbieren. Es wird das Ziel verfolgt, den Hauserwerb im Bestand zu fördern.
Diese Entwicklung hat zum Einen dazu geführt, dass Bauunternehmen wegen Konjunkturschwäche Mitarbeiter entlassen mussten oder Insolvenz beantragten. Sie hat aber auch dazu geführt, dass bestehende Hausbaukonzepte seitens der Hersteller und der Käufer auf ihre Rentabilität und Zukunftsfähigkeit untersucht wurden.
Der Bundesbürger emittiert nach Angaben des Bundesumweltamtes pro Jahr ca. 10 Tonnen Kohlendioxid (Amerika 21 t CO_2/Einwohner und Jahr). Hierbei handelt es sich größtenteils um energiebedingte Emissionen. Etwa ein Drittel des gesamten CO_2-Ausstosses in der Bundesrepublik Deutschland wird durch die Beheizung von Gebäuden verursacht [Jahrmann, 2001]. Zukunftsfähigkeit kann nur erreicht werden, wenn in diesem Bereich Einsparpotentiale realisiert werden.
Die frühere Bundesregierung unter Bundeskanzler Kohl hat sich im Rahmen des Kyoto-Protokolls verpflichtet, die CO_2-Emissionen in Deutschland erheblich zu reduzieren. Die Bundesregierung unter Bundeskanzler Schröder bestätigte im Jahr 2000 diese angestrebten Kohlendioxideinsparungen und erhöhte die Zielvorgaben, so dass eine Übererfüllung des Kyoto-Protokolls aus bundespolitischer Sicht angestrebt wird. Im März 2002 wurde das Kyoto-Protokoll im deutschen Bundestag ratifiziert. Die Industriestaaten verpflichten sich, ihre gemeinsamen Emissionen der wichtigsten Treibhausgase im Zeitraum 2008-2012 um mindestens 5%, bezogen auf das Basisjahr 1990, zu senken.
Deutschland hat mit 21% CO_2-Reduktion im Vergleich zum Basisjahr 1990 drei Viertel des gesamten EU-Reduktionsvolumens zu erbringen [www.holz-zentralblatt.de].
Damit diese Ziele erfüllt werden, bedarf es der Unterstützung durch den Bürger. Eine Veränderung des Nutzerverhaltens im privaten Bereich muss erreicht werden.

Ein erhebliches Einsparpotential bietet der Wohnungsbau. Hausbaufirmen müssen und können Häuser planen und realisieren, die gesamtenergetisch günstig sind. Auf diese Weise können auch die Unternehmen dazu beitragen, die Umwelt zu entlasten und die Einsparziele der Politik zu realisieren.

Die energetische Gebäudeoptimierung unter gesamtheitlicher Betrachtung ist eine der faszinierendsten Herausforderungen im Sinne des Energieverbrauchs und des Umweltschutzes.
Der Hausbereich bietet ein großes Potential, innovativ, nachhaltig, umwelt- und ressourcenschonend zu handeln.
Die konstruktiven Entwicklungen im Hausbau der letzten Jahre müssen zunehmend auch unter dem Aspekt der ökologischen Zielsetzung von Politik und Wirtschaft betrachtet werden.
Der Gesellschaft wird immer deutlicher vor Augen geführt, dass generell ein ressourcenschonendes Handeln gefordert ist.
In der Bundesrepublik Deutschland ist es in den letzten Jahren zu einer Verteuerung der Energie gekommen. Zukünftig ist von einer Entspannung des Energiesektors nicht auszugehen.
Die Bemühungen hinsichtlich der Einsparung von Kohlendioxidemissionen (Kyoto-Protokoll) tragen dazu bei, dass auch die Hersteller und Bewohner von Häusern sich in der heutigen Zeit verschiedenen Fragen hinsichtlich der Ökologie ihres Produktes kritisch stellen müssen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, weitergehende Untersuchungen zur ökologischen Bewertung von Gebäuden vorzustellen und Aussagen über den **Gesamtenergiebedarf** und die **Kohlendioxidemissionen** zu treffen. Diese Erkenntnisse stammen aus durchgeführten Berechnungen des Gesamtenergiebedarfs und der Kohlendioxidemissionen von zwei unterschiedlichen Holzhauskonstruktionen. Damit die zu untersuchenden Parameter erfasst und mit geeigneten Methoden ganzheitlich bewertet werden können, wurde die **Methodik der Ökobilanzierung** nach DIN EN 14.040 ff gewählt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können von der Politik als Datengrundlage für zukünftige Entscheidungen in der Energiepolitik genutzt werden. Herstellerverbände und Bauträger können ihr Produkt einer fundierten Optimierung unterziehen, so dass die Umwelt entlastet und die Ziele der Bundesregierung hinsichtlich einer Kohlendioxidreduktion in der Atmosphäre ein Stück näher rücken.
Der interessierten Bevölkerung soll Information über die Tendenzen im Hausbau an Hand gegeben werden. Eine Sensibilisierung der Nutzer von Gebäuden hinsichtlich der Umwelteinwirkungen von Gebäuden soll forciert werden.

Diese Arbeit ist im Kontext von Energieeinsparungen und Kohlendioxidemissionen zu sehen und beantwortet einige aktuelle Fragestellungen im Hausbau. Es werden mit Hilfe von ökologischen Bewertungen unterschiedliche Eigenschaften im Gebäudebereich zueinander in Beziehung gestellt, wie z.B.:

- Welchen Einfluss hat die Architektur der Häuser und die Gebäudekennwerte auf den Gesamtenergiebedarf?
- Ist eine Reduzierung der Nutzungsenergie automatisch mit einer Verringerung des Gesamtenergiebedarfs verbunden? (Stichwort „Sinn und Unsinn von Passivhäusern“)
- Ist es möglich, eine ausgeglichene Kohlenstoffbilanz durch die Verwendung von Holz im Hausbau zu realisieren? (Stichwort „Positivhäuser“)
- Ist es möglich, die Grundlagen für ein Softwaretool zu entwickeln, das mit angemessenem Aufwand Energie- und Kohlendioxidbilanzen für Gebäude über einen bestimmten Lebensweg berechnet und hierdurch die Erstellung von ganzheitlichen Aussagen für den Gebäudebereich ermöglicht?

Der ERSTE TEIL der Arbeit befasst sich zum Einen mit der Methodik der ganzheitlichen Bilanzierung (Ökobilanz) und zum Anderen mit generellen Aspekten im Hausbau.
Die Methodik der Ökobilanz ist seit kurzem in den DIN/EN/ISO 14.040 ff festgeschrieben. Bisher sind einige ökologische Bewertungen erstellt worden, deren Aussagekraft und Erstellung in diesem Teil der Arbeit in Form von Beispielen dargestellt werden.
Die Informationen über den Hausbau beinhalten den momentanen Stand der Technik und verschiedene Aspekte des Energiesparens.

Im ZWEITEN TEIL der Arbeit, dem Hauptteil, werden Energiebilanzen und Kohlendioxidbilanzen für den Holzhausbau errechnet. Zudem wird eine entwickelte Berechnungsgrundlage für die Erstellung von ganzheitlichen Bilanzen im Hausbau und in ersten Ansätzen für die Berechnung von verschiedenen Umweltkriterien vorgestellt.
Die Grundlagen dieses einfachen Arbeitstools fußt auf detaillierten Ergebnissen des Forschungsprojektes

> „Planungsmethoden zur Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs von Wohngebäuden mit Hilfe von Ökobilanzen unter besonderer Berücksichtigung der Erzielung positiver Umweltwirkungen bezüglich des Treibhauseffektes.“

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens, finanziert mit Mitteln des Senators für Bildung, Wissenschaft, Kunst und Sport der Freien und Hansestadt Bremen und der Bremer Energie Konsens GmbH, wurde die Gesamtenergie von zwei architektonisch verschiedenen Wohnhäusern ermittelt und optimiert.

Das Forschungsprojekt wurde in Zusammenarbeit mit der Hochschule Bremen, Fachbereich Architektur, durchgeführt [Bartolles, Frühwald et al., 2001]. Die Universität Bremen hat die Architektur der ökologisch betrachteten Gebäude berechnet und erstellt. Auf diese Weise konnte das Haus mit allen Details am Computer entworfen werden. Die Datengrundlage für eine weiterführende ökologische Untersuchung ist direkt an das entstehende Haus gebunden.

Die erstellten und in dieser Arbeit vorgestellten ökologischen Bewertungen sind mit der entwickelten Berechnungsgrundlage erstellt worden.
Die Eingabewerte resultieren aus den des Bremer Planungsprogramms entnommenen Materialdaten und den damit verbundenen Kennwerten der Gebäude (Heizenergiebedarf, Ausrichtung, Sonneneinstrahlung, etc.).

Die graphische Darstellung der Zusammenarbeit und die Ziele dieser Forschungskooperation sind der Abbildung 1 zu entnehmen.

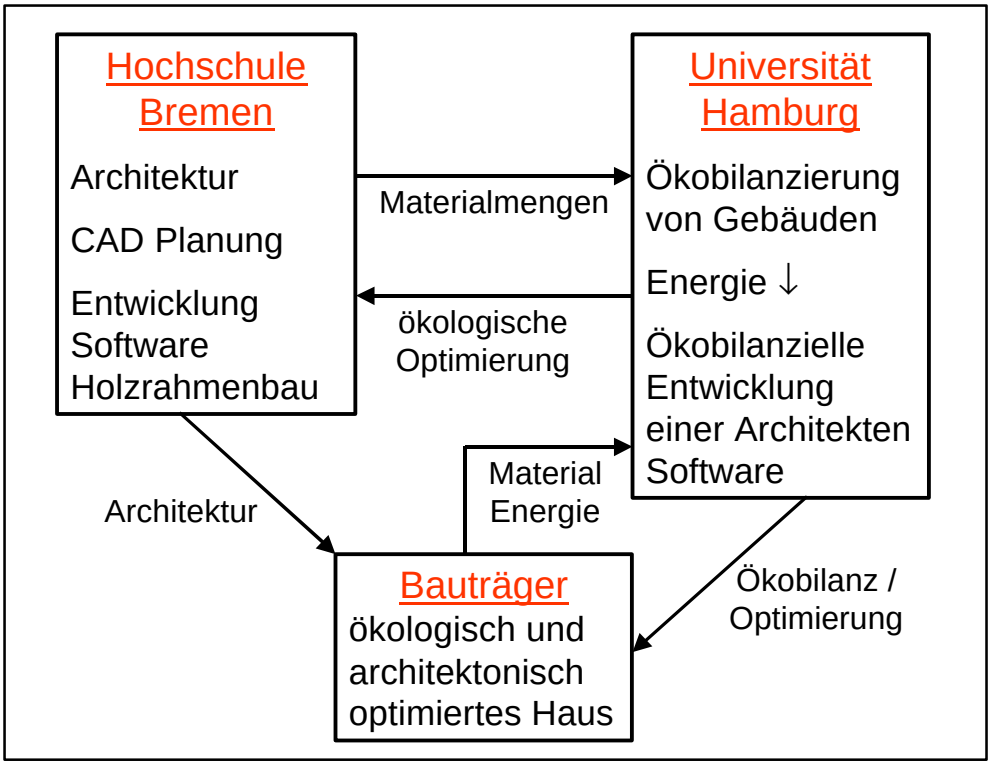


Abbildung 1: Ziel des Forschungsvorhabens „Planungsmethoden zur Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs von Wohngebäuden mit Hilfe von Ökobilanzen unter besonderer Berücksichtigung der Erzielung positiver Umweltwirkungen bezüglich des Treibhauseffektes“ und Zuordnung der Leistungen der beteiligten Forschungsinstitute

Das erwähnte Forschungsprojekt ist mit folgender Arbeitsteilung durchgeführt worden:

Die **Bremer Hochschule** hat für die ökologische Optimierung die benötigten Materiallisten zur Verfügung gestellt, welche mit CAD ermittelt wurden. Die **Hamburger Universität** erarbeitete aus diesen Listen eine ökologische Bewertung mit dem Schwerpunkt der Energieoptimierung und der Erzielung positiver Umweltwirkungen bezüglich des Treibhauseffektes. Um Aussagen hinsichtlich des Treibhauseffektes treffen zu können, mussten unter anderem die Massen aller Kohlenstoff speichernden Baustoffe ermittelt werden.

Bei den in diesem Forschungsprojekt geplanten und in dieser Arbeit berechneten Gebäuden handelt es sich um sogenannte Niedrig-Energie-Häuser; das bedeutet, der Heizenergiebedarf des Hauses ist aufgrund der Gebäudeeigenschaften (hoch gedämmter Wandaufbau, wärmebrückenreduzierte Konstruktion, Verwendung geeigneter Fenstersysteme etc.) im Verhältnis zu herkömmlichen Gebäuden reduziert. Diese Häusertypen entsprechen der momentanen Vorstellung und Förderwürdigkeit der Bundesregierung.
Der Energieaufwand bei der Herstellung der Gebäude ist in den meisten Fällen jedoch erhöht, da zusätzliche Baustoffe eingebracht und neue Konstruktionen hinsichtlich der Gebäudekennwerte angewendet werden müssen.
Es gilt, das Verhältnis von „Aufwand“ (Herstellungsaufwand des Gebäudes) und „Nutzen“ (Energieeinsparung während der Bewohnung) durch die ganzheitliche Bilanzierung zu ermitteln, um zukunftsweisende Aussagen treffen zu können.
Die **Methodik der Ökobilanz** liefert für diese Fragestellung die benötigten Daten, so dass erstmals ganzheitliche Energie- und Kohlendioxidbilanzen für Gebäude erstellt werden konnten.

Aus dem Forschungsprojekt ist am Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg eine Berechnungsgrundlage/Architektentool, vorgestellt in Teil II dieser Arbeit, entstanden.

TEIL I

Allgemeine Informationen über

- Ökobilanzen
- Holzhausbau

Einleitung

2

2. EINLEITUNG

Der Einfluss des Menschen auf das Klima der Erde wird heute wissenschaftlich, politisch und gesellschaftlich nicht mehr bestritten. Durch die zunehmende Industrialisierung seit etwa 100 Jahren hat der Mensch das Weltklima maßgeblich beeinflusst.

Die neuartigen Waldschäden, wissenschaftlich erfasst und für jeden Waldbesucher ersichtlich, sind ebenso als lokale Umweltschäden wie die Überdüngung von Gewässern zu bezeichnen. Weltweite Naturkatastrophen, wie zum Beispiel das größer werdende Ozonloch, die Erhöhung der Jahresdurchschnittstemperatur, das Schmelzen der Polkappen, die Versteppung weiter Teile der nördlichen Hemisphäre und der Anstieg des Meeresspiegels sind prognostizierte Folgen der zunehmenden, vom Menschen verursachten Emissionen von Treibhausgasen in die Atmosphäre. Kohlendioxid ist als Treibhausgas bekannt und wird mit dem Treibhauseffekt unmittelbar in Verbindung gebracht.

Der Treibhauseffekt entsteht durch die auf die Erde auftreffende relativ kurzwellige Sonnenstrahlung, die zum Teil vom Ozon in der Atmosphäre reflektiert wird. Fehlt dieses Ozon, wie z.B. beim Ozonloch, geht mehr Strahlung hindurch, was entsprechend human- und ökotoxische Wirkungen hervorruft. Die kurzwellige Sonnenstrahlung erwärmt die Erde, die Ausstrahlung sind langwellige Infrarotstrahlen, die durch bestimmte Gase in der Atmosphäre, wie z.B. Kohlendioxid (CO_2), Methan oder Wasserdampf, teilweise reflektiert werden, so dass diese Strahlungsenergie wieder auf die Erdoberfläche zurückgeschickt wird (Abbildung 2).

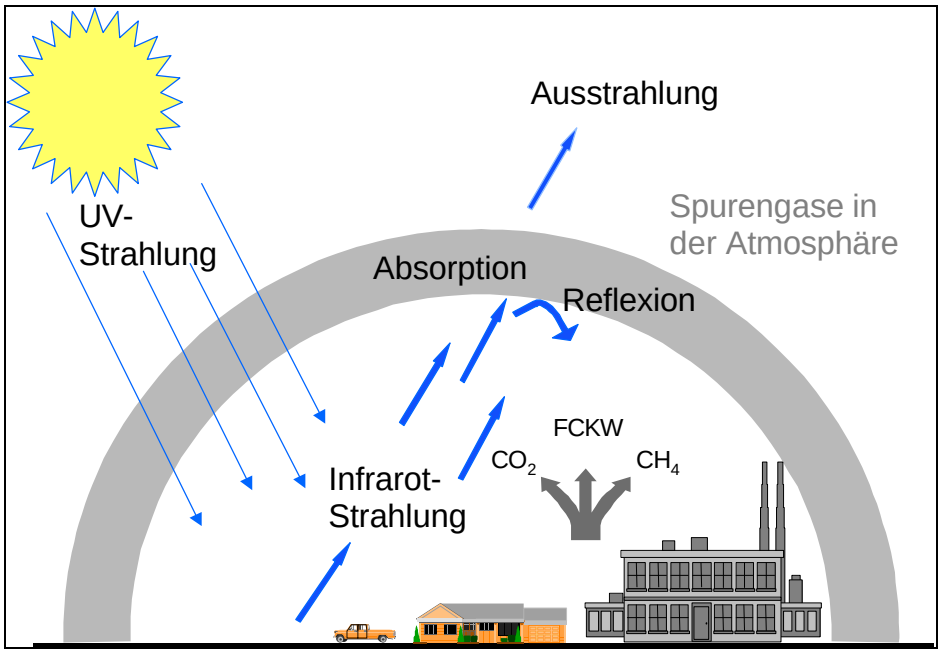


Abbildung 2: Graphische Darstellung des Treibhauseffektes [GaBi 2000]

Es kommt zu einer Erhöhung der Temperatur auf der Erde. Fachleute schätzen diese Temperaturerhöhung in den nächsten 100 Jahren auf mehrere Grad Celsius.
Eine Minderung des Treibhauseffektes kann dadurch erreicht werden, dass die schädlichen Gase in der unteren Atmosphäre, die zu einem Reflektieren der langwelligen Strahlung führen, reduziert werden. Weiteres Ziel ist es, die Konzentration ozonabbauender Substanzen in der oberen Atmosphäre zu verringern. Leitsubstanz für die Treibhausgase ist Kohlendioxid, andere Spurengase wie z.B. Methan (CH_4), Kohlenmonoxid (CO) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) werden in CO_2-Äquivalente umgerechnet.
Eine Begrenzung der Emission von Treibhausgasen ist notwendig, um die beschriebenen negativen Auswirkungen auf die Umwelt zu vermeiden.

In den letzten Jahren wurden folgende Klimaveränderungen wiederholt festgestellt [www.treibhauseffekt.com]:

- ungewöhnlich lange 'El Nino'-Warmphase von 1990 bis 1995
- Anstieg des Meeresspiegels um 10 bis 25 Zentimeter innerhalb der letzten 100 Jahre, hauptsächlich verursacht durch die Ausdehnung des Wassers aufgrund der Erhöhung der Lufttemperatur.
- Anstieg der Oberflächentemperatur in Alaska um 2 - 4° C.
- Zunahme der Luftfeuchtigkeit in den Tropen.
- Zunahme der Wolken über Land.
- Rückgang der Schneedecke in den Alpen.
- Abschmelzen der Gletscher.

Ob der Mensch für diese Naturereignisse verantwortlich ist, wird wissenschaftlich diskutiert. Ein endgültiger Beweis konnte noch nicht erbracht werden. Die erheblichen Veränderungen innerhalb kürzester Zeit werden jedoch als eindeutiges Indiz dafür bewertet.

Die Weltpolitik befasst sich schon seit geraumer Zeit mit dem Klimaschutz und den Auswirkungen von energiebedingten Emissionen auf die Umwelt.

Historisch gesehen lassen sich die politischen Bemühungen um den Klimaschutz wie folgt zusammenfassen (Tab. 1):

Tabelle 1: Zeitliche Abfolge der internationalen Klimaschutzbemühungen der Weltpolitik [www.bundesumweltamt.de und allgemeine Tagespresse]:

1977: Genf	Die erste Weltklimakonferenz erkennt die Notwendigkeit für weitere Forschungen hinsichtlich des Klimaschutzes.
1987: Villach& Bellagio	Verschiedene Klimaworkshops erarbeiten Konzepte, inwiefern das Weltklima geschützt werden kann.
1988: Toronto	Klimagipfel: Weltweite Forderung, die CO_2-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 20 % zu reduzieren. Gründung des zwischenstaatlichen Klimaexpertengremiums IPCC.
1990:	Erster IPCC Bericht belegt hohen wissenschaftlichen Konsens über anthropogene Klimaveränderung. UN-Vollversammlung setzt zwischenstaatliches Verhandlungsgremium (INC) zur Erarbeitung einer Klimarahmenkonvention ein.
1992: New York	Schlussverhandlung des INC
1992: Rio de Janeiro	Erster UN Umweltgipfel; Klimarahmenkonvention liegt bei der UN-Konferenz „Umwelt und Entwicklung“ zur Unterzeichnung aus, 154 Länder unterzeichnen. Ziel dieser Konvention ist die Stabilisierung der Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre auf ein Niveau, das eine gefährliche Störung des Klimasystems verhindert.
1994:	Klimarahmenkonvention tritt in Kraft, 50 Staaten ratifizieren die Konvention; Verpflichtung, bis 1997 ein Protokoll auszuarbeiten, um den Ausstoß von Treibhausgasen über das Jahr 2000 hinaus zu reduzieren.
1994: Berlin	1. Vertragsstaatenkonferenz: Die Klimarahmenkonvention IPCC erklärt in einem Sachstandsbericht den wahrnehmbaren Einfluss des Menschen auf das Klima.
1996: Genf	2. Vertragsstaatenkonferenz: In einer Ministererklärung wird darauf hingewiesen, dass die Ziele zur Reduzierung/Begrenzung von Treibhausgasen rechtlich verbindlich auszustatten sind.
1997: Kyoto	3. Vertragsstaatenkonferenz: Das **Kyoto-Protokoll** wird verfasst. Ziel des unverbindlichen Abkommens: Die Industrieländer müssen ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2008-2012 um durchschnittlich mindestens 5% gegenüber dem Basisjahr 1990 reduzieren.
1998: Buenos Aires	4. Vertragsstaatenkonferenz: Ein Arbeitsplan zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls wird beschlossen.

1999: Bonn	5. Vertragsstaatenkonferenz: Fortschritte bei methodischen und technischen Fragen hinsichtlich der weltweiten CO_2-Reduzierung werden erzielt.
2000: Den Haag	6. Vertragsstaatenkonferenz: Der Weltklimagipfel wird unterbrochen, da die Teilnehmerländer sich nicht auf verbindliche CO_2-Reduktionszahlen verständigen können.
2001: Bonn	Fortführung der in Den Haag gescheiterten Verhandlungen. Amerika zieht sich unter der neuen Regierung von Präsident Bush aus den Kyoto-Protokoll Verhandlungen zurück, da die Vereinigten Staaten der Meinung sind, dass Maßnahmen zur Einsparung fossiler Brennstoffe die Wirtschaft des Landes schädigen. Es wird jedoch erwartet, das die Vereinigten Staaten eigene Programme zu CO_2-Reduktionsverfahren erarbeiten, wie z.B. die Sequestrierung (Großtechnologie zur Endlagerung von CO_2 in Gesteinsschichten oder auf dem Meeresgrund). Das Protokoll von Kyoto tritt in Kraft, wenn es von mindestens 55 Ländern, die mindestens 50% der weltweiten CO_2-Emissionen verursachen, unterzeichnet wird.
2001: Marrakesch	7. Vertragsstaatenkonferenz: 180 Vertragsstaaten einigen sich über Details zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls. Die Industriestaaten sollen bis zum Jahr 2012 die CO_2-Emissionen um 5,2% gegenüber 1990 reduzieren.
2002	Die Ratifizierung des Kyoto-Protokolls und damit verbindliche CO_2-Reduktionszahlen der am Protokoll beteiligten Länder wird erwartet.

Die am Kyoto-Protokoll beteiligten Länder sind bemüht, Umsetzungsmöglichkeiten der Energieeinsparung voranzutreiben. Die im Jahr 1998 gewählte Regierung der Bundesrepublik Deutschland hat im Rahmen ihrer Zielsetzung, die Kohlendioxidemissionen zu reduzieren, unter anderem die für den Hausbau geltende Wärmeschutzverordnung (WSV) von 1995 überarbeitet.

Die neue Energieeinsparverordnung (EnEV) ist im März 2001 als Entwurf im Bundestag verabschiedet worden. Am 16. November 2001 hat der Bundesrat der Verordnung zugestimmt und am 1. Februar 2002 ist die Energieeinsparverordnung in Kraft getreten.

2.1. Energieeinsparverordnung

Nach der endgültigen Fassung der Energieeinsparverordnung (EnEV) vom 16.11.2001 wird der zulässige Heizenergiebedarf von Neubauten gegenüber dem derzeitigen Anforderungsniveau drastisch reduziert. Hauptanforderungsgröße ist der Jahres-Primärenergiebedarf.
Die Nachweise zur Einhaltung dieser Anforderungen lehnen sich an die europäische Norm DIN EN 832 ("Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden") in Zusammenhang mit der DIN V 4108-6 ("Berechnung des Jahresheizenergiebedarfs") an. Durch die Erweiterung des Bilanzierungsrahmens wird auch die Anlagentechnik (Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung) nach DIN V 4701-10 ("Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen") in das Nachweisverfahren einbezogen.
Die DIN V 4108-6 bietet zwei verschiedene Berechnungsverfahren an:

- vereinfachtes Verfahren ("**Heizperiodenverfahren**")
- genaueres Verfahren ("**Monatsbilanzverfahren**").

Gegenüber dem Heizperiodenverfahren bietet das Monatsbilanzverfahren den Vorteil genauerer Ergebnisse (z.B. durch Berücksichtigung der Wärmespeichereffekte) und der Anwendbarkeit für alle Gebäudearten, die nach EnEV die Anforderungen an den Wärmeschutz erfüllen müssen.
Der Aufwand der Erstellung der geforderten Verfahren ist jedoch sehr groß, so dass aufgrund des hohen Rechenaufwandes beide Nachweisverfahren sinnvoll nur mit EDV-Unterstützung durchgeführt werden können.
Grundsätzlich wird angestrebt, dass die neue Energieeinsparverordnung die Anforderungen der alten WSV von 1995 um ca. 30% unterschreitet. Hierdurch werden transmissionsbedingte CO_2-Emissionen verringert, was wiederum einen positiven Effekt auf den Ausstoß von Treibhausgasen erzielt. Als gravierende Änderung kann der für Neubauten geltende Energieeinsatz für die Nutzung des Gebäudes angesehen werden. In der WSV von 1995 wurde ein Heizenergiebedarf von ~110 kWh/m²Jahr festgelegt. Die geplante EnEV reduziert diesen Wert um 30 % auf ~75 kWh/m²Jahr. Der Niedrigenergiestandard bestimmt einen Heizenergiebedarf von ~50 kWh/m²a.
Jeder seit dem Inkrafttreten der EnEV geplante Neubau muss rechnerisch diesen Wert erfüllen. Dieser Richtwert ist nicht bauartengebunden, das bedeutet, sowohl massiv gebaute Häuser als auch Holzhäuser müssen den Wert erreichen, indem der Nutzungsenergiebedarf reduziert oder auf niedrigem Niveau beibehalten wird.
Ein wesentlicher Unterschied zur WSV ist darin zu sehen, dass die EnEV den **Primärenergiebedarf** des Hauses während der Nutzung berechnet.

Die WSV von 1995 hat als Berechnungsgrundlagen den **Heizenergiebedarf** angesehen. Die Deckung dieses Heizenergiebedarfs konnte durch beliebige Energieträger durchgeführt werden. Die EnEV berechnet den Primärenergiebedarf während der Nutzung. Der verwendete Energieträger zur Deckung des Heizenergiebedarfes wird folglich in die Gebäudeberechnung mit einbezogen. Das bedeutet, dass Gebäude, die mit Energieträgern günstigerer Wirkungsgrade beheizt werden, Vorteile in dem Berechnungsverfahren aufweisen.
Diese Tatsache ermöglicht dem Bauherren zwei verschiedene Vorgehensweisen in der Planung:

- Bessere Isolierung des Gebäudes durch mehr Dämmstoff oder
- Verwendung besserer Heizungsanlagen

Beide Verfahren führen zu dem Ergebnis, den Primärenergiebedarf während der Nutzung zu reduzieren.
Entscheidet der Bauherr sich für die Verwendung von besseren Wandkonstruktionen, so müssen durch konsequente Isolierung des Gebäudes die Wärmeübergänge von innen nach außen reduziert werden. Die Heizenergie wird hierdurch reduziert. Weitere Energiesparmöglichkeiten im Hausbau können in dem Kapitel 4 dieser Arbeit nachgelesen werden.
Für den Holzhausbau bietet die neue Energieeinsparverordnung vielfältige Möglichkeiten: Es ist es im Holzbau mit relativ geringem konstruktiven Aufwand möglich, den Energieeinsatz während der Nutzung zu reduzieren.

Kritisch muss jedoch betrachtet werden, dass die neue Energieeinsparverordnung sich hauptsächlich auf den Nutzungsenergiebedarf fokussiert.
Diese nur auf die Bewohnung/Nutzung des Hauses ausgerichtete Betrachtung von Energieeinsparungsmöglichkeiten ist mit der Entwicklung von sogenannten Passivenergiehäusern und Nullenergiegebäuden an ihre Grenzen geraten. Die möglichen weiteren Reduzierungen im Bereich der Betriebsenergie werden in den meisten Fällen mit einem hohen Aufwand an Herstellungsenergie des Hauses erzielt. Es hat sich in der Vergangenheit herausgestellt, dass Häuser, die besonders wenig Energie in der Nutzungsphase verbrauchen, sogenannte Passivhäuser, sehr energieaufwendig hergestellt werden. Das begründet sich in dem aufwendigen, da wärmebrückenfreien und mit sehr viel Dämmmaterial gefüllten Wandaufbau, dem vermehrten Einsatz von Metall für zwischengehängte Decken, den technischen Anlagen für eine kontrollierte Be- und Entlüftung und vieles mehr.

Eine grundlegende Änderung ist nur möglich, wenn der Gesamtenergiebedarf, d.h. der Energiebedarf für die Herstellung der Baustoffe, die Produktion des Hauses, den Betrieb über einen bestimmten Zeitraum und die Entsorgung, erfasst und minimiert wird.

Diese ganzheitliche Betrachtung wird unter anderem in Ökobilanzen angestrebt und ist in ISO/EN/DIN 14040 ff. festgeschrieben. Ziel in der Zukunft muss es sein, dass jedes Gebäude gesamtheitlich optimiert wird und die verwendeten Baumaterialien bestimmte, in Zukunft zu definierende Kriterien erfüllen. Bundesumweltminister Trittin unterstützt die Aussage, dass die Baumaterialien in Zukunft an Bedeutung gewinnen [Öko Test/Energie, 2000].

Die umfassende Nachhaltigkeit des Hauses kann und muss als wichtiges Kaufkriterium angesehen werden, da nur auf diese Weise die tatsächlichen umweltbeeinflussenden Faktoren von Gebäuden erfasst werden können. Diese ganzheitliche Betrachtung muss auch den am Bau Beteiligten vermittelt werden.

Holzhäuser besitzen gesamtheitlich gesehen erhebliche Vorteile.
Die Forstwirtschaft und die Holzbearbeitung sowie die Herstellung der Baustoffe ist jeweils nur mit einem geringen Energieaufwand verbunden. Holz weist ein sehr gutes Dämmverhalten auf, die Nutzungsenergie kann folglich durch geeignete Wandkonstruktionen minimiert werden. Nach der Nutzung des Hauses kann Holz in weiteren Produkten weiterverwertet werden (Herstellung von Holzwerkstoffen und Dämmmaterialien) oder es kann thermisch verwertet werden. Auf diese Weise können fossile Energieträger wie Erdöl, Erdgas oder elektrische Energie substituiert und Kohlendioxidemissionen minimiert werden.
Ein weiterer Vorteil von Holz, dessen Einbeziehung in das Kyoto-Protokoll momentan diskutiert wird, ist seine Kohlendioxidneutralität gegenüber anderen Baustoffen. Während des Wachstums der Bäume wird der Atmosphäre Kohlendioxid entzogen. Der darin enthaltene Kohlenstoff wird durch die Photosynthese im Holz bzw. der Biomasse eingelagert. Es kommt zu einer Speicherung des Kohlenstoffes über den gesamten Lebensweg des Holzes; erst als Baum im Wald, anschließend als Vollholz, Holzwerkstoff oder Dämmmaterial im Haus und in Möbeln.
Das bedeutet, dass durch die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen, hier von Holz, der Umwelt das Treibhausgas Kohlendioxid über einen gewissen Zeitraum entzogen wird und nicht zum Anstieg des Treibhauseffektes beiträgt. Diese Tatsache wird in Anbetracht des Kyoto-Protokolls (Einberechnung von Holz als Kohlenstoffsenke in die angestrebten Einsparpotentiale der Bundesregierung) in näherer Zukunft starke Bedeutung erfahren. Die Speicherung von Kohlenstoff im Wald ist gemäß IPCC honoriert worden, die Speicherung von Kohlenstoff in Holzprodukten noch nicht.
Die Verwendung von Holz im Bauwesen ist folglich gesamtheitlich mit positiven Umweltwirkungen verbunden und wird unter anderem auch aus diesem ökologischen Grund in Zukunft vermehrt Beachtung finden.

Die Bundesregierung hat bis zum Jahr 2000 den Bau von Niedrigenergiehäuser unterstützt. Diese Förderung verschiebt sich zunehmend in Richtung Passivenergiehaus.
Ein zusätzliches Ergebnis dieser Forschungsarbeit ist die Erkenntnis, ob die Bundesregierung mit der Förderung von Passivhäusern tatsächlich die Häuser unterstützt, die gesamtenergetisch die geringste Energie verbrauchen oder ob die Fokussierung auf die Nutzungsphase der Gebäude durch die EnEV sich als gesamtenergetisch negativ erweist.

Die vorliegende Arbeit beschreibt erstmals eine ökologische Bewertung hinsichtlich der Energiebilanz und Kohlendioxidemissionen von Wohngebäuden. Als Weiserwerte für diese Untersuchung werden die benötigten Energiemengen und die Emission des Treibhausgases CO_2 eines Hauses über den gesamten Lebensweg betrachtet.

2.2. Holzbau

Holz als Baustoff hat eine lange Tradition. 500 Jahre alte Holzhäuser zeugen davon, dass unsere Vorfahren den nachwachsenden Roh- und Werkstoff Holz mit dem nötigen Fachwissen eingesetzt haben. Holz war schon zu früherer Zeit mit einfachen Werkzeugen leicht zu bearbeiten, das Vorkommen war gesichert.
Der Wunsch nach besonders preiswerten Wohneinheiten und die Erfüllung dieses Verlangens durch die Holzhausindustrie in den 50er und 60er Jahren hat in dieser Zeit das Image des Holzhauses schwer geschädigt. Bauschäden und ein als schlecht bezeichnetes Wohnklima waren mit jenen Gebäuden verbunden. Gegen das aus dieser Zeit resultierende „Barackenimage“ eines Holz- und Fertighauses haben die Haushersteller seit jener Zeit anzukämpfen.
Eine Trendwende ist seit etwa 20 Jahren zu spüren. Die Verwendung von Holz im Bauwesen erfährt eine Renaissance. Aufgrund verbessertem Know-how der Holzhaushersteller in den Bereichen Konstruktion und Ausführung und einer verstärkten Konkurrenzsituation auf dem Markt hat sich die Qualität der Häuser verbessert, die Kosten sind konkurrenzfähig und das Image der Produkte ist deutlich positiver geworden.

2.2.1. Stand der Technik

Der Holzbau kann grob in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- den Holzrahmenbau und
- den Vollholzbau.

Im **Holzrahmenbau** werden „Fertighäuser“ und „Zimmermeisterhäuser“ unterschieden. Konstruktiv gibt es keine großen Unterschiede, lediglich der Vorfertigungsgrad bestimmt die Einteilung. Fertighäuser werden im Werk komplett vorgefertigt, die Türen und die Fenster sind in der Wand eingebaut. Die Bauelemente werden auf der Baustelle in kurzer Zeit zusammengesetzt. Zimmermeisterhäuser werden ebenfalls im Werk vorgefertigt, jedoch ist der Vorfertigungsgrad deutlich geringer. In der Regel wird nur die nach außen geschlossene Wand zur Baustelle gebracht, der Weiterausbau geschieht vor Ort. Holzrahmenhäuser werden mit einem Grundgerüst aus Holzständern errichtet, die Ständer werden zu beiden Seiten beplankt, der freie Wandinnenraum wird mit Dämmung ausgefüllt. Konstruktiv und energetisch gibt es keine Unterschiede zwischen Fertighäusern und Zimmermeisterhäusern.
Der **Vollholzbau** setzt entweder Rundholz oder übereinandergelegtes und miteinander verbundenes Balkenholz als Wand ein, die aus Energiespargründen nach innen mit einer

Beplankung versehen werden kann. Diese Häuser weisen ein höheres Grundgewicht mit den damit verbundenen positiven Eigenschaften auf (verbesserter Schallschutz, massive Bauart, etc.). In den meisten Fällen ist die Produktion jedoch noch sehr manuell, die Anzahl der produzierten Häuser viel geringer als im Ständerbau.
Ein energetischer und konstruktiver Vergleich der gängigen Bausysteme ist dem Kapitel 4.4 zu entnehmen.

2.2.2. Marktsituation

Der Anteil der Holzhäuser am deutschen Ein- und Zweifamilienhausbau, aber auch am Objektbau, hat in den letzten Jahren zugenommen [Bundesverband Deutscher Fertigbau, 2001]. Die absoluten und prozentualen Baugenehmigungszahlen der letzten Jahre sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Baugenehmigungszahlen von Ein- und Zweifamilienhäusern in Holzbauweise [Bundesverband Deutscher Fertigbau, Klaas, 2001, Lignacon, 1998, statistisches Bundesamt]

	1995	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**
Fertigbau [1)]	13.600	14.200	14.700	15.000	15.400	10.500[4)]	9.000[6)]
Zimmerer [2)]	2.217	3.777	8.625	10.161	11.000	9.516[5)]	8.000[6)]
Import	2.005	2.130	2.155	2.300	2.500	2.000	1.600[6)]
Sonstige [3)]	2.681	2.697	2.224	3.789	3.066	2.247	1.800[6)]
Holzhausbau gesamt	**20.583**	**22.804**	**27.704**	**31.250**	**31.966**	**24.263**	**20.779**
Hausbau gesamt:	**168.755**	**178.572**	**194.693**	**210.910**	**215.772**	**179.170**	**162.223**
Holzhausanteil in %	**12,2**	**12,8**	**14,2**	**14,8**	**14,8**	**13,7**	**12,8**

1) Mitgliedsunternehmen des Bundesverbandes Deutscher Fertigbau (BDF)
2) Handwerklicher Zimmermannsbau, Kleinbetriebe und Zimmermeisterhaus
3) Blockhäuser, sonstige Massivhäuser aus Holz und nicht zu den anderen Kategorien zuzuordnende Baugenehmigungen
4) Schätzung; der BDF gibt Baugenehmigungszahlen für die Holzfertigbauweise von 12.440 Einheiten an.
5) Schätzung; die Zimmerer geben Baugenehmigungszahlen von 13.200 an.
6) Schätzungen, da die Baugenehmigungszahlen für die einzelnen Sektoren nicht erhältlich sind. Die Gesamtzahlen entsprechen der Realität.

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass in den Jahren bis 1999 im Bereich des Ein- und Zweifamilienhausbaus ein starkes Wachstum herrschte. Hervorzuheben ist der starke Anstieg der sogenannten Zimmermannshäuser, deren Zahl sich im Jahr 1997 verdoppelte und eine ernst zunehmende Konkurrenz für den hoch industrialisierten und organisierten Fertigbau darstellt. Grund dieser Entwicklung ist in der räumlichen Nähe der Zimmereibetriebe zu den Käufern zu sehen. Dem regionalen Zimmermann wird mehr Vertrauen durch den Käufer entgegen gebracht, da er sich vor Ort befindet und an dem regionalen Leben teilnimmt.

Die Fertighausindustrie ist in der Regel mit Musterhauszentren in den Ballungsgebieten vertreten, die Käufer von Holzhäusern nutzen diese Musterhäuser jedoch häufig nur zur Information, der Erstellungsauftrag wird zunehmend an regionale Betriebe vergeben. Der Fertighausindustrie ist diese Entwicklung nicht entgangen, eine geeignete Marketingkampagne wird von den einzelnen Fertighausherstellern erwartet.

Die Tabelle 2 verdeutlicht den prozentualen Anteil der einzelnen Bauarten an dem Gesamtanteil aller Baugenehmigungen in Deutschland in den letzten Jahren.

Innerhalb Deutschlands stellt sich die positive Entwicklung des Holzhausbaus unterschiedlich dar. Die neuen Bundesländer besitzen einen prozentualen Holzhausanteil von ca. 19 % an den Baugenehmigungen im Neubau. In den alten Bundesländern ist dieser Anteil deutlich geringer, er liegt momentan bei ca. 13%.

Die negative Entwicklung des Bausektors seit dem Jahr 2000 geht auch an der Holzhausbranche nicht vorbei. Die Anzahl der Baugenehmigungen im Holzbau geht seit dem Jahr 1999 um durchschnittlich ca. 25% zurück.

Den deutschen Markt und die damit verbundene Produktion von ~30.000 Ein- und Zweifamilienhäusern teilen sich verschiedene Holzbauunternehmen untereinander auf. Die einzelnen Unternehmen produzieren, abhängig von der Fertigungsstruktur, zwischen 2 (Handwerksbetrieb) und 2.000 (großer Fertighausproduzent) Häuser pro Jahr. Ein Marktführer existiert insofern nicht, da alle Hersteller gewisse Marktsegmente und unterschiedliche Regionen abdecken. Die großen Fertighaushersteller (Produktionsmenge >500 Einheiten) bearbeiten den gesamtdeutschen Markt und treten untereinander in Konkurrenz.

Die kleinen Anbieter (Produktionsmenge <100 Einheiten) operieren überwiegend regional.

Einigen wenigen Firmen ist es gelungen, trotz einer recht kleinen Jahresproduktionsmenge von ~100 Wohneinheiten europaweit Häuser zu vertreiben. Grund für dieses europaweite Betätigungsfeld ist in der angestrebten Käuferschicht zu sehen. Diese Firmen vertreiben in der Regel architektonisch und preislich hochwertige Gebäude.

Viele regional angebotene Häuser können als Nischenprodukte für spezielle Käufergruppen angesehen werden, die häufig ein **ökologisches Haus** erwerben möchten.

Auffallend ist, das der Begriff ökologisches Haus momentan von fast jedem Haushersteller in Werbebroschüren für das eigene Produkt in Anspruch genommen wird. Einige große Fertig-

haushersteller entwerfen neue Produktlinien, die den ökologischen Kunden anvisieren. Momentan werden jedoch nur wenige Häuser dieses Nischenproduktes pro Jahr produziert.
Die Definition des Begriffes „ökologisch“ bleibt in der Regel dem Verbraucher verborgen. Tatsache ist jedoch, dass dieser das Wort ökologisch mit positiven Assoziationen verbindet. Ein ökologisches Haus entspricht folglich den Wünschen des Käufers nach Naturverbundenheit und Naturschonung, Wohnkomfort und anderen für den Nutzer angenehmen Eigenschaften. Generell erwartet der Käufer eines Ökohauses, dass das Gebäude aus umweltverträglichen und baubiologisch unbedenklichen Baustoffen hergestellt wurde.
Weitergehend wird gefordert, dass mit dem Haus keine negativen Auswirkungen auf den Bewohner oder die Umwelt verbunden sind. Umweltverträgliche und baubiologisch unbedenkliche Baustoffe sind weitestgehend frei von Schadstoffemissionen, denen der Bewohner während der Nutzung des Hauses ausgesetzt sein würde. Schadstoffemissionen führen zur Einschränkung der Wohnqualität und können generell und besonders im ökologischen Hausbau nicht toleriert werden. Naturbelassenes Holz als Baustoff ist frei von Schadstoffemissionen[1] und kann als für den Menschen verträglicher Baustoff angesehen werden.

Unter „umweltverträglich“ muss jedoch auch verstanden werden, dass das Endprodukt, in diesem Fall das Gebäude, der Umwelt über den gesamten Lebensweg weniger „Schaden“ zufügt, als nicht ökologische Häuser.
Der gesamte Lebensweg beinhaltet die Herstellung des Hauses, die Nutzung, aber auch die Entsorgung des Hauses nach der Nutzungsphase.
Schaden für die Umwelt resultiert beispielsweise durch den vermehrten Einsatz von Energieträgern zu Heizzwecken während der Nutzung. Durch den Einsatz von fossilen Energieträgern wird Kohlendioxid an die Umgebung abgegeben. Eine Reduzierung der im privaten Bereich verwendeten Energie führt zu einer Entlastung der Umwelt und muss folglich Ziel des ökologischen Hausbaus sein.
Ökonomisch können Holzhäuser durchaus als konkurrenzfähige Produkte bezeichnet werden. Die industrielle Herstellung, verbunden mit der termingerechten Errichtung der Häuser und einem Preis von € 850,- bis € 1.500,- pro m² Wohnraum (nach oben ist die Skala auch im Holzbau offen), kann als zusätzliche Kaufentscheidung betrachtet werden.

[1] Harzhaltige Nadelhölzer wie z.B. die Kiefer geben Terpene an die Umgebung ab. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um einen Schadstoff; es kann vereinzelt aber zu allergischen Reaktionen kommen.

Ökobilanzen in der Holzwirtschaft

3

3. ÖKOBILANZEN IN DER HOLZWIRTSCHAFT

„Ökologische Aspekte gewinnen für die Gestaltung und die Herstellung von Produkten immer größere Bedeutung.
Produkte aus Holz besitzen ein sehr gutes ökologisches Profil, weil es sich um einen nachwachsenden Rohstoff handelt, zu ihrer Herstellung wenig Energie benötigt wird, nur geringe Emissionen auftreten, während der Verwendung Kohlendioxid gespeichert wird und die Produkte nach Gebrauch energetisch verwertet werden können“ [Frühwald, 2001].

3.1. Hintergrund

Ökobilanzen oder Lebens-Zyklus-Analysen ermöglichen dem Verbraucher eine neue Sicht der Betrachtung. Die im Bauwesen bisher übliche sektorale Betrachtung (der Fokus liegt auf dem Energieeinsatz während der Nutzungsphase) weicht zunehmend einer Bilanzierung über den gesamten Lebensweg.
Das Haus wird von der Herstellung der Einzelelemente bis hin zu der Entsorgung des Gebäudes nach einem bestimmten Nutzungszeitraum ökologisch betrachtet und bewertet. Hierdurch wird ein sehr gutes Verständnis der verschiedenen Einflussgrößen untereinander im Hausbau ermöglicht.
Eine Optimierung der Gebäude kann auf diese Art und Weise gezielter, detaillierter und vor allem fundierter durchgeführt werden, da für jeden Bauabschnitt des Gebäudes Daten ermittelt werden.
Häuser bestehen aus einer Vielzahl verschiedener Baustoffe. Unterschiedliche ökologische Daten und Einflüsse müssen verbunden und über den gesamten Lebensweg dargestellt werden.
In einer Ökobilanz müssen für jeden Lebensabschnitt Daten erhoben werden. Auf diese Weise kann eine ganzheitliche Betrachtung stattfinden. Für eine Optimierung des Produktes und eine eventuelle spätere Zertifizierung oder ähnliches liefert die ganzheitliche Betrachtung wichtige Daten.

Der Lebensweg eines Hauses wird in der Abbildung 3 graphisch dargestellt.

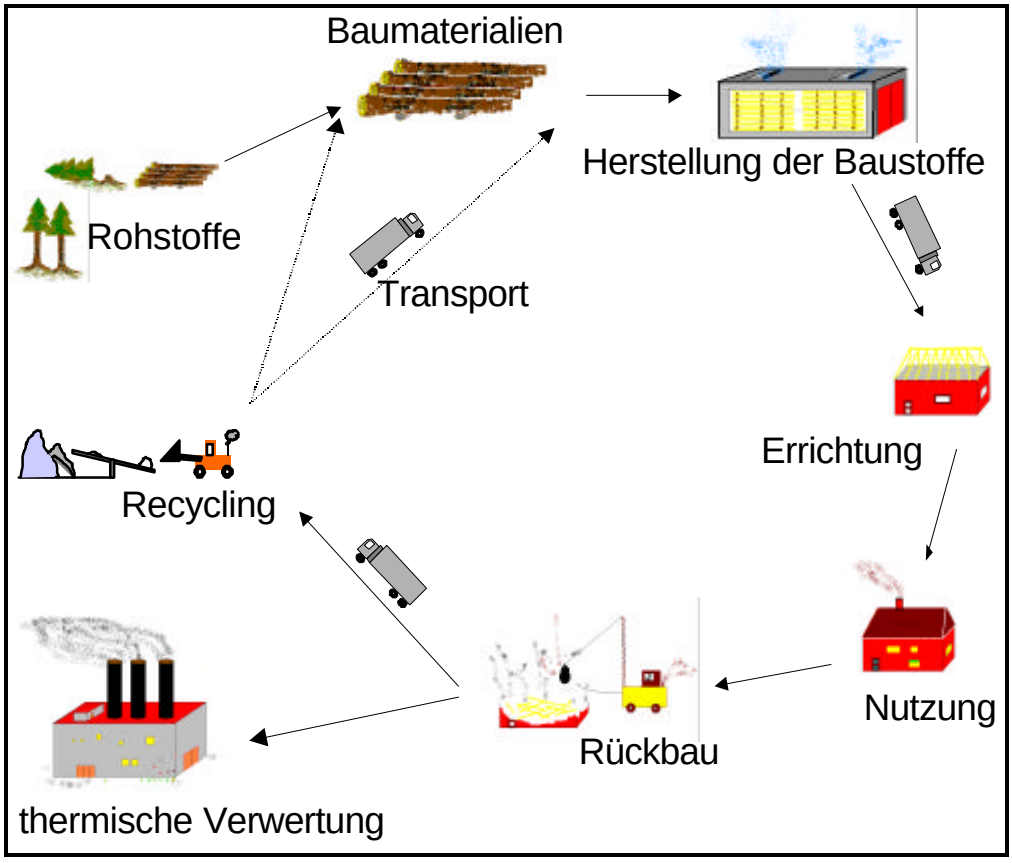


Abbildung 3: Lebensweg eines Gebäudes; von der Wiege (Rohstoffe) bis zur Bahre (thermische Verwertung) oder im Idealfall wieder zur Wiege (Recycling und Baumaterialien) [Cliparts: Bäumle, 1999]

Ökobilanzen werden von Unternehmen für eine gezielte Schwachstellenanalyse und die Verfahrensoptimierung verwendet, Wirtschaftsverbände und Betriebe nutzen sie als Marketinginstrument. Der informative und aufklärende Charakter einer Ökobilanz ist auch für Verbraucherverbände von großer Verwendbarkeit. Letztendlich geben auch Ministerien und Behörden Ökobilanzen in Auftrag, um politische Entscheidungen und Strategien auf ein wissenschaftliches Fundament zu stellen. Für die immer populärer werdende Ökozertifizierung leisten Ökobilanzen wichtige Vorarbeit.

Ökobilanzen sind seit dem Jahr 2000 durch die ISO Norm 14040 ff. in ihrem Aufbau, der Verwendung und im Allgemeinen definiert.

Folgende Normen für die Ökobilanzierung werden unterschieden:

DIN ISO EN	14.040	Ökobilanz, Prinzipien und allgemeine Anforderungen
	14.041	Umweltmanagement – Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz
	14.042	Umweltmanagement – Ökobilanz – Wirkungsbilanz
	14.043	Umweltmanagement – Ökobilanz – Auswertung

Momentan befindet sich die zukünftige Norm

14.048 Datendokumentationsformat

im sogenannten Draftstadium (Entwurfsstadium).

Die 14.049 (Beispielhafte Erläuterungen zur Anwendung von ISO 14.041 – Ökobilanz – Festlegung des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanzierung) liegt als Technical Report vor.

Trotz dieser detaillierten Normierung befindet sich die Erstellung von Ökobilanzen immer noch in Kinderschuhen und vergleichbare bzw. vergleichende Ökobilanzen sind bisher selten zu finden. Im Folgenden wird auf drei Institutionen bezüglich der Definition einer Ökobilanz verwiesen, die sich intensiv mit dem Thema Ökobilanz und deren Erstellung/Durchführung auseinandergesetzt haben.

Die **EN ISO 14040** definiert eine Ökobilanz folgendermaßen:

Die Ökobilanz ist eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potentiellen Umweltwirkungen, durch

- Zusammenstellung einer Sachbilanz von relevanten Input- und Outputflüssen eines Produktsystems;
- Beurteilung der mit diesen Inputs- und Outputs verbundenen potentiellen Umweltwirkungen;
- Auswertung der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungen hinsichtlich der Zielsetzung der Studie

Das **Umweltbundesamt** (1992) definiert wie folgt: „Unter Ökobilanzen ist ein möglichst umfassender Vergleich der Umweltauswirkungen zweier oder mehrerer unterschiedlicher Produkte, Produktgruppen, Systeme, Verfahren oder Verhaltensweisen zu verstehen.

Sie dient dem Offenlegen von Schwachstellen, der Verbesserung der Umwelteigenschaften der Produkte und als Entscheidungsgrundlage für die Beschaffung und den Einkauf. Je nach der zugrundeliegenden Fragestellung wird dieser Vergleich um weitere Aspekte ergänzt, z.B. eine Beurteilung der Umweltschutzeffizienz finanzieller Mittel.“

Frühwald (Vorsitzender des Managementkomitee der COST Action E9[2]) vom Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg und dem Institut für mechanische Technologie des Holzes der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft setzt folgende Kriterien für produktbezogene Ökobilanzierung fest: „Ökobilanzen sind Instrumente zur Abschätzung der Umweltkriterien entlang des Lebensweges eines Produktes, d.h. von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, Nutzung, Wieder- und Weiterverwendung bis zur Entsorgung. Sie haben die Aufgabe, die mit Produkten in Verbindung stehenden Wirkungen auf die Umwelt zu erfassen, transparent aufzuarbeiten und zu bewerten."

3.2. Wie erstellt man eine Ökobilanz?

In der Ökobilanz werden ökologisch relevante Daten über den gesamten Lebensweg des Produktes erhoben und bewertet.
Die Vorgehensweise für eine Ökobilanz kann vereinfacht wie folgt dargestellt werden [Frühwald et al., 2001]:

1. Für das zu betrachtende Produkt (oder den Prozess) wird der Bilanzraum festgelegt, d.h. der Lebensweg (-abschnitt) wird definiert und es wird festgelegt, welche Daten erhoben werden sollen.
2. Die umweltrelevanten Daten werden erhoben; üblicherweise für Materialien und Energien (Stoff- und Energiebilanzen). Die Emissionen in die Luft, den Boden und das Wasser, sowie die Haupt- und Nebenprodukte werden erhoben („Sachbilanz").
3. Die Daten werden gruppiert in sogenannte Wirkungskategorien wie Treibhauspotential, Versauerung usw.. Die Wirkungen werden in Potentialen angegeben, für den Treibhauseffekt z.B. in kg CO_2-Äquivalenten („Wirkungsbilanz").
4. Die Wirkungspotentiale werden bewertet und Folgerungen, z.B. für Verbesserungen, werden abgeleitet.

Für die immer populärer werdende Umweltzertifizierung von Betrieben leisten Ökobilanzen wichtige Vorarbeit.
Ökobilanzen können für Produkte (produktbezogene Ökobilanz), für einzelne Produktionsprozesse (Prozessbilanzen) oder für ein ganzes Unternehmen (betriebliche Ökobilanz) er-

[2] Die europäische Arbeitsgruppe COST Action E9 (Life Cycle Assessment of Forestry and Forest Products) hat sich mit methodischen und technischen Fragestellungen bei der Durchführung von Ökobilanzen beschäftigt. Die COST Action ist im September 2001 ausgelaufen, ein Schlussbericht wird erwartet.

stellt werden. Obwohl es in Teilbereichen Überschneidungen gibt, wird die produktbezogene Ökobilanz aufgrund der Ausgangsfragestellung, welche Umweltwirkungen sind von diesem speziellen Produkt zu erwarten, von den anderen Bewertungsverfahren getrennt. Eine Ökobilanz bewertet, wie z.B. die Produktlinienanalyse, keine ökonomischen, sozialen, entwicklungs- oder gesellschaftspolitischen Aspekte. Ökobilanzen sind in der Regel in starkem Maße auf spezielle Produkte, wie z.B. die Herstellung einer Spanplatte, eines Hauses oder ähnliches ausgerichtet. Laut ISO 14040 besteht eine Ökobilanz immer aus den folgenden Teilen:

- der Zieldefinition
- der Sachbilanz
- der Wirkungsabschätzung
- der Interpretation der Ergebnisse.

Abbildung 4 stellt die Bestandteile einer Ökobilanz graphisch dar [ISO 14040, Ökobilanz, Prinzipien und allgemeine Anforderungen].

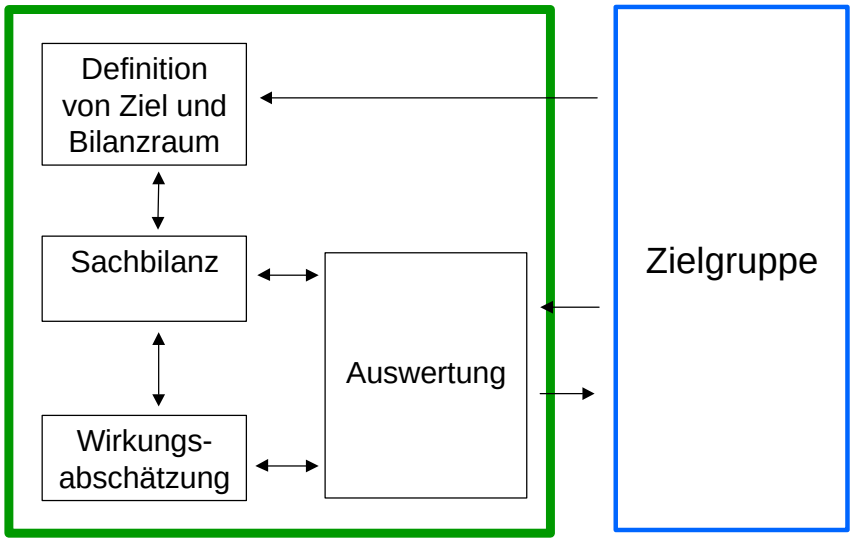


Abbildung 4: Bestandteile einer Ökobilanz [DIN ISO 14.040]

Die Zielgruppe der Ökobilanz nimmt einen wichtigen Stellenwert der Betrachtung ein. Sie spiegelt das Interesse an der Ökobilanz wieder. Die Zielgruppe muss in der allgemeinen Beschreibung der Ökobilanz definiert werden.

3.2.1. Definition von Ziel und Bilanzraum

Bei der Zieldefinition handelt es sich um einen Definitionsbereich, der am Anfang einer Ökobilanz beschrieben werden muss. Hierbei wird der Anwendungsbereich, das Ziel bzw. der Zweck der Untersuchung, das sogenannte Erkenntnisinteresse und die Zielgruppe näher definiert. Das Bilanzsystem wird von seiner Umgebung abgegrenzt. Die räumlichen und zeitlichen Grenzen der Ökobilanz werden beschrieben. Die Abgrenzung des Bilanzraumes muss so gewählt werden, dass die Ökobilanz einerseits verständlich ist und andererseits den sachlichen Ansprüchen genügt. Eine allumfassende Ökobilanz zu erstellen ist aufgrund der komplexen Wirtschaftsstruktur nicht möglich, deshalb müssen Ausschlusskriterien definiert und bestehende Voraussetzungen, z.B. welche Vorgänge unberücksichtigt bleiben, erläutert werden. Im Rahmen der Zieldefinition wird das zu untersuchende Projekt beschrieben und die funktionale Einheit festgelegt. Die funktionale Einheit ist die leistungs- und nutzenbezogene Basis, auf die sämtliche Daten bezogen werden. Zum Beispiel könnte als funktionale Einheit 1 m³ Bauholz, 1m³ umbauter Raum, die Produktion eines Standardfensters oder die Errichtung eines Dachstuhls angesehen werden.
Die entwickelte und in Teil II vorgestellte Berechnungsgrundlage definiert als funktionale Einheit einen „**Rohstruktur des Hauses mit gewissen Ausbaustufen[3]“**.

3.2.2. Sachbilanz

Die Sachbilanz wird im internationalen Sprachgebrauch als „Life Cycle Inventory“ bezeichnet. Sie bildet die Datengrundlage einer Ökobilanz. Hier werden die Stoff- und Energieflüsse als Input- Outputgrößen in Form einer Bilanz zusammengestellt. Eine Sachbilanz umfasst den gesamten Lebensbereich des Produktes.
Die Redewendung „von der Wiege bis zur Bahre“ und im Fall der Weiterverwendung „von der Wiege bis zur Wiege“ wird dafür verwendet. Das bedeutet, dass alle Lebensabschnitte von der Rohstofferschließung über die Produktion und den Gebrauch bis zur Entsorgung/Verwertung einschließlich der dazwischenliegenden Transporte berücksichtigt werden. Man spricht bei diesen Abschnitten von Lebensphasen des Produktes.
Eine Ökobilanz ist modular aufgebaut. Ein Modul ist die kleinste Einheit, für die Daten erhoben werden. Ein oder mehrere aufeinanderfolgende Module bilden eine Lebensphase. Der Vorteil des modularen Aufbaus ist die Überschaubarkeit der Datenmenge und die Aktualisierung zu gegebenem Zeitpunkt. Jedes Modul kann separat bearbeitet werden, damit bleibt der untersuchte Bilanzraum überschaubar.

[3] Die berechneten Ausbaustufen werden in dem Kapitel 5.4 beschrieben.

Treten zum Beispiel Unterschiede in der Verarbeitungstechnik auf, so können einzelne Module ausgetauscht werden. Innerhalb der Module können Untereinheiten festgelegt werden. Man spricht hier von dem Begriff Submodul. Submodule beleuchten Teile eines Moduls, so kann z.B. das Modul „Sägewerk“ in die Submodule „Schnittholzherstellung“ und „Schnittholztrocknung“ unterteilt werden. Hierdurch erhält das Modul „Sägewerk“ mehr Transparenz.
In der Ökobilanzierung von Gebäuden kann beispielsweise das Modul Herstellung in die Submodule der verschiedenen Baustoffe unterteilt werden. Diese Submodule werden zusammengefügt und ergeben einen transparenten Einblick in das Modul Herstellung.
In der Sachbilanz werden alle umweltbeeinflussenden Faktoren festgestellt und quantifiziert. Hierbei handelt es sich um den Verbrauch von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, den Energieeinsatz, die Boden, Wasser und Luft belastenden Emissionen und weitere quantifizierbare Daten.
Abbildung 5 verdeutlicht den modularen Aufbau einer Ökobilanz.

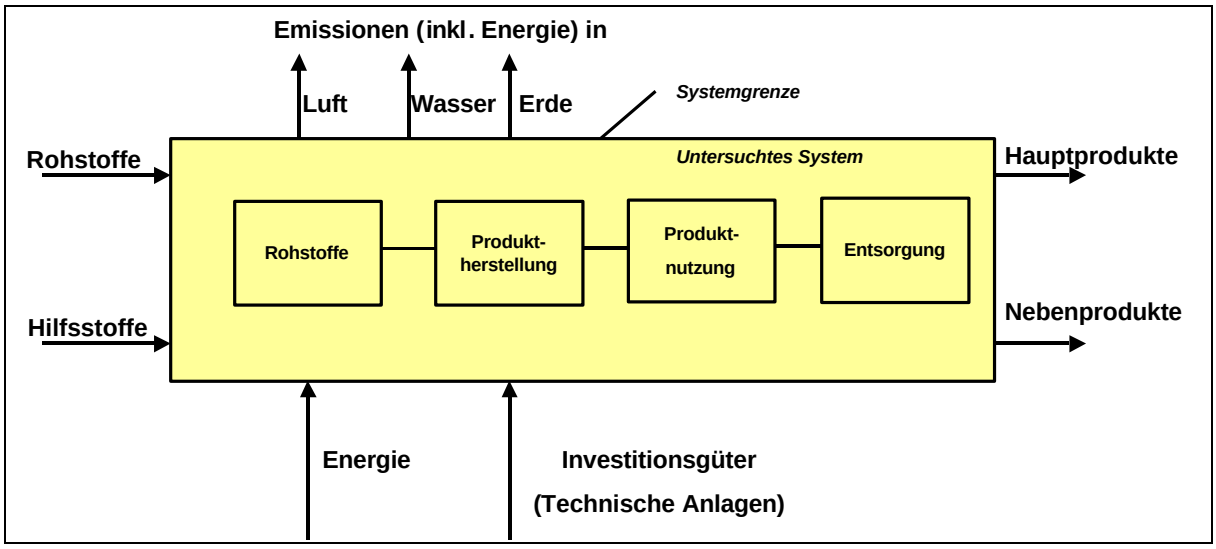


Abbildung 5: Modularer Aufbau einer Ökobilanz [Frühwald, 1999]

Es werden zwei Kategorien hinsichtlich der Datenqualität und der Datenherkunft unterschieden:

- allgemeine Daten
- spezifische Daten.

Allgemeine Daten werden übergreifend erhoben und sind nicht auf ein Produkt oder einen Betrieb bezogen. So werden z.B. für den Transport allgemeine Daten verwendet. Diese Daten sind in sogenannten Standardmodulen zusammengefasst. Spezifische Daten werden für eine bestimmte Ökobilanz erhoben. Sie haben nur Gültigkeit für einen bestimmten Betrieb oder einen bestimmten Produktionsablauf.

Die folgenden Tabellen (3, 4und 5) verdeutlichen eine Sachbilanz für eine Spanplatte V100, welche im Feuchtbereich eingesetzt werden kann. Man unterscheidet stoffliche und energetische Sachbilanzen.

Tabelle 3: Sachbilanzdaten (stofflich) einer Spanplatte V100 [Frühwald, Scharai-Rad, Hasch, 1999]

Input	[kg/m³ Platte]	Output	[kg/m³ Platte]
Rohstoffe:		**Produkt:**	
Industrieholz	86,75	Spanplatte atro	636,40
Schwarten u. Kappstücke	92,12	Feuchte	54,13
Hackschnitzel	79,41	**Summe**	**690,60**
Späne	210,90		
Spanplattenrecycling	3,38	**Nebenprodukte:**	
Gebrauchtholz	184,40	Schonplatten, Kanthölzer, Leisten	0,54
Sonstiges	8,45	Schleifstaub	56,37
		sonstiger Ausschuss	46,78
Summe Holz	**665,40**		
Summe Wasser	411,50	**Summe**	**103,70**
Leim und Zusatzstoffe:	65,00		
flüssige Emissionen	304,00	flüssige Emissionen	223,00
Betriebsstoffe	0,07	feste Emissionen	3,04
Metalle	1,13	luftgetragene Emissionen	428,50
Sonstiges	1,74		
Summe Input:	**1449,00**	**Summe Output**	**1449,00**

Die Tabelle 4 stellt die energetische Sachbilanz einer Spanplatte für den Außenbereich dar. Der Energieverbrauch in den einzelnen Produktionsschritten einer Spanplattenproduktion kann hierdurch erhoben werden.

Die energieintensiven Prozessschritte können somit identifiziert und gegebenenfalls betriebsintern optimiert werden.

Tabelle 4: Sachbilanzdaten (energetisch) einer Spanplatte V100 [Frühwald, Scharai-Rad, Hasch, 1999]

Produktionsschritt	**Energieverbrauch** elektrische Energie (kWh/m³)
Spanaufbereitung	36
Spänetrocknung	31
Beleimung	6
Verpressung/Zuschnitt	24
Schleifen	18
Anderes	16
Total elektrisch (Verbrauch)	**131**
	thermische Energie (MJ/m³)
Spänetrocknung	1713
Verpressung	657
Transport	16
Total thermisch	**2386**

Weiteres Beispiel für Sachbilanzen

In der Sachbilanz werden Aufwendungen (Input) und Ergebnisse (Output, Produkte und Emissionen) erfasst. Tabelle 5 verdeutlicht den Stoffeinsatz für die Herstellung von Brettschichtholz.

Tabelle 5: Stoffeinsatz für 1 m³ Brettschichtholz [Ristl, 1996]

Input	**[kg/m³ BSH]**
Schnittholzeinsatz	593,00
Wasser im Holz (u = 60%)	237,00
Metallteile	22,00
lösemittelhaltige Lasuren	0,70
Fette	0,01
Öle	0,09
Altöl	0,05
Folien	0,50
Klebstoffe (MF, UF, PRF/RPF)	15,00

3.2.3. Wirkungsabschätzung

Die in der Sachbilanz erhaltenen Daten werden in der Wirkungsbilanz hinsichtlich ihrer umweltbeeinflussenden Größe beschrieben und abgeschätzt. Man unterscheidet globale Einflüsse oder Wirkungen, wie z.B. den Treibhauseffekt und regionale bzw. lokale Wirkungen, wie z.B. die direkte Auswirkung auf Mensch und Tier. Nach einem Vorschlag von NAGUS (Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes) können folgende Wirkungskriterien unterschieden werden:

- Treibhauseffekt
- Ozonabbau
- Humantoxizität
- Ökotoxizität
- Versauern von Böden und Gewässern
- Eutrophierung
- Bildung von Photooxidantien (bodennahem Ozon)
- Bodenbeanspruchung
- Verringerung der Artenvielfalt
- Ressourcenverbrauch

Zusätzlich existieren Wirkungskriterien, welche nur beschrieben werden können, ohne dass eine Quantifizierung möglich ist:

- Arbeitssicherung
- Lärm oder Geruchsbelästigung
- Wirkung der Wälder als Erholungsgebiet

Der methodische und wissenschaftliche Rahmen für die Wirkungsabschätzung ist in der ISO Norm 14.042 festgelegt. Die Modelle für die vorgeschriebenen Wirkungskriterien sind jedoch unterschiedlich weit entwickelt, so dass es momentan keine allgemein anerkannte Methode für eine durchgängige und genaue Zuordnung von Sachbilanzdaten zu spezifischen potentiellen Umweltwirkungen gibt. Infolge der subjektiven Elemente bei der Wirkungsabschätzung, wie zum Beispiel bei der Auswahl, Modellierung und Beurteilung der Wirkungskategorien muss deshalb eine hohe Transparenz sichergestellt werden, indem alle getroffenen Annahmen beschrieben und dargestellt werden.

Abbildung 6 zeigt eine Wirkungsabschätzung für 1 m³ Spanplatte V100. In der Grafik wird die Wirkungskategorie Treibhauseffekt (GWP = **G**lobal **W**arming **P**otential) betrachtet. Es wird deutlich, dass bei der Spanplatte der Leim und die zur Herstellung der Platte verbrauchte Energie den größten Anteil am Treibhauspotential besitzen. Holz als Rohstoff mit einem Massenanteil von ca. 90% des Produktes trägt nur unwesentlich zu der Kategorie Treibhauseffekt bei. 1 m³ Spanplatte emittiert der Grafik zufolge 275 kg CO_2-Äquivalente.

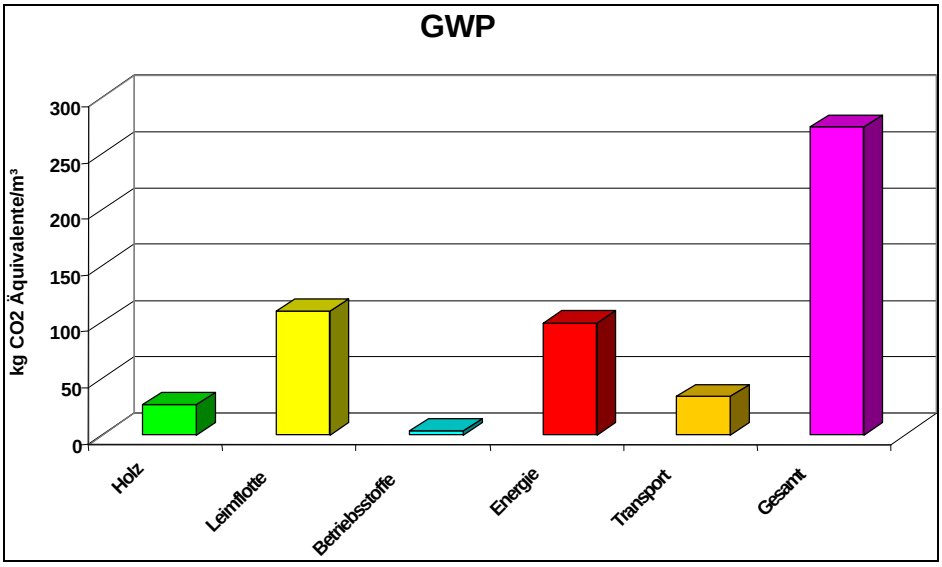


Abbildung 6: Wirkungsabschätzung einer Spanplatte V 100 hinsichtlich des Treibhauseffektes [Frühwald, Scharai-Rad, Hasch, 2000]

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung ermöglichen eine Differenzierung der einzelnen Lebensabschnitte im Hinblick auf die betrachtete Wirkungskategorie. Die einzelnen Module können zueinander gewichtet werden, so dass ökologische Optimierungen abgeleitet werden können.

Im Folgenden werden Beispiele für den Hausbau dargelegt, die verschiedene Aspekte verdeutlichen:

Energiebilanz von Gebäuden

Die Bundesregierung ist bestrebt, den Energiebedarf im Wohnsektor zu reduzieren. Die neue Energieeinsparverordnung (EnEV) fordert den Energiebedarf während der Nutzung um 30%, bezogen auf die Wärmeschutzverordnung von 1995, zu verringern.

Mit dieser Verordnung wird der Erkenntnis Rechnung getragen, dass der Wohnungsbausektor ein großes Potential bietet, Energie zu sparen und damit die Umwelt zu entlasten.

Die Tendenz im Hausbau ging in den letzten Jahren hin zu Niedrig- und Passivenergiehäusern. Das bedeutet, dass der Energiebedarf während der Nutzung im Vergleich zu herkömmlichen Häusern geringer ist.

Das Problem dieser Entwicklung ist jedoch darin zu sehen, dass nur die Nutzung des Gebäudes eine Optimierung erfahren hat. Die Herstellung der Häuser ist aufgrund ausgefeilter Konstruktionen stetig energieintensiver geworden. Diese Problematik kann nur mit Hilfe einer ganzheitlichen ökologischen Betrachtung untersucht werden, wobei der gesamte Lebensweg von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum Rückbau des Gebäudes einbezogen wird.
Die ökologische Betrachtung eines Niedrigstenergiehauses auf Holzbasis mit einem Betriebsenergiebedarf von 32 kWh/m²a führt zu interessanten Ergebnissen hinsichtlich des Gesamtenergiebedarfs:

Über einen Lebensweg von 60 Jahren verbraucht ein Haus ca. 43% der Gesamtenergie in der Nutzungsphase, während die restlichen Energiemengen auf die Herstellung, die Instandhaltung und den Rückbau des Hauses entfallen (Abbildung 7).

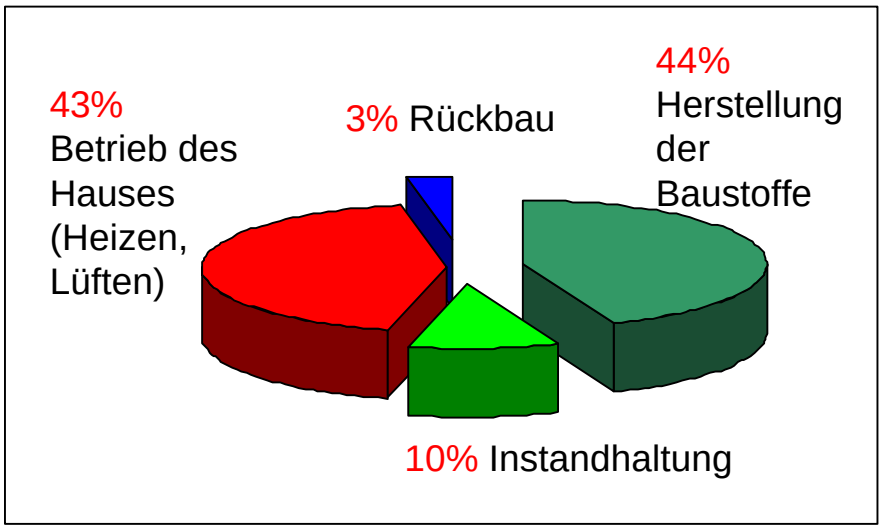


Abbildung 7: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebensphasen eines Niedrigstenergiehauses am Gesamtenergiebedarf über einen Zeitraum von 60 Jahren [Pohlmann, Frühwald, 2001]

Die Wirkungsabschätzung „GWP“ ist zu ca. 90% von dem Energieverbrauch abhängig. Das Wissen über die Verteilung des Energieverbrauchs über den gesamten Lebensweg ermöglicht Rückschlüsse auf die Verteilung der energiebedingten Kohlendioxidemissionen im Hausbau und liefert damit Daten für eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen.

Diese Tatsache verdeutlicht, dass auch im Hausbau ökologische Bewertungen wichtige und zukunftsrelevante Daten liefern können. Es zeigt sich, dass nicht nur die Nutzung, sondern der gesamte Lebensweg des Hauses betrachtet werden muss (Herstellung der Baustoffe 44% + Instandhaltung 10% = mehr als die Hälfe der Gesamtenergie dieses Hauses fällt in der Erstellung des Gebäudes an).

Zukünftige ökologische Bewertungen in den kommenden Jahren werden die Datenbasis verdichten und detaillierte Aussagen über den ökologisch optimalen Hausbau hervorbringen.

Einbeziehung der Energieerzeugung aus Holz

Ein wesentlicher Vorteil von Holz als Werk- und Baustoff ist die Möglichkeit der energetischen Verwertung als sogenannte „Zweitnutzung".
Nach der Nutzung als Produkt wird durch die thermische Verwertung Energie gewonnen. Auf diese Weise können fossile Energieträger z.B. bei der Beheizung von Räumen und Gebäuden ersetzt werden. Die Ressourcen der Erde werden längerfristig erhalten und es wird weniger CO_2 freigesetzt.

Beispiel Holzhaus

Das berechnete (Abbildung 7) Niedrigstenergieholzhaus besteht aus **76 Tonnen Holz** in Form von Bauholz, Brettstapelelementen und Holzwerkstoffen.
Auf diese Weise sind in dem Haus ca. 395.000 kWh Primärenergie gespeichert, die nach dem Rückbau des Hauses als Energieträger zur Verfügung stehen. Diese Menge an Energie würde ausreichen, das Haus herzustellen und 25 Jahre lang zu beheizen. Auf diese Weise können zum Beispiel fossile Brennstoffe substituiert werden.
Verschiedene Berechnungen für Holzprodukte ermitteln ein **negatives GWP** für das entsprechende Produkt. Hierbei wird auf die Tatsache verwiesen, dass in dem Produkt mehr Kohlenstoff gespeichert ist, als während der Herstellung emittiert wird. Wird diese Betrachtung auf den gesamten Lebensweg erweitert, so können auch Gebäude ein negatives GWP aufweisen.
Bei entsprechender Optimierung (wenig Herstellungsenergie, viel Holzverwendung, gute Wärmedämmung) ist es möglich, Wohnhäuser zu errichten und zu bewohnen, für deren Bewohnung ausschließlich erneuerbare Energieträger erforderlich sind. Die Begriffe „Null-Fossile-Energie-Gebäude" oder „Plusenergiehaus" könnten auf diese Weise auch in der Praxis Wirklichkeit werden.

Die thermische Verwertung von Biomasse, speziell von Holz und Holzprodukten, wird ab dem Jahr 2005 eine große Bedeutung erhalten, da die Deponierung von Holz ab diesem Zeitpunkt nicht mehr erlaubt ist. Altholz muss demnach entweder stofflich verwertet oder thermisch entsorgt werden. Ökologisch gesehen ist die thermische Verwertung der Deponierung ohnehin vorzuziehen, wie Speckels (2001) festgestellt hat.

3.2.4. Auswertung

Die Interpretation der in der Wirkungsabschätzung erhaltenen Ergebnisse nimmt einen wichtigen Teil einer Ökobilanz ein, denn in ihr wird die zuvor geleistete Arbeit kommentiert. Die Ergebnisse der Sach- und Wirkungsbilanz werden zusammengefasst und auf der Grundlage von nachvollziehbaren und dokumentierten Kriterien bewertet. Die Interpretation soll Schwachstellen identifizieren und Entwicklungspotentiale im Hinblick auf eine ökologische Optimierung aufzeigen.
Die Auswertung einer ökologischen Bewertung bietet vielfältige Möglichkeiten, wie die Verfahrensoptimierung oder den Produktvergleich.

3.2.4.1. Verfahrensoptimierung

Die Industrie ist bestrebt, konkurrenzfähige Produkte anzubieten. Eine ständige Optimierung der Verfahrensabläufe und Produkte sichert langfristig Marktanteile. Um jedoch eine gezielte ökologische Optimierung durchführen zu können, muss der Produktionsprozess detailliert erfasst und bewertet werden.
Die Ökobilanz zeichnet normkonform jeden einzelnen Produktionsschritt auf, angefangen bei der Herkunft des eingesetzten Holzes im Forst bis hin zum Endprodukt. Auf diese Weise können fundierte Daten für eine Optimierung zur Verfügung gestellt werden.

Beispiel Spanplatte

Im Kalenderjahr 2000 wurden in Europa 36 Mio. m³ Spanplatten, in Deutschland 9 Mio. m³ hergestellt [EPF, 2000]. Die Spanplatte nimmt mit einem Anteil von 71% an der europäischen Holzwerkstoffproduktion eine Schlüsselstellung ein und ist für das Bauwesen und die Möbelherstellung ein wichtiger Holzwerkstoff. Wie Ökobilanzen für Spanplatten [Hasch, 2001] gezeigt haben, resultieren etwa 80% der negativen Umweltwirkungen aus dem Verbrauch von Energie. Eine Optimierung des Produktes und des Verfahrensablaufes bei der Spanplattenherstellung hinsichtlich des Energieeinsatzes entlastet die Umwelt und schont endliche Ressourcen.
Um eine Energieoptimierung durchführen zu können, muss zuerst der Energiebedarf in den einzelnen Verfahrensschritten erhoben werden. In der Studie von Hasch wurden 30% der deutschen Spanplattenproduzenten einbezogen.
Die Tabelle 4 auf Seite 29 zeigt den Energieeinsatz in den einzelnen Produktionsschritten. Die energieintensiven Produktionsschritte und Faktoren können mit Hilfe der ökologischen Bewertung identifiziert werden. Bei der Spanplattenproduktion ist die Spänetrocknung sehr energieintensiv.

3.2.4.2. Produktvergleich unter ökologischen Gesichtspunkten

Im Rahmen der Bilanzinterpretation können verschiedene Produkte miteinander verglichen werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Produkte den gleichen Gebrauchsnutzen aufweisen. Eine weitere Vorraussetzung für vergleichende Betrachtung ist die Übereinstimmung der Bilanzräume der Produkte.
Beispiele für einen vergleichbaren Gebrauchsnutzen sind:

- Die physikalischen Eigenschaften der Produkte sind identisch (Steifigkeit, Biegeeigenschaften, statische Festigkeiten, etc.).
- Die Produkte werden in einem vergleichbaren Rahmen verwendet, zum Beispiel als Wandbauplatte oder verschiedene Trägersysteme (ein Vergleich einer herkömmlichen Gipskartonplatte und einer Holzfaserplatte für den Innenbereich, verschiedene Trägersysteme aus neuen Holzwerkstoffen mit herkömmlichen Verbundsystemen).
- Die Produkte besitzen die gleiche Funktionale Einheit, z.B. 1 m³ Spanplatte und 1 m³ OSB-Platte, verwendet im Hausbau als Aussteifung des Holzrahmens (Hinweis: Die Spanplatte muss mit einer PE-Folie verbaut werden, damit sie die bauphysikalischen Eigenschaften der OSB-Platte aufweist. Diese PE-Folie muss in die Betrachtung einfließen).

Im Hausbau bieten sich ebenfalls vielfältige Vergleichsmöglichkeiten, die von Firmen unter anderem für Marketingzwecke oder für Produktoptimierungen genutzt werden können. Der Gebrauchsnutzen der Häuser muss jedoch auch hier analog sein. Es bieten sich unter anderem folgende Vergleiche an. Die zu vergleichenden Häuser haben:

- die gleiche Wohn- und Nutzfläche
- die gleiche überbaute Fläche
- das gleiche Volumen
- den gleichen Herstellungspreis
- den gleichen Ausbaustand und Ausbaustandard
- die gleiche Architektur, jedoch unterschiedliche Wandaufbauten („Massivhäuser“ kontra „Holzhäuser“)
- gleiche Wandaufbauten, jedoch unterschiedliche Architektur („Architektenhäuser“ kontra „Normalbauten“)
- den gleichen Energiebedarf während der Nutzung

Durch fundierte ganzheitliche Vergleiche können unterschiedliche Hersteller ihre Produkte miteinander vergleichen, es muss jedoch sichergestellt sein, dass für die Datenerhebung ebenfalls vergleichbare Rahmenbedingungen (Übereinstimmung des Bilanzraumes der Baustoffe etc.) festgelegt wurden.
Den Vorteil dieser ökologischen Vergleiche würde der Verbraucher erhalten, da seiner Käuferentscheidung ein weiteres Kriterium, das gesamtheitlich energetisch beste Haus zu erwerben, hinzugefügt werden kann.
Momentan wird die Käuferentscheidung von dem Preis-/ Leistungsverhältnis der Gebäude dominiert. Es bleibt abzuwarten, inwiefern die zu erwartende Verteuerung der Energie ein ökologisches Denken der Verbraucher unterstützen kann.
Zunehmend werden mit Hilfe der Ökobilanz verschiedenartige Produkte aus unterschiedlichen Baustoffen verglichen und daraus Entscheidungen für die Produkt- oder Prozessgestaltung oder auch eine Kaufentscheidung abgeleitet.
Vorraussetzung für einen Vergleich ist aber ein analoger Produktnutzen, d.h. die zu vergleichenden Produkte müssen die gleiche Funktion erfüllen.
Beispiele für einen Produktvergleich im Hausbau können sein:

- Häuser aus Stein verglichen mit Holzhäusern
- Blockhäuser verglichen mit Fertighäusern
- Baustoffvergleiche: Konstruktionsvollholz verglichen mit Brettschichtholz
- Unterschiedliche Trägersysteme
- Fenster mit verschiedenen Rahmenmaterialien

Die ökologische Bewertung kann mit Hilfe von sinnvollen Produktvergleichen ökologische Prioritäten setzen und den Verbraucher auf diese Weise informieren.

Ökologischer Vergleich verschiedener Holzwerkstoffe

In Tabelle 6 sind die Wirkungspotentiale für die Herstellung von Holzwerkstoffen (Bilanzraum: Wald bis zum fertigen Holzwerkstoff am Werkstor) wiedergegeben. Die Daten bilden die Grundlage für einen Vergleich der Holzwerkstoffe. Der Gebrauchsnutzen muss jedoch ebenfalls in den Vergleich einfließen, diese Holzwerkstoffe werden zum Teil in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt, stellen also nicht vergleichbare funktionale Einheiten im Sinne der Ökobilanz dar.

Tabelle 6: Wirkungsbilanzen verschiedener Holzwerkstoffe [Frühwald, Scharai-Rad, Hasch, 2000]

	Spanplatten		MDF	OSB	
	V 20	V 100		PF	PF/PMDI
GWP aus foss. Energie	240	275	540	235	265
davon % Energie	42	34	64	k. A.	k. A.
% Klebstoff	32	40	25	35	47
% Holz	12	10	5	8	7
Versauerung	1,4	2,0	2,1	1,7	1,6
davon % Energie	35	25	45	k. A.	k. A.
% Klebstoff	25	45	30	41	41
% Holz	12	5	10	9	10
Überdüngung	0,2	0,24	0,28	0,21	0,21
davon % Energie	65	55	40	k. A.	k. A.
% Klebstoff	15	20	40	37	37
% Holz	10	7	10	14	14
Ozonbildung	0,40	0,45	0,50	0,37	0,4
davon % Energie	50	45	50	k. A.	k. A.
% Klebstoff	7	25	12	20	30
% Holz	20	15	24	31	28

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Energie und der Klebstoff einen sehr großen Einfluss auf die verschiedenen Wirkungskategorien haben. Holz als Rohstoff hat einen eher geringen Anteil auf die verschiedenen Wirkungskategorien, obwohl der Massenanteil des Rohstoffes Holz mit 80 – 90% dominant ist.

Ökologischer Vergleich verschiedener Wandaufbauten

Ökobilanzen können eine ökologische Überlegenheit bestimmter Produkte gegenüber Konkurrenzprodukten aufzeigen. Der Hausbau bietet aufgrund seiner vielfältigen Konstruktionen und eingesetzten Baustoffe gute Bedingungen für ökologische Vergleiche. Ein Vergleich von vier verschiedenen Wandaufbauten (zwei Massivbauten und zwei Holzrahmenbauten) zeigten interessante Ergebnisse (Tabelle 7 und Tabelle 8).

Dieser Vergleich wurde von dem österreichischen Institut für Baubiologie- und ökologie in Krems (Zentrum für Bauen und Umwelt) durchgeführt.

Unter den in der Studie betrachteten Bilanzräumen weisen die Holzwände in allen Kategorien bessere Eigenschaften auf als die Steinwände.

Tabelle 7: Bauphysikalische und ökologische Daten von vier verschiedenen Wohnhauswandsystemen [Waltjen et al., 1999]; Wandaufbau siehe Tabelle 8

	Dicke [cm]	WDQ [1)] [W/m²K]	Masse [kg]	PEI ne [2)] [MJ/m²]	GWP [3)] [kg CO_2-äq.]
(1) zweischaliges Mauerwerk	46	0,34	461	1172	93
(2) Hochlochziegelmauer	38	0,30	273	876	58
(3) Holzständerwand	27	0,26	88	418	- 21
(4) Holzständerwand	32	0,29	71	271	- 50

1) Wärmedurchgangskoeffizient
2) Treibhauspotential bewertet auf 100 Jahre
3) Primärenergiebedarf (nicht erneuerbare Energie)

Das negative GWP-Potential der Holzwände entsteht durch das in der Wand gespeicherte Kohlendioxid (siehe Exkurs Kohlendioxidspeicherung auf Seite 71).
Der Wärmedurchgangskoeffizient der Holzwände ist ebenfalls geringer, sodass der Energieverbrauch während der Nutzung reduziert ist. Der Nachteil des Holzbaus ist, dass die verbaute Masse bei Holz nicht annähernd so massiv ist wie bei Steinwänden, was sich negativ auf die Schalldämmung auswirkt.

Tabelle 8: Aufbau der in Tab. 7 bewerteten Wandsysteme [Waltjen et al., 1999]

[cm]	Baustoff
12,0	Sichtziegel
4,0	Hinterlüftung
12,0	Glaswolle zw. Lattung
17,0	Porosierter
1,0	Hochlochziegel
	Lehmputz
46,0	

(1) Zweischaliges Ziegelmauerwerk

[cm]	Baustoff
2,0	armierter Silikatputz
10,0	Steinwolle
25,0	Hochlochziegel
1,0	Kalkputz
38,0	

(2) Hochlochziegelmauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem

[cm]	Baustoff
1,0	armierter Silikatputz
2,5	Holzwolle-
2,4	Dämmplatte
	Schalung
16,0	Zellulosedämmung
	zw. Kantholz
0,02	PE-Folie
2,0	Holzlattung
3,0	Brandschutzplatten
27,0	

(3) Holzständerwand mit Putzfassade

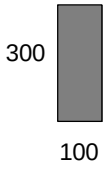
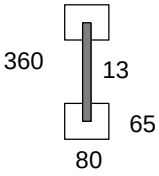
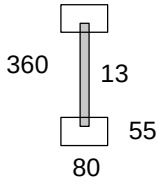
[cm]	Baustoff
2,0	Holzschalung
3,0	Lattung
4,0	Konterlattung
0,02	Windbremse
2,0	Holzsparschalung
16,0	Zellulosedämmung
	zw. Kantholz
0,02	PE-Folie
2,0	Holzlattung
3,0	Brandschutzplatten
32,0	

(4) Holzständerwand mit hinterlüfteter Fassade

Ökologischer Vergleich verschiedener Trägersysteme

Holz als Trägersystem findet Anwendung unter anderem im Brückenbau, Hallenbau und im Holzhausbau. In der Tabelle 9 sind drei verschiedene Trägersysteme mit einen vergleichbaren Gebrauchsnutzen (Flächenträgheitsmoment) hinsichtlich ökologischer Aspekte verglichen worden.

Tabelle 9: Ökologischer Vergleich verschiedener Trägersysteme aus Holz [Frühwald 2000]

	BSH 	**CSL/ Parallam** 	**LVL/OSB** 
Funktionale Einheit als „Steifigkeit“ [1)] [KN/m²]	760	725	668
Holzeinsatz für 10 m Länge	0,70 m³	0,22 m³	0,26 m³
Rundholz	Starkholz	Schwachholz	Starkh. 75% Schwach 25%
Energieeinssatz für 10 m	1.400 MJ	900 MJ	1.300 MJ
davon fossil	57%	37%	50%
biogen	43%	63%	50%
CO_2-Äquivalente für 10 m (fossil)	33 kg	17 kg	27 kg

1) [Venschott 2001]

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass eine ökologische Bewertung keine absoluten Handlungsempfehlungen aussprechen kann, da die Ökologie stark von den Erwartungen des Nutzers abhängt. Bei den Trägersystemen kann man dies sehr gut verdeutlichen, da mit den einzelnen Produkten verschiedene Vorteile verbunden sind.

Beispiel:

Der Käufer sucht ein Produkt, für dessen Herstellung sehr wenig Energie aufgewendet werden muss. Die Wahl wird auf den Träger zwei (CSL/PArallam) fallen, für dessen Herstellung nur 900 MJ Energie aufgewendet wurden. Sucht der Käufer allerdings ein dekoratives Produkt mit hohem Feuerwiderstand, so wird er sich für den BSH Träger entscheiden. Dieser besteht aus 0,7 m³ Holz (~329 kg Nadelholz).

Die Erwartungen des Nutzers eines Holzhauses an die Ökologie können ebenfalls variieren, die ökologischen Vorteile der bestehenden Bausysteme sind dem Kapitel 4.4 (Holzhausbau) auf Seite 58 zu entnehmen.

Ökologischer Vergleich von BSH und KVH

Ökobilanzen ermöglichen einen gezielten Vergleich von Baustoffen. Konstruktionsvollholz (KVH) und Brettschichtholz (BSH) werden als Träger oder Stützen im Hausbau eingesetzt. Der Vorteil von Brettschichtholz ist jedoch darin zu sehen, dass dieser Baustoff in nahezu unbegrenzten Dimensionen hergestellt werden kann. Konstruktionsvollholz ist an den Durchmesser des Baumes gebunden. Diese Tatsache bedingt zum Teil ein unterschiedliches Käuferpotential, BSH hat sein Marktsegment im Hallenbau etabliert. Im Holzhausbau finden beide Produkte Anwendung. Ein ökologischer Vergleich dieser Baustoffe ist in der Tabelle 10 abgebildet.

Tabelle 10: Stofflicher und energetischer Vergleich von BSH und KVH [Grunddaten Ristl 1996 und Frühwald 2000]

BSH			**KVH**		
Stoffe	kg/m³	kg/FE[1)]		kg/m³	kg/FE[1)]
Schnittholz	592	118	Schnittholz	529	116
Holzfeuchte	467	93	Holzfeuchte	423	93
Öle + Fette	0,2	0,04	Öle + Fette	0,3	0,06
Lasur	0,7	0,14	Harz + Härter	0,4	0,08
Verpackung	0,2	0,04	Verpackung	0,2	0,04
Metall	22	4,4			
Klebstoff	14	2,8			
Gesamt:	**1.096**	**218**	**Gesamt:**	**953**	**209**
Energie	KWh[2)]/m³	KWh[2)]/FE[1)]		KWh[2)]/m³	KWh[2)]/FE[1)]
Elektrisch	391	78	Elektrisch	241	53
Diesel	273	55	Diesel	216	48
Holzfeuerung	518	104	Holzfeuerung	220	48
Heizöl	36	7	Heizöl	11	2
Gesamt:	**1.218**	**244**	**Gesamt:**	**688**	**151**

1) Funktionale Einheit: 5 m Träger mit vergleichbarer Steifigkeit
Abmessung: BSH: 5 m x 0,2 m x 0,2 m = 0,2 m³
KVH: 5 m x 0,22 m x 0,2 m = 0,22 m³

2) Primärenergie

Vergleicht man eine bestimmte Masse, in diesem Fall 1 m³ des Produktes, so wird für die Herstellung von Konstruktionsvollholz ungefähr die Hälfte an Energie benötigt als für die Herstellung von Brettschichtholz. Konstruktionsvollholz würde folglich unter ökologischen Gesichtspunkten Vorrang vor Brettschichtholz erhalten. Brettschichtholz besitzt jedoch ein besseren E-Modul als Konstruktionsvollholz [DIN 1052-1/A1], hierdurch reduziert sich die benötigte Brettschichtholzmenge, um vergleichbare Produkteigenschaften zu erhalten.
Bezieht sich der ökologische Vergleich, wie in der Ökobilanz gefordert, auf eine vergleichbare Einheit, in diesem Fall einen Träger mit 5 m Länge, so verringert sich der Unterschied des Energiebedarfs zur Herstellung der Baustoffe. Die für Konstruktionsvollholz eingesetzte Holzmenge ist fast genauso hoch wie die für Brettschichtholz.

3.3. Zusammenfassung Ökobilanz

Der Einsatz von Holz und Holzprodukten in allen Bereichen des täglichen Lebens erfährt derzeit eine Renaissance. Gründe für dieses Wachstum gibt es viele, da der Werkstoff Holz doch mit sehr vielen Vorzügen ausgestattet ist und Holzprodukte wirtschaftlich konkurrenzfähig sind. In der letzten Zeit wird vermehrt auch die ökologische Komponente eines Produktes in das Marketing einbezogen. Die Sensibilisierung der Kunden hin zu ökologischen Produkten hat dazu geführt, dass der Mensch an den Umweltwirkungen, die von einem Produkt ausgehen, immer mehr interessiert ist. Dieses wird von der Umweltpolitik massiv gefördert. Eine Einschätzung der Umweltfreundlichkeit eines Produktes war bisher schwierig, da keine geeigneten Instrumente für eine Bewertung der ökologischen Wirkungen von Produkten oder Produktionsprozessen zur Verfügung standen.
Werden Ökobilanzen für Produkte mit einem vergleichbaren Gebrauchsnutzen erstellt, so können die betrachteten Produkte ökologisch verglichen und dem Verbraucher Produktvergleiche ermöglicht werden. Diese ökologischen Vergleiche werden in Zukunft stark an Bedeutung gewinnen. Für den Hersteller können durch die Ökobilanz die Schwachstellen des gesamten Lebensweges des Produktes analysiert und eine Optimierung des Produktes kann durchgeführt werden. Die Sachbilanzdaten können zudem für eine Analyse des Produktionsbetriebes genutzt werden und wichtige Voraussetzungen für betriebliche Optimierungen und Umwelt Zertifizierungen schaffen. Die Ergebnisse einer Ökobilanz können ebenfalls für ein Produktmarketing genutzt werden. Für eine Einordnung der Produkte in ökologische Klassen kann die Ökobilanz die benötigten Daten liefern.

Mit der Methode der Ökobilanzierung wurde ein Instrument geschaffen, das ökologische Bewertung ermöglicht und so Aussagen über die Umweltwirkungen der Produkte zulässt.

Energieoptimiertes Bauen

4

4. ENERGIEOPTIMIERTES BAUEN

Das physikalische Gesetz der Energieerhaltung besagt, dass Energie nicht verloren gehen kann; sie wandert nur von einem Ort höherer Dichte zu einem Ort niedrigerer Dichte. Im Hausbau wird jene Energie, welche aus dem Gebäude entweicht, als Wärmeverlust bezeichnet.

Energie wird auch zu Zeiten von „Grüner Energie“ und „CO_2 freier Energie“ im wesentlichen aus fossilen, also endlichen Energieträgern gewonnen. Energiesparen bedeutet folglich Energieträgersparen. Der Verbrauch von Energie kann demnach besser als Energieträgerverbrauch bezeichnet werden. Diesen gering zu halten, sollte das Bestreben der Bevölkerung sein, da so die Ressourcen der Erde länger erhalten bleiben und die Umwelt geschont wird.
Der Hausbau bietet viele Möglichkeiten, Energieträgereinsparungen zu erreichen:

- Reduzierung des Heizenergiebedarfs durch Verbesserung der Wand-, Dach und Fußbodeneigenschaften.
- Reduzierung der elektrischen Nutzenergie durch Verwendung energiesparender Geräte.
- Reduzierung des Abbaus fossiler Energieträger durch Verwendung von regenerativen Energieträgern wie zum Beispiel Sonnenenergie und Holzenergie.

Das Niedrig-Energie-Konzept wurde entwickelt, um die Möglichkeiten des Energiesparens zu realisieren.

In diesem Kapitel werden einige Grundbegriffe über Möglichkeiten der Energieeinsparung im Hausbau beschrieben, die mit dem Begriff des energie- und ressourcensparenden Bauens eng verbunden sind. Die für eine ökologische Betrachtung wichtigen ganzheitlichen Zusammenhänge im Hausbau können mit Hilfe dieser Grundbegriffe hergestellt werden.

4.1. Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient (u-Wert[4]) beschreibt den Wärmedurchgang durch eine Wand bei einem Temperaturgefälle von einem Grad während einer bestimmten Zeit. Er wird angegeben in Watt/m²Kelvin. Je weniger Wärme durch die Wand hindurch geht, desto niedriger ist der u-Wert. Bei einem u-Wert von 0,15 gehen folglich 0,15 Watt/m² und Zeit von innen nach außen.

Der Bau von Niedrigenergiehäusern fordert unter anderem geringe u-Werte, da dadurch der Wärmeverlust reduziert wird. Wärmeverluste durch Bauteile müssen durch den Einsatz von Heizenergie ausgeglichen werden. Eine Verbesserung des u-Wertes kann beispielsweise durch den Einsatz von Dämmmaterial erreicht werden. Dämmstoffe als Baustoffe besitzen sehr gute u-Werte und reduzieren den Wärmedurchgang, ein gut isoliertes Gebäude trägt folglich zum Energiesparen bei.

Der Holzhausbau bietet sehr gute Möglichkeiten, schlanke Wandaufbauten bei niedrigen u-Werten zu realisieren. Die Zwischenräume des Holzrahmengerüstes können mit einer Dämmschicht versehen werden. Die Tabelle 11 verdeutlicht die Verhältnisse von Steinwänden und Holzrahmenwänden. Es fällt besonders ins Auge, dass der in Deutschland typische Wandaufbau im Massivbau (Nr. 4) fast doppelt so dick ist, wie eine Holzrahmenwand mit vergleichbaren Kennwerten (Nr. 5).

Tabelle 11: Vergleich unterschiedlicher Wandaufbauten bei gleichem Wärmedurchgangskoeffizienten [Informationsdienst Holz, Niedrigenergiehäuser], [Bartolles et al., 2001], [Frühwald et al, 2000]

Wandaufbau mit vergleichbarem u-Wert (0,25 W/m²K)	**Gesamtdicke [cm]**
1. Putz – Vollziegel – Putz	193
2. Putz – Leichthochlochziegel	87
3. Putz – Bimshohlblock	95
4. Vormauerwerk – Luft – Dämmstoff – Mauerwerk – Putz	41
5. Holzrahmenbau mit Dämmstoff	23
u-Wert (0,15 W/m²K)	**Gesamtdicke [cm]**
Stein: Putzmörtel – Dämmstoff – Porenbetonstein – Gipsputz	52
Holz: 2-schaliger Wandaufbau mit Dämmung	34

[4] früher k-Wert

Beispiel für ein Niedrigenergiehaus:

Ein Haus mit den Außenmaßen 10x10 m hat im Massivbau eine bewohnbare Innenfläche[5] von 92 m². Im Holzbau besitzt das Haus eine Innenfläche von 95,5 m². Würde sich der Bauherr für ein Holzhaus entscheiden, so erhält er bei gleichen Gebäudekennwerten[6] einen Abstellraum von 3,5 m² zusätzlich. Dieser Vorteil findet momentan jedoch selten Beachtung, es handelt sich jedoch um einen eindeutigen Marktvorteil des Holzbaus.

4.1.1. Einfluß der Wärmedämmung auf die Ökologie/Ökonomie

Die Wärmedämmung hat einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch des Gebäudes während der Nutzungsphase. Sie dient als Wärme- oder Kältepuffer zwischen den Innenräumen und der Außentemperatur. Im Winter wird mit Hilfe geeigneter Wärmedämmung weniger warme Luft nach außen transportiert (winterlicher Kälteschutz), während im Sommer weniger warme Luft nach innen transportiert wird (sommerlicher Wärmeschutz).
Der ökologische Nutzen der Dämmung und der finanzielle Aufwand der Anschaffung steht in einem Verhältnis zu der Dämmstoffdicke und dem Wandaufbau. Die Dämmstoffdicke korreliert mit der Ökologie und der Ökonomie in folgender Abhängigkeit:

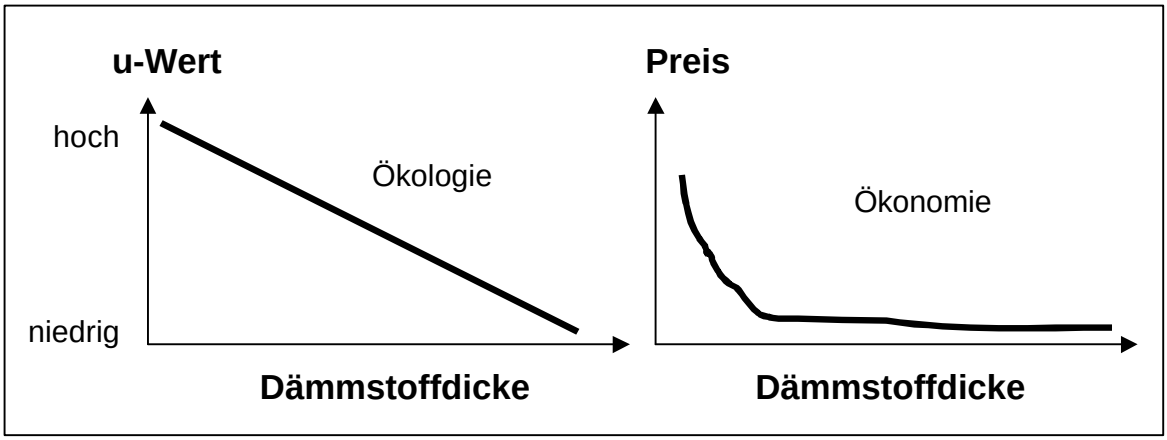


Abbildung 8: Korrelation von Dämmstoffdicke und ganzheitlicher Ökologie/Ökonomie

Ökologisch gesehen verbessert sich der u-Wert der Wand bei zunehmender Dämmstoffdicke proportional. Je mehr Dämmstoff eingebracht wird, desto niedriger wird der Wärmedurchgangskoeffizient.

[5] Annahme: keine Zwischenwände vorhanden

[6] vergleichbarer Wärmedurchgangskoeffizient

Eine Wand besteht in der Regel aus verschiedenen Baumaterialien und Fenstern. Durch den Aufbau einer geschlossenen Dämmschicht kann der Wärmeverlust eines Bauelements reduziert werden, die wärmetechnische Schwachstelle der Wand sind jedoch die Fenster, deren u-Wert handelsüblich bei 0,9 W/m²K liegt. Diese Schwachstellen haben jedoch einen großen Einfluss auf den Gesamtverbund, so dass es aus energetischer Sicht nicht sinnvoll ist, sehr dicke Dämmstoffstärken zu verwenden.
Bei einem einschichtigen Wandaufbau sollte aus diesen Gründen die Dämmstoffdicke zwischen 16 cm und 24 cm liegen. Größere Dicken bringen nur unwesentlich bessere Wärmedurchgangskoeffizienten, das Preis-/Leistungsverhältnis verändert sich jedoch negativ.
Im Passivhausbau werden Dämmstoffdicken von 30 cm und mehr sowie hochwertige Fenstersysteme verwendet. Hierdurch kommt es zu dem sehr geringen Heizenergiebedarf, aber auch zu einem dickeren Wandaufbau und deutlich geringeren Fensterflächen als im Niedrigenergiebau.
Kraft [2000] hat einen ökonomischen Kosten-Nutzen-Vergleich der optimalen Dämmstoffstärke durchgeführt, indem die Materialkosten des Dämmstoffes der Energieeinsparung aufgrund besserer u-Werte entgegengestellt wurden. Er kommt zu dem Ergebnis, dass auch ökonomisch eine Dämmstoffdicke von 42 cm nicht überschritten werden sollte.

4.1.2. Korrelation Heizenergie und Lüftungsenergie

Die Tendenz zu immer besser gedämmten Gebäuden und damit hin zu einer Reduzierung des Heizenergiebedarfes muss differenziert betrachtet werden.
Der Niedrigenergiebau und Passivenergiebau fordert aus Gründen der Reduzierung des Heizenergiebedarfs und der Luftqualität eine kontrollierte Be- und Entlüftung der Häuser. In vielen Fällen wird eine Wärmerückgewinnung verwendet.
Diese technischen Anlagen verbrauchen elektrische Energie, welche in die Energiebilanz eingerechnet werden muss. Die Bereitstellung von elektrischer Energie ist mit verhältnismäßig hohen Kohlendioxidemissionen verbunden.
Elektrische Energie wird mit nur einem Wirkungsgrad von ca. 30% erzeugt, es muss folglich sehr viel mehr Energie erzeugt werden, als vom Verbraucher letztendlich abgenommen wird. Der Primärenergieaufwand ist bei der Herstellung von elektrischer Energie hoch.
Passivenergiehäuser können auf Heizkörper verzichten, da sie den Wärmebedarf durch solare und interne Wärmequellen decken.
Der natürliche Luftstrom in diesen Gebäuden ist jedoch aufgrund des luftdichten Aufbaus sehr gering, die Wärme muss also mit Hilfe technischer Anlagen bewegt, ausgetauscht und rückgewonnen werden.

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Korrelation von Heizenergie und Lüftungsenergie:

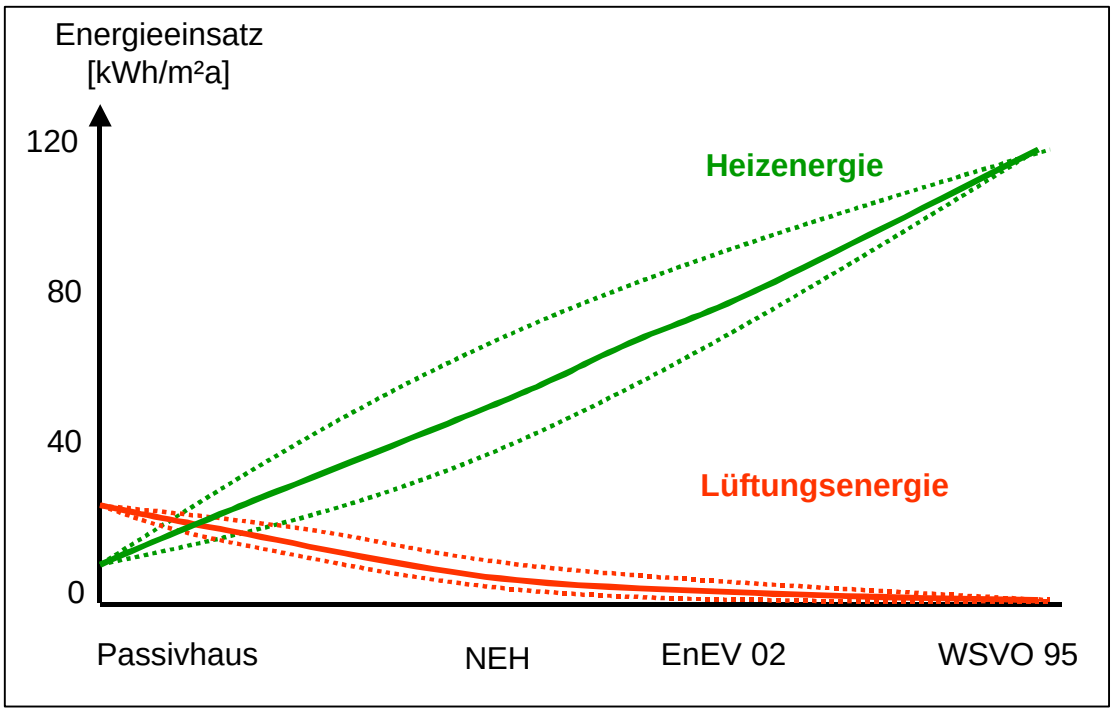


Abbildung 9: Korrelation von Heizenergie und Lüftungsenergie

Im Niedrigenergiebau ist es Stand der Technik, dass der Luftaustausch im Gebäude mit Hilfe von Ventilatoren betrieben wird. Diese Ventilatoren müssen eine gewisse Luftwechselrate pro Stunde garantieren. Die elektrische Leistung dieser Ventilatoren liegt zwischen 50 und 150 Watt/h[7]. Das bedeutet, dass für den Luftaustausch pro Jahr und Ventilator zwischen 1.436 kWh und 4.308 kWh[8] aufgewendet werden muss. Es stellt sich folglich die Frage, ob es ganzheitlich nicht sinnvoller wäre, den u-Wert der Wand zu verschlechtern und den höheren Heizenergiebedarf mit einem nachwachsenden Energieträger zu decken. Die Menge der eingesetzten Ventilatoren in einem Gebäude ist abhängig von der Größe und der Architektur des Hauses und der zu transportierenden Luftmenge.

Eine kontrollierte Be- und Entlüftungsanlage sollte aus Gründen der Effizienz bei der Planung eines Hauses berücksichtigt werden. Nachträglich installierte Anlagen führen zu nicht optimalen Luftstromführungen durch das Haus.

[7] Nutzenergie

[8] Primärenergie

4.2. Energieverbrauch im Hausbau

In Deutschland werden verschiedene Heizenergiestandards für Gebäude unterschieden. In den letzten 50 Jahren hat sich der Standard deutlich verbessert, so dass in heutiger Zeit gebaute Häuser weniger Heizenergiebedarf benötigen als ältere Gebäude.
Das begründet sich zum Einen in dem gestiegenen Wissen von Verbrauchern, Herstellern und Verbänden über eine energiesparende Bauweise, zum Anderen werden Verordnungen zur Energieeinsparung im Bundesrat verabschiedet, die diese Entwicklung fördern.
Altersbedingt unterscheidet man in Deutschland verschiedene Energiestandards. Sie können unter anderem nach dem Energieeinsatz während der Nutzungsphase klassifiziert werden. Die Abbildung 10 verdeutlicht den Heizenergiebedarf von Gebäuden, angegeben in kWh/m^{2}Jahr.

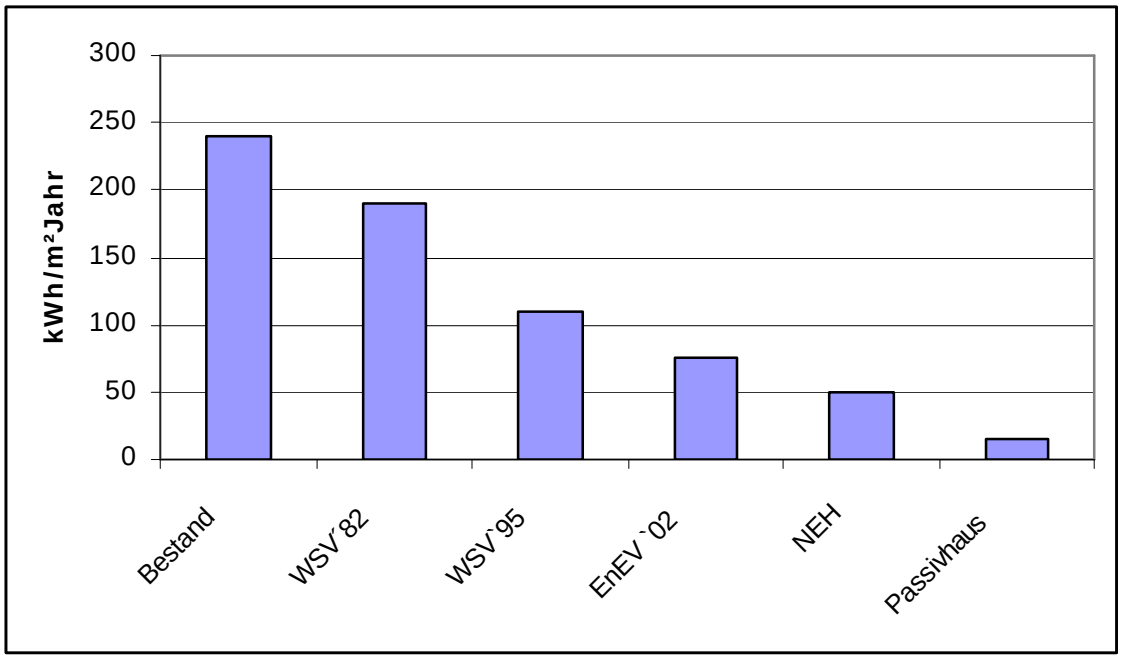


Abbildung 10: Entwicklung des Heizenergiebedarfs [Corte, 2002]

Unter Bestand werden die Gebäude verstanden, die bis 1960 erbaut wurden. Der Bestand an diesen Häusern beträgt in Deutschland ca. 80% (~37 Mio. Gebäude werden in Deutschland bewohnt). Energieeinsparungen können hier relativ zügig und problemlos durch neu installierte Außendämmung und den Einbau von verbesserten Fenstersystemen erreicht werden. Die Bundesregierung bietet Förderprogramme und vergünstigte Darlehen (KfW-Darlehen) für Altbausanierungen an. Ziel ist es, den Heizenergiebedarf zu reduzieren.

Der Heizenergiebedarf **(Q_H)** ist abhängig von verschiedenen Faktoren im Gebäude. Ein geringer Heizenergiebedarf entlastet die Umwelt und ist folglich in der modernen Architektur anzustreben. Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$Q_H = Q_T + Q_L - Q_S - Q_I$$

Die Transmissionsverluste **(Q_T)** entstehen durch das Temperaturgefälle von Innen und Außen, ihr Anteil kann durch geeignete Wandaufbauten mit besseren Wärmedurchgangskoeffizienten minimiert werden. Lüftungswärmeverluste **(Q_L)** entstehen beispielsweise durch Öffnen der Fenster oder durch Fugen und Risse in der Wand. Durch die geöffneten Fenster entweicht die warme Luft, es strömt kalte Luft in das Gebäude, welche mit einem hohen Energieaufwand erwärmt werden muss. Durch eine kontrollierte Gebäudelüftung kann dieser Energieaufwand reduziert werden. Im Passivhausbau und in weiten Teilen des Niedrigenergiebaus werden kontrollierte Be- und Entlüftungsanlagen eingebaut. Die Sonnenenergie **(Q_S)** kann im Hausbau als sogenannter Wärmegewinn genutzt werden. Die Sonnenstrahlen können durch die Fenster eindringen und die dahinter liegenden Räume erwärmen. Hierdurch erhält man quasi kostenlose und vor allem emissionsfreie Wärme. Durch wärmespeichernde Wandkonstruktionen kann die Wärme im Haus gehalten werden und verringert auf diese Weise die Menge an Zusatzheizung.

Im Idealfall (Passivhaus) kann auf eine zusätzliche Heizung verzichtet werden. Der Mensch als Warmblüter und die von ihm verwendeten elektrischen Geräte geben Wärme an die Umgebung ab. Die Wärme wird als interner Wärmegewinn **(Q_I)** in der Heizenergiebilanz kalkuliert. Durch die Körperwärme oder die Abstrahlung beispielsweise von Glühlampen entstehen nutzbare Energiegewinne, welche sich bei einem hochgedämmten Haus sehr stark bemerkbar machen können.

Durch die neue Energieeinsparverordnung, in Kraft getreten am 1. Februar 2002, soll es zu einer Reduzierung des Energiebedarfs im Hausbau kommen. Die Berechnung des Jahresheizenergiebedarfs ist zu einer Berechnung des **Jahres-Primärenergiebedarf (Q_P)** ausgeweitet worden. Der Jahres-Primärenergiebedarf errechnet sich nach folgender Formel:

$$Q_P = (Q_H + Q_W)\, e_P$$

Dabei bedeuten:

Q_W: Zuschlag für Warmwasser (12,5 kWh/(m²a) [EnEV Nr. 2.2 Anhang 1]

e_P: Anlagenaufwandszahl[9]

[9] Wirkungsgrad der verwendeten Anlage

Die Energieverluste setzen sich bei den hochgedämmten Niedrig-Energie-Gebäuden folgendermaßen zusammen:

- Niedrigenergiehaus: 35 kWh Q_L und 15 kWh Q_T
- Passivenergiehaus: 15 kWh Q_T

Die Lüftungsenergieverluste entstehen bei einem Passivenergiehaus zwar auch, hier wird mit geregelter Lüftung und einer Wärmerückgewinnung nur geringe Energie für ein Wiedererwärmen des Hauses benötigt, zudem werden die solaren Wärmegewinne den Lüftungsenergieverlusten entgegengestellt

Generell muss jedoch festgehalten werden, dass die Menge der Energiegewinne von der Gebäudearchitektur, der Ausrichtung des Hauses und den Fensterflächen abhängig ist und nicht pauschal angegeben werden kann.

4.3. Energieeinsparmöglichkeiten in der Bauwirtschaft

Ergebnisse einer Studie vom Öko-Institut in Darmstadt belegen, dass ein Drittel der gesamten CO_2-Emissionen deutscher Haushalte durch Energiesparen vermieden werden könnten [Feist, 1998]. In der Praxis existieren vielerlei Möglichkeiten, ressourcenschonend und energiesparend zu bauen. Im Folgenden werden einige Möglichkeiten aufgeführt, die den Energieverbrauch im Gebäudebereich reduzieren können.

4.3.1. Einsatz geeigneter Fenster

Durch Konvektion findet an den Fensterflächen ein erhöhter Wärmetausch mit der Außenluft statt. Der Wärmedurchgangskoeffizient von Fenstern ist in den letzten Jahren jedoch erheblich reduziert worden, so dass hier Energieverluste vermieden werden können. Es werden folgende Wärmedurchgangskoeffizienten erreicht:

Name	u-Wert [W/m²K]	Anmerkung
Einfachverglasung	5,8	
Isolierverglasung	2,6	
Wärmeschutzverglasung	1,1	Füllung trockene Luft oder Vakuum
Wärmeschutzverglasung II	0,9	Edelgasfüllung, z.B. Argon
Wärmeschutzverglasung III	0,7	Dreischeibenisolierverglasung mit speziellem Rahmen und Füllung

Wärmeschutzverglasungen bestehen aus einem Zweischeibenisolierglasverbund. Die Scheibenzwischenräume werden mit trockener und entstaubter Luft gefüllt. Für die Erreichung von besseren u-Werten wird ein Edelgas als Füllung verwendet, da so die Luftbewegungen weiter reduziert und folglich die Konvektion verringert wird. Eine aufgedampfte oder aufgebrachte Schicht verbessert den Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster weiter.

Die Abbildung 11 verdeutlicht einen Aufbau der in der heutigen Zeit eingesetzten Fenster.

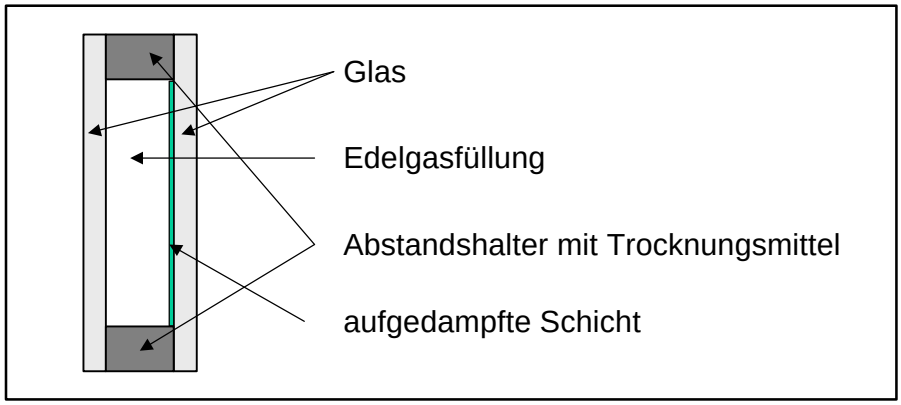


Abbildung 11: Querschnitt des Aufbaus einer handelsüblichen Wärmeschutzverglasung mit einem u-Wert von 0,9 W/m²K.

Der Heizenergiebilanz ist zu entnehmen, dass Wärmegewinne durch die Sonneneinstrahlung erzielt werden können. Fensterscheiben können diesen Energiegewinn realisieren. In den hoch gedämmten Gebäuden sind die Fenster vom Wärmedurchgangswert aus gesehen die Schwachstellen, da die Wand-, Decken- und Dachkonstruktionen mit u-Werten von kleiner als 0,15 W/m²K gebaut werden können. Die Fensterhersteller wirken dieser Tatsache mit verbesserten Fensterkonstruktionen entgegen, so dass schon Fenster mit u-Werten von 0,7 realisiert werden können. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass mit abnehmenden u-Wert auch die solaren Wärmegewinne reduziert werden. Als Kennwert fungiert hier der g-Wert (Gesamtenergiedurchlasswert). Als Faustformel gilt:

Je niedriger der g-Wert, desto besser der u-Wert.

Ein hoher g-Wert erhöht die solaren Wärmegewinne und verringert dadurch den Heizenergiebedarf (siehe Heizenergieberechnung).
Ein g-Wert von 0,7 bedeutet, dass 70% der Strahlung von außen in das Gebäude gelangen kann und so als Wärme spürbar wird.

Eine an Bedeutung gewinnende Tatsache dieser „perfekten Fenster“ ist in der aufgedampften Schicht zu sehen. Gold- und Silberlegierungen werden auf die Innenseite der Fensterscheibe aufgebracht, damit durch Reflexion Energie gespart werden kann.
Diese Schicht führt dazu, dass weniger Helligkeit in die Innenräume gelangt. Das hat zum Einen Auswirkungen auf die Energiebilanz, da elektrisches Licht zu einem früheren Zeitpunkt als herkömmlich eingeschaltet werden muss; zum Anderen hat es Auswirkungen auf den

Menschen, denn dieser empfindet natürliche Helligkeit als angenehm. Eine Minderung des Wohnkomforts kann die Folge sein.

4.3.2. Luftdichter Aufbau des Gebäudes

Ein sehr wichtiger Faktor bei der Reduzierung des Heizenergiebedarfs ist der luftdichte Aufbau des Hauses. Luftdichtigkeit bedeutet, dass nur sehr geringe Strömungen von den Innenräumen zu der Außenluft und umgekehrt möglich sind. Diese Strömungen transportieren die warme Luft ab und ein erhöhter Heizaufwand muss diese Lüftungsverluste kompensieren. Die Abbildung 12 verdeutlicht die im luftdichten Holzhausbau übliche Verklebung der OSB-Plattenstöße.

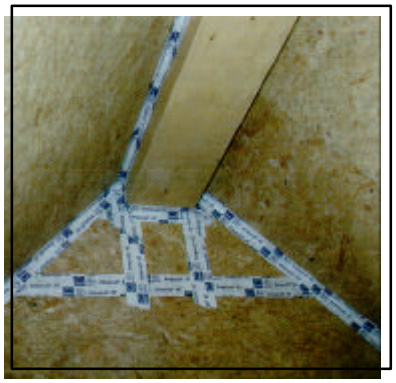


Abbildung 12: Verklebung der Stöße zur Reduzierung der Luftströmung von Innen nach Außen

Die luftdichte Gebäudehülle ist oberstes Ziel im Niedrigenergiebau. Die bauausführenden Gewerke müssen ihre Arbeitsschritte ohne Zerstörung der Hülle durchführen. Den elektrischen Leitungen kommt hier eine besondere Bedeutung zu. Umgangssprachlich wird der Elektriker als Feind der Luftdichtheit bezeichnet, da nur selten bei der Verlegung der Leitungen auf eine korrekte Abdichtung der Durchbrüche geachtet wird.

In der Praxis kann die Luftdichtheit mit einem einfachen Test, dem sogenannten Blower Door Test [Feist, Borsch-Laaks, 1997], kontrolliert werden. Das Gebäude wird mit einer sogenannten blasenden Tür (ein Ventilator wird in die Tür gespannt) versehen. Der Ventilator ist in der Lage, einen Unter- oder Überdruck in dem Haus zu erzeugen (DIN 4108-7 Anforderungen an die Luftdichtheit).

In der Norm ist festgelegt, wie oft das umschlossene Luftvolumen pro Stunde bei einem aufgebrachten Über- oder Unterdruck von 50 Pascale (N_{50}) höchstens ausgetauscht werden darf. Man berechnet den Luftaustausch für das geprüfte Gebäude nach folgender Formel:

$$N_{50} = \frac{\text{ausgetauschtes Luftvolumen}}{\text{Gebäudevolumen}} \quad [h^{-1}]$$

Ein N_{50} Wert von 2 bedeutet, dass das Gebäudevolumen zweimal pro Stunde ausgetauscht wird.

Folgende Werte werden nach der neuen Energieeinsparverordnung gefordert [EnEV, Anhang 4: Anforderungen an die Dichtheit und den Luftwechsel]:

- $N_{50} \leq 3$ für Gebäude mit natürlicher Lüftung
- $N_{50} \leq 1{,}5$ für Gebäude mit raumlufttechnischen Anlagen

Die undichten Stellen des Hauses können mit Rauchkerzen sichtbar gemacht werden. Diese Undichtheiten müssen im Anschluss nachgebessert werden. Es ist folglich unabdingbar, dass die Luftdichtheitsmessung im Rohbauzustand des Hauses stattfindet, so dass eine Ausbesserung durchgeführt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit der Offenlegung der Schwachstellen kann durch das Anlegen eines Überdruckes in Verbindung mit einer Nebelanlage erreicht werden. Der Nebel wird in Folge des Überdruckes durch die undichten Stellen der Gebäudehülle gedrückt und ist außen als Rauch sichtbar.

Der Blower Door Test kann und wird auch bei massiv gebauten Gebäuden angewandt.

Es muss hier darauf hingewiesen werden, dass die Forderung nach luftdichten Gebäuden sich nicht ausschließlich auf den Holzhausbau beschränkt. Auch der Aufbau von Massivhäusern muss luftdicht sein, damit Energieverluste reduziert werden und Energie gespart werden kann.

4.3.2.1. Nachteile/Probleme der Luftdichtheit

Der Stand der Technik im Holzhausbau beinhaltet eine kontrollierte Be- und Entlüftungsanlage. Die Raumluftqualitäten, z.B. vermehrte Ansammlung von Kohlenmonoxid im Schlafzimmer, können auf diese Weise verbessert werden [Münzenberg, 2001].

Aus energetischer Sicht muss jedes Gebäude luftdicht hergestellt werden.

Ein Problem des luftdichten Aufbaus kann dadurch entstehen, dass die Feuchtigkeit aufgrund mangelnder Lüftung nicht abtransportiert werden kann.

Vor einigen Jahren (und zum Teil heute noch) wiesen selbst Neubauten große Fugen und Risse im Aufbau auf. Diese Fugen, Löcher und Ritzen haben zu einer natürlichen Belüftung des Gebäudes geführt. Der Nachteil ist die Ansammlung von Feuchtigkeit an den Übergangsstellen zur Außenluft, da die warme Innenluft auf die kalte Außenluft trifft und Feuchte

kondensiert. Es kommt zu einer Feuchteansammlung in dem Bauteil. Wird die Feuchte über einen längeren Zeitraum in dem Bauteil gelassen und kann nicht abtrocknen, so kommt es zu Bauschäden. Zusätzlich wird unnötig viel Energie durch die Erwärmung des Raumes verbraucht, da die Raumtemperatur aufgrund der Fugen sinkt.
Im luftdichten Gebäude gibt es keine Fugen und Löcher, die Belüftung des Hauses kann also nicht auf herkömmliche Weise geschehen. Der Luftaustausch mit der Umgebung wird durch kontrollierte Entlüftungsanlagen gewährleistet, welche einen definierten Luftwechsel des Hauses ermöglichen. Verzichtet der Bewohner aus Kostengründen oder ähnlichem auf die Anschaffung einer kontrollierten Be- und Entlüftungsanlage, so muss der Feuchteabtransport durch natürliche Fensteröffnung stattfinden.
Die Aufklärung der Bewohner bezüglich Raumluftqualität und Luftwechsel ist im Zuge der technischen Modernisierung jedoch vernachlässigt worden. Der Bewohner ist sich der Risiken von mangelhafter Belüftung seines Hauses nur unzureichend bewusst.
Das führt häufig dazu, dass der Luftaustausch in luftdichten Gebäuden zu knapp bemessen ist, so dass es zu einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte in dem Gebäude kommt.
Die Erhöhung der relativen Luftfeuchte erklärt sich dadurch, dass das Luftvolumen in dem Haus sich durch den Heizbetrieb erwärmt und in der Lage ist, mehr Feuchtigkeit aufzunehmen. Die feuchte Luft kondensiert an den kälteren Gebäudeelementen (Fenster, Wärmebrücken in der Wand und in der Gebäudekonstruktion) und gibt Feuchte ab.
Die Folge einer längerfristigen Feuchteansammlung, die bei relativen Luftfeuchten >80% gegeben ist, ist ein Pilzbefall im Gebäude; in der Regel Schimmelpilzbefall. Schimmelpilzsporen gelten als gesundheitsgefährdend und müssen durch aufwendige Trocknung des Hauses und Austausch der befallenen Stellen beseitigt werden. In einem fortgeschrittenen Stadium des Schimmelpilzbefalls kann das Haus aus gesundheitstechnischen Gründen nicht bewohnt werden.
Hier herrscht ein enormes Aufklärungsbedürfnis durch die betreffenden Firmen und Institute. Vermehrte Bauschäden würden dazu führen, dass die Bestrebungen, das „Barackenimage“ von Holz- und Fertighäusern vergessen zu machen, scheitern.

4.3.3. Einflüsse auf den Wärmehaushalt eines Gebäudes

Die Einflüsse auf den Wärmehaushalt eines Gebäudes sind vielschichtig. Verschiedene externe und interne Faktoren spielen hier zusammen. Man unterscheidet zwischen:

- gegebenen und
- veränderbaren Einflüssen.

Gegebene Einflüsse können nicht vom Planer und Architekten beeinflusst werden. Hierzu zählt das Klima, das Benutzerverhalten und ähnliches.
Veränderbare Einflüsse können und müssen vom Architekten oder Planer kalkuliert und beeinflusst werden. Die Abbildung 13 gibt einen Überblick über die Einflüsse (veränderbare Einflüsse: **fett und rot** / gegebene Einflüsse: *kursiv und schwarz*).

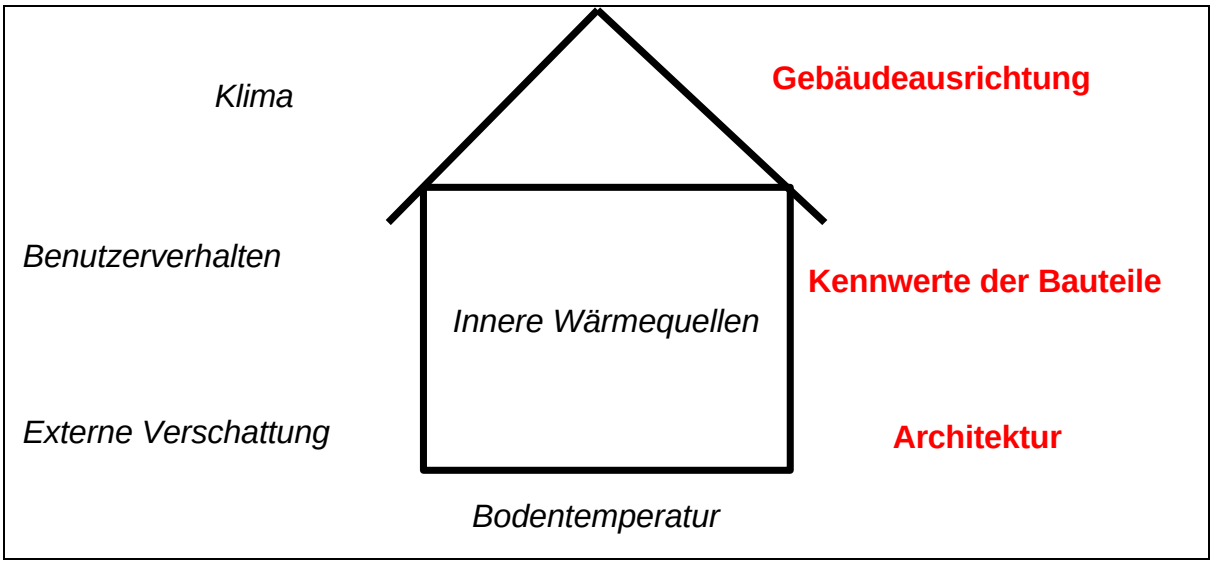


Abbildung 13: Einflüsse auf den Wärmehaushalt eines Einfamilienhauses [Eyerer et al., 2000]

Das Benutzerverhalten kann nicht direkt von Planern beeinflusst werden. Der Staat und die Wirtschaft sind jedoch in der Lage, Veränderungen herbeizuführen.

Der **Staat** kann auf das Nutzerverhalten durch

- neue Gesetze zur Energieeinsparung
- steuerliche Entlastung für umweltgerechtes Wohnen
- Verteuerung der Energie

einwirken.
Die **Wirtschaft** und die **Planer** können ebenfalls etwas dazu beitragen, dass der Nutzer von Gebäuden energiesparend wohnt.

- Reduzierung der energieverschwendenden Möglichkeiten der Bewohner bei Beibehaltung des Wohnkomforts.

Die **Wissenschaft** muss durch geeignete Forschung und Publikationen die Nutzer von Gebäuden sensibilisieren, damit die energetischen Zusammenhänge im Hausbau verstanden werden und demzufolge das Verhalten eigenverantwortlich geändert werden kann.

4.3.4. Verwendung energiesparender Elektrogeräte

Die Verwendung von Energiesparlampen oder Haushaltsgeräten mit einem niedrigen Strombedarf bietet ein beträchtliches Einsparpotential. Es wird davon ausgegangen, dass der Energiebedarf im privaten Wohnbereich um 30% gesenkt werden kann, wenn zum Einen Elektrospargeräte eingesetzt werden, zum Anderen aber auch Geräte, die sich nicht im Einsatz befinden, abgeschaltet werden. Zudem können Zeitschaltuhren den Energieverbrauch durch bedarfsgerechten Betrieb (z.B. Bewegungsmelder auf kurze Betriebszeit programmieren) reduzieren. Der energiesparorientierte Hausbesitzer wird sich überlegen müssen, ob zusätzliche Energieverbraucher, wie elektrische Garagentore und Jalousien, eine Sauna im Haus oder ähnliches für ihn einen erhöhten Wohnkomfort oder einen unnötigen Energieverbrauch bedeuten.
Durch den Stand-By Modus der Geräte (Fernsehgerät, PC, Stereoanlage, etc.) wird in Deutschland unnötig viel Energie verbraucht.

Beispiel TV-Gerät

Ein Fernsehrgerät verbraucht im Stand-By Modus pro Stunde zwischen 0,13 Watt[10] (neue Technologie) und 3,9 Watt (ältere Technologie) [Schulz, 2002]. Durch Ausschalten eines Gerätes älteren Baujahrs können folglich 34 kWh pro Jahr eingespart werden.

In Deutschland wird $^1/_7$ der Stromkosten für den Stand-By Betrieb ausgegeben. Theoretisch könnten demzufolge zwei große Kraftwerke vom Netz genommen werden, wenn die Geräte statt auf Stand-By ausgeschaltet werden [Energiestiftung Schleswig-Holstein, 2001].

[10] Primärenergie

4.4. Holzhausbau

Der Holzbau bietet vielfältige Möglichkeiten Holz ökologisch vertretbar einzusetzen. In diesem Kapitel werden die bestehenden gängigen Bauvarianten kurz zusammengefasst. Gerade in den vergangenen Jahren hat die Produktpalette im Holzbau einen erheblichen Zuwachs erfahren.
Die neuen Systeme basieren größtenteils auf den herkömmlichen Konstruktionsprinzipien (dem Holzrahmenbau, dem Holzskelettbau oder dem Blockhausbau). Sie sind nur in einigen Punkten modifiziert worden. Die Anbieter beziehen sich hierbei hauptsächlich auf Teilbereiche des Holzbaus, wie der Verwendung von naturbelassenem Holz, der Verringerung der Verbindungsmittel oder einer geringfügigen Modifizierung der Konstruktionen.
Nur sehr wenige neuartige Bausysteme lassen sich keiner der herkömmlichen Bauweise zuordnen. Diese Bausysteme besitzen deutschlandweit aber zur Zeit auch keine Relevanz.

Die Tabelle 12 gibt einen Überblick über die herkömmlichen Bausysteme und betrachtet die Unterschiede in der **Konstruktion** [Natterer et al. 1978 u. 1996; verschiedene Informationsdienst Holz Broschüren; Holzrahmenbau, 1995] und der **Ökologie**.
Die Daten der Ökologie können als Durchschnittswerte alle Bausysteme dieser Art betrachtet werden, Spezifikationen der einzelnen Gebäude können zu anderen Ergebnissen führen.

Eine Rangfolge der einzelnen Bausysteme wird als **Fazit**[11] (☺ = sehr gut, 😐 = gut; ☹ = befriedigend bis nicht so gut) hinsichtlich Konstruktion, möglichen Qualitätseinbußen und Ökologie angegeben.
Dieses Fazit ist genereller Art und stark abhängig vom Hersteller und anderen Parametern im Hausbau. Jedes Bausystem besitzt Vor- und Nachteile.
Es muss davon abgeraten werden, eine Addition der Pluspunkte eines Systems durchzuführen, um eventuell zu dem besten Holzhaus insgesamt zu gelangen. Die im Hausbau vorhandenen Prioritäten der Bewohner sind hierfür zu vielfältig.
Das angegebene Fazit kann aber vom Nutzer dazu verwendet werden, das für ihn beste Haus zu planen, da er seine eigenen Prioritäten gewichten kann.
Für das Verständnis der folgenden Tabelle muss davon ausgegangen werden, dass die drei verglichenen Gebäude über die gleiche Gebäudegröße (funktionale Einheit) verfügen.

[11] Abstufungen zwischen den einzelnen Noten werden durch zwei Gesichter angegeben. So würde z.B.☺ 😐 der Note 1,5 entsprechen.

Tabelle 12: Vergleich der herkömmlichen Holzbausysteme hinsichtlich Konstruktionseigenschaften und ökologischen Parametern

Holzrahmenbau	Skelettbau	Blockhausbau
Holzrahmenbau (Foto: LBS Haus 81^{fuenf})		
	Holzskelettbau (Foto: Fa. HUF Haus Hartenfels)	
		Blockhausbau (Foto: Fa. Hanssen Blockhaus)

Holzrahmenbau	Skelettbau	Blockhausbau
Konstruktion:		
Vorteile des Systems:		
→ bewährtes System → energiesparende Bauweise → geringe Baukosten	→ Planungsfreiheit hinsichtlich Abmessungen → Innenwände versetzbar → große Fensterflächen möglich	→ Holzmasse sehr groß → „angenehmes Raumklima“ → massive Bauweise
Statisches Prinzip:		
Scheibenprinzip keine Trennung von raumabschließenden und tragenden Bauteilen	Stabförmiger Lastabtrag Trennung von raumabschließenden und tragenden Bauteilen	Lastabtrag über die ganze Wand, ähnlich Massivbau
Verwendetes Holz:		
Holz in Form von: → KVH /Bauholz → Holzwerkstoffen → ggf. Brettstapel 😐	Holz in Form von: → BSH als Skelett → Holzwerkstoffe 😐	Holz in Form von: → Rundholz → Brettstapel ☺
Verhältnis Wandstärke/Wohnraum:		
Schlanker Wandaufbau = große Wohnfläche ☺	Siehe Holzrahmenbau, jedoch abhängig von der Ständerdimensionierung ☺ 😐	Wandaufbau dicker als andere Systeme im Holzbau, d. b. die Wohnfläche ist kleiner ☹
Holzschutz:		
Technisch getrocknetes Bauholz Holzwerkstoffe besitzen definierte Feuchte, Qualität gleichbleibend gut Konstruktiver Holzschutz herrscht vor, Ausnahme Schwellenholz ☺ 😐	Technisch getrocknetes Brettschichtholz Qualität gleichbleibend gut Konstruktiver Holzschutz vorherrschend ☺	Technisch getrocknetes Rundholz Aufwendige und langwierige Trocknung, Holzqualität abhängig von der Trocknungstechnik; Konstruktiver Holzschutz vorherrschend ☺

Holzrahmenbau	Skelettbau	Blockhausbau
Baustoffbedingte Schadstoffemissionen im Haus:		
Die Verwendung von Holzwerkstoffen ist mit dem Einsatz von Bindemitteln verbunden, trotz bauaufsichtlicher Zulassung wird z. B. von Baubiologen die Verwendung von Spanplatten negativ beurteilt ☺ 😐	Siehe Holzrahmenbau (Spanplatten) ☺ 😐	Das verwendete Naturholz (NH) emittiert Terpene, welche zu allergischen Reaktionen führen können ☺
Möglichkeiten des Selbstbaus („Eigenleistung“):		
Ausbau in Eigenleistung sehr gut möglich ☺	Selbstausbau bei nichttragenden Bauteilen möglich ☺ 😐	Beschränkung auf Innenausbau 😐
Vorfertigung:		
Sehr hoher Vorfertigungsgrad möglich, Bauelemente inkl. Fenstern und Türen lieferbar (Tafelbau) ☺	Gute Vorfertigungsmöglichkeiten, jedoch häufig Baustellenfertigung 😐	Zusammenbau auf der Baustelle, Vorfertigung der Bohlen im Werk 😐
Wandaufbau (u-Wert):		
Niedrigenergiebau problemlos möglich ☺	Niedrigenergiebau möglich, jedoch abhängig von der Fensterfläche und der verwendeten Fenstersysteme (Zwei- oder Dreischeibenisolierglas) ☺ 😐	Niedrigenergiebau nur im zweischaligen Wandaufbau möglich, Einschalig kann kein Niedrigenergieniveau erreicht werden 😐

Holzrahmenbau	Skelettbau	Blockhausbau
CO_2 –Speicherung:		
verbaute Holz/Biomasse:		
Der Holzrahmenbau gewährleistet bei schlankem Wandaufbau sehr gute Dämmwerte; die Masse des Hauses ist jedoch gering Problem Schallschutz 😐	Im Skelettbau verbaute Masse abhängig von dem gewählten Raster 😐	Der Blockhausbau weist das größte Gewicht an Holz/Biomasse auf. ☺
Energieverbrauch:		
Erstellungsenergie:		
Verschiedene Baustoffe auf Basis Holz, andere Baustoffe als Holz → Herstellungsenergie gering, aber höher als Blockhausbau 😐	Große Fensterflächen, versch. HWS, andere Baustoffe als Holz; Stahl als Verbindungsmittel für die tragenden Teile → Herstellungsenergie höher als Holzrahmenbau ☹	Baustoff Rundholz; andere Baustoffe als Holz anteilig geringer → Herstellungsenergie gering ☺
Nutzungsenergie:		
Transmissionsverluste:		
2-schalig ist Niedrigenergiestandard problemlos möglich ☺	Abhängig vom Wandaufbau und den Fensterflächen. Im Skelettbau werden in der Regel große Fensterflächen geplant 😐	2-schalig ist Niedrigenergiestandard problemlos möglich; Blockhausbau in der Regel aber einschalig ☺😐
Lüftungsverluste:		
Abhängig von der technischen Ausstattung		

Interne Wärmegewinne:

Generell nutzerabhängig, bestimmte Bausysteme, die aus einem schlechten Wärmeleiter als Baustoff (z.B. Holz) bestehen, sind aber in der Lage, Wärme zu speichern und langsam wieder abzugeben.

Grundsätzlich kann die vereinfachte Regel angewendet werden:

Je mehr Masse in dem Gebäude verbaut wurde, desto besser ist die Wärmespeicherfähigkeit des Hauses.

Die Vorteile hinsichtlich Wärmespeicherung befinden sich demnach bei dem Blockhaus, dessen Masse an Holz am größten ist.

😐	😐	☺

Solare Wärmegewinne:

Aufgrund der Lastabtragung über die Scheibe darf die Fensterfläche nicht zu groß sein.	Sehr viele solare Wärmegewinne aufgrund großer Fensterflächen	Fensterflächen normal
😐	☺	😐

Heizenergiebedarf gesamt:

Einen Vergleich der drei Bauvarianten hinsichtlich des Heizenergiebedarfs kann nicht generell beantwortet werden. Alle Varianten besitzen Vorteile, ein endgültiger Vergleich ist momentan noch nicht durchführbar.

Entsorgungsenergie:

Entsorgung problemlos; Energiegewinn durch thermische Entsorgung vorhanden.	Entsorgung problemlos, Entsorgung der Fenster eventuell aufwendig; Energiegewinn durch thermische Entsorgung vorhanden.	Entsorgung des naturbelassenen Holzes problemlos; Hoher Energiegewinn durch thermische Entsorgung; Weiterverwendung des Rundholzes zu Holzwerkstoffen möglich.
😐	😐 ☹	☺ ☺

4.5. Planerische Details im Holzrahmenbau

In dieser Arbeit werden zwei Holzhäuser architektonisch geplant und mit Hilfe der entwickelten und in Kap. 5 und 6. vorgestellten Berechnungsgrundlage bewertet. Bei den Gebäuden handelt es sich um Holzrahmenhäuser, deren planerische Grundlagen in diesem Kapitel näher erläutert werden.

Das Rastermaß im Holzrahmenbau beträgt zwischen 62,5 cm und 81,5 cm. Die Mehrzahl der Holzrahmenbauten werden in einem Raster von 62,5 cm geplant und hergestellt. Der Vorteil dieses Maßes liegt in der bisher üblichen Produktionsmentalität der Baustoffhersteller, die Plattengrößen mit einer Breite von 125 cm liefern. Der Holzbauer hat folglich diese Breite in seinem Raster berücksichtigt und die halbe Plattenbreite als Rastermaß gewählt.
Die Nachteile dieses Rasters entstehen mit dem Einbau von Fenstern und Türen, da Wanddurchlässe größer dimensioniert werden müssen als 62,5 cm abzüglich der Balken. Die Folge dieser Bauart ist, dass zusätzliche Ständer und Träger an jedem Wanddurchbruch eingebaut werden, damit die statischen und funktionellen Anforderungen erfüllt werden können. Diese Probleme gibt es bei einem gewählten Raster von 81,5 cm nicht in dem Maße. Mittelgroße Fenster können problemlos in das Raster eingepasst werden. Ein weiterer Vorteil ist nach Aussagen des Erfinders dieses Rastermaßes in der Materialeffizienz [R. Pohlmann; 2000] zu sehen.
In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass im Ständerbau Holz in einem Wandverbund als potentielle Wärmebrücke betrachtet werden kann. Die Reduzierung des Holzanteils, verbunden mit einer Erhöhung der zu dämmenden Menge in einer Holzrahmenwand verringert folglich den Wärmedurchgang durch die Wand und kann zu einem niedrigeren Energieverbrauch während der Nutzung beitragen.

Die Verwendung von Holz im Hausbau ist an eine bauaufsichtliche Zulassung gebunden.
Der Holzbau ist generell beschrieben in den Normen:

DIN 1052 Teil 1	Holzbauwerke; Berechnung und Ausführung
DIN 1052 Teil 2	Holzbauwerke; Mechanische Verbindungen
DIN 1052 Teil 3	Holzbauwerke; Holzhäuser in Tafelbauart
DIN 1074	Holzbrücken; Berechnung und Ausführung

Die einzelnen Massivholzprodukte und Holzwerkstoffe werden nach folgenden Normen beurteilt:

DIN 4074 Teil 1	Bauholz für Holzbauteile; Gütebedingungen für Bauschnittholz (Nadelholz)
DIN 4074 Teil 2	Bauholz für Holzbauteile; Gütebedingungen für Baurundholz (Nadelholz)
DIN 69705 Teil 3	Sperrholz; Bau-Furniersperrholz
DIN 68705 Teil 5	Sperrholz; Bau-Furniersperrholz aus Buche
DIN 68754 Teil 1	Harte und mittelharte Holzfaserplatten für das Bauwesen; Holzwerkstoffklasse 20
DIN 68763	Spanplatten; Flachpreßplatten für das Bauwesen, Begriffe, Eigenschaften, Prüfung, Überwachung

Der **EUROCODE 5** gewinnt im Hausbau zunehmend an Bedeutung. In ihm ist festgelegt, dass die Bemessung der Holzkonstruktionen nicht mehr, wie in der DIN 1052 über zulässige Spannungen, sondern über die Versagenswahrscheinlichkeit einer Konstruktion ermittelt wird. Es muss nachgewiesen werden, dass das Gebäude den während der Nutzung auftretenden Kräften standhalten kann.

4.5.1. Im Holzbau verwendete Materialien

In den folgenden Abbildungen werden die im Holzhausbau gängigen Wand- Dach- und Fußbodenaufbauten beschrieben. Es existieren im Holzbau viele unterschiedliche Systeme und Varianten. Im Folgenden werden die Aufbauten dargestellt, die einen geringen Nutzungsenergiebedarf ermöglichen. Diese Niedrigenergiekonstruktionen werden nach der zu erwartenden Energieeinsparverordnung an Relevanz gewinnen.

4.5.1.1. Dach

Ein typischer Dachaufbau im Niedrigenergie-Holzbau ist in der Abbildung 14 dargestellt.

Dachbedeckung	Dachziegel oder ähnliches
Lattung	6/4 cm
Holzweichfaserplatte	2,2 cm
Holzsparren aus Nadelholz mit Dämmung	6/24 mit 24 cm Dämmung
Nadelsperrholz	2 cm
Gipskartonplatte	1,25 cm

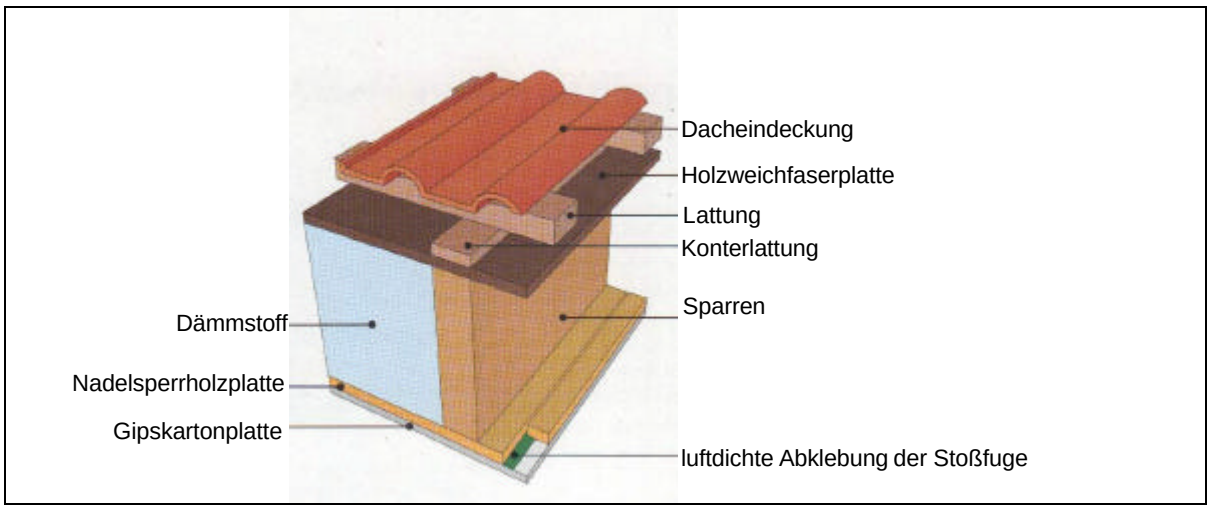


Abbildung 14: Graphischer Aufbau eines Daches [Venschott, 2000]

Im energieoptimierten Holzbau müssen jegliche Energieverluste durch die Gebäudehülle vermieden werden. Das beheizte Gebäudevolumen muss vollständig mit einer Isolationsebene umgeben sein. In der Abbildung 14 ist der Aufbau und die Dämmung des Daches dargestellt. Bei diesem Dach handelt es sich um ein ausgebautes Dach mit einem beheizten Dachraum. Verzichtet der Bauherr auf einen Dachausbau, so muss die gebäudeisolierende Schicht in der Zwischendecke zum Dachboden geführt werden.

4.5.1.2. Zwischendecken

Ein Problem des in seinem Aufbau sehr leichten Holzbaus ist die Übertragung von Trittschall. Trittschall lässt sich jedoch mit einfachen Mitteln, z.B. durch das Einbringen von Gewicht oder durch aufwendige Baukonstruktionen (Abhängen der Decke) verringern. Im Holzbau kann Masse durch die Verwendung von handelsüblichen Gehwegplatten in die Zwischendecken eingebracht werden.

Die Zwischendecke wird demzufolge mit dem Baustoffen

Gipskartonplatte	1,25 cm
Nadelsperrholz	3 cm
Deckenbalken gefüttert mit Dämmung	6/24 mit 24 cm Dämmung
Nadelsperrholz	2,2 cm
Gehwegplatten	5 cm
Holzweichfaserplatte	2 cm
OSB-Platte	1,5 - 1,8 cm
Gesamt:	**ca. 40 cm**

hergestellt.

Abbildung 15 verdeutlicht einen möglichen Wandaufbau und den Aufbau der Zwischendecke.

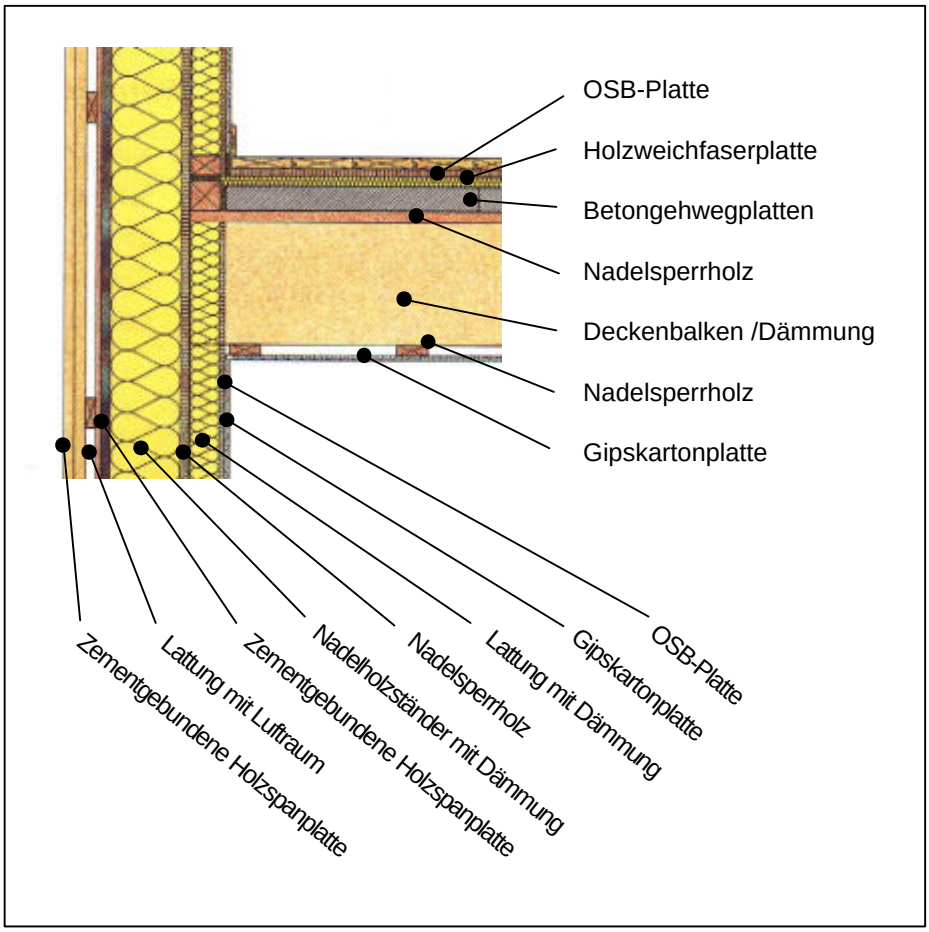
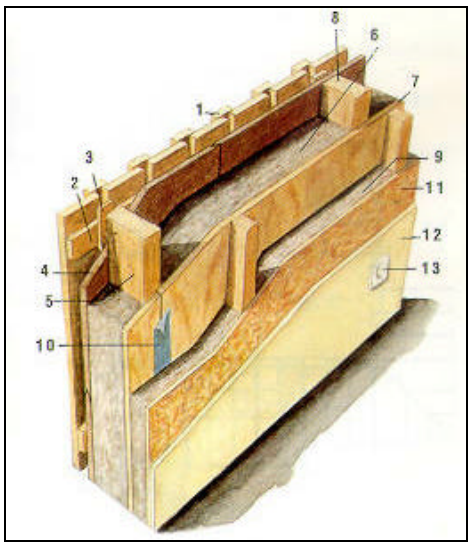


Abbildung 15: Aufbau einer Zwischendecke und einer Wand [Venschott; 2000]

4.5.1.3. Wandaufbau

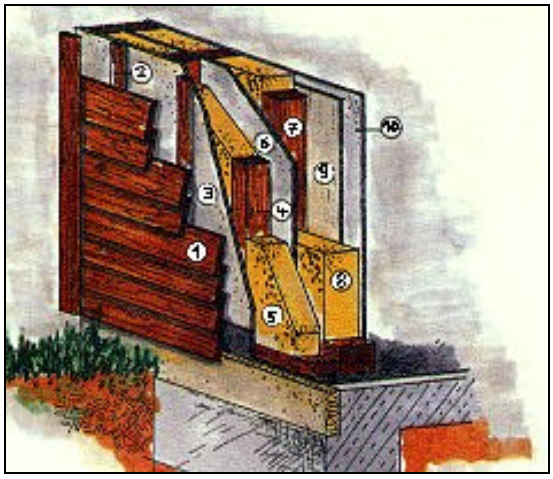
Der Holzhausbau bietet eine sehr große Auswahl an technisch hochwertigen Konstruktionen. In den Abbildungen 16 und 17 werden zwei mögliche Wandaufbauten dargestellt, mit denen eine energiesparende Bauweise möglich ist.

Die in Abbildung 16 dargestellt Wand hat eine Dicke von 35 cm, während die Wand in der Abbildung 17 eine Stärke von 39 cm aufweist.



1. Zementgebundene Holzspanplatte
2. Lattung
3. Konterlattung
4. Zementgebundene Holzspanplatte
5. Nadelholzbalken
6. Zelulosedämmung
7. Nadelsperrholz
8. Nadelholzbalken
9. Zellulosedämmung
10. Abdichtung der Stoßfugen
11. OSB-Platte
12. Gipskartonplatte
13. Installationsraum

Abbildung 16: Graphischer Aufbau einer Wand des 81^{fuenf} Hauses



<u>Außen → Innen:</u>
Lärchenholz-Verschalung
Traglattung
Gipsbauplatte
Vollholzständer
Zellulosedämmstoff
Gipsbauplatte
Vollholzständer
Zellulosedämmung
OSB-Platte
Gipsbauplatte

Abbildung 17: Graphischer Aufbau einer hochgedämmten Wand (Haacke Produktlinie NATUR)

Die Entwicklung neuer Baustoffe bedeutet, dass im Holzbau eine potentielle „Schwachstelle“ hinsichtlich des Wärmebrückeneffektes verringert werden kann. Zusammengesetzte Holzwerkstoffe, wie beispielsweise die TGI Träger reduzieren die Wärmebrücken in einem Bauelement durch einen verringerten Holzanteil über den Querschnitt im Verhältnis zu der Verwendung von Vollholzständern.

Der Steg des Trägers besteht aus einem Holzwerkstoff mit einer Dicke von maximal 1,5 cm. Vollholzständer weisen im Holzbau Querschnitte von wenigstens 6 cm auf. Die Abbildung 18 zeigt den Wandaufbau einer wärmebrückenreduzierten Außenwand.

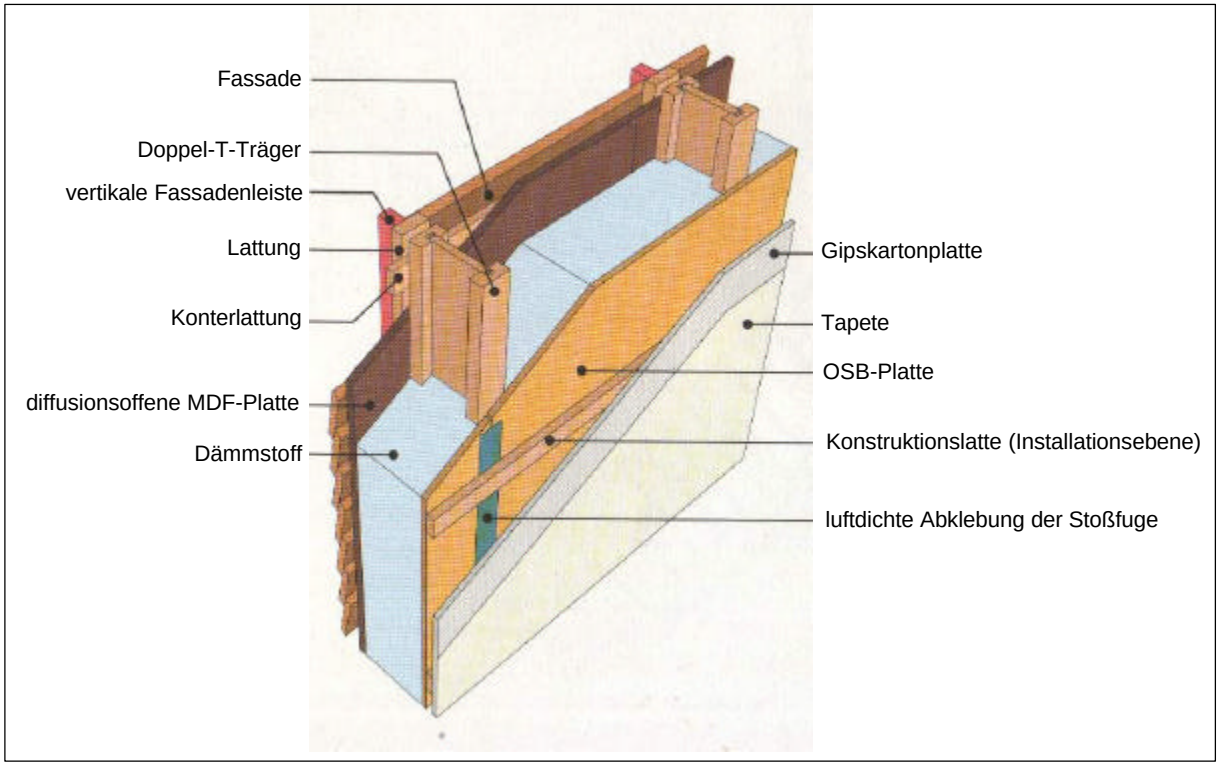


Abbildung 18: Wärmebrückenreduzierte Wandkonstruktion [www.81fuenf.de]

4.6. Kritische Anmerkungen zum Kapitel 4

Die Reserven der fossilen Energieträger werden in den kommenden 50 Jahren zur Neige gehen. Der Nutzer von Energie ist demzufolge gefordert, schon heute neue Energieträger, wie nachwachsende Rohstoffe oder die Nutzung von Wind und Sonne, in sein Verhalten einzubeziehen. Grundsätzlich gilt es jedoch, den Verbrauch von Energie einzuschränken. Der Gebäudebereich bietet, wie in dem vorigen Kapitel beschrieben, vielfältige Möglichkeiten der Energieträgereinsparung und der Nutzung nachwachsender und natürlicher Energiequellen.

Niedrigenergie- und Passivhäuser spiegeln den neuen Trend der Marktentwicklung wieder. Der Holzbau hat es verstanden, das Marktsegment Passivhausbau mit dem Wort Holzbau auf sehr gute Weise zu verbinden.

Die Holzhaushersteller haben in der vergangenen Zeit beträchtliche Anstrengungen unternommen, geeignete Konstruktionen zum energiesparenden Bauen zu entwerfen. Diese Konstruktionen sind technisch und konstruktiv anspruchsvoll, sie können als ausgereift und marktfähig bezeichnet werden.

Es muss jedoch darauf verwiesen werden, das der Passivhausbau momentan ein Nischenprodukt im Hausbau darstellt; dass Kerngeschäft der Baubranche ist der „einfache“ und

energetisch „normale“ Bau. Die Herstellung von energetisch optimierten Gebäuden ist mit einem erhöhten Konstruktionsaufwand, einer verbesserten Haustechnik und einem Mehraufwand an Material verbunden. Das führt dazu, dass diese Häuser in der Anschaffung teurer sind.

Die Energiepreise werden sich in den kommenden Jahren erhöhen. Das kann dazu führen, dass energetisch optimierte Häuser vermehrt nachgefragt werden.

Ein nicht zu vernachlässigendes Problem stellen jedoch die Nutzer der Gebäude dar.

Die immer luftdichteren und technisch hochwertigeren Häuser müssen, damit sie dauerhaft und mängelfrei bewohnbar sind (Feuchteansammlung etc.), gebäude- und konstruktionsgerecht bewohnt werden. Die Industrie und die Forschung sind gefordert, den Bewohnern von energetisch optimierten Gebäuden sozusagen Gebrauchsanleitungen für die Häuser an die Hand zu geben, damit die Häuser auch tatsächlich langfristig energetisch optimal funktionieren können.

Fazit:

Primäres Ziel der kommenden Jahre muss es sein, den Gesamtenergiebedarf im Gebäudebereich zu reduzieren.

Der Fokus muss sich von der einseitigen Betrachtung auf die Nutzung des Gebäudes hin zu einer Betrachtung über den gesamten Lebensweg verändern, da die konstruktiv aufwendigen Gebäude nur auf diese Weise realistisch betrachtet werden. Die Auswahl der Baustoffe und die Wahl geeigneter Konstruktionen muss gleichrangig mit der Nutzung der Häuser gesehen werden.

4.7. Exkurs Kohlenstoffspeicherung

In dem vorigen Kapitel ist verdeutlicht worden, dass eine energiesparende und umweltschonende Bauweise durch den Einsatz von Holz und Holzprodukten sehr gut realisiert werden kann. Holz als Roh- und Baustoff, aber auch als Energieträger, besitzt zudem einen einzigartigen Vorteil:

> Holz bindet bei seiner Entstehung das für den weltweiten Treibhauseffekt sehr stark verantwortliche Treibhausgas Kohlendioxid. Bei der Bildung von Biomasse (Holz) wird der Atmosphäre CO_2 entzogen und der Kohlenstoff (C) in die Biomasse eingebaut. Wälder und Holzprodukte sind damit Kohlenstoffsenken und tragen positiv zur Reduzierung von Treibhausgasen bei.

Holz als nachwachsender Rohstoff besteht durchschnittlich zu

- 50 % aus Kohlenstoff
- 43 % aus Sauerstoff
- 6 % aus Wasserstoff
- 1 % aus anderen Elementen.

Der Baum entzieht der Atmosphäre während des Wachstums Kohlendioxid und bildet aus dem Kohlenstoffmolekül zusammen mit Spurenelementen aus dem Boden die baumeigenen Bestandteile wie Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Es wird Holz, Rinde und Laub, allgemein Biomasse, gebildet. Die notwendige Energie liefert die Sonne.
1 m³ Kiefernholz mit einem Gewicht von ca. 500 kg (atro) enthält 250 kg Kohlenstoff und speichert somit 900 kg CO_2-Äquivalente.
Durch die Photosynthese der Pflanzen und Bäume wird die Umwelt entlastet. Ein positiver Nebeneffekt der Photosynthese ist die Freisetzung von Sauerstoff. Abbildung 19 verdeutlicht den natürlichen Prozess der Holzproduktion.

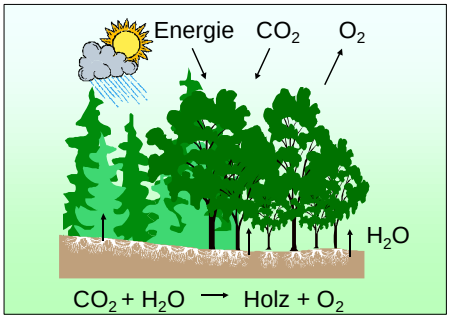
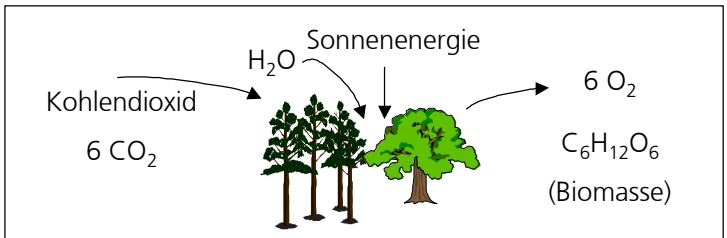


Abbildung 19: Energiefabrik und Kohlenstoffsenke Wald [Frühwald et al.; 2001]

Die Kohlenstoffbilanz für 1 kg Holz ist der Abbildung 20 zu entnehmen.



Bilanz für 1 kg Holz

Input	Output
1,44 kg CO_2	1 kg Holz (Biomasse)
0,56 kg H_2O	1 kg O_2
18,5 MJ Sonnenenergie	18,5 MJ Heizwert

Abbildung 20: CO_2-Bilanz von Holz (Holz vereinfachend als $C_6H_{12}O_6$ gesehen)

Für 1 t Holzmasse (atro) ergibt sich folgender Stoffstrom [Schweinle, Thoroe, 2001]:

$$1.851 \text{ kg } CO_2 + 1.082 \text{ kg } H_2O \Rightarrow 1.000 \text{ kg Holz} + 1.392 \text{ kg } O_2 + 541 \text{ kg } H_2O$$

Beim späteren natürlichen Abbau durch Pilze und Bakterien wird die Biomasse wieder in CO_2 und H_2O zerlegt. Durch die thermische Verwertung wird ebenfalls Kohlendioxid und Wasser an die Atmosphäre abgegeben, dieser Prozess vollzieht sich aber unter Energiefreisetzung. Die in dem Holz gespeicherte Energie wird freigesetzt und kann fossile Energieträger wie z.B. Kohle und Erdgas ersetzen.

4.7.1. Wälder und Holzprodukte sind Kohlenstoff-Senken

In den europäischen Wäldern ist mehr als 20mal so viel Kohlendioxid gespeichert wie die jährlichen Emissionen betragen[12] [Karjalinen et al., 2000]. Das Speicherpotential deutscher Wälder ist deutlich geringer, da in unserem hoch industrialisierten und dicht bevölkerten Land die Kohlendioxidemissionen in Relation zur Bevölkerungsdichte hoch sind. Die zusätzlichen Potentiale zur Speicherung von Kohlenstoff sind im Vergleich zum Bestand gering, weil viele Wälder relativ alt sind und bereits einen hohen Bestand an Biomasse haben. Vergleicht man das zusätzliche Speicherpotential mit den Emissionen, so können theoretisch in Deutschland nur etwa 3-5% gespeichert werden. In Europa können in den Wäldern

[12] Gespeichert: 20.000 Mio. t / jährliche Emissionen: 900 Mio. t

mehr als 10% der Emissionen eingelagert werden. Für waldreiche Länder wie Kanada, Russland u.a. kann das Speicherpotential aber deutlich höher sein. Grundsätzlich kann festgestellt werden:

- Wälder sind bedeutende Kohlenstoffsenken.
- Die zusätzliche Senkenfunktion nimmt mit zunehmendem Alter der Wälder ab.
- Neu- und Wiederaufforstungen können zusätzliche Senken schaffen.
- Die Senkenfunktion setzt sich in Holzprodukten fort.
- Nutzung der Biomasse kann durch Substitution fossiler Rohstoffe und Energieträger zu einer Reduzierung von CO_2-Emissionen führen.

Durch die Verwendung von Holz kann die Kohlenstoffsenke im Wald zeitlich fortgesetzt werden. Im Forst speichert der Baum Kohlenstoff zwischen 30 Jahren (Durchforstung) und 120 Jahren (Endnutzung). In Holzprodukten wird das Kohlendioxid zwischen wenigen Wochen (Papier für Tageszeitung) bis zu mehreren hundert Jahren (Holzgebäude) gespeichert. Vermehrte Nutzung von Holz und anderer Biomasse kann daher eine wichtige Rolle im nationalen Klimaschutz spielen.

Für die aktuell in Gebrauch befindlichen Holzprodukte wird von einer Kohlenstoffspeicherung von wenigstens 340 Mio. t C, also ca. 1,224 Mrd. t CO_2, ausgegangen [Frühwald et al, 2001]. Die derzeitige Holzverwendung erhöht diese Menge pro Jahr um 14 bis 18 Mio. t CO_2. Dabei liegt die durchschnittliche Dauer der Speicherung (alle Produkte gerechnet) bei ca. 33 Jahren.

Durch den vermehrten Einsatz von Holz im Hausbau kann der Kohlenstoffspeicher weiter vergrößert werden. Die Speicherzeit der Emissionen wird sich deutlich verlängern, da die Nutzungsphase länger ist als die von anderen Holzprodukten.

Der Begriff **„Positivhaus“** ist auf die Kohlenstoffspeicherfähigkeit des Baustoffes Holz zurückzuführen. Durch die Verwendung von Holz und anderer Biomasse im Hausbau kann es theoretisch möglich sein, über den gesamten Lebensweg des Hauses weniger CO_2 an die Atmosphäre abzugeben als in dem Gebäude an Kohlenstoff gespeichert ist.

4.7.2. Positivhäuser

Im Zuge der Kohlendioxidspeicherung können Häuser realisiert werden, die über den gesamten Lebensweg weniger Kohlendioxid emittieren, als in ihren nachwachsenden und erneuerbaren Baustoffen gespeichert ist, bzw. verwertet werden kann. Das bedeutet, dass letztlich kein CO_2 emittiert wird. Für diese Häuser wurde der Begriff „Positivhäuser“ [Bartolles 2001] etabliert. Die Abbildung 21 verdeutlicht die CO_2-Bilanz von herkömmlichen Gebäuden,

deren CO_2-Bilanz negativ ist. Diese Gebäude können als gängige Bausysteme in Deutschland bezeichnet werden. Die Darstellung eines Positivhauses ist in Abbildung 22 dargestellt.

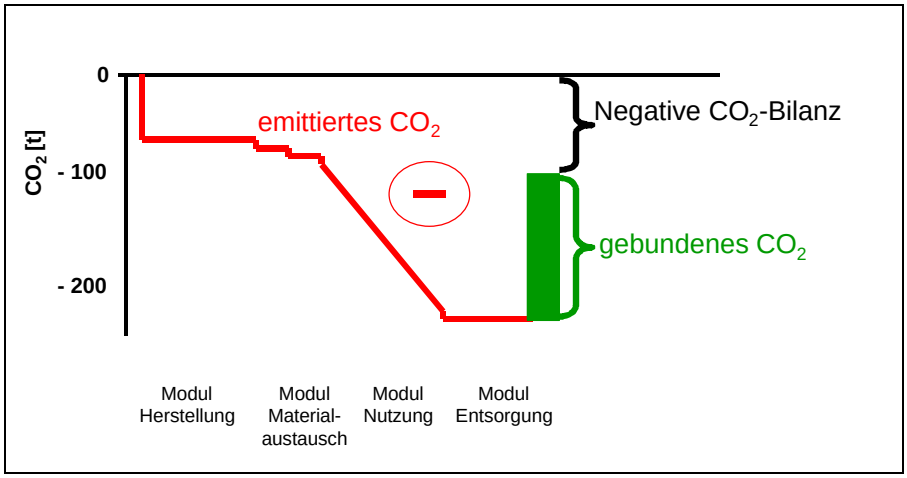


Abbildung 21: Negative Kohlendioxidbilanz eines herkömmlichen Hauses

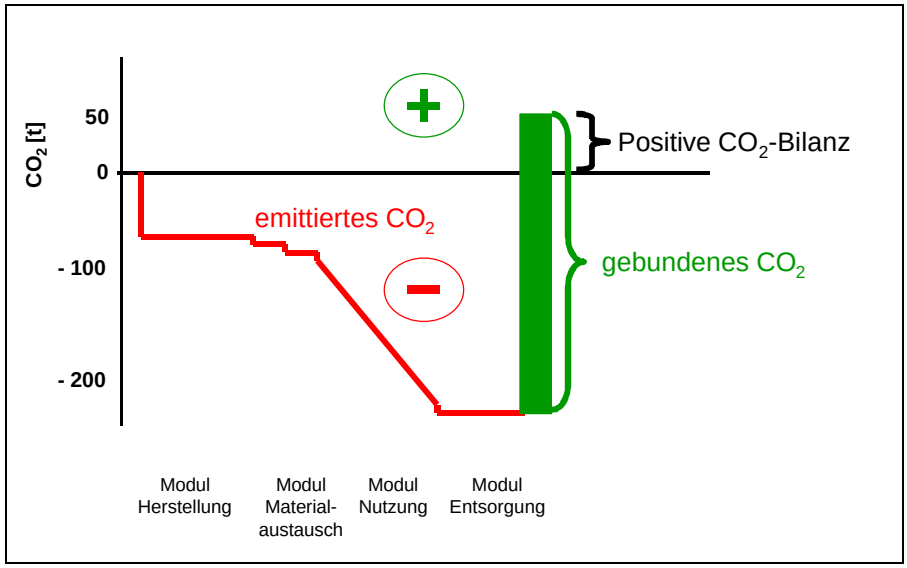


Abbildung 22: Kohlendioxidbilanz (bzw. –fluß) eines Positivhauses

Ein Positivhaus kann erstellt werden, wenn folgende Faktoren bei der Planung Berücksichtigung finden:

- Die eingebrachte Menge an Holz, Holzwerkstoffen und anderen CO_2-speichernden Baustoffen muss groß sein.
- Der Betriebsenergiebedarf des Hauses muss gering sein.
- Fossile Baustoffe müssen durch nachwachsende Baustoffe ersetzt werden.

TEIL II

Energiebilanzen und CO_2-Bilanzen

für den Hausbau

Berechnungsgrundlage (Architektentool)

5

5. BERECHNUNGSGRUNDLAGE (ARCHITEKTENTOOL)

Die Erstellung von ökologischen Bewertungen ist mit derzeitigen Mitteln und Methoden zeit- und arbeitsintensiv. Die Ergebnisse dieser ganzheitlichen Betrachtungen sind zudem sehr speziell, so dass keine verallgemeinerten Aussagen, wie sie von Praktikern oder der Industrie gefordert werden, abgeleitet werden können. Die Folge dieser Entwicklung ist, dass das Vertrauen in die Aussagekraft von ökologischen Bewertungen geringer wird.

Ziel dieser Arbeit ist es, ganzheitliche Zusammenhänge bezüglich des Energieaufwandes und der Kohlendioxidemissionen beim Bau, Betrieb und Rückbau von Wohngebäuden zu ermitteln.
Um diese Aussagen transparent und wiederholbar zu errechnen, wurde eine anwenderfreundliche Berechnungsgrundlage zur Erstellung von ökologischen Bewertungen im Hausbau entwickelt.
Der Planende möchte schnell und effektiv ökologische Aussagen erhalten, die sowohl von der Praxis als auch von der Wissenschaft als relevant erachtet werden.
Vordergründig ist der Holzhausbau an den ökologischen Aussagen über den **Energieaufwand** und den Zusammenhängen von Betriebsenergiebedarf und Gesamtenergiebedarf, die Politik ist an fundierten Aussagen zu den **Treibhausgasemissionen** und einer Verringerung dieser Emissionen interessiert.
Die Planer und Architekten möchten zudem zunehmend über die **ganzheitlichen Auswirkungen** der **Gebäudekonstruktion** und der **verwendeten Baustoffe** informiert werden.
Um diese Aussagen treffen zu können, wurden Daten generiert, mit deren Hilfe die Erstellung von ganzheitlichen Energiebilanzen und Kohlendioxidemissionen im Hausbau möglich sind.
Die **ganzheitlichen Energiebilanzen** liefern Aussagen über:

- Die Verhältnisse der verschiedenen Lebensabschnitte im Hausbau zueinander.
- Gibt es eine ideale energiesparende Bauweise?
- Fakten zur Energiesparverordnung
- Welche Auswirkungen hat die Gebäudekonstruktion auf den Energiebedarf?
- Welche Auswirkungen hat eine energiesparende Bauweise auf den Gesamtenergiebedarf?

- Welchen Einfluss hat die Wahl der Baustoffe auf den Gesamtenergiebedarf über den Lebensweg und den Herstellungsenergiebedarf des Hauses?

Die Aussagen zu den **ganzheitlichen Kohlendioxidemissionen** finden Verwendung bei den Diskussionen zu den Themen:

- Holz als Kohlenstoffspeicher
- Können CO_2–neutrale Gebäude (Positivhäuser) gebaut werden?
- CO_2-Einsparmöglichkeiten durch den Hausbausektor.

Die entwickelte Berechnungsgrundlage betrachtet diese Fragestellungen in Anlehnung an die Ökobilanzierung nach DIN 14.040 ff.
Die ökologische Bewertung befindet sich trotz der abgeschlossenen Normung immer noch in den Anfängen. Will die ökologische Bewertung Zukunft haben, so müssen Grundlagen geschaffen werden, mit denen die Erstellung der Betrachtung erleichtert, in deutlich kürzerer Zeit als bisher leicht überschaubare Ergebnisse geliefert und grundlegende Aussagen über das Produkt für Jedermann sichtbar gemacht werden.
Grundsätzlich hat aber in der Vergangenheit gegolten, dass die Aussagekraft einer fundierten ökologischen Bewertung den Erstellungsaufwand in den meisten Fällen rechtfertigt (siehe Grundlagenteil über Ökobilanzen im Kapitel 3).

In der Praxis existieren nur sehr wenig normkonforme Ökobilanzen. Der Bilanzierer besitzt derzeit einen nicht zu unterschätzenden Handlungsspielraum.
Die DIN 14.040 ff fordert einen transparenten Aufbau, so dass die Ergebnisse jederzeit nachvollziehbar bleiben. In der Praxis sind die Ökobilanzen jedoch nur unter einem erheblichen Zeitaufwand nachzuvollziehen. Ein transparenter und damit durchgängiger Aufbau ist selten, in den meisten Fällen werden nur die Ergebnisse der ökologischen Bewertung veröffentlicht, die Grundlagen bleiben verborgen.
Aus diesen Gründen ist eine Berechnungsgrundlage für den Hausbau erstellt worden, die in ihrem Aufbau transparent ist. Der Aufwand zur Erstellung von ganzheitlichen ökologischen Bewertungen ist mit diesem „Arbeitstool“ minimiert worden, sodass ganzheitliche Erkenntnisse über Energie- und Kohlendioxidbilanzen für den Hausbau erhalten werden können.

5.1. Datengrundlage

In einer ökologischen Betrachtung muss eine Fülle von Daten auf die Funktionale Einheit, in diesem Fall das geplante **Haus im Rohbauzustand**[13], bezogen werden. Problematisch hierbei ist, dass selbst in „Holzhäusern“ viele unterschiedliche Materialien (Betonfundament mit Stahlbewehrung, Fenster, Dachdeckung, Metallverbindungen, Gipsfaserplatten, etc.) verbaut werden, so dass der Bilanzierer auf Fremddaten von vielen Quellen angewiesen ist. Bei diesen Daten können jedoch ganz unterschiedliche Bilanzgrenzen vorliegen, so dass die verwendeten Daten vor Beginn der Untersuchung sorgfältig geprüft werden müssen und gegebenenfalls diese Bilanzen zu der durchzuführenden Studie kompatibel gemacht werden müssen.

Für die Bilanzierung eines Hauses erweist es sich als hilfreich, wenn die verwendeten Fremddaten bis zu dem fertigen Baustoff bilanziert sind. Diese Werte lassen sich dann relativ problemlos in weiterführende Module für die Berechnungsgrundlage integrieren.

Als Beispiel sei hier die ökologische Bewertung für eine **O**riented **S**tructural (**S**trand) **B**oard (OSB-Platte) genannt. Diese Holzwerkstoffplatte wird im Bauwesen als Innenbeplankung eingesetzt. Durch ihre Platteneigenschaften kann man auf eine PE-Folie als Dampfsperre verzichten, da die Holzspanplatte diffusionsoffen aber dampfdicht ist. Eine ökologische Betrachtung für die OSB-Platte wurde in weiten Teilen von Hasch [2001] durchgeführt. Die Daten beziehen sich auf den Lebensweg der Platte bis zum Werktor, das bedeutet, die Platte kann zum Verarbeiter transportiert und dann ihrer weiteren Nutzung zugeführt werden.

> Diese Bilanzgrenze erweist sich für die ökologische Bilanzierung eines Hauses als optimal, da der Bilanzierer auf die Grundwerte, sprich die Herstellung des Baustoffes zurückgreifen und diese in seine Berechnung einfließen lassen kann.

Der modulare Aufbau einer Ökobilanz erweist sich folglich als sinnvoll, da man Daten aus bestehenden Bilanzen herausnehmen und nach einer sorgfältigen Kompatibilitätsprüfung in andere Bilanzen integrieren kann.

Die Erstellung von Ökobilanzen muss mit aktuellen und fundierten Daten verbunden sein. Existierende ökologische Abschätzungen und in den letzten Jahren entwickelte Softwareprogramme und die hinterlegten Datenbanken basieren häufig auf älteren und sehr allgemeinen Daten.

---

[13] Definition Rohbau: Das Haus ist regen- und winddicht auf einem Fundament/Keller erstellt. Die Fenster sind eingebaut und das Dach ist gedeckt. Die Wände sind inklusive der Dämmung fertiggestellt. Die Abschneidekriterien der Berechnungsgrundlage sind dem Kapitel 5.4 zu entnehmen.

Eine Ökobilanz für Produkte kann aber nur zuverlässige Ergebnisse liefern, wenn ihre Datengrundlage aktuell und fachlich korrekt ist, so dass über das bilanzierte Produkt detaillierte Aussagen getroffen werden.
Der Begriff „Brunneneffekt“ wird oftmals mit durchgeführten Ökobilanzen in Verbindung gebracht. Dieser Begriff meint, dass Ökobilanzen in einer wissenschaftlichen Tiefe erstellt wurden, die selbst einen ökologischen Vergleich von Produkten mit vergleichbarem Produktnutzen nicht zulassen.
Die Ökobilanz fordert, wie in dem allgemeinen Teil dieser Arbeit beschrieben, eine transparente Abgrenzung des Bilanzraumes. Zum Beispiel können für dasselbe Produkt unterschiedliche ökologische Ergebnisse erzielt werden, wenn der Bilanzraum unterschiedlich ist. Das folgende Beispiel verdeutlicht die Auswirkungen verschiedener Bilanzräume auf das Ergebnis der Ökobilanzstudie.
Negative Auswirkungen auf eventuelle Käuferentscheidungen und auf politische Regelungsmechanismen sind die Folge.

Beispiel Spanplatte

Zwei verschiedene ökologische Bewertungen für dieselbe Spanplattenproduktion einer Firma werden erstellt. In der einen werden in dem Bilanzraum alle Zulieferprodukte mit ihrem ökologischen Rucksack berücksichtigt, während die zweite nur die ökologischen Vorgänge in der Plattenherstellung oder nur Teile des ökol. Rücksackes betrachtet. Werden diese beiden Bilanzen unkommentiert veröffentlicht, so sieht die „erste Platte“ ökologisch schlechter aus als die „Zweite“, da die Datengrundlage umfassender ist und alle Lebensphasen berücksichtigt wurden. De facto handelt es sich jedoch um ein und dieselbe Platte, die getroffenen Bilanzräume stimmen nur nicht überein. Die Aussagekraft der ökologischen Betrachtung der „ersten Platte“ ist jedoch fundiert und der Nutzen z.B. für eine spätere Optimierung des Produktes größer.

Eine Kompatibilitätsprüfung der Bilanzgrenzen ist folglich eine Grundvoraussetzung für die Verwendung der Daten in weiterführenden Studien.
In diesem Projekt wurden aktuelle, transparente und sachlich korrekte Daten mit einem vergleichbaren Bilanzraum aus den in der Vergangenheit erstellten Ökobilanzen herausgefiltert. Diese Werte wurden auf eine berechenbare Einheit bezogen, in diesen Fall auf

1 kg Baustoff.

Mit dieser kleinen funktionalen Einheit konnte jedem Baustoff ein ökologisches Profil hinsichtlich seines Energieverbrauchs[14] und seiner Kohlendioxidemissionen[15] zur Herstellung zugeordnet werden. Die baustoffspezifischen Kennwerte der Baustoffe (u-Wert, Rohdichte, etc.) sind ebenfalls bekannt und finden unter anderem ihre Berücksichtigung bei der Wärmebedarfsberechnung der Gebäude.
Die verwendeten Energiewerte werden in Megajoule (MJ)/kg Baustoff angegeben. Es handelt sich bei den Angaben um den Primärenergiebedarf, also um die Energie in ihrer Ursprungsform. Die Energiewerte beziehen sich ausschließlich auf fossile Energie, die Energie aus nachwachsenden Rohstoffen wurde nur in sehr wenigen bisher erstellten Studien erfasst und ausgewiesen. Es findet deshalb aus Gründen der Vereinfachung keine separate Erfassung statt.
Ein großer Vorteil dieser gewählten kleinen Bezugseinheit ist in der Übersichtlichkeit zu sehen. Eine Aktualisierung der Module zu einem späteren Zeitpunkt kann im Bedarfsfall jederzeit durchgeführt werden, wenn neuere und eventuell „bessere“ Daten erhältlich sind. Es muss jedoch bei einem Austausch der Baustoffmodule darauf geachtet werden, dass die Rahmenbedingungen, wie der Bilanzraum und eventuelle spezifische Eigenschaften der Baustoffe, übereinstimmen.

In den folgenden Kapiteln werden die in der Berechnungsgrundlage verwendeten Daten nach ihrer Herkunft sortiert dargestellt.

5.1.1. Angaben aus dem Bauforschungsbericht

Der Bauforschungsbericht des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau ist im Jahr 1994 erschienen und untersuchte den Primärenergiegehalt der Baukonstruktionen [Annon, 1994]. Diese Quelle älteren Datums gibt einen Überblick über verschiedene Wandaufbauten und ihren Energieaufwand zur Erstellung. Ähnliche, jedoch tiefergehende Studien führten Waltjen et al. [1999] für Österreich durch. Die Ergebnisse beider Studien basieren auf einer vergleichbaren Datengrundlage.
Die Daten der Studie wurden für die Berechnungsgrundlage auf die Baustoffeinheit 1 kg berechnet. Im Speziellen wurde nur der Energieeinsatz betrachtet, die Kohlendioxidemissionen finden keine Berücksichtigung, da sie in dem Bauforschungsbericht nicht untersucht wurden.

[14] Die berechneten Werte beziehen sich grundsätzlich auf den Primärenergiebedarf. Ausnahmen sind gekennzeichnet. Eine Unterteilung des Primärenergiebedarfs in verschiedene Energieträger kann aufgrund der verwendeten Daten nicht durchgeführt werden.

[15] Bei den Kohlendioxidemissionen handelt es sich um Kohlendioxidäquivalente.

Tabelle 13: Umgerechnete Daten aus dem Bauforschungsbericht [Annon, 1994]

Baustoffbezeichnung	Rohdichte [kg/m³]	PEI [MJ/kg]
Dämmstoffe:		
Mineralfaserdämmstoff/Holzständer	30	18
Korkschüttung	180	3,6
Glaswolle	8	5
Mineralwolle	20	5
Steinwolle	80	3,37
Holzfaserdämmplatte	~ 200	7,11
Polystyrol (Styropor)	15 - 30	3,4
PE-Dampfsperre (flammgeschützt)	220	1,6
PE Dampfsperre (nicht flammgeschützt)	820	3,14
Baustoffe:		
Gipskartonplatte	900	3,39
Gipsfaserplatte	1200	2,47
Gipswandbauplatte	1000	2,53
Spanplatte	700	4,11
Zementgebundene Holzspanplatte	1250	2,31
Deckenschalung aus Nadelholz (NH)	600	1,49
Stahlbeton	2500	2,54
Faserzementplatte	2000	5,32
Brettschichtholz	600 - 800	5,76
Flachpressplatte	700	5,62
Harte Holzfaserplatte	1000	2,34
Poröse Holzfaserplatte	200	0,54
Mörtel/Putz	1400	0,61
Polystyrol Wärmedämmputz	350	2,72
Dachbedeckungen:		
Dachziegel	1800	2,29
Unglasierte Dachziegel	1800	2,72
Betondachsteine	1800	1

Die entstandenen Daten wurden kritisch betrachtet und können als Referenzwerte für andere Erhebungen verwendet werden. Anhand dieser Daten wurden die neueren Ökobilanzstudien kritisch betrachtet. Aus dem Bauforschungsbericht wurde für die Berechnungsgrundlage als einziger Wert der Energieaufwand zur Herstellung von Holzfaserdämmplatten verwendet.

Auffallend bei den Angaben aus dem Bauforschungsbericht ist, dass die Daten in ihrer Größenordnung nicht immer mit den Werten neueren Datums übereinstimmen. Die neueren und in der Systemgrenze umfassenderen Werte des IKP (siehe Kapitel 5.1.2) beurteilen die Herstellung von Dämmmaterialien als energieintensiver.
Die Angaben des Bauforschungsinstitutes offenbaren ein weiteres Problem der Ökobilanzierung, das auch auf andere Institute, die sich mit der ganzheitlichen Bilanzierung beschäftigen, zutrifft. Die Datengrundlage für Holz und Holzprodukte ist vielfach sachlich falsch.
Am Beispiel der Rohdichteangabe kann man das Problem darstellen. Eine Rohdichte von 600 kg/m³ wird häufig für Nadelholz angegeben. Dieser Wert ist für europäisches Nadelholz zu hoch. Im Holzbau werden überwiegend Kiefern und Fichtenholz eingesetzt, die Rohdichte beträgt hier 490 kg/m³ (Kiefer) und 420 kg/m³ (Fichte) [Sell, 1997]. Weitere Holzarten werden nur aufgrund besonderer Eigenschaften verwendet; die Lärche findet unter Anderem Einsatz als Verschalungsholz oder als Fußschwelle.
Die Bilanzierung von Holz scheitert oftmals an seinem inhomogenen Aufbau und dem Wissen der bilanzierenden Institute darüber. Die Bilanzen über Holz und Holzwerkstoffe berücksichtigen nicht, dass Holz hygroskopisch ist. Die Rohdichteangabe von 600 kg bezieht sich vielleicht auf Holz im Wald mit einer durchschnittlichen Feuchte von ~80% und nicht auf getrocknetes Holz im Bau mit einer Feuchte von ~15%. Diese erhöhte Massenangabe kann dazu führen, dass sachlich falsche Massen für das Endprodukt Haus ermittelt werden und zum Beispiel überhöhte Angaben für die Kohlenstoffspeicherung resultieren.

5.1.2. Angaben des Instituts für Kunststoffprüfung

Das Institut für Kunststoffprüfung (IKP) in Stuttgart hat in den letzten Jahren an der Erstellung von ganzheitlichen Bilanzen gearbeitet. Im Zuge der Forschungstätigkeit ist die Ökobilanzsoftware GABI (Ganzheitliche Bilanzierung) entstanden, mit deren Hilfe die Betrachtung von Lebenszyklen sehr detailliert möglich ist.
Das Institut hat multisektorale Studien durchgeführt und kann fundierte Daten hinsichtlich der Produktion von vor allem Massivbauteilen vorweisen. Das im Jahr 2000 erschienene Buch von P. Eyerer et al. [2000] über die ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden bietet sehr gute Voraussetzungen und Datengrundlagen für weiterführende Studien. Die neueren Daten wurden alle in Anlehnung an die Norm 14.040 ff erhoben.

Die Tabelle 14 gibt einen Überblick über Daten, die in die Berechnungsgrundlage einfließen.

Tabelle 14: Umgerechnete Daten aus Angaben des Instituts für Kunststoffprüfung [Eyerer et al., 2000]

Baustoffbezeichnung	Rohdichte [kg/m³]	PEI [MJ/kg]	CO_2-Äquivalente/kg
Baustoffe:			
Zement		4,394	0,872
Sand/Kies	1230	0,017	0,001
Beton 25	2365	0,6	0,1022
Beton 35	2364	0,758	0,1393
Normalmörtel	1710	0,632	0,1117
Porenbeton	413	2,139	0,3978
Kalksandstein	1381	1,233	0,083
Ziegel	670	2,22	0,28
WDVS-Leichtputz	13,93/m²	5,36	0,467
WDVS-Kratzputz	35,67/m²	3,46	0,328
Dämmung:			
Glaswolle:			
Trennwandplatte	14	17,775	5,525
Klemmfilz WLG 040	17	17,775	
Steinwolle:			
Dämmkeil WLG 040	33	18,659	3,484
Lammelle WLG 040	75	18,413	
Flachdach Dämmplatte WLG 040	160	18,418	
Zellulose:			
Zelluloseflocken	beliebig	4,3	0,323
inkl. Einblasen		4,88	
Flachsfaserdämmstoff:			
Dämmvlies	30	9,72	1,753

5.1.3. Angaben der Universität Hamburg

Die Universität Hamburg, Fachbereich Biologie – Ordinariat für Holztechnologie und die Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der ökologischen Bewertung von Wald, Holz und Holzprodukten.

In dieser Zeit wurden verschiedene Ökobilanzstudien erstellt. Für das Architektentool bieten die erarbeiteten Grunddaten eine gute Datengrundlage, da die Bilanzgrenzen der Studien deutlich definiert und die Daten folglich auf die funktionale Dateneinheit von 1 kg Baustoff umgerechnet werden konnten.
Die folgenden Werte basieren auf Abschlussberichten, Dissertationen, Diplomarbeiten und sonstigen Veröffentlichungen von A. Frühwald, C. Thoroe, J. Hasch, J. Schweinle, L. Speckels, M. Scharai-Rad, C. M. Pohlmann, R. Kraft, und M. Ristl in den Jahren 1996 bis 2001.

Tabelle 15: Umgerechnete Daten der Universität Hamburg und der BFH in Hamburg

Baustoff:	**Rohdichte [kg/m^3]**	**PEI [MJ/kg]**	**CO_2-Äquivalente/kg**
Spanplatte V 20			
Holzfeuchte = 8% (atro)	696,9 (641,1)	5,42	0,365
Spanplatte V 100			
Holzfeuchte = 8% (atro)	690,6 (635,4)	5,71	0,411
MDF			
Holzfeuchte= 8% (atro)	830 (763,6)	10,52	0,645
OSB			
Holzfeuchte = 8% (atro)	660 (607,2)	7,23	0,332
KVH			
Holzfeuchte = 15% (atro)	510,6 (444)	5,73	0,283
Bauholz			
Holzfeuchte = 15% (atro)	510,6 (444)	5,56	0,283
Brettschichtholz			
Holzfeuchte u = 15% (atro)	479,2 (428)	8,86	0,394

5.1.4. Eigene Berechnungen

Verschiedene für den Hausbau benötigte Daten konnten aus bestehenden Untersuchungen nicht übernommen werden, da die Grundlagen dieser Werte nicht nachvollziehbar errechnet werden konnten oder die Produkte erst neu am Markt erschienen sind (z.B. TGI Trägersysteme für den wärmbrückenreduzierten Wandaufbau aus mehren Baustoffen).

Es wurden folglich eigene Erhebungen und Herstellerbefragungen über die Zusammensetzung der Baustoffe durchgeführt, damit ein ökologisches Profil erstellt werden konnte. Dieses ökologische Profil besitzt nicht den Anspruch auf ökobilanzielle Vollständigkeit; Überschlagsrechnungen haben jedoch eine sehr gute Übereinstimmung mit vergleichbaren Daten ergeben.

Tabelle 16: Berechnungen von Pohlmann [1999 – 2001]

Baustoff	**Rohdichte [kg/m³]**	**PEI [MJ/kg]**	**CO_2-Äquivalente/kg**
Zementgebundene Holzspanplatte	1250 1350	4,59 4,255	0,462
Gipskartonplatte	900	8,481	0,469
Holzfaserdämmplatte[16]	~ 200	7,11	0,31
Trägersystem	75% NH		
Gurt: NH (6 x 4,7 cm)	25% HDF	6,81	0,374
Steg: HDF (0,8 cm dick)			
1 m Träger:			
Höhe: 20 cm		23,42	1,286
Höhe: 24 cm		26,21	1,439
Höhe: 30 cm		30,41	1,671
Trägersystem	75 % NH		
Gurt: NH (9 x 6 cm)	25 % OSB	5,97	0,295
Steg: OSB (1,5 cm dick)			
1 m Träger:			
Höhe: 24 cm		32,12	1,587
Höhe: 28 cm		42,11	2,081
Höhe: 32 cm		44,97	2,222
Metall		19	2,861
Stahl		15	2,5
Dachziegel		2,3	0,3
	45 kg = 1 m²	103,5	13,5
Fenstersysteme:			
Isolierverglasung		30	4,65
Fensterrahmen aus Holz		55	7,75

[16] PEI übernommen aus dem Bauforschungsbericht [Annon 1994]

5.1.5. Berechnung der Fenster

Die ökologische Bewertung von Gebäuden kann nur vollständig durchgeführt werden, wenn die Fenster in die Betrachtung mit einfließen. Die Fenstersysteme haben einen großen Einfluss auf eine Ökobilanz. Zum Einen ist die Herstellung der Fenster energieintensiv und zum Anderen haben die eingesetzten Fenster einen großen Einfluss auf den Energiebedarf während der Nutzung des Hauses (siehe Kapitel „Energiesparmöglichkeiten in der Bauwirtschaft“). Aus diesen Gründen sind in der Berechnungsgrundlage verschiedene Fenstergrößen bewertet worden. In dem Berechnungstool kommen drei Arten von Fensterkonstruktionen zur Anwendung:

- Zweischeiben-Isolierverglasung
- Kastenfenster mit Zweischeibenisolierglasverbund
- Passivhausfenster

Die verwendeten Grunddaten entstammen Ökobilanzstudien der EMPA (Eidgenössische Material Prüfanstalt, Zürich) und wurden von U. Kasser und M. Pöll [1998] und von K. Richter et al. [1996] erstellt.
Grundlage der Berechnungen ist ein Standardfenster mit den Abmessungen 1 x 1m und einem Rahmenanteil von 30%. Für die Berechnungsgrundlage mussten die Daten jedoch auf real existierende Fenster für den Hausbau umgerechnet werden.
Es werden in der Studie nur Holzfenster berechnet und in den Gebäuden verbaut. Ein energetischer Vergleich mit anderen Fenstersystemen ist aus diesem Grund nicht durchführbar. Die Herstellung von PVC-Fenstern und Alu-Fenstersystemen wurde von Richter et al. (1998) untersucht und mit Holzfenstern verglichen. Es zeigte sich, dass die Herstellung von Holzfenstern die geringste Energie zur Herstellung benötigt, Aluminiumfenster wiesen den größten Energiebedarf auf.
Aus Kosten- und Konstruktionsgründen wird in der Planung von Häusern heutzutage teilweise auf einen Flügel zum Öffnen des Fensters verzichtet. Diese Fenster werden als festverglast betrachtet und berechnet. Das hat einen Einfluss auf den Holzanteil am Fenster, dieser wird geringer, da kein Flügelholz existiert.

Die Tabelle 17 berechnet den Energieeinsatz und den Materialeinsatz verschiedener Fenster, die im Hausbau Verwendung finden.

Tabelle 17: Umgerechnete Daten für Zweischeibenisolierverglasung [Kasser et al.,1998; Richter et al. 1996]

Abmessungen	Energieeinsatz /Fenster [MJ]	CO_2 Emissionen/Fenster [kg CO_2]	Gewicht Holz [kg]	Gewicht Glas [kg]	Gewicht gesamt [kg]
Rahmen mit Flügel		**U_V = 0,8 W/m²K**		**U_F = 1,1 W/m²K**	
0,775 x 1,59	1.542,7	226,92	15,75	22,55	38,30
0,775 x 2,405	2.372,5	351,23	21,17	40,25	60,42
0,626 x 1,29	1.079,7	157,43	12,76	12,59	25,35
0,641 x 2,405	2.086,9	307,69	20,28	32,37	52,65
0,845 x 2,405	2.507,2	369,24	21,31	43,89	65,20
0,971 x 2,405	2.770,7	411,97	22,48	51,13	73,61
Rahmen ohne Flügel/oben verjüngt		**U_V = 0,8 W/m²K**		**U_F = 1,1 W/m²K**	
0,775 x 1,02/1,59	1.271,4	186,29	13,85	16,98	30,83
0,775 x 1,59/2,405	1.949,1	287,72	18,46	31,11	49,57
0,975 x 1,91/2,58	2.597,3	385,92	21,44	47,26	68,70
0,975 x 2,76/3,467	3.638,5	542,81	27,29	71,25	98,54
Rahmen ohne Flügel		**U_V = 0,8 W/m²K**		**U_F = 1,1 W/m²K**	
0,695 x 2,405	1.758,6	265,14	9,54	41,12	50,66
0,917 x 2,405	2.209,8	334,56	10,23	54,90	65,13
1,38 x 2,405	3.179,4	483,72	11,65	84,61	96,26
0,695 x 2,034	1.567,9	235,57	9,54	34,76	44,30
Rahmen mit Flügel/Kastenfenster		**U_V = 0,6 W/m²K**		**U_F = 0,8 W/m²K**	
0,4075 x 0,4075	496,5	70,27	8,62	0,74	9,36
0,452 x 2,455	2.382,2	345,24	30,97	22,63	53,60
0,637 x 2,415	2.761,5	402,83	32,52	32,43	64,95
0,775 x 0,775	1.159,4	166,92	16,51	8,38	24,89
0,775 x 1,108	1.508,6	218,28	20,06	13,51	33,57
0,775 x 1,59	2.056,1	299,16	25,21	22,32	47,53
0,775 x 1,8665	2.385,3	347,91	28,14	27,92	56,06
0,775 x 2,415	3.058,9	447,87	33,88	39,85	73,73
1,43 x 2,415	4.578,1	677,86	40,96	77,51	118,47
1,57 x 2,385	4.886,3	724,72	42,14	85,62	127,76
1,57 x 2,415	4.970,2	737,47	42,46	87,83	130,29
2,09 x 2,385	6.175,3	920,22	47,68	118,43	166,11
1,489 x 1,6	3.316,9	488,62	32,91	50,23	83,14
D = 0,815	805,3	120,01	6,22	15,44	21,66
0,265 x 1,69 (o. Flügel)	817,6	119,25	9,64	9,58	19,22

Die energiesparende Bauweise fordert auch von den Fensterherstellern eine Verbesserung der Fenstersysteme hin zu weniger Konvektion, also zu besseren u-Werten. Dies ist eine wichtige Vorraussetzung für den Bau von Passivhäusern. Verschiedene Hersteller haben sich der Aufgabe gestellt und geeignete Fenster für Passivhäuser entworfen. Für die Betrachtung von Passivhäusern mit Hilfe der Berechnungsgrundlage mussten folglich Daten generiert werden, die in Tabelle 18 dargestellt sind. Bei diesen Fenstern handelt es sich um einen Dreischeibenisolierglasverbund in einem Kastenfenster mit entsprechend dickem Holzrahmen.

Tabelle 18: Berechnung von Passivhausfenstern (Dreischeibenisolierverglasung)

Abmessungen	Energieeinsatz /Fenster [MJ]	CO_2 Emissionen/Fenster [kg CO_2]	Gewicht Holz [kg]	Gewicht Glas [kg]	Gewicht gesamt [kg]
Kastenfenster: dreifachverglast		**U_V = 0,35 W/m²K**		**U_F = 0,45 W/m²K**	
0,4075 x 0,4075	626,5	88,75	10,78	1,12	11,90
0,452 x 2,455	3.148,2	457,94	38,72	33,95	72,67
0,637 x 2,415	3.710,4	543,58	40,65	49,15	89,80
0,775 x 0,775	1.516,8	219,06	20,64	12,71	33,35
0,775 x 1,108	1.993,8	289,61	25,08	20,48	45,56
0,775 x 1,59	2.747,3	401,46	31,51	33,82	65,33
0,775 x 1,8665	3.204,2	469,38	35,18	42,31	77,49
0,775 x 2,415	4.140,9	608,97	42,35	60,38	102,73
1,43 x 2,415	5.633,1	943,02	51,21	117,45	168,66
1,57 x 2,385	6.789,8	1011,56	52,68	129,74	182,42
1,57 x 2,415	6.911,9	1030,19	53,08	133,08	186,16
2,09 x 2,385	8.661,8	1296,37	59,61	179,44	239,05
1,489 x 1,6	4.546,5	672,79	41,14	76,12	117,26
D = 0,815	1.129,8	169,02	7,77	23,40	31,17
0,265 x 1,69 (o. Flügel)	1.094,4	160,25	12,05	14,38	26,43

Ein Haus als komplexes Produkt besteht aus vielen verschiedenen Materialien. Der Einfluss der Fenstersysteme auf den Gesamtenergiebedarf von Wohngebäuden konnte jedoch bisher nicht allgemeingültig berechnet werden. Mit Hilfe der hier berechneten Fenstersysteme und der Integration der Werte in die Berechnungsgrundlage kann dieser Einfluss untersucht werden. Aufgrund der großen Variation in den Abmessungen der Fenster können die erhobenen Daten für sehr viele verschiedene Gebäudeberechnungen im Holz- und Massivbau verwendet werden.

5.1.6. Berechnung der fossilen Energieträger

Gebäude benötigen während des Betriebs Energie. Die Produktion von bereitgestellter Energie ist mit umweltschädlichen Emissionen verbunden. Jeder Kohlenstoff enthaltende Energieträger setzt bei seiner Umwandlung oder Herstellung Kohlendioxid und andere gasförmige Emissionen frei. Die Intensität der Kohlendioxidemissionen schwankt jedoch nach eingesetzten Energieträgern. Durch eine geeignete Wahl des Energieträgers lassen sich demzufolge Kohlendioxidemissionen verringern. Es müssen Energieträger verwendet werden, deren Energiedichte im Verhältnis zu der C-Einheit groß ist.
Für die ökologische Betrachtung von Gebäuden wurde jedem Energieträger die bei der Verwendung anfallenden Kohlendioxidemissionen zugewiesen. Als Untereinheit für die Berechnung der Energie wird

1 MJ Primärenergie

betrachtet.
In Tabelle 19 werden die energieabhängigen CO_2-Emissionen dem jeweiligen Energieträger zugeordnet.

Tabelle 19: CO_2-Emissionen verschiedener Energieträger [Informationsdienst Holz, Niedrigenergiehäuser – bauphysikalische Entwurfsgrundlagen; 1998]

Energieträger	CO_2-Äquivalente [kg/MJ]
Braunkohle	0,111
Steinkohle	0,083
Heizöl	0,081
Erdgas	0,052
Fernwärme	0,066
Strom-Mix Deutschland	0,155

Die Daten in Tab. 19 wurden mit bestehenden Bewertungen für Energieträger verglichen, es zeigten sich jedoch keine signifikanten Unterschiede. Zum Beispiel gibt Frischknecht [1995] einen CO_2-Äquivalenzwert für elektrische Energie von 0,14 kg CO_2-Emission/MJ Energie an. Dieser Wert differiert geringfügig zu dem in Tab. 19 angegebenen Wert.
Für die Berechnungsgrundlage wird bewusst darauf verzichtet, einen speziellen Energieträger detailgetreu zu bilanzieren. Moderne Ökobilanzsoftware ermöglicht die Bilanzierung

bestimmter Energieträger unter speziellen Bedingungen[17]. Hierdurch werden detaillierte Daten erhalten, die den Energieträger in spezieller Anwendung charakterisieren. Dieses Detailwissen ist in der Praxis jedoch selten vorhanden, zusätzlich birgt diese Vorgehensweise das Problem des „Brunneneffektes“. Der Nachteil der detaillierten Betrachtung ist darin zu sehen, dass Vergleiche nicht mehr möglich sind, da die Bilanzräume der Energieträger sich zu sehr unterscheiden.

Das hier zu entwickelnde Planungstool soll eine allgemeine aber fundierte Aussage für den Hausbau treffen und Vergleiche ermöglichen. Insofern wurde von der detailgetreuen Berechnung einzelner Energieträger unter bestimmten Bedingungen abgesehen. Ein Ziel der Berechnungsgrundlage ist darin zu sehen, berechenbare Größen festzustellen und sich nicht im Detail zu verlieren.

[17] z.B. Umwandlung des Energieträgers auf Anlagen mit sehr guten Wirkungsgraden, sehr hohe Sonneneinstrahlung bei Photovoltaikanlagen in bestimmten Regionen, Verwendung eines el. Strommixes mit einem hohen Anteil regenerativer Energiequellen, etc.

5.1.7. Berechnung erneuerbare Energieträger

Derzeit gewinnen regenerative Energiequellen vermehrt an Bedeutung.
Der Hausbesitzer hat verschiedene Möglichkeiten, Energie für die Nutzung seines Hauses zu erzeugen. Im herkömmlichen Sinn kann mit Holz, Gas, Öl, Kohle oder Strom der Bedarf eines Hauses für den Betrieb gedeckt werden. Zusätzliche Möglichkeiten bestehen in der Nutzung von umgewandelter Energie aus Sonnen- , Wind- und Wasserkraftanlagen. Für den Holzhausbau bietet es sich auf hervorragende Weise an, innovative Anlagentechnik mit der Niedrigenergiebauweise zu kombinieren.
Die Datengrundlage zur Abschätzung von regenerativen Energiequellen und den mit dieser Energie verbundenen Umweltwirkungen ist jedoch noch nicht umfassend entwickelt.
Die Sonnenenergie kann unterschiedlich umgewandelt werden. Zum Einen kann daraus direkt solare Wärme entstehen (Strahlungswärme), zum Anderen werden aber auch Solaranlagen zur Warmwasserbereitstellung eingesetzt (Heiz- und Brauchwasser).
Auch elektrische Energie (Solarstrom) kann durch die Umwandlung von Sonnenenergie bereitgestellt werden.
Ein erheblicher Vorteil dieser Energieform ist in der Kohlendioxidbilanz zu sehen; Sonneneinstrahlung emittiert kein Kohlendioxid, der Betrieb der Solaranlagen ist demzufolge kohlendioxidfrei.
Dem kohlendioxidneutralen Gebrauch der Anlage steht jedoch die Herstellung einer funktionsfähigen Solaranlage gegenüber. Um die Kohlendioxidbilanz zu vervollständigen, muss für diese Anlagen eine ökologische Bewertung erstellt werden, damit die Herstellungsenergie berücksichtigt werden kann.
In der entwickelten Berechnungsgrundlage wird der Energiebedarf und die resultierenden Kohlendioxidemissionen berechnet, die für die Bereitstellung von

1 MJ Primärenergie

aus regenerativen Energiequellen benötigt werden.
Die Energie- und Kohlendioxidbilanz kann durch die Verwendung regenerativer Energiequellen verbessert werden.
Der Energiebedarf des Hauses verändert sich in der Praxis nicht, es muss z.B. nach wie vor derselbe Heizenergiebedarf wie bei fossilen Energieträgern gedeckt werden. Die Verwendung von Sonnenenergie ist jedoch energie- und kohlendioxidfrei.
Bei der Berechnung von regenerativen Energieträgern wird folglich die Energiemenge berechnet, die für die Herstellung der Energieanlagen benötigt wird, um kohlendioxidfreie Energie während der Nutzung zu erhalten.

5.1.7.1. Solaranlagen - Sonnenkollektoren

Eine Ökobilanz [Ansätze: Gränicher et al., 1995, umfassend von Gürzenig; Ende 2002] für Solaranlagen[18] existiert in umfassender Form derzeit nicht und ist relativ komplex. Im Folgenden wird deshalb der Versuch unternommen, die Herstellungsenergie einer Solaranlage zur Warmwasserbereitstellung aufgrund der eingesetzten Materialien zu betrachten. Diese Erhebung besitzt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, es ist jedoch ein Versuch, Sonnenenergie ganzheitlich und nicht nur unter dem Aspekt der Nutzung, sondern auch unter dem Aspekt der technischen Investitionen und der daraus folgenden ökologischen Wirkungen, realistisch zu betrachten.

Sollten in Zukunft detaillierte Daten generiert werden, die eine vollständige Ökobilanz für Solaranlagen ermöglichen, können diese für die Berechnungsgrundlage übernommen werden.

Bei der folgenden Betrachtung wird nur die Herstellung der Therme und des Wärmespeichers betrachtet, die Rohrleitungen müssen auch bei herkömmlichen Warmwasseranlagen im Haus verlegt werden und können demnach nicht als signifikanter Unterschied verschiedener Systeme angesehen werden.

Die Grunddaten wurden einer Studie von Gränicher et al. (1995) entnommen. Die Daten wurden mit Herstellern und auf dem Gebiet tätigen Wissenschaftlern [Gürzenig ,2002] abgestimmt und für die Berechnungsgrundlage umgerechnet.

Als Ausgangsanlage wurde ein Sonnenkollektor für ein Einfamilienwohnhaus gewählt, wie er in der Systemabgrenzung der Studie Gränicher (1995) beschrieben wurde.

Ziel der Umrechnung ist es gewesen, einen Energiewert und einen Kohlendioxidwert für die Herstellungsenergie der Kollektoranlagen zu erhalten.

Der Warmwasserbedarf eines Hauses wird in der EnEV mit 12,5 kWh/m²a angegeben.

Es stellt sich folglich die Frage, welches Medium diesen Energiebedarf, gesamtheitlich gesehen mit den geringsten Umwelteinflüssen, decken kann und so eine bessere Kohlendioxidbilanz des betrachteten Gebäudes ermöglicht.

Für einen Solarkollektor kann und wird folgende generelle Annahme getroffen:

1 m² Kollektor ermöglicht in Deutschland etwa einen Jahreswärmeertrag von 1.440 MJ.

Eine funktionsfähige Anlage besteht aus dem Kollektor auf dem Dach und einem Speichergefäß im Haus, in dem das erwärmte Wasser bereitgehalten wird. In Tabelle 20 ist der Her-

[18] Begriffsklärung Solaranlagen: Anlagen, die eintretende Sonnenstrahlen in nutzbare Wärmeenergie umwandeln.

stellungsenergieaufwand einer Solaranlage, wie sie in dem modernen Hausbau Verwendung findet, dargestellt.

Tabelle 20: Herstellungsenergie und daraus resultierende Kohlendioxidemissionen eines Sonnenkollektors von 1 m² [Grundwerte Gränicher; interpretiert und umgerechnet von Pohlmann, 2001, kontrolliert von Gürzenig; 2001]

Material kg/m²	**Energieeinsatz [MJ]**	**CO_2-Emissionen [kg]**
Warmwasserspeicher: 600 l		
- Stahl ST 37: 220 kg	11.000	2.200
- Chromstahl: 40 kg	2.000	200
- Glaswolle: 20 kg	360	100
- Alkydharzlack: 1 kg	25	10
- PVC (fakultativ) 2 kg	k.A.	k.A.
- Schweißanode 1,5 kg	k.A.	k.A.
	Gesamt: 13.385 MJ	**Ges.: 2.510 kg CO_2**
Flachkollektor (1 m²):		
- Aluminium: 9 kg	1.800	90
- Kupfer: 2,5 kg	125	12,5
- Glas: 10 kg	300	23
- Silikon: 0,25 kg	2,5	-
- Lötmaterial: 0,15 kg	1,5	-
- Wärmedämmung	k.A	k.A.
	Gesamt: 2.229 MJ	**Ges.: 125 kg CO_2**

Die Tabelle 21 enthält die Daten der Berechnungsgrundlage. Die Werte beziehen sich auf funktionsfähige Solareinheiten, mit denen Energie erzeugt werden kann.

Tabelle 21: Zusammenfassung der Grunddaten der Solaranlage zur Warmwasserbereitstellung

Anlagen-größe	**Energie-ertrag**	**Energie-einsatz**	**CO_2-Emissionen**	**energetische Amortisation**
1 m²	1.440 MJ	15.614 MJ	2.635 kg	11 Jahre
3 m³	4.320 MJ	20.072 MJ	2.885 kg	4,6 Jahre
6 m²	8.640 MJ	26.759 MJ	3.260 kg	3 Jahre
12 m²	17.280 MJ	40.133 MJ	4.010 kg	2,3 Jahre

Bei den Daten für die Berechnungsgrundlage handelt es sich um ein vereinfachtes Modell.

Für die Funktionsfähigkeit einer solchen Anlage müssen zusätzlich Pumpen, ein Expansionsgefäß und Dämmmaterialien kalkuliert werden. Die obige Abschätzung betrachtet folglich den untersten Wert für den Energieeinsatz zur Herstellung der Anlagen.

Zusammenfassung

Eine Solaranlage hat nach Herstellerangaben [Fa. Alligator, 2000] eine Lebenserwartung von 20 Jahren. Danach muss sie ausgetauscht werden.

- ➔ Energetisch amortisiert sich eine Anlage je nach Größe der Kollektorfläche spätestens nach 11 Jahren. Man erhält folglich bei der kleinsten Anlage (1 m²) bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren 9 Jahre „energiefreie“ Energie. Je größer die Kollektorfläche dimensioniert wird, desto schneller amortisiert sich die Anlage energetisch. Bei einer 6 m² Anlage wird 17 Jahre „energiebereinigt“ Energie hergestellt.
- ➔ Dem Verbraucher ist deshalb aus energetischen Gründen zu raten, die Anlage großzügig zu dimensionieren.
- ➔ Wirtschaftlich amortisieren sich Solaranlagen derzeit noch nicht. Es ist jedoch davon auszugehen, das sich die monetäre Amortisationszeit in den kommenden Jahren aufgrund gesteigerter Nachfrage, besserer Produktionstechniken und technologischer Fortschritte verringert.

Die durchgeführte Berechnung des Herstellungsenergiebedarfs von Solarkollektoren kann grundsätzlich dafür genutzt werden, Solarenergie realistischer als bisher zu betrachten. Der von der Wirtschaft propagierte Slogan: „Solarenergie ist kohlendioxidneutral“ ist grundsätzlich zu widerlegen.
Die Qualität der Daten ist sicherlich in Teilen diskussionsbedürftig. In Anbetracht der Tatsache, dass keine Forschungseinrichtung bisher in der Lage gewesen ist, eine umfassende und anwendbare Ökobilanz für Solaranlagen zu erstellen, müssen die hier erarbeiteten Werte solange verwendet werden, bis detailliertere Erhebungen vorliegen.

5.1.7.2. Photovoltaikanlagen

Photovoltaikanlagen dienen der Umwandlung von Sonnenenergie in elektrischen Strom. Nach allgemeiner Aussage steht der Eintritt in das „Siliziumzeitalter“ kurz bevor. Die Vor- und Nachteile dieser Anlagen werden im Folgenden kurz erläutert.
Vorteile des Einsatzes von Photovoltaikanlagen sind:

- Solarenergie ist unerschöpflich.

- Der Betrieb der Anlagen ist emissionsfrei.
- Silizium als Hauptbestandteil ist das zweithäufigste Element der Erdkruste.
- Eine Einspeisung der Energie in das öffentliche Netz wird derzeit vom Staat bis zum Jahr 2020 mit einem garantierten Abnahmepreis gefördert. Dieser reduziert sich jedes Jahr für neu in Betrieb genommene Anlagen um 5%. Im Jahr 2001 wurde Strom aus solarer Strahlungsenergie mit 0,51 €/kWh gefördert. Im Jahr 2002 in Betrieb genommene Anlagen werden mit 0,48 €/kWh gefördert [EEG, 2000].

Nachteile des Einsatzes von Photovoltaikanlagen sind:

- Die Stromproduktion ist witterungsabhängig.
- Es wird anlagenbedingt nur Gleichstrom erzeugt.
- Die Zelle erzeugt nur bei Licht Strom.
- Eine direkte Energiespeicherung ist nicht möglich.
- Silizium muss aufwendig gereinigt werden und ist momentan sehr kostenintensiv. Die Kosten der Zellen sind sehr hoch.
- Der Wirkungsgrad der Zellen ist (noch) relativ gering.

Für die Bilanzierung eines Hauses müssen Daten generiert werden, die eine Betrachtung des Energiesystems Photovoltaikstrom ermöglichen. Es werden folglich verallgemeinerte Daten verwendet, wie sie in der Studie von Doka et al. (1995) errechnet wurden. Diese Grunddaten werden hier auf aktuelle Photovoltaikanlagen, eine Anlage mit 12 m² mit einer Jahresleistung von 1.000 kWh umgerechnet. Um diese Nutzleistung zu erhalten, werden 12 Module benötigt. Photovoltaikanlagen erzeugen Gleichstrom. Der Gleichstrom muss mit einem Wechselrichter umgewandelt werden, so dass er im Haus genutzt werden oder an das öffentliche Stromnetz abgegeben werden kann.

Die folgende Sachbilanz (Tabelle 22) stellt die Stoffflüsse für die Herstellung eines Panels nach Doka et al. dar. Dieses Panel hat eine Fläche von 0,43 m² bei einer Zellenfläche von 0,35 m². Die Nennleistung liegt bei 53 W_{pik}. Bei der Betrachtung von Photovoltaikanlagen muss beachtet werden, dass die optimale Leistung der Anlage mit einem Aufstellwinkel von 30-45° und einer Südausrichtung der Kollektorfläche verbunden ist. Zusätzlich muss die Sonneneinstrahlung in dem jeweiligen Gebiet beachtet werden. Im Süden Deutschlands ist die Sonnenscheindauer pro Jahr höher und intensiver als im Norden.

Die folgenden Werte müssen aus diesen Gründen mit der nötigen Objektivität betrachtet werden.

Tabelle 22: Berechnung der Herstellungsenergie und der Kohlendioxidemissionen einer Photovoltaikanlage [Grundwerte Doka et al. (1995); interpretiert und umgerechnet auf bestehende Verhältnisse von Pohlmann (2001), kontrolliert von Gürzenig (2001)]

Material für 0,43 m² Panel Leistung: 53 W_{pik}	**kg/Panel**	**Energieeinsatz [MJ]**	**CO_2-Emissionen [kg]**
m-SI Solarzellen	0,3	55,5	1,8
Lotpaste	0,002		
Lot	0,01		
Verbindungsbänder	0,03		
Solarglasscheiben	4,1	123	9,4
EVA-Folie	0,4	4	2
Rückseitenfolie	0,12		
Schrumpfschläuche	0,001		
Epoxid-Harzmasse	0,005		
Quarzmehl	0,006		
Aluminium- Rahmenteile	1,9	380	19
Profilgummi	0,36	10,8	0,9
Kleber	0,005		
Kunststoffwinkel	0,021		
Anschlusskasten	0,25	25	2,5
Energieverbrauch zur Herstellung:			
elektrisch netto:		13,68	2,12
thermisch netto:		22,32	1,16
Herstellungsenergie gesamt:		**634,3**	**38,88**

Wechselrichter:

Photovoltaikanlagen produzieren Gleichstrom, der mit Hilfe sogenannter Wechselrichter in für das öffentliche Netz verwendbaren Wechselstrom umgewandelt werden muss. Der Wechselrichter muss in eine Betrachtung integriert werden, da er ein unverzichtbarer Bestandteil ist.

Der im Folgenden bilanzierte Wechselrichter basiert auf Materialangaben von Doka et al. (1995). Die Maximalleistung wird mit 3 kW und einem Wirkungsgrad von 92 % angenommen. Tabelle 23 zeigt den Herstellungsenergieaufwand einer derartigen Anlage.

Tabelle 23: Berechnung Wechselrichter (Leistung 3 KW) [Grundwerte Doka et al (1995); umgerechnet von Pohlmann (2001), kontrolliert von Gürzenig (2001)]

Material / Wechselrichter		Energieeinsatz [MJ]	CO_2-Emissionen [kg]
Wechselrichter			
- Stahl ST 37	19 kg	950	190
- Aluminium	14 kg	2800	140
- Kupfer	3 kg	225	15
- PVC	1 kg	150	7,5
		Gesamt: 4.125 MJ	**Gesamt: 352,5 kg CO_2 äq.**

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Herstellung eines Wechselrichters sehr energieaufwendig ist. Für die Herstellung der Paneele bedarf es deutlich weniger Energie. Für Anlagen von 12 m² bzw. 16 m² ergeben sich die in Tabelle 24 gezeigten Werte.

Tabelle 24: Berechnung der Kennwerte für 12 bzw. 16 m² Paneele.

	Energieeinsatz [MJ]	CO_2-Emissionen [kg]	Nennleistung [MJ]
Energieeinsatz für 0,43 m² Panel	634,3	38,88	191
Energieeinsatz für 12 m² Panel	17.701	1.085	3.600
inklusive Wechselrichter	21.826	1.438	
Energieeinsatz für 16 m² Panel	23.601	1.446	4.800
inklusive Wechselrichter	27.726	1.798	

Zusammenfassung:

Die in Tab. 25 gezeigten Energieaufwendungen und CO_2-Emissionen stehen den solaren Energiegewinnen gegenüber:

Tabelle 25: Datengrundlage Photovoltaikanlage

Anlagen-größe	Energie-ertrag	Energie-einsatz	CO_2-Emissionen	energetische Amortisation
1 m²	300 MJ	5.600 MJ	442 kg	18 Jahre
3 m²	900 MJ	8.550 MJ	623 kg	9,5 Jahre
6 m²	1.800 MJ	12.975 MJ	895 kg	7,2 Jahre
12 m²	3.600 MJ	21.826 MJ	1.438 kg	6 Jahre
16 m²	4.800 MJ	27.726 MJ	1.798 kg	5,7 Jahre

Die erwartete Lebensdauer einer Photovoltaikanlage liegt heute bei weit mehr als 25 Jahren [IWR zitiert in Gruß (2001)]. Vom Hersteller werden 10 Jahre Garantie auf eine Photovoltaikanlage gegeben [Gruß, 2001]. Während einer Lebenswegbetrachtung muss die Anlage folglich mehrmals ausgetauscht werden (siehe Kap. 5.4.4.1). In der Berechnungsgrundlage wird von einer Lebensdauer von 15 Jahren ausgegangen.

➔ Energetisch ist die Amortisationszeit von der Größe der Anlage abhängig, da der Wechselrichter ein unverzichtbarer, aber herstellungsintensiver, Bestandteil ist und auch für kleine Anlagen erstellt werden muss. Je größer die Anlage dimensioniert wird, desto schneller liefert sie „energiebereinigt bzw. aufwandsbereinigt“ Strom.

Eine energetische Amortisationsdauer von unter zehn Jahren erscheint in Anbetracht der eingebauten Materialien und der aufwendigen Herstellung der Photovoltaikanlagen sehr kurz. Der Energieertrag dieser Anlagen schwankt innerhalb Deutschlands stark. Eine Möglichkeit der Objektivierung kann beispielsweise durch die Einführung eines regionalen Wirkungsgrades oder Faktors liegen. Dieser Wirkungsgrad würde die Sonnenscheindauer und die Intensität in dem Gebiet berücksichtigen und könnte detailliertere Aussagen über den Standort des Hauses treffen.

An der Universität Essen – Fachbereich 12 (Maschinenbau für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft) werden derzeit ganzheitliche Energiebilanzen für Photovoltaikanlagen erstellt. Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Berechnung des kumulierten Energieaufwandes (KEA) von Photovoltaikanlagen. Es werden unterschiedliche PV-Anlagen in Deutschland energetisch berechnet.
Die Ergebnisse dieser Studie werden Ende 2002 erwartet. Die hier erstellten Berechnungen wurden mit der Universität Essen abgesprochen [Gürzenig,2001] und können insofern als Orientierungswerte dienen.
Ökologische Betrachtungen von Solaranlagen zur Heizunterstützung und zur Warmwassererwärmung sind derzeit nicht in Bearbeitung.

5.1.7.3. Holzpelletofen

Der Heizenergiebedarf eines Hauses kann durch den Einsatz von regenerativen Energieträgern gedeckt werden. Ein Holzpelletofen dient der Umwandlung von gespeicherter Sonnenenergie im Holz in Wärme.

Für die Berechnungsgrundlage wird die Betrachtung von Ockelmann (2001) verwendet, der den Herstellungsenergiebedarf eines Holz-Pellet-Primärofen berechnet hat. Dieser Ofen hat eine Gesamtwärmeleistung von 10 kW und ein Gewicht von ca. 200 kg . Er besteht vorwiegend aus Stahl und Schamottsteinen bzw. Keramik. Dazu kommt der Pelletspeicher, bestehend aus einer Stahlkonstruktion und Verkleidung. Das Gewicht wurde hier mit zusätzlich 150 kg veranschlagt.

Die Abgase müssen über einen Schornstein abgeführt werden, der in die Betrachtung jedoch nicht mit einfließt, da auch eine Erdgasheizung nicht auf einen Schornstein verzichten kann. Ein im Haus gebauter Schornstein würde jedoch über die vom Planer erstellten Baustofflisten erfasst und in der Berechnungsgrundlage kalkuliert werden.

Die Tabelle 26 zeigt die Berechnung des Herstellungsenergiebedarfes:

Tabelle 26: Berechnung eines Holzpelletofens [Grundwerte Ockelmann, 2001; umgerechnet]

Material kg/m²		**Energieeinsatz [MJ]**	**CO_2-Emissionen [kg]**
Holzpelletofen:			
Stahl	200 kg	10.000	2.000
Schamottsteine	30 kg	300	15
Pelletspeicher:			
Stahl	95 kg	4.750	950
Spanplatte V100	55 kg	314	23
		Gesamt: 15.364 MJ	**Gesamt: 2.988 kg**

Holz als nachwachsender Rohstoff verursacht bei der thermischen Verwertung keine Kohlendioxidemissionen, da Holz ein CO_2-neutraler Energieträger ist. Die in dem Holz gespeicherte Sonnenenergie kann in Wärme umgewandelt werden. Die Verwendung eines Holzpelletofens stellt folglich eine Nutzung von Sonnenenergie dar. Ein Holzpelletofen ist eine vollautomatische Energiequelle, die Holzpellets werden dem Brennraum über eine Förderschnecke permanent zugeführt.

Holzpellets bestehen aus gepressten und getrockneten Holzspänen. Die Späne entstehen als Kuppelprodukt bei der Schnittholzherstellung, bei Hobelvorgängen in der Industrie und im Handwerk oder in der Weiterverarbeitung von Vollholzprodukten.

Für die ganzheitliche ökologische Betrachtung von Holzpellets gibt es zweierlei Möglichkeit:

- Die Holzpellets werden als Abfallprodukt betrachtet, die thermische Entsorgung dieses Produktes wird ohne „ökologischen Rucksack[19]“ betrachtet.
- Die Holzpellets werden als Kuppelprodukt betrachtet, sie werden folglich mit einem Anteil der Energieaufwendungen und der auftretenden Emissionen belastet.

In der Berechnungsgrundlage wird der zweitgenannte Aspekt verfolgt, das bedeutet, Holzpellets werden als nutzbares Kuppelprodukt der Holzbe- und Verarbeitung betrachtet.
Holzheizungen stellen ein wachsendes Marktsegment dar und die Herstellung der Holzpellets verfolgt eindeutig das Ziel der thermischen Nutzung. Das hat zur Folge, dass die Holzpellets mit dem ökologischen Rucksack der Bereitstellung des Rohstoffes Holz belastet werden müssen.
Die Herstellung von Holzpellets ist demnach analog der Herstellung von z.B. Bauschnittholz mit einem gewissen Energieaufwand verbunden, der in eine ganzheitliche Betrachtung integriert werden muss.
Im Folgenden wird der Herstellungsenergiebedarf von Holzpellets betrachtet. Hierfür existieren derzeit keine Berechnungswerte, es wird allgemein davon ausgegangen, dass Holzpellets analog zur Sonnenenergie ohne Aufwand bereitgestellt werden können. Im Zuge einer ganzheitlichen Betrachtung ist dies jedoch nicht korrekt.
Für die Herstellung der Späne sowie die Formgebung der Pellets muss Energie aufgewendet werden. Um die Herstellungsenergie überschlägig zu berechnen, werden folgende Annahmen getroffen:

1 kg Holzpellets entspricht 18,5 MJ[20] Heizenergie

Die Herstellung der Späne wird ähnlich der Vollholzherstellung betrachtet. Für die Herstellung von 1 kg Bauschnittholz werden 5,56 MJ und 0,283 kg CO_2-äq. berechnet [Speckels, 2000].
Bei der Schnittholzherstellung fallen 18,7% Späne an [Speckels, 2000].
Speckels (2000) berechnet für den Einschnitt von Holz im Sägewerk 0,377 MJ/kg Schnittholz. Für die Trocknung von Spänen wird mit 3,1 MJ/kg gerechnet [Hasch, 2001]. Für die Pelletierung wird ebenfalls Energie benötigt. Hierbei wird auf die Daten von Marutzky und Seeger (1999) zurückgegriffen. Für die Betrachtung von 1 kg Holzpellets wird mit folgenden Daten[21] gerechnet:

[19] Die während des Lebensweges des Produktes aufzubringenden ökologischen Faktoren, wie Energie usw., werden auf die gesamten Produkte (Hauptprodukt und Nebenprodukte) anteilig verteilt.

[20] Heizwert des verbauten Holzes; theoretischer Heizwert von Nadelholz rund 18,8 MJ/kg [Marutzky, Seeger 1999]

[21] Primärenergie

- 0,377 MJ/kg Einschnitt
- 2,2 MJ/kg Trocknung[22]
- 0,4 MJ/kg Pelletierung[23].

In der Berechnungsgrundlage wird mit folgendem Wert gerechnet:

1 kg Holzpellets entspricht 2,9 MJ Herstellungsenergie und 0,15 kg CO_2-Emissionen.

Für den Energieträger Holzpellet bedeutet das:

1 MJ Holzenergie entspricht 0,15 MJ Herstellungsenergie und 0,008 kg CO_2-Emissionen[24].

Das bedeutet, dass 15% der in dem Holzpellet gespeicherten Energie für die Herstellung benötigt wird.
Zimmer[25] (2002) gibt als Faustformel für die Holzpelletherstellung an, dass 2% des in dem Pellet gespeicherten Energiepotentials zu der Herstellung benötigt wird. Dies würde bedeuten, dass 0,02 MJ Herstellungsenergie 1 MJ Holzenergie entsprechen.
Seeger (2002) weist der Herstellung von Holzpellet einen Wert zwischen 0,04 – 0,05 MJ/MJ Holzenergie zu.

[22] abgemindert um 30% aufgrund der angestrebten Endfeuchte (Holzwerkstoff: u = 3-5%; Holzpellet: u = 15%)

[23] Für die Pelletierung der Späne bedarf es eines spezifischen Kraftbedarfs von 30–40 kWh/t [Marutzky et al. ,1999 Seite 78].

[24] Der Energiebedarf und die Kohlendioxidemissionen zur Herstellung des Ofens werden in der Berechnungsgrundlage separat berechnet.

[25] Bezugnehmend auf eine Diplomarbeit, die sich mit der Holzpelletherstellung in Österreich beschäftigt. Ergebnisse werden im Sommer 2002 erwartet.

5.1.8. Transport

Für die Berechnung der CO_2-Emissionen und des Energiebedarfs durch Transporte wird auf die Berechnungen von Frischknecht et al. (1995) als Grundwerte zurückgegriffen. Die Werte beziehen sich auf einen dieselbetriebenen LKW mit einem Gesamtgewicht von 40 Tonnen.
Frischknecht betont in der Beschreibung seiner Bilanz, dass kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden darf. Die in Tab. 27 dargestellten Werte sind, auf dieser Grundlage, auf eine berechenbare Einheit, auf

1 km Wegstrecke

umgerechnet worden und erheben somit ebenso wenig Anspruch, sie geben jedoch einen guten Überblick über den Zusammenhang von Dieselverbrauch und den transportierten Gütern über eine vorgegebene Transportentfernung.
In der hier durchgeführten Studie wird davon ausgegangen, dass die LKW vollbeladen zur Baustelle fahren. Eigenen Erhebungen bei deutschen Fertighausfirmen haben ergeben, dass die im Werk vorproduzierten Bauelemente[26] eines Hauses durchschnittlich auf fünf LKWs verladen werden.
Die Fundamente, die Dacheindeckung, technische Anlagen und sonstige benötigte Bausstoffe werden separat betrachtet, da sie von anderen Anlieferfirmen zur Baustelle transportiert werden (siehe Kapitel 5.4.6.1). Diese Anlieferfirmen befinden sich überwiegend in der Region des zukünftigen Standortes des Gebäudes, also der Baustelle.
Grundsätzlich muss hier zwischen Fertighausherstellern mit einem zentralen Produktionsort und regional tätigen Herstellern unterschieden werden. Die vorgefertigten Bauelemente einer Fertighausfirma werden von dem Produktionsort zu der Baustelle transportiert. Dieser Weg kann länger sein, als wenn ein ortsansässiger Zimmermann das Haus erstellt.
Die einzugebenden Transportentfernungen in die zu entwickelnde Planungsgrundlage müssen diese Tatsache berücksichtigen. In dem Kapitel 5.4 wird die Vorgehensweise bei der Betrachtung erläutert und die Abschneidekriterien definiert.
Die Tabelle 27 verdeutlicht die Grundlage für die Berechnung der transportbedingten CO_2-Emissionen und den Energiebedarf.

Tabelle 27: Modul Transport, Datengrundlage für Energiebedarf und Kohlendioxidemissionen [Frischknecht et al, 1995]

gefahrene Kilometer	Verbrauch Diesel	Energieeinsatz	CO_2-Emissionen
1	0,3192 kg/km	14 MJ/km	0,99 kg/km

[26] wie Wand-, Fußboden- und Dachelemente

Im Folgenden soll die durchgeführte Umsetzung der Grundwerte verdeutlicht werden.
Zum allgemeinen Verständnis wird exemplarisch angenommen:

- Transportumfang: Bauelemente für ein Haus
- Transportentfernung: 60 km von dem Hersteller zur Baustelle

Benötigt werden 5 Transporte über 60 km. Die Fundamente und sonstigen Zusatzstoffe werden in diesem Beispiel nicht betrachtet.

	gefahrene km	**Transporte**	**Gesamt km**
Hinfahrt	60	5	300
Rückfahrt	60	5	300
Gesamt:	**120**	**5**	**600**
	Dieselverbrauch:	**192 kg**	
	Energieeinsatz:	**8.400 MJ**	
	CO_2-Emissionen:	**600 kg**	

Diese Werte und die Werte der für den Hausbau weiterhin benötigten Baustoffe, wie Betonfundamente, Dacheindeckung usw., müssen dem Gebäude bei einer ganzheitlichen Bilanzierung zugerechnet werden. Bei Hausherstellern mit geringer Vorfertigung werden die Fenster, die Isolation und eventuell andere Baustoffe des Hauses erst auf der Baustelle eingebaut, das muss bei der Planung des Hauses beachtet werden. Diese Transportentfernungen müssen ebenfalls in die Berechnungsgrundlage eingegeben werden.

Einschränkung: Qualität der Werte

Bei diesen Werten handelt es sich, wie Frischknecht et al. (1995) feststellte, nicht um die detaillierteste, sondern lediglich um eine stark verallgemeinerte Darstellung.
Für die Berechnungsgrundlage ist eine detaillierte Berechnung aber auch nicht gefordert. Das Hauptaugenmerk liegt in der grundsätzlichen Berechnung von gesamten Gebäuden und einer möglichen Optimierung.
Die Werte des Transportes steigen linear mit der Entfernung. Es kann folglich abgeschätzt werden, was es gesamtheitlich bedeuten würde, das geplante Haus in einer bestimmten Entfernung vom Hersteller oder von den Zulieferern zu errichten und was es bedeuten würde, wenn diese Entfernung sich vergrößert oder verkleinert.
In verschiedenen Ökobilanzstudien wird eine LKW-Auslastung von 50% angenommen [Hasch 2001]. Das bedeutet, der LKW fährt vollbeladen auf der Hinfahrt und unbeladen zurück. Bei der Erstellung von ökologischen Bewertungen für Gebäude fährt der Lastkraftwagen ausschließlich, um die Baustoffe oder die Bauelemente zu transportieren. Die Emissionen, auch die der Rückfahrt, werden zu 100% auf das Gebäude angerechnet.

5.2. Zusammenfassung der Datenherkunft

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Daten wurden aus Befragungen, Messungen und den unterschiedlichsten Literaturquellen zusammengestellt. Die Tabelle 28 stellt Übersichtsweise die verwendeten Daten dar.

Tabelle 28: Übersicht über die Herkunft der verwendeten Daten der vorliegenden Studie

Architektonische Planung und Wärmebedarfsberechnung	Bartolles et al, 2001 Zarsteck, 2000
Baustoffbereitstellung	Adebahr, 1995 Annon, 1994 Eyerer et al., 2000 Frischknecht et al, 1995 Frühwald et al., 2000 Hasch, 2001 IKP, Gabi 3.0, 1997 Kasser et al., 1998 Pohlmann, 1999 Richter et al., 1992 Richter et al., 1995 Ristl, 1996 Speckels, 2001 Speckels et al., 2000 Waltjen et al., 1999 Eigene Berechnungen 1999-2002
Daten für die Berechnung von regenerativen Energiequellen	Doka et al.,1995 Ockelmann, 2001 Gürzenig, 2001 Gränicher et al., 1995 Gruß, 2001 Marutzky et al., 1999
Kohlenstoffspeicherung, Holzenergie	Karjalinen et al., 2000 Krapf, 2001 Schweinle, 2001 Thoroe, 1996 Wegener et al., 1994
Produktion des Hauses	Eigene Erhebungen 1999-2001
Transport	Frischknecht et al., 1995 IKP, Gabi 1997

5.3. Datenqualität der Berechnungsgrundlage

Die Qualität der Daten ist verifiziert durch verschiedene Kriterien. Die verwendeten Daten müssen unter anderem einen vergleichbaren Bilanzraum aufweisen. Der optimale Bilanzraum für Baustoffe beginnt bei den Ausgangsrohstoffen und endet nach der Fertigstellung des Produktes, verladen auf dem LKW am Fabriktor.
Es wurde versucht, in diesem Forschungsprojekt nur jene Studien zu verwenden, welche diesen Bilanzraum zur Grundlage haben. Die Ökobilanzierung von Baustoffen ist soweit fortgeschritten, dass die Betrachtung diesen Lebensweg nachzeichnet und insofern kann die Datenqualität der hier eingesetzten Baustoffe als gut bezeichnet werden. Die Daten bisheriger Studien wurden übernommen und auf eine Untereinheit **1 kg Baustoff** berechnet.
Die Funktionale Einheit der Grunddaten ist in den meisten Fällen 1 m³ eines Baustoffes oder 1 t des Baustoffes gewesen. Diese Umrechnung birgt eventuell einen kleinen Umrechnungsfehler im Verhältnis zu den Quellwerten, allerdings kann dieser Fehler als gering und für die Studie als nicht signifikant aussagekräftig eingeschätzt werden.

Für einige Baustoffe wurden bisher keine Ökobilanzen erstellt (siehe Kap 5.1.4). Da die Zukunftsfähigkeit dieser Baustoffe gegeben ist und sie vermehrt im Holzbau eingesetzt werden, mussten eigene Erhebungen durchgeführt werden. Die dafür benötigten Grunddaten wurden nach einer Plausibilitätsprüfung verwendet.

Die Verwendung von regenerativen Energiequellen ist derzeit mit gewissen Datenunsicherheiten behaftet. Es existieren keine durchgängigen Daten. Für die Durchführbarkeit der Studie mussten folglich verschiedene Annahmen getroffen werden, die mit auf dem Gebiet tätigen Fachleute abgesprochen wurden. Alle getätigten Annahmen sind im Text kenntlich und damit nachvollziehbar gemacht worden.

Schätzungen wurden in der Regel dann vorgenommen, wenn keine Primärinformationen zu erhalten waren. Alle durchgeführten Schätzungen wurden mit Sekundärquellen verglichen und eingehend mit Fachleuten diskutiert.
Ziel dieser Studie ist es gewesen, Planungsmaßnahmen zu entwickeln, mit deren Hilfe eine ganzheitliche Betrachtung von Wohngebäuden möglich ist. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen kleinste und nicht signifikant aussagefähige Datenschwankungen einkalkuliert werden. Durchgeführte Schätzungen können zu gewissen Fehlern führen, der Einfluss auf die Gesamtbetrachtung wird jedoch als sehr gering angesehen.

5.4. Unterteilung eines Hauses in die Lebenswegmodule/ Vorgehensweise bei der Berechnung

Ziel einer Ökobilanz muss es sein, den gesamten Lebensweg des Produktes zu beschreiben und zu dokumentieren. Für den Bau eines Hauses bedeutet dies, dass bei der Herstellung der benötigten Materialien und der Energien begonnen wird und auch der Rückbau mit einer entsprechenden Entsorgung/Verwertung der Baustoffe mit in die Betrachtung einfließt. Der Lebensweg eines Hauses wird in der Berechnungsgrundlage in folgende Lebensabschnitte unterteilt:

- Modul Herstellung der Baustoffe des Hauses
- Modul Errichtung/Produktion des Hauses
- Modul Nutzung
- Modul Instandhaltung
- Modul Rückbau
- Modul Transport

Zusätzlich wird die:

- gespeicherte Energie in den verbauten nachwachsenden Baustoffen des Hauses und der
- gespeicherte Kohlenstoff in dem Haus

ermittelt und ausgewiesen. Hierdurch können Bilanzen gebildet werden und Aussagen zu der Kohlenstoffsenke in Holzhäusern generiert werden.

In diesem Kapitel werden die Lebensabschnitte dargestellt und beschrieben. Die Abschneidekriterien der Studie und die Vorgehensweise durch die Berechnungsgrundlage werden im Anschluss an die Vorstellung des Moduls unter dem Kapitelpunkt:

Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage

dargestellt.

Aus Gründen der Transparenz und der Durchführbarkeit einer Studie müssen verschiedene Annahmen getroffen werden. Bestehende Ökobilanzen sind häufig nur mit einem sehr großen Zeitaufwand zu interpretieren, die Datenfülle ist meist beachtlich hoch und schwer ver-

ständlich. Für die Berechnungsgrundlage wurden deshalb verschiedene Kriterien von vornherein ausgegrenzt.

Die Grunddaten des Tools (Kap. 5.1) fußen auf bereits erhobenen Ökobilanzen, die von verschiedenen Forschungsinstitutionen durchgeführt wurden. Die Abschneidekriterien der Quellwerte sind in der entsprechenden Literatur nachzulesen.

Im Folgenden werden die Abschneidekriterien definiert, mit denen die ökologische Bewertung der betrachteten Gebäude durch die Berechnungsgrundlage erstellt werden. In der Ökobilanzierung von Gebäuden werden bestehende Grunddaten zusammengeführt, so dass der Lebensweg eines Gebäudes nachgezeichnet werden kann. Dabei ist es unerlässlich, bestimmte Einflüsse von der Betrachtung auszuschließen.

5.4.1. Modul Herstellung

In diesem Modul werden die verwendeten Materialien ermittelt und ihre spezifischen Daten erfasst. Der Herstellungsenergiebedarf der Baustoffe wird berechnet. Es werden folgende Baustoffe in der Berechnungsgrundlage mit Datenmaterial hinterlegt:

- Holzständer und Lattung aus Fichten-/Kiefernholz
- Brettstapeldecken aus Fichtenvollholz
- Holzwerkstoffe, wie z.B. Spanplatte, OSB Platte, MDF Platte, TGI Träger, Nadelsperrholz
- Zellulosedämmstoff
- Kombinierte Baustoffplatten, wie Gipsfaserplatten und zementgebundene Holzspanplatten
- Beton und Betonverbundteile
- Holzfenster in verschiedener Ausführung (Zweischeibenisolierglas, Dreischeiben, oval, rund, eckig, fest verglast oder mit Flügel, etc.)
- Dacheindeckung
- Ziegelsteine in verschiedener Ausführung
- Solaranlagen, Photovoltaikanlagen und Holzheizung
- Stahlmatten und Rundstahl als Bewehrung
- Nägel, Schrauben und sonstige Verbindungsmittel

- Herstellung der regenerativen Energiequellen[27]
    - Photovoltaikanlage zur Herstellung elektrischer Energie
    - Sonnenkollektor zur Warmwasserbereitstellung
    - Holzpelletofen zur Deckung des Heizenergiebedarfs

Für diese Baustoffe und Energieanlagen wurde ein Ökoprofil erstellt, wie es der Berechnungsgrundlage (Kapitel 5.1) entnommen werden kann. Mit diesen Baustoffen kann jedes beliebige Gebäude erstellt werden; eine Betrachtung von Massivhäusern ist ebenso möglich wie die ökologische Bewertung von Block- und Fertighäusern.

5.4.2. Modul Errichtung/Produktion

Unter Errichtung wird die Arbeit in der Zimmerei/Fertighaushersteller und auf der Baustelle verstanden. Tendenziell ist dieses Modul zu vernachlässigen, da die benötigte Energie gering ist.
Die Produktion von Holzhäusern kann mit einem sehr unterschiedlichen Vorfertigungsgrad verbunden sein. Die Häuser werden im Betrieb vorgefertigt und als Bauelemente auf die Baustelle transportiert. Vor Ort erfolgt nur noch die endgültige Montage.
Die Produktion von Holzhäusern ist in weiten Teilen z.T. noch immer mit einem hohen Anteil manueller Arbeit verbunden. Die Baustoffe müssen von Hand auf das zu verbauende Maß gebracht und angeordnet werden.
Dämmstoffe werden manuell zugeschnitten und in die Wand eingelegt oder eingeblasen. Diese anfallenden Arbeiten sind folglich ökobilanziell nur sehr schwer zu bewerten. Um diesen manuellen Ablauf energetisch realistisch zu betrachten, wurden die Sägen, Bohrer, Schussapparate und weitere elektrisch betriebene Maschinen mit ihrem Stromverbrauch gemessen. Mit den Ergebnissen könnten die Produktionsabläufe berechnet werden.
Die erhobenen Energiewerte (Tab. 29) basieren auf Messungen und daraus abgeleiteten Berechnungen:

[27] (wenn in der Gebäudeplanung berücksichtigt)

Tabelle 29: Berechnungsgrundlage für den Energieverbrauch in der Produktion [Daten sind erhoben und normiert]

Maschine	PEI [MJ]	Bezugsgröße
Kappsäge	0,0175	Schnitt
Fräse	0,217	1m
Hobelmaschine	0,105	1m
Bohrmaschine	0,0089	Bohrloch
Kreissäge	0,19	5m
Schussapparat	0,0058	Nagel
Kran	2,272	Hub

Die Energie für das Modul Produktion beinhaltet nachstehende Berechnungen:

- Sägen der Plattenwerkstoffe
- Sägen der Holzständer
- Durchführen der benötigten Bohrungen
- Verbinden der Elemente mit Nägeln und Schrauben
- Befestigen der Werkstoffe mit Klammern
- Einblasen der Dämmung (findet zum Teil auf der Baustelle statt)
- Aufnageln der Lattung
- Transportieren der Elemente auf Förderbändern und Kränen

Eine Berechnung der tatsächlichen Werte ist in der Praxis jedoch nur schwer und nur mit einem erheblichen Aufwand zu erreichen.
Die Folge dieser Berechnungen sind häufig undurchsichtige und damit nicht verallgemeinerbare Daten. Das folgende Beispiel verdeutlicht diese Problematik in der ganzheitlichen Betrachtung.

Schussapparat für die Befestigung der Verbindungsklammern

Die im Hausbau verwendeten Werkstoffplatten werden mit Klammern auf dem Ständerwerk befestigt. Die außen befindlichen Plattenwerkstoffe, wie zementgebundene Holzspanplatten oder Nadelsperrholz werden mit Klammern im Abstand von 10 cm, die innen verbauten Platten, wie Gipskartonplatten oder OSB-Platten, alle 5 cm befestigt. Diese Abmessungen einzuhalten, wird gefordert. Tatsächlich können die vorgegebenen Abstände aber nicht zuverlässig eingehalten werden,

da z.B. die hohe Arbeitsgeschwindigkeit ein exaktes Ansetzen des Schussapparates verhindert. Die Abstände der Klammern zueinander schwankt in einer Untersuchung zwischen 2 cm und 23 cm. Eine Fixierung auf vorgegebene Werte ist in der Praxis folglich nicht zu realisieren.

Da die theoretische Berechnung sich in der Praxis als wenig zielgerichtet erwiesen hat, wird folgende Umsetzung der Berechnung angestrebt.

5.4.2.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage

In einem abgeschlossenen Forschungsprojekt [Bartolles et al. (2001), Pohlmann, Frühwald (2001)] wurden soweit wie möglich alle Produktionsenergien berechnet. Es stellte sich jedoch heraus, dass die errechneten Werte keine nennenswerten Aussagen hinsichtlich der Energieoptimierung ergaben. Der erhaltene Gesamtenergiewert aller Errichtungsschritte war vergleichsweise gering, die Menge an eingebrachtem Metall für die Befestigung ebenfalls sehr klein. Nach eingehender Betrachtung der erhaltenen Ergebnisse wurde von der Einzelberechnung abgesehen und eine begründete Pauschale angenommen. Diese Pauschale ist an die Größe des Gebäudes gebunden und liegt zur Sicherheit über dem Rechenwert der Einzelergebnisse. Auf diese Weise kann ausgeschlossen werden, dass die Betrachtungen sich im Detail verlieren und zusätzlich keine signifikanten Aussagen erhalten werden.
Die Mengen an eingesetztem Metall für die Befestigungsmittel werden gesondert ausgewiesen und berechnet. Die beschriebene Pauschale berücksichtigt alle durchzuführenden energetischen Arbeitsschritte während der Produktion.
In der Berechnungsgrundlage wird mit folgendem Wert gerechnet:

1 m² Gebäudenutzfläche erfordert 60 MJ Produktionsenergie[28].

1 m² Gebäudenutzfläche entspricht damit 9,3 kg CO_2-Emissionen.

Die Kohlendioxidemissionen beziehen sich auf den Energieträger Strommix aus Deutschland. Dieser Wert wird verwendet, da die Arbeitsschritte in der Produktion überwiegend durch strombetriebene Maschinen durchgeführt werden.

[28] Für die gesamte Herstellung ausgehend von fertigen Baustoffen

Die Werte sind verallgemeinert, im Rahmen des Ziels dieser Studie aber plausibel und vertretbar.

5.4.3. Modul Nutzung

Die Nutzung nimmt einen wichtigen Stellenwert in der Betrachtung von Häusern ein, da Heiz- und elektrische Energie über den Zeitraum der Nutzung aufgewendet werden muss. Dieser Zeitraum liegt in der Zukunft und ist in hohem Maße mit Annahmen zu verbinden. Die Betriebsenergie des Gebäudes während der Nutzungsphase wird mit Hilfe von Energiebedarfsberechnungen ermittelt.

Es werden folgende Energieformen unterschieden:

- **Heizenergie:** Bei dieser Energieform wird die thermische Heizenergie über den Nutzungszeitraum berechnet. Als realistischer Zeitraum werden 60 Jahre angenommen. Die Berechnung des Heizenergiebedarfs basiert auf einer detaillierten Wärmebedarfsberechnung aller Gebäudeelemente.
- **Warmwasserherstellung:** Während der Nutzung wird eine gewisse Menge an Wasser gebraucht. Diese Menge muss erwärmt und den Bewohnern des Hauses bereitgestellt werden. Hierfür muss thermische Energie aufgewendet werden.
- **Lüftungs- und Beleuchtungsenergie:** Der Niedrigenergiestandard erfordert eine geregelte Be- und Entlüftung. Folglich werden die Häuser mit einer Lüftungsanlage versehen. Diese Anlagen verbrauchen während des Betriebs elektrische Energie, welche in eine Energiebilanz und in die Berechnung der Kohlendioxidemissionen mit aufgenommen werden muss.

Die während des Lebensweges aufzuwendende Energie wird nach der Energieeinsparverordnung (2002) berechnet.

5.4.3.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage

Die Nutzungsphase eines Gebäudes ist in sehr hohem Maße mit zu treffenden Annahmen verbunden, da sie in der Zukunft liegt und vielfältigen Parametern unterworfen ist. Hieraus leitet sich ein wichtiger Problembereich der vorliegenden Studie ab:

> **„Welche Annahmen unterstützen die Aussagefähigkeit der Betrachtung und welche Annahmen verfälschen das Ergebnis?“**

Im Hausbau hat die Nutzungsphase eine Schlüsselstellung in der ökologischen Bewertung, da viele Umweltwirkungen aufgrund der Dauer und dem damit verbundenen Energieeinsatz mit ihr verbunden sind.
In dieser Studie wurden verschiedene Einflüsse in der Nutzungsphase nicht beachtet. Hierbei handelt es sich um alle Parameter, die vom Planer nicht zu beeinflussen sind, wie z.B.

- Umgebungsfaktoren des Gebäudes, wie Jahrestemperaturverlauf, Wind usw. und interne Faktoren, wie individueller Betrieb des Hauses (Raumtemperatur, Zwischenlüftung usw.).
- Die Herstellung der Inneneinrichtung und die Betrachtung dieser Gegenstände über den Nutzungszeitraum.

Es wurden „nur“ die mit dem Gebäude verbundenen Kennwerte betrachtet und in die Kalkulation aufgenommen. Der Vorteil dieses Abschneidekriteriums ist darin zu sehen, dass sich die Gebäudekennwerte, die Architektur und andere Merkmale der Häuser besser miteinander vergleichen lassen.
Nutzerspezifische Eigenheiten und wetterabhängige Faktoren beeinflussen die Energie- und Kohlendioxidbilanz eines Hauses nachweislich, jedoch kann bei der Erstellung des Hauses nicht erahnt werden, wie der endgültige Nutzen aussieht oder wie das Klima der Region sich in den kommenden Jahren entwickeln wird.

Lebensdauer

Der Hausbau ist in der Lage, stabile und dauerhafte Konstruktionen zu erstellen, die über eine sehr lange Zeit (>100 Jahre) bestehen können.
In der Berechnungsgrundlage wird eine Lebensdauer von 60 Jahren angenommen. Die in dieser Zeit anfallenden Reparaturen und der Austausch bestimmter Materialien werden berücksichtigt (siehe Modul Instandhaltung).
Der Vorteil dieser Lebensdauer ist in der Überschaubarkeit und Realität zu sehen. Eine lange Lebensdauer bedingt eine hohe Instandhaltung, die für den Austausch der Materialien benötigte Energie wird folglich einen immer größeren Anteil an dem Gesamtergebnis übernehmen. Das Nutzerverhalten erhält bei einem längeren Lebensweg eine entsprechend große Bedeutung. Zudem kann von dem Bauherrn und dem Planer nicht erwartet werden, konkrete Aussagen über Technologie und Entwicklung der nächsten 100 Jahre treffen zu können.
Quak [2001, Seite 197] ist in ihrer Studie von einer Lebensdauer von 80 Jahren ausgegangen, sie vertritt jedoch ebenfalls den Standpunkt, dass eine kürzere Lebensdauer eine bessere Vergleichbarkeit ermöglicht. Für die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerungspotential und Sommersmog ergeben sich nach einem Betrachtungszeitraum von 60

Jahren die gleichen relativen Resultate wie nach 80 Jahren. Für die Kriterien Überdüngung und Primärenergiebedarf würde ein betrachteter Lebensweg von 40 Jahren ausreichen.
Eyerer et al. [2000] berechnen ebenfalls einen Lebensweg von 60 Jahren.
Winter [2002] gibt eine Gesamtnutzungsdauer[29] für Holzgebäude zwischen 80 und 100 Jahren an, er weist aber darauf hin, dass die tatsächliche Nutzungsdauer bedeutend kürzer ist. Winter [2002] beziffert die Lebensdauer auf 30-40 Jahre, nach dieser Zeit finden umfassende Renovierungsarbeiten statt und das Haus wird im Grund neu erstellt.

Heizmedium

Die Wahl eines Heizmediums kann die Kohlendioxidbilanz maßgeblich beeinflussen. Dem Versuch, eine Optimierung des Gebäudes während der Nutzungszeit zu errechnen, wurde durch die Option, verschiedene Heizmedien einzusetzen, Rechnung getragen. Für den Heizenergiebedarf können die Medien:

- Erdgas
- Holzpelletheizung[30]
- Sonnenkollektor für die Bereitstellung des Warmwassers

verwendet werden. Der Strombedarf während der Nutzung kann durch den Einsatz von:

- Photovoltaik
- elektrischem Strom aus dem öffentlichen Netz

gedeckt werden.
Für die Bereitstellung der regenerativen Energie[31] mussten Daten generiert werden, die eine Aussage über die Effektivität und die Umweltwirkungen treffen.
Die Nutzung der regenerativen Energien, Solarenergie, Photovoltaik und Holzenergie, ist momentan mit den meisten Annahmen verbunden, da die Industrie noch nicht in der Lage ist, eindeutige und realistische Zahlen hinsichtlich einer ökologischen Abschätzung zu liefern.

[29] Der Zeitraum, in dem ein Gebäude bei normaler Instandhaltung wirtschaftlich nutzbar ist und den Anspruch der Nutzer gerecht wird [Winter 2002]

[30] Die Herstellung der Holzpellets (siehe 5.1.7.3) wird in dem Modul Nutzung einberechnet, da der Energieaufwand der Herstellung dem Energiegewinn durch die thermische Nutzung des Holzes entgegensteht. Es ist zudem nicht davon auszugehen, dass die Holzpellets im Voraus für 60 Jahre, sondern gebunden an den Heizenergiebedarf jedes Jahr, hergestellt werden.

[31] Die Herstellung der Energieanlagen wird in dem Modul Herstellung betrachtet. Das Modul Nutzung wird in Folge der Verwendung von „Sonnenenergie“ mit weniger Energiebedarf und Kohlendioxidemissionen belastet. Das Modul Herstellung der Bauteile durch die Verwendung von regenerativen Energiequellen ist jedoch energieintensiver.

Die berechneten Werte für Sonnenkollektoren und Photovoltaikanlagen gehen von den als sachlich richtig angesehenen Grundwerten von Gränicher et al. und Doka et al. (1995) aus. Diese Grundwerte wurden auf praxisgerechte und im Handel erhältliche Anlagen umgerechnet.
Die Angaben für den Betriebsenergiebedarf während der Nutzung müssen sich auf den Primärenergiebedarf beziehen, der Wirkungsgrad des Energieträgers muss in die Berechnung einfließen. In die Berechnungsgrundlage darf nur der Primärenergiebedarf während der Nutzung eingegeben werden.

Die **Elektroinstallationen** und die **Heizungsrohre** fließen nicht in die Betrachtung ein. Es ist bekannt, dass die in einem Gebäude verlegten Leitungen einen großen Einfluss auf die Umweltwirkungen eines Hauses haben, eine Berechnung der verlegten Leitungen wird jedoch in den seltensten Fällen vom Planer im voraus durchgeführt. Die Verlegung der Rohre und Leitungen geschieht in der Regel auf der Baustelle und kann aus diesem Grund nicht generell berechnet werden. Grundsätzlich gilt, dass in großen Gebäuden mehr Leitungen und Kabel verlegt werden.
Die Ausstattung mit Elektrokabeln ist jedoch stark an die Bedürfnisse des Nutzers gebunden. Derzeit werden immer mehr Gebäude elektronisch vernetzt, dies geschieht jedoch in der Regel erst nach Fertigstellung des Hauses und ist stark an das Nutzerverhalten gebunden. Es wird deshalb nicht mit in die Betrachtung einbezogen.

Während der Nutzung des Wohngebäudes werden verschiedene **Einrichtungsgegenstände** und **Wohnutensilien** benötigt. Diese werden für jedes Haus benötigt und sind stark an den Geschmack des Nutzers gebunden. In der Berechnungsgrundlage werden sie nicht berücksichtigt. Es wird nur das Haus als solches ganzheitlich betrachtet. Nutzerspezifische Eigenheiten können nicht berücksichtigt werden, da sie keine signifikanten Aussagen über das Gebäude treffen und von Fall zu Fall variieren.

5.4.4. Modul Instandhaltung

Die Nutzung von Gebäuden über einen längeren Zeitraum bedingt einen Austausch von verschiedenen Baustoffen, da deren Dauerhaftigkeit begrenzt ist. Gebäude werden in der Regel für einen Zeitraum von >50 Jahren konzipiert.
Die Berechnungsgrundlage beachtet diese Tatsache durch das Modul Instandhaltung. Die ausgetauschten Bauteile werden in diesem Modul ersetzt, der Aufwand für die Herstellung neuer Bauteile wird durch dieses Modul berechnet. Die Entsorgung der verbrauchten Materialien wird an das Modul Entsorgung weitergeleitet.

5.4.4.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage

Verschiedene Bauteile müssen während der Nutzungsphase aus Gründen der Materialermüdung ersetzt werden. Für diese Baustoffe werden neue Bauteile gleicher Art und Material berücksichtigt, während die Alten entsorgt werden.
Die ausgetauschten Bauteile aus nachwachsenden Rohstoffen werden thermisch verwertet. Die für die Herstellung der neuen Materialien benötigte Energie und die damit verbundenen Kohlendioxidemissionen werden in die Bilanz integriert und tragen zum Gesamtenergiebedarf und zur Kohlendioxidbilanz bei.
Folgende Materialien müssen über eine Nutzungsdauer von 60 Jahren ausgetauscht und durch die Berechnungsgrundlage kalkuliert werden:

- Fenster: 1 mal
- Dachdeckung: 1 mal
- Fassadenbekleidung: 1 mal
- Photovoltaikanlage: 3 mal
- Solaranlage: 2 mal
- Holzpelletofen: 1 mal

Diese Annahmen fußen auf den Grundbilanzen der in der Datengrundlage genannten Institute.
Die Fensterstudie der EMPA betrachtet beispielsweise Holzfenster über einen Zeitraum von 30 Jahren. In dieser Betrachtung sind die Instandhaltungsarbeiten wie z.B. Abschmirgeln, Streichen usw. enthalten. Würden in dieser Studie andere Nutzungszeiträume angenommen werden, so könnten die Grundwerte, die die Erstellung einer Berechnungsgrundlage erst ermöglicht haben, nicht übernommen werden oder die Austauschintervalle müssten anders gewählt werden.

5.4.5. Modul Rückbau

Am Ende der Nutzungsdauer wird das Haus zurückgebaut und wenn möglich wiederverwertet. Die Art der Weiterverwendung bzw. Entsorgung muss festgelegt werden. Grundsätzlich wird angenommen, dass das gesamte in dem Gebäude verbaute Holz thermisch verwertet wird. Auf diese Art und Weise kann Energie aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden.

5.4.5.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage

Das Modul Rückbau (Entsorgung) ist in weiten Teilen Spekulation, da momentan nicht abzuschätzen ist, welche Entsorgungsmöglichkeiten nach Ende der Nutzungsdauer, in diesem Fall in 60 Jahren, bestehen. Allerdings sind in der Methode der Ökobilanzierung Zeiteffekte ohnehin ausgeschlossen, d. h. der gesamte Lebensweg wird ab jetzt im Zeitraffer ablaufend betrachtet [ISO/EN/DIN 14.040, 14.041]. Die in dieser Studie verwendeten Ökobilanzdaten betrachteten ausschließlich den Lebensweg bis zur Herstellung des Baustoffes.
Mit der Entsorgung hat sich bisher nur Speckels (2001) beschäftigt. Den Untersuchungen zur Folge ist es unter ökobilanziellen Gesichtspunkten sinnvoll, regenerative Baustoffe, in diesem Fall Holz und Holzprodukte, nach der Nutzung thermisch zu verwerten.
Baustoffe werden in Deutschland Verbrennungsanlagen zugeführt, die überwiegend der 17. BImSchV entsprechen. Für den Betrieb dieser Verbrennungsanlagen gelten Grenzwerte für die Emissionen, sodass von einem für den Menschen ungefährlichen Schadstoffausstoß ausgegangen werden kann. Althölzer müssen ebenfalls Anlagen zugeführt werden, die nach der 17. BimSchV Biomasse thermisch verwerten. In der Praxis ist es ein weitverbreitetes Phänomen, dass die geforderten Grenzwerte von den zuständigen Bezirksregierungen im Zuge der Baugenehmigung der Anlage angehoben werden.
Tabelle 30 zeigt die geforderten, genehmigten und tatsächlich gemessenen Grenzwerte ausgesuchter Luftschadstoffe für die MVA Stapelfeld [Andresen, 2002].

Tabelle 30: Schadstoffemissionen der MVA Stapelfeld

	Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV	**Genehmigte Grenzwerte**	**Betriebswerte 2001**
	Tagesmittelwert [mg/m³]	Tagesmittelwert [mg/m³]	Jahresmittelwert [mg/m³]
Stickstoffdioxid	200	83,3	34,57
Schwefeldioxid	50	25	1,33
Gesamtkohlenstoff	10	8,3	0,50
Chlorwasserstoff	10	8,3	0,32
Fluorwasserstoff	1	0,83	< 0,07
Gesamtstaub	10	8,3	0,59
Kohlenmonoxid	50	50	21,89
Quecksilber	0,03	./.	0,00053

Den Energieeinsatz und die Kohlendioxidemissionen, die mit dem Rückbau eines Hauses und einer Verwertung verbunden sind, hat bisher niemand fundiert und aussagekräftig betrachtet.

Für den Rückbau eines Hauses gibt es verschiedene Möglichkeiten. Das Gebäude kann mit Abrissbirnen zerkleinert und zur Weiterverwertung abtransportiert werden. Der Transport[32] und der Bagger müssten folglich berücksichtigt werden. Der Energieaufwand des Abrisses ist sehr gering, da in der vorliegenden Studie Einfamilienhäuser betrachtet werden.

In der Berechnungsgrundlage wird die gespeicherte und nutzbare Energie erfasst. Dies soll Aussagen über die mögliche Substitution von fossilen Energieträgern durch die thermische Verwertung der in dem Gebäude verbauten nachwachsenden Rohstoffe ermöglichen. Um die nachwachsenden Baustoffe thermisch zu verwerten, müssen sie von den fossilen Baustoffen getrennt werden. Es bedarf folglich eines gezielten Rückbaus des Hauses. Der Rückbau erfordert zusätzlich zu dem Abriss der Bodenplatten einen gewissen manuellen Arbeitsanteil. Eine Quantifizierung dieses Aufwandes ist mit erheblichem Aufwand verbunden und könnte in einer standardisierten Berechnung nicht durchgeführt werden. Der Aufwand kann jedoch auch nicht pauschal angenommen werden, da sich Gebäude in ihrer Größe und den verbauten Baumengen stark unterscheiden. Es muss folglich eine Berechnung angenommen werden, die große und aufwendig produzierte Häuser im Rückbau energieaufwendiger beurteilt als kleine Gebäude.

Es wird aus diesem Grund für das Modul Rückbau folgende Annahme getroffen:

Das Modul Rückbau wird prozentual an das Modul Herstellung und Instandhaltung gebunden.

In der Berechnungsgrundlage werden **5% der Herstellungsenergie** der Baustoffe in die Energieaufwendungen des Rückbaus eingerechnet. In der Berechnung der Kohlendioxidemissionen werden ebenfalls **5% der CO_2-Herstellungsemissionen** in dem Modul Rückbau angenommen und berechnet.

Die während der Instandhaltung ausgetauschten Baustoffe werden ebenfalls mit diesem Wert berechnet, da sie entsorgt oder wiederverwertet werden.

Der Vorteil dieser Annahme ist in der Funktionalität zu sehen. Auf diese Weise werden herstellungsintensive Häuser realistischer betrachtet, als wenn ein Standardwert für alle Häuser angenommen würde.

[32] Entfernung wird berücksichtigt im Modul Transport unter Baustelle zum Entsorger

5.4.6. Modul Transport

Der Einfluss der Transportentfernungen auf die ökologische Betrachtung von Produkten wird in dem Modul Transport untersucht.
In den meisten ökologischen Betrachtungen wird das Modul Transport stark vernachlässigt. Grundsätzlich wird behauptet, dass kurze Transportentfernungen einen positiven Einfluss auf eine Ökobilanz haben. Diese Tatsache ist mit Sicherheit richtig, ein rechnerischer Nachweis konnte für Gebäude jedoch nicht erbracht werden.
Das Modul Transport ist entwickelt worden, um diesen Nachweis zu führen und fundierte Werte zu dem Einfluss der Transportentfernung zu berechnen.

5.4.6.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage

Die Betrachtung der Transportentfernungen wird in der ganzheitlichen Bilanzierung in den meisten Fällen stark vernachlässigt. Der Transport kann aber eine wichtige Bedeutung bei der ökologischen Betrachtung von Gebäuden haben. Kurze Transportwege verringern den an das Produkt gebundenen Energieaufwand und die durch die Verbrennung des Treibstoffes anfallenden Emissionen. Damit das Modul Transport in die ganzheitliche Bewertung der Berechnungsgrundlage integriert werden kann, müssen einige Abschneidekriterien definiert werden.
Ein Gebäude besteht aus vielen verschiedenen Baustoffen. Eine Marktvorherrschaft eines Baustoffanbieters gibt es nicht; die Produktion ist zum größten Teil überregional. Aus diesem Grund kann einem Baustoff nicht ein speziellen Hersteller zugeordnet werden. Ziel muss es sein, generelle Aussage zu treffen.
In der Berechnungsgrundlage sind folgende Entfernungen zu berücksichtigen:

- Baustoffhersteller → Produktion der Bauelemente
- Zusatzstoffe → Produktion/Baustelle
- Fenster → Produktion/Baustelle
- Produktion → Baustelle
- Baustelle → Entsorgung

Bei den Baustoffen werden die Rohstoffe für die Vorfertigung, die Fenster und die Zusatzstoffe (Beton, Stahl) separat eingegeben. In der Praxis ist der Planer/Architekt gefordert, für die angegebenen Baustoffe Durchschnittsentfernungen zu ermitteln und einzugeben.
Diese Unterteilung wurde gewählt, da alle Baustoffe, die in einem vorgefertigten Wandelement eingebaut werden (Holz und Holzwerkstoffe, Dämmung usw.) zu dem Produktionsort

transportiert werden müssen. Die Fenster können entweder auch zu der Produktion oder direkt zur Baustelle gebracht werden. Die Zusatzstoffe, wie Beton und Stahlbewehrung, werden für das Fundament des Hauses genötigt und im voraus verbaut. Für diesen Bauschritt werden in der Regel regionale Bauträger beschäftigt.
Die Berechnungsgrundlage ermittelt die verbaute Menge aus den eingegebenen Materialdaten und berechnet nach der Formel

$$\text{Energie bzw. } CO_2 = \left[\frac{\text{Masse}_{\text{Haus}}\,[t]}{\text{Kapazität}_{\text{LKW}}} * \sum \text{Entfernung}\,[km] \right] * x$$

Anzahl der Transporte — Addition der Entfernungen — Energiewert/ CO_2-Wert

den Energiebedarf und die Kohlendioxidemissionen des Transports. Es handelt sich folglich um einen gewichteten Mittelwert.

Der Benutzer der Berechnungsgrundlage kann somit den Einfluss eines langen Transportweges bestimmter Baustoffe auf den Gesamtenergiebedarf und die gesamten CO_2-Emissionen errechnen. Von einem eventuellen externen Betrachter der Bewertung können die eingegebenen Entfernungen schnell und einfach auf Plausibilität geprüft werden.

5.4.7. Gespeicherte Energie

Um eine **ganzheitliche Gesamtenergiebilanz** für die betrachteten Gebäude aufzustellen wird die in dem Holz gespeicherte Energie berechnet.
Es muss aber darauf verwiesen werden, dass **wenigstens 80% aller Umweltwirkungen** mit dem **Gebrauch von Energie** [Hasch, 2001; Eyerer et al., 2000] verbunden sind. Insofern erlaubt die Energiebetrachtung bereits eine sehr gute Abbildung der Umweltproblematik des Bauens und dafür liegt eine gute Datenbasis vor.
Letztendlich ist die Möglichkeit der Energieeinsparung im Hausbau, verbunden mit einer Reduktion der Kohlendioxidemissionen, politisch gefordert. Sie findet ihren Ausdruck in der neuen Energieeinsparverordnung.
Die Energiebilanzen und die Kohlendioxidemissionen von Gebäuden bieten zudem sehr gute Möglichkeiten, Schwachstellen im Hausbau zu analysieren und fundierte Aussagen hinsicht-

lich Baustoffeinsatz, Architektur und sogar der Verwendung von speziellen Fenstersystemen oder Kollektoranlagen zu machen.

5.4.7.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage

Der Baum nutzt die Energie der Sonne zum Wachstum. Die Sonnenenergie wird in dem Holz des Baumes gespeichert. Durch eine thermische Verwertung kann die Sonnenenergie genutzt werden. Die Berechnungsgrundlage erfasst die in dem verbauten Holz vorhandene und gespeicherte Energie. Die Stoffbilanzen geben den Massenwert des Holzes in dem Haus an. Bei diesem Wert handelt es sich um absolut trockenes Holz.
Der Brennwert von absolut trockenem Holz beträgt 19 MJ/kg atro Holz. In der Praxis kann es kein absolut trockenes Holz geben; aus diesem Grund wird die verbaute Masse an Holz und Holzprodukten mit dem Brennwert 18,5 MJ/kg [Marutzky, Seeger, 1999] bewertet. Diese Energie kann zur Substitution von fossilen Energieträgern verwendet werden.
Die Berechnungsgrundlage ermittelt die im Holz gespeicherte Energie und berechnet die daraus zu substituierende Energie wie folgt:

MJ = (Masse x 18,5 MJ/kg) µ

MJ: Menge an Energie, die durch die thermische Verwertung substituiert werden kann
M: Menge an thermisch verwertbarem Baustoff in dem gesamten Haus
µ: Wirkungsgrad der Verbrennung[33]

5.4.8. Gespeicherter Kohlenstoff

In dem Kapitel Nr. 3 werden verschiedene Umweltwirkungen beschrieben, welche in einer Ökobilanz betrachtet werden sollen. Die vorliegende Studie betrachtet fast ausschließlich die Emissionen des Treibhausgases CO_2, es handelt sich folglich um einen Großteil der Wirkungskategorie **Global Warming Potential (GWP)**. Eine vollständige Berechnung dieser Kategorie ist mit der Datengrundlage jedoch nicht möglich, da einige Berechnungsgrunddaten nur die CO_2-Emissionen ausweisen und nicht die CO_2-Äquivalente.
Aussagen bezüglich der Emissionen der weiteren Treibhausgase Methan, Distickstoffmonoxid und FCKW können nicht als „durchgängig vorhanden“ bezeichnet werden und wurden nicht in die Berechnungsgrundlage integriert. Diese Gase haben eine höhere Wirksamkeit

[33] Der Wirkungsgrad der Energiegewinnung aus Biomasse beträgt ~ 80% [Krapf, 2001, Seite 83]. Dieser Durchschnittswert wird in den Berechnungen verwendet.

als Kohlendioxid; für die Ermittlung des GWP`s werden sie mit CO_2-Äquivalenzwerten von bis zu 5.600 (Halon) multipliziert. Für eine Relativierung dieser Aussage muss jedoch darauf verwiesen werden, dass diese Gase nur in geringen Mengen emittiert werden. Bereits durchgeführte Berechnungen des Global Warming Potentials [Pohlmann,1999; Hasch 2001; Speckels 2001] haben ermittelt, dass der Einfluss von Kohlendioxid an der Wirkungskategorie ~96% beträgt. Durch eine fundierte Berechnung der Kohlendioxidemissionen lassen sich folglich sehr gute Aussagen über die Auswirkungen eines Hauses bezüglich der Kategorie Global Warming Potential treffen.

5.4.8.1. Vorgehensweise der Berechnungsgrundlage

Der Baum besitzt die positive Eigenschaft, Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entziehen und den Kohlenstoff in dem Holz einzulagern (siehe Kap.4.7). Das der Atmosphäre entzogenem Kohlendioxid wird als Menge an **gespeichertem Kohlendioxid** in der Kohlendioxidbilanz dargestellt und folgendermaßen berechnet:

gespeichertes CO_2 [kg] = Masse Holz [kg] x 1,851[34]

Holz besteht zu ca. 50% aus Kohlenstoff. Der in dem Haus **gebundene Kohlenstoff** wird in der Kohlendioxidbilanz angegeben. Die Kohlenstoffspeicherfähigkeit von Holz und anderen nachwachsenden Rohstoffen in Gebäuden wird nach der Formel

gebundenes C [kg] = Masse Holz [kg] x 1,851/3,6[35]

berechnet.

Diese beiden Kategorien, **Energiebilanz und Kohlendioxidbilanz**, werden verwendet, da sie für den Hausbau aussagekräftig sind und die Datengrundlage für diese Kategorien fundiert ist. Obwohl die Methodik der Ökobilanz fordert, dass bestimmte Wirkungskategorien betrachtet werden, ist dies im Hausbau zu jetziger Zeit nicht möglich, da für die meisten im Bausektor eingesetzten Baustoffe keine Daten für alle Kategorien vorliegen. Auch sind die für die anderen Wirkungskategorien relevanten Daten oftmals mit großen Unsicherheiten verbunden, so dass auf diese Betrachtung verzichtet wird.

Verschiedene Umweltwirkungen werden anhand des Gesamtenergiebedarfes des Hauses berechnet. Die ökologische Betrachtung wird in Kap. 6.6 beschrieben.

[34] [Thoroe, Schweinle, 1996]

[35] berechnet nach der Molmasse von Kohlenstoff und Sauerstoff

Aufbau der Berechnungsgrundlage

6

6. AUFBAU DER BERECHNUNGSGRUNDLAGE

Eine Berechnungsgrundlage zur ökologischen Bewertung von komplexen Produkten, wie z.B. Gebäuden, kann in der Praxis nur Anwendung finden, wenn die Handhabung einfach und der Nutzen groß ist. Der Aufwand für die Erstellung der ökologischen Bewertung muss ohne wesentlichen zusätzlichen Aufwand des Planers durchzuführen sein.

6.1. EDV-Berechnungsgrundlagen

Im folgenden werden verschiedene EDV-Werkzeuge für die ökologische Bewertung kurz dargestellt.

ECOPT und ECOPRO

Diese Programme wurden innerhalb des Verbundprojektes KOBEK (Methode zur kombinierten Berechnung von Energiebedarf, Umweltbelastung und Baukosten in frühen Planungsstadien) entwickelt [Kohler et al. 1996]. Es sollten Planungshilfen für Architekten und Ingenieure entwickelt werden. Mit ECOPT können Gebäudenutzungsvarianten miteinander verglichen werden. Mit ECOPRO können Gebäudevarianten auf der Basis der Elementzusammensetzung und des Energieverbrauchs während der Nutzung (Heizung und Warmwasser) bilanziert werden [Quak, 2001].

Build-it

Das Programm Build-it wurde innerhalb des interindustriellen Verbundprojektes „ganzheitliche Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden“ [Eyerer et al. 2000] entwickelt. Das Programm sollte eine konsistente Datenbasis für die ökologische Betrachtung von Gebäuden schaffen. Die zu betrachtenden Gebäude werden modulartig zusammengesetzt und inklusive der Nutzungsphase bilanziert.

OGIP

Der Name steht für Optimierung der Gesamtanforderungen (Energie/Kosten/Umwelt) und ist ein Programm für die integrale Planung. Es können Lebenszyklusanalysen auf der Basis der Elementmethode durchgeführt werden. Der Primärenergiebedarf und verschiedene Wirkungskategorien einer Ökobilanz können berechnet werden. Zudem werden die Kosten ermittelt [www. ogip.ch].

BauBioDataBank

Das Programm wurde von der Genossenschaft Information Baubiologie in Flawil (Schweiz) entwickelt. Es ist als Nachschlagwerk für Architekten, Handwerker und andere Bauinteressierte konzipiert. Der Fokus liegt auf bauökologischen und baubiologischen Daten bis hin zur chemischen Zusammensetzung von Bauprodukten. Anhand der Bauelemente wird der Gesamtenergiebedarf und verschiedene Umweltkategorien betrachtet [Buehler, 2000; www.gibbeco.org].

Legoe

Das von der Umweltstiftung geförderte Programm untersucht im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse die Baukosten, den Energieverbrauch für Heizung und Warmwasseraufbereitung, den Energieverbrauch für die Erstellung, Erneuerung und Entsorgung, die Umweltbelastungen durch die Baustoffe und gibt Hinweise zum Thema Wohnkomfort [König, 2000; www.legoe.de].

Diese Programme können als Spezialistentools bezeichnet werden, die erzielbaren Ergebnisse sind z.T. detailliert. Die verwendete Datengrundlage entspricht jedoch nicht immer den Anforderungen einer Ökobilanz.

Alle Programme erfordern einen erheblichen Aufwand zur Einarbeitung. Ein spezielles Betriebssystem oder die Anschaffung teurer Zusatzsoftware wird gefordert. Die Folge dieser Situation ist eine geringe Akzeptanz in der Praxis. Nur wenige Mitarbeiter wären in der Lage, mit dem Programm zu arbeiten. Die Softwaretools finden Anwendung in Forschungsinstituten und vereinzelt auch in großen Unternehmen.

Umfassende Erhebungen und eine Umsetzung ökobilanzieller Betrachtung durch Planer können jedoch nur durchgeführt werden, wenn die Software einfach ist und einer breiten Masse zuggängig gemacht wird. Die Datengrundlage ist innerhalb der Programme sehr unterschiedlich, so dass die erzielten Ergebnisse nicht vergleichbar sind.

Aussagen und Berechnungen zur Speicherung von Kohlenstoff in nachwachsenden Baustoffen werden von keinem der genannten EDV-Werkzeuge unterstützt. Die Problematik der Kohlenstoffsenke in Holzprodukten wird jedoch in Zukunft an Bedeutung gewinnen (Kyoto-Protokoll) und muss folglich in ganzheitliche Betrachtungen integriert werden. In Gebäude werden nachwachsende Baustoffe eingesetzt und der in diesen Elementen gespeicherte Kohlenstoff wird über den gesamten Lebensweg der Atmosphäre entzogen.

Aus diesen Gründen wurde ein eigenständiges Arbeitswerkzeug entwickelt und mit transparenten Daten ausgestattet (siehe Kap. 5.1).

Die Vorgehensweise bei der ganzheitlichen Betrachtung von Gebäuden wird in der Abbildung 23 verdeutlicht. Die Berechnungsgrundlage ist ähnlich aufgebaut und fußt auf den Daten und der beschriebenen Vorgehensweise in dem Kapitel 5.4).

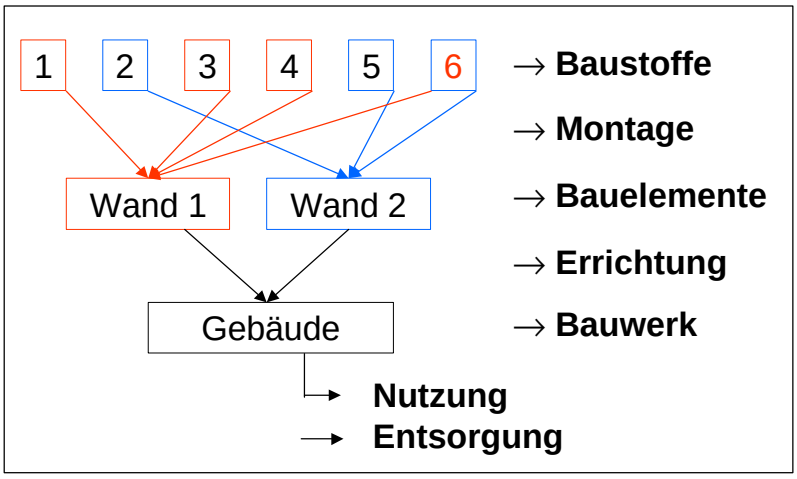


Abbildung 23: Vorgehensweise bei der ökologischen Bewertung von Bauwerken

Das im Folgenden entwickelte Arbeitstool (Berechnungsgrundlage) ist in Module unterteilt.
Die in dem Gebäude verbauten Baustoffmengen werden in der Planung des Hauses durch eine Baubeschreibung oder eine computergesteuerte Software ermittelt **(Modul Herstellung)**.
Verschiedene Baustoffe, deren ökologisches Profil bekannt ist, werden zu Bauelementen (z.B. Wand, Dach oder Fußboden) montiert **(Modul Produktion/Errichtung)**. Nach einer Montage im Werk oder auf der Baustelle werden diese Bauelemente zu einem Gebäude zusammengesetzt.
Das Gebäude kann bewohnt werden **(Modul Nutzung)**. Während dieser Phase müssen Bauelemente ersetzt und wieder neu eingebaut werden (z.B. Fenster, Dach und Außenfassade), da ihre Haltbarkeit begrenzt ist **(Modul Instandhaltung)**.
Nach einem angenommenen Zeitraum wird das gesamte Gebäude zurückgebaut **(Modul Rückbau/Entsorgung)**. Die Bauteile aus Holz werden thermisch verwertet.
Auf diese Weise kann die bei der Verbrennung entstehende thermische Energie genutzt werden. Holz als Energieträger kann so unter anderem der Substitution von fossilen Energieträgern dienen. Die Bauteile aus nicht brennbaren Materialien werden soweit wie möglich wiederverwertet. Betonteile können beispielsweise zu Schotter verarbeitet und im Straßenbau eingesetzt werden. Die Beförderung der Baustoffe zwischen den einzelnen Abschnitten des Lebensweges eines Hauses wird in dem **Modul Transport** berücksichtigt (in Abb. 23 nicht eingezeichnet).

Die Berechnungsgrundlage besteht aus einer EXCEL Datei von ca. 60 KB. Diese geringe Speicherkapazität auf einer handelsüblichen Standardsoftware ermöglicht eine schnelle und einfache Berechnung auf jedem PC ohne zusätzliche Installation von Programmen.

Der Aufbau der Berechnungsgrundlage teilt sich in fünf Felder/Seiten:

- Eingabe
- Daten
- Berechnung
- Ergebnisse (Energiebilanz und Kohlendioxidbilanz)
- Ansatz einer Ökobilanz auf der Grundlage des Gesamtenergiebedarfs

Die Felder werden im folgenden in ihrem Aufbau, in ihrer Aussage und ihrer Ansicht dargestellt.

6.2. Feld Eingabe

Ein Problem von ökologischen Bewertungen ist in der möglichen (bewussten oder unbewussten) Manipulation durch den Bilanzierer zu sehen. Ist der Bilanzierer Nutznießer der ökologischen Bewertung, so ist das Eigeninteresse an einer positiven Bilanz sehr groß. Dieser ist in der Lage, Daten und Eigenschaften nicht zu erwähnen, so dass sie in der Bewertung nicht existieren. Die ISO/EN/DIN 14.040 erlaubt z.B., dass Stoffe deren Massenstrom <1% des Gesamtmassenstromes ausmachen, nicht in die Sachbilanz aufgenommen werden müssen. Hierdurch kommt es jedoch zu einer Verfälschung der Ergebnisse. Ein Vergleich mit anderen Produkten kann eigentlich nicht mehr stattfinden. Das hier zu erarbeitende Architektentool soll unabhängig von dem Eigeninteresse des Bilanzierers arbeiten und wurde deshalb bewusst so aufgebaut, dass nur wenige Möglichkeiten des Eingriffes bestehen. Zusätzlich ist die Anzahl der einzugebenden Daten gering, so dass auch eine zügige Kontrolle der eingegebenen Daten durchgeführt werden kann. Dies ermöglicht eine große Transparenz und Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Der Durchführende der ökologischen Betrachtung hat nur die Möglichkeit, die grünen Felder des Eingabeblattes (siehe Abbildungen 24 bis 27) auszufüllen. Die ganzheitliche Betrachtung des Gebäudes vollzieht sich anhand der eingegebenen Daten selbständig.

Ein Problem für die ökologischen Betrachtung von Gebäuden bestand in der Vergangenheit in der Ermittlung des Betriebsenergiebedarfs; hier wurde von den Planern/Architekten in der Regel mit einer mehr oder weniger groben Schätzung gearbeitet. Dem Käufer des Hauses konnte auf diese Weise mitgeteilt werden, dass der Niedrigenergiestandard des Hauses problemlos erreicht wird. Der Käufer hat sich mit dieser Aussage zufrieden gegeben und erst während des Bewohnens feststellen müssen, dass seine Heizkosten dem Niedrigenergiestandard nicht entsprechen.

Im Februar 2002 ist die neue Energieeinsparverordnung (EnEV) in Kraft getreten. Diese schreibt die Ermittlung des Betriebsenergiebedarfs durch den Planer verbindlich vor. Es muss für spezielle Gebäude ein Einzelberechnungsverfahren durchgeführt werden, das auch alle Wärmebrücken erfasst. Für standardisierte Häuser ist ein allgemeines Berechnungsverfahren ausreichend.

Durch diesen Nachweis lassen sich die spezifischen Energiekennwerte des Gebäudes erfassen. Die während der Nutzung verwendeten Energieträger müssen in dem Energieberechnungsverfahren ebenfalls berücksichtigt werden, da in der EnEV der Primärenergiebedarf ermittelt werden muss. Der Warmwasserenergiebedarf des Hauses wird ebenfalls angegeben. Man kann 12,5 kWh/m²a als Warmwasserenergiebedarf in die Betriebsenergiebe-

darfsermittlung einrechnen. Für die Berechnungsgrundlage werden durch diese Verfahren die benötigten Daten geliefert.

Die Abbildung 24 bis 27 verdeutlichen den Aufbau des Feldes EINGABE. Für die Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs und der Kohlendioxidemissionen über den Lebensweg des Hauses muss der Planer/Architekt die grünen Felder ausfüllen, die Berechnung geschieht dann selbstständig.

Abbildung 24 verdeutlicht die Eingabemöglichkeiten für die Berechnung der Energieträger während der Nutzung sowie die Größe des Hauses. Die weißen Felder können nicht beschrieben werden, sie dienen dem Benutzer zur Information (siehe Beispiel).

Es wird darauf verwiesen, dass die Abbildungen 24-27 nur für Erläuterung unterteilt wurden, in der Berechnungsgrundlage handelt es sich um eine durchgehende Eingabemöglichkeit.

			Einheit		
	betrachteter Zeitraum	60	Jahre		
	Wohnraum	210	m²		
	beheizte Fläche	190	m²		
	u-Wert der Wände	0,12	W/m²K		
Energiebedarf während der Nutzung	Heizbedarf	51,8	MJ/m²Jahr	9842	MJ/Jahr
	Warmwasserbedarf	56,95	MJ/m²Jahr	10820,5	MJ/Jahr
	Lüftungsbedarf	23	MJ/m²Jahr	4370	MJ/Jahr
Warmwasser	Größe der Solaranlage	7	m²	10080	MJ/Jahr Output
	Warmwasser Heizbedarf Erdgas	740,5	MJ/Jahr		
Strom	Größe der Photovoltaikanlage	10	m²	3000	MJ/Jahr Output
	Strombedarf öffentliches Netz	1370	MJ/Jahr		
Heizenergie verwendeter Energieträger:	Holzpellets		Feld mit **1** markieren		
	Erdgas	1	(nur ein Feld markieren!)		

Abbildung 24: Ansicht des Feldes „Eingabe“ für die Betrachtung der verwendeten Energieträger und der Rahmenbedingungen

Dem Planer wird die Möglichkeit gegeben, regenerative Energiequelle zu verwenden. Die geplante Größe der Solar- und Photovoltaikanlagen kann ebenfalls eingegeben werden. Das Programm berechnet selbständig die daraus erzeugte Energie (siehe Kap.5.1.7) und ermittelt, ob zusätzlich andere Energieträger genutzt werden müssen. Der Nutzer kann mit Hilfe der Berechnungsgrundlage z. B. die optimale Größe der Solaranlagen ermitteln.

Beispiel

In der Abbildung 24 ist ein Beispiel eingegeben mit einer Solaranlage von 7 m². Diese Anlagengröße kann den Energiebedarf zur Warmwasserbereitstellung des Beispielhauses nicht vollständig decken, es bleibt ein Restbedarf von 740,5 MJ/Jahr (weißes Feld). Diese Energie wird mit Hilfe von Erdgas gedeckt. Gibt der Planer eine Solaran-

lage von 8 m² Größe ein, so kommt es zu einer Überproduktion von 699,5 MJ/Jahr (Wert: – 699,5 MJ/J). Zur Deckung des Warmwasserenergiebedarfs des Beispielhauses wäre eine Solaranlage mit einer Größe 7,5 m² ideal, es müssen nur 20,4 MJ/Jahr mit Erdgas erwärmt werden.

Die Abbildung 25 zeigt die Eingabemöglichkeit für die in dem Haus verwendeten Baustoffe. Mit diesen vorgegebenen Baustoffen ist es möglich, jedes beliebige Gebäude ganzheitlich energetisch zu betrachten und die Kohlendioxidemissionen über den gesamten Lebensweg zu errechnen.

Baustoffe	Bauholz / NH	46400	kg
	KVH		kg
	BSH		kg
	OSB	10300	kg
	Spanplatte V20		kg
	Spanplatte V100	1500	kg
	PE-Folie		kg
	Holzfaserdämmplatte	2000	kg
	MDF		kg
	Nadelsperrholz		kg
	Trägersystem (Gurt:NH/ Steg: OSB)	1200	kg
	Trägersystem (Gurt:NH/ Steg: HDF)		kg
	Gipskarton	8000	kg
Dämmstoffe	Zellulose	8900	kg
	Steinwolle		kg
	Holzfaserdämmplatte/Trittschall	1200	kg
	Glaswolle		kg
Fassade	zementgebundene Holzspanplatte	9600	kg
	Ziegelstein		kg
	Hohllochziegel		kg
	Gehwegplatten		kg
	Porenbeton		kg
	Kalksandstein		kg
	WDVS-Leichtputz		kg
	WDVS-Kratzputz		kg
Dach / Stein und Beton	Beton B 25	133100	kg
	Beton B 35		kg
	Dachziegel	9000	kg
Metall	Stahl (Matten, Rundstahl)	6800	kg
	Metall zur Verbindung	600	kg

Abbildung 25: Ansicht des Feldes „Eingabe“ für die Betrachtung der verwendeten Baustoffe

Die Fensterlisten (Abbildung 26) wurden in die Eingabe integriert, um dem Planer verschiedene Fenster mit den entsprechenden Kennwerten zur Auswahl zu geben. Der Materialaustausch der Fenster wird automatisch durch das Programm berechnet. Der Planer/Architekt benötigt nur die Abmessungen der Fenster aus der Baubeschreibung des Hauses und gibt die Mengenangaben in die Berechnungsgrundlage ein. Abbildung 26 zeigt einen kleinen Ausschnitt der Fenstersysteme mit verschiedenen Abmessungen.

Rahmen ohne Flügel	0,695 x 2,405		Stück
	0,917 x 2,405		Stück
	1,38 x 2,405		Stück
	0,695 x 2,034		Stück
Kastenfenster	0,265 x 1,69 (festverglast)	4	Stück
	0,4075 x 0,4075	1	Stück
	0,452 x 2,455	4	Stück
	0,637 x 2,415	1	Stück
	0,775 x 0,775	2	Stück
	0,775 x 1,108	3	Stück
	0,775 x 1,59	9	Stück
	0,775 x 1,8665	7	Stück
	0,775 x 2,415	1	Stück
	1,43 x 2,415	2	Stück
	1,57 x 2,385	1	Stück
	1,57 x 2,415	1	Stück
	2,09 x 2,385	1	Stück
	1,489 x 1,6	1	Stück
	D = 0,815	2	Stück

Abbildung 26: Auszug der Fensterlisten des Feldes „Eingabe“

Der Einfluss der Transportentfernungen auf den Gesamtenergiebedarf von Gebäuden kann mit Hilfe der Berechnungsgrundlage problemlos ermittelt werden.
Die Transportentfernungen der einzelnen Module müssen in dem Feld Eingabe benannt werden.

Transport			
	Holzhersteller -> Produktion	20	km
	Zusatzstoffe -> Produktion/Baustelle	8	km
	Fenster -> Produktion/Baustelle	60	km
	Produktion -> Baustelle	40	km
	Baustelle -> Entsorgung	10	km

Abbildung 27: Eingabemöglichkeit eines gewichteten Mittelwertes für die Betrachtung der Transportentfernungen der einzelnen Produktionsschritte

6.3. Feld Daten

Das Feld Daten stellt die Grunddaten der Betrachtung dar. Die Daten der Berechnungsgrundlage entsprechen den Grunddaten des Kapitels 5.1. Dieses Feld dient dem Benutzer zur Information, mit welchen Werten die ökologische Betrachtung durchgeführt wird. Die Erstellung einer ökologischen Betrachtung erfordert einen transparenten Aufbau. Es sollte mit einem vertretbaren Zeitaufwand möglich sein, Grundlagen der Ergebnisse nachzuvollziehen.

Dieser Komponente (Transparenz einer ökologischen Betrachtung) wurde mit dem Feld DATEN Rechnung getragen. Der Bilanzierer hat nicht die Möglichkeit, die Datengrundlage zu verändern und auf diese Weise Einfluss auf die Bewertung zu nehmen.

Abbildung 28 gibt einen kleinen Überblick über den Aufbau des Feldes DATEN.

Baustoffe	Dichte kg/m³	Energie MJ/kg	CO2 kg/kg
Baustoffe			
Bauholz / NH	510	5,56	0,283
KVH	510	5,73	0,283
BSH	480	8,86	0,394
OSB	660	7,23	0,332
Spanplatte V20	690	5,42	0,365
Spanplatte V100	690	5,71	0,411
PE-Folie			
Holzfaserdämmplatte	<200	7,11	0,31
MDF	830	10,52	0,645
Nadelsperrholz		6	0,4
Trägersystem (Gurt: NH, Steg: OSB)		5,97	0,295
Trägersystem (Gurt: NH; Steg: HDF)		6,81	0,374
Gipskarton	900	8,481	0,469
Dämmstoffe			
Zellulose		4,3	0,323
Steinwolle		18,659	3,484
Holzfaserdämmplatte	<200	7,11	0,31
Glaswolle		17,775	5,525
Fassade			
zementgebundene Holzspanplatte	1250	4,599	0,462
Ziegelstein	670	2,22	0,28
Hohllochziegel		1,233	0,151
Gehwegplatten		0,6	0,6
Kalksandstein	1381	1,233	0,083
WDVS-Leichtputz	13,93/m²	5,36	0,467
WDVS-Kratzputz	35,67m²	3,46	0,328
Stein und Beton			
Dachziegel		2,3	0,3
Beton B 25	2365	0,571	0,1022
Beton B 35	2364	0,758	0,1393
Porenbeton	413	2,139	0,3978

Abbildung 28: Ansicht des Feldes „Daten“ in einem kleinen Ausschnitt, die Daten weiterer Baustoffe, der Fenster und der Energiesysteme dieser Beispielberechnung sind nicht dargestellt.

Ein Vorteil dieser Verknüpfung ist darin zu sehen, dass bei einer Verbesserung der Datengrundlage hinsichtlich Qualität eine zügige Aktualisierung der Berechnungsgrundlage durchgeführt werden kann.
Es müssen lediglich die Daten ausgetauscht werden, die Berechnungsgrundlage bedarf keiner Veränderung.

6.4. Feld Berechnung

Das Feld BERECHNUNG liefert eine detaillierte Betrachtung des Einflusses der verbauten Baustoffe des betrachteten Gebäudes auf die Gesamtbilanz. Es werden die umweltrelevanten Faktoren der Herstellung und der Instandhaltung des Gebäudes ausgewiesen. Das Feld BERECHNUNG ist die Grundlage für eine spätere Optimierung des Herstellungsenergiebedarfs des Gebäudes, da die Einflüsse der verwendeten Baustoffe aufgezeigt werden. Dieses Feld kann von dem Betrachter zur Information genutzt werden; eine Abwandlung der Werte kann nur durch eine Veränderung der Eingaben in dem Feld EINGABE erfolgen, das heißt, das Gebäude muss verändert werden.

el- Energie				
Photovoltaikanlage		24775 MJ	1605,5	kg CO2-Emissionen
öffentliches Netz		10200 MJ	1581	kg CO2-Emissionen
		CO2 ohne PV:	40641	
Warmwasser				
Solaranlage		28988 MJ	3385	kg CO2-Emissionen
Erdgas		44430 MJ	2310,36	kg CO2-Emissionen
		CO2 ohne Solar:	33759,96	
Heizenergie				
Holzenergie		0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
Holzpelletofen	Erstellung des Ofens	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
Erdgas		590520 MJ	30707,04	kg CO2-Emissionen
		Nutzung Normal:	30707,04	
	Ökobilanz Versauerung	590520		
	Gesamter Nutzungsenergiebedarf:	**1501950 MJ/60 Jahre**		
Instandhaltung				
	Photovoltaikanlage	74325 MJ	4816,5	kg CO2-Emissionen
	Solaranlage	57976 MJ	6770	kg CO2-Emissionen
	Holzpelletofen	15364 MJ	2988	kg CO2-Emissionen
Herstellungsenergie	**Baustoffe**			
	Bauholz / NH	257984 MJ	13131,2	kg CO2-Emissionen
	KVH	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
	BSH	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
	OSB	74469 MJ	3419,6	kg CO2-Emissionen
	Spanplatte V20	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
	Spanplatte V100	8565 MJ	616,5	kg CO2-Emissionen
	PE-Folie	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
	Holzfaserdämmplatte	14220 MJ	620	kg CO2-Emissionen
	MDF	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
	Nadelsperrholz	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
	Trägersystem (NH/OSB)	7164 MJ	354	kg CO2-Emissionen
	Trägersystem (NH/HDF)	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
	Gipskarton	67848 MJ	3752	kg CO2-Emissionen
	Zellulose	38270 MJ	2874,7	kg CO2-Emissionen
	Steinwolle	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
	Holzfaserdämmplatte	8532 MJ	372	kg CO2-Emissionen
	Glaswolle	0 MJ	0	kg CO2-Emissionen
	zementgebundene Holzspanplatte	44150,4 MJ	4435,2	kg CO2-Emissionen

Abbildung 29: Ansicht des Feldes „Berechnung“ in einem kleinen Ausschnitt, die Werte weiterer Baustoffe und der Fenster dieser Beispielberechnung sind nicht dargestellt.

Der Wert 0 in der Abbildung 29 zeigt an, dass der Baustoff oder das Bauteil (z.B. Fenster) in dem Gebäude nicht verbaut wurde. Es entsteht folglich kein baustoffbedingter Energiebedarf oder CO_2-Emissionen. In dem Beispiel wird deutlich, dass zur Herstellung des eingesetzten

Nadelholzes in dem betrachteten Haus 257.984 MJ Energie benötigt werden, wozu 13,13 t CO_2 emittiert werden.

Der Herstellungsenergiebedarf der verwendeten Energieanlagen kann ebenfalls aus dem Feld BERECHNUNG abgelesen werden. Der gesamte Nutzungsenergiebedarf über 60 Jahre ist in der Abb. 29 dargestellt (1.5 Mio. MJ). Dieser Wert wird in dem Feld ERGEBNISSE bei der nicht optimierten Gebäudevariante des Moduls Nutzung verwendet.

Die Herstellung und die Instandhaltung der Energieanlagen wird ebenfalls in dem Feld BERECHNUNG ausgewiesen. Zudem wird das Feld genutzt, um verschiedene Werte zu ermitteln, die in weitere Berechnungen einfließen, aber nicht mit einem Rechenweg zu kalkulieren sind. Diese Werte werden in dem Feld BERECHNUNG erst umgerechnet (z.B. Ökobilanz Versauerung).

Abbildung 30 verdeutlicht das Feld Berechnung durch Erläuterungen.

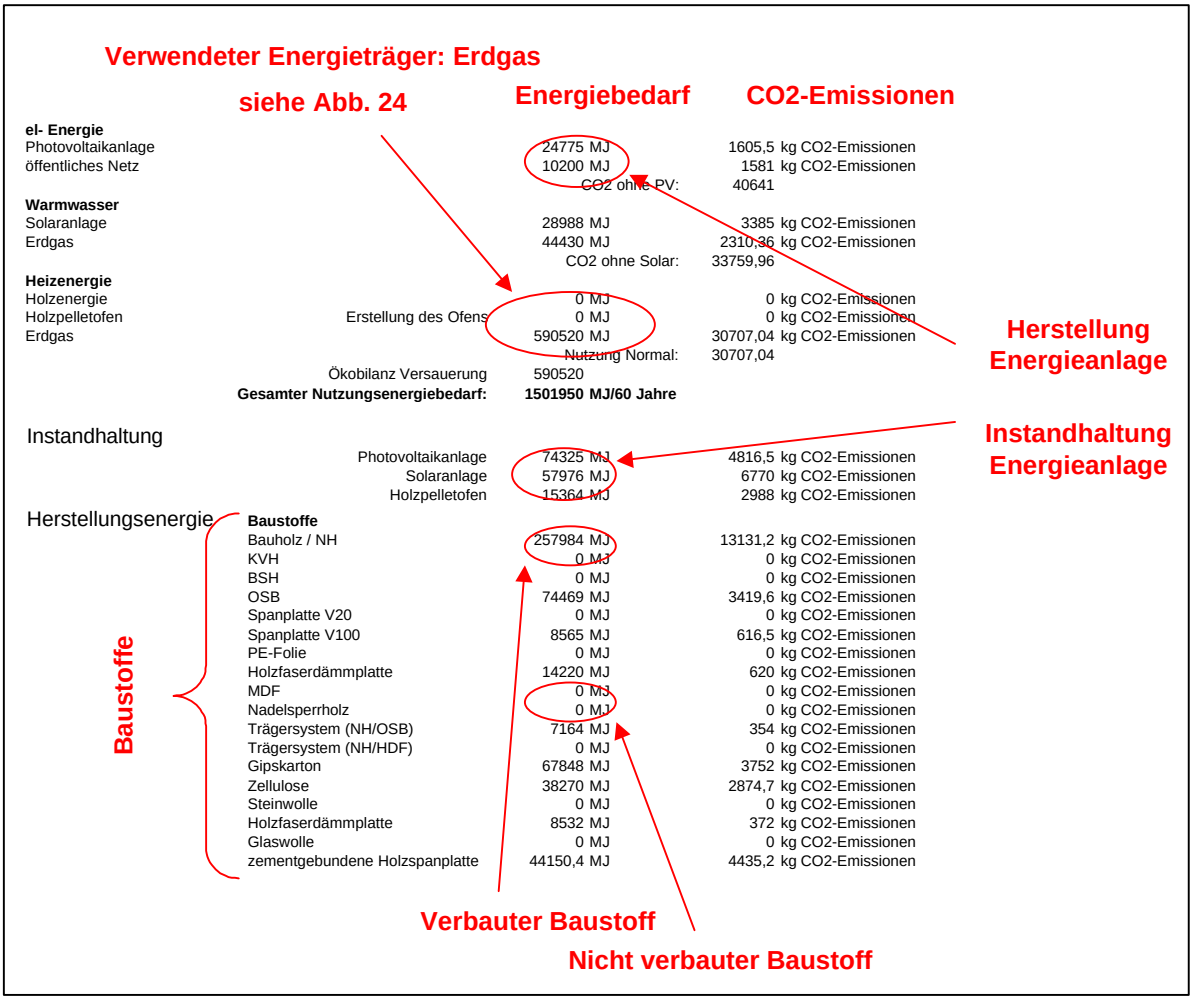


Abbildung 30: Feld „Berechnung“ mit Erläuterungen

6.5. Feld Ergebnisse

Das Feld ERGEBNISSE fasst die Betrachtung über den gesamten Lebensweg des Hauses zusammen (vergl. Kapitel 5.4).

In dem Feld werden die Resultate bezüglich des Gesamtenergiebedarfs und der Kohlendioxidemissionen des bewerteten Gebäudes dargestellt.

Eine Energiebilanz und eine Kohlendioxidbilanz wird aufgestellt. Die verbaute Menge an Holz und Holzprodukten in dem Haus findet in dieser Aufstellung Berücksichtigung, so dass die Senkenfunktion des nachwachsenden Baustoffes und damit des gesamten Gebäudes über den Lebensweg aufgezeigt werden kann.

Die Abbildung 31 stellt die Ansicht des gesamten Feldes dar.

MODULE		Energie		CO2-Emissionen
Herstellung	Normal:	822.581 MJ	Normal:	77.957 kg
	Optimiert:	876.344 MJ	Optimiert:	82.947 kg
Errichtung		12.600 MJ		1.953 kg
Instandhaltung	Normal:	156.129 MJ	Normal:	20.498 kg
	Optimiert:	288.430 MJ	Optimiert:	32.084 kg
Nutzung	Normal:	1.501.950 MJ	Normal:	105.108 kg
	Optimiert:	645.150 MJ	Optimiert:	34.598 kg
Rückbau	Normal:	48.936 MJ	Normal:	4.923 kg
	Optimiert:	58.239 MJ	Optimiert:	5.752 kg
Transport		19.256 MJ		1.362 kg
	Gesamtenergiebedarf:	2.561.452 MJ	CO2-Gesamt:	211.800 kg
	Optimiert:	1.900.019 MJ	Optimiert:	158.696 kg
	Gespeicherte Energie:	1.500.350 MJ	Gespeichertes CO2:	150.116 kg
	Nutzbare Energie:	1.200.280 MJ	Gebundenes C:	41.699 kg

	Energiebilanz	CO2-Bilanz
Normal:	1.361.172 MJ	61.684 kg
Optimiert:	699.739 MJ	8.580 kg

Abbildung 31: Ansicht des gesamten Feldes „Ergebnisse“.

Die Funktionsfähigkeit dieser Berechnungsgrundlage muss für den Architekt/Planer gewährleisten, dass Planungsmethoden und Optimierungen sich nach einer einzigen Eingabe selbständig durchführen.

Der Abbildung 31 ist zu entnehmen, dass die Ergebnisberechnung sich in zwei Kategorien unterteilt:

- NORMAL Erdgas + Strom
- OPTIMIERT Verwendung von Energieanlagen + „normal“

Die Kategorie **NORMAL** bezieht sich auf ein Gebäude, in dem keine Energieanlagen basierend auf erneuerbaren Energieträgern, eingeplant sind. Die Fläche der Solar- und Photovoltaikanlagen ist Null. Es wird kein Holzpelletofen eingesetzt. Der Energiebedarf des Hauses während der Nutzung wird durch Erdgas und elektrischen Strom gedeckt.
Wird von dem Planer in Erwägung gezogen, eine Energieanlage oder einen Holzpelletofen zu installieren, so berechnet das Tool automatisch die damit verbundenen Gesamtaufwendungen in der Kategorie **OPTIMIERT**. Die nicht von den Energieanlagen bereitgestellte Energie wird ebenfalls mit Erdgas und elektrischer Energie gedeckt.

Dem Planer werden auf diese Weise schnellstmöglich und überschaubar die Resultate des Einsatzes regenerativer Energiequellen aufgezeigt. Der Einsatz von erneuerbaren und unendlichen Energieträgern, wie der Verwendung von Wind-, Sonnen- und Holzenergie, ist mit einem positiven Effekt verbunden.
Diese Energieträger liefern „energieoptimierte“ Nutzenergie. Die Herstellung dieser Energieanlagen ist jedoch aufwendig und die Lebensdauer begrenzt. Während der Nutzung entstehen mit Ausnahme der Herstellung der Holzpellets und der nicht durch die regenerativen Energiequellen gedeckten Energiemenge[36] keine weiteren Emissionen durch die Bereitstellung von Energie.
Die Kategorie OPTIMIERT berechnet diesen Herstellungs- und Instandhaltungsbedarf und weist demzufolge einen erhöhten Wert für die Module Herstellung optimiert und Instandhaltung optimiert, aber einen reduzierten Bedarf während der Nutzung auf. Durch den Einsatz von Solar- und Photovoltaikanlagen und eines Holzpelletofens kann die Energiebilanz und Kohlendioxidbilanz des Gebäudes verbessert (optimiert) werden.
In Abbildung 32 sind einige Hinweise zu dem Feld ERGEBNISSE dargestellt.

[36] Restenergiebedarf wird mit Erdgas und Strom als Energieträger gedeckt

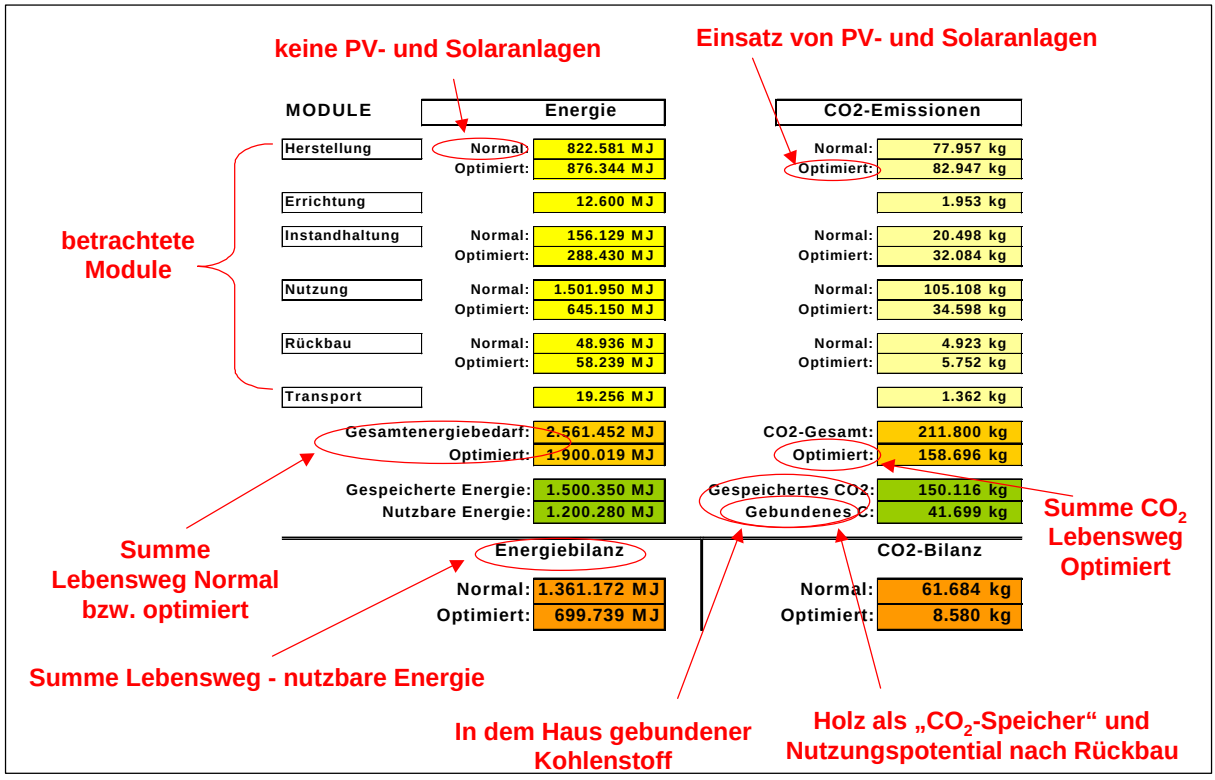


Abbildung 32: Feld ERGEBNISSE mit Erklärungen

Die Darstellung der gespeicherten Energie und Kohlendioxidmengen wird für die Kohlendioxidbilanz und Energiebilanz verwendet. Diese gespeicherte Menge wird aus den in dem Haus verbauten nachwachsenden Baustoffen berechnet. Sie wird den Emissionen[37] gegenüber gestellt, so dass dem Betrachter eine Bilanz über den Zeitraum des gesamten Hauses dargeboten wird.

Die in der Praxis gebräuchlichen Begriffe „Nullemissionshaus“, „Plusenergiehaus“ und „Positivhaus“ sind hier ganzheitlich zu hinterfragen. Diese Begriffe treffen nur dann auf das geplante Haus zu, wenn der berechnete Bilanzwert negativ ist. Hat der Planer ein „Positivhaus“ entworfen, wird die Kohlendioxidbilanz einen negativen CO_2-Wert ausweisen. In der Abbildung 32 weist die optimierte CO_2-Bilanz einen Wert von 8,6 t aus. Diese Emissionen werden, trotz der gebundenen Menge an Kohlenstoff in dem aus dem verwendeten Holz über den gesamten Lebensweg an die Atmosphäre abgegeben und tragen zum Treibhauseffekt bei.

Bei dieser Betrachtung ist es jedoch von entscheidender Bedeutung, dass die Begriffe auf den gesamten Lebensweg bezogen werden.

Das Passivhausinstitut aus Darmstadt [Feist, 2002] beschränkt den Begriff „Nullemissionshaus“ nur auf den Betrieb des Hauses. Demzufolge werden alle Passivhäuser als Nullemis-

[37] Normal und Optimiert

sionshäuser bezeichnet, da während der Nutzung der Heizenergiebedarf durch solare und interne Wärmequellen gedeckt wird und somit Null ist. Es wird davon ausgegangen, dass die benötigte Betriebsenergie[38] mit Solaranlagen, Photovoltaikanlagen bereitgestellt wird. Dieser Idealfall ist in der Baupraxis jedoch nicht allzu häufig anzutreffen.
Der Erstellungsaufwand, die Instandhaltung und der Rückbau dieser aufwendig konstruierten Gebäude fließt in die Betrachtung nach dieser Definition ebenfalls nicht ein.
Es bleibt demzufolge die Forderung, dass diese eingeengte Betrachtungsweise und die daraus dann entsprechende Aussage auch auf die anderen Lebensabschnitte erweitert werden. Ergebnisse der ganzheitlichen Betrachtung zeigen, dass die Module Herstellung, Instandhaltung und Rückbau einen erheblichen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf und die Kohlendioxidemissionen und daraus resultierend auf die Ökobilanz von Gebäuden haben (siehe Kapitel 7).

[38] Lüftungsanlage und eventuell Warmwasser

6.6. Feld Ökobilanz

Die Berechnungsgrundlage wurde erstellt, um fundierte Aussagen über den Gesamtenergiebedarf und die CO_2-Emissionen von Gebäuden zu erhalten. Das Feld ERGEBNISSE verdeutlicht dies.
Die Ökobilanz fordert die Betrachtung von Wirkungskategorien entsprechend oder in Anlehnung an die ISO/EN/DIN 14.040, um vielschichtige Aussagen über das Produkt zu erhalten.
In dem Feld ÖKOBILANZ der Berechnungsgrundlage wird der Versuch unternommen, aus dem Gesamtenergiebedarf des Hauses eine Abschätzung weiterer Wirkungskategorien als GWP abzuleiten. Dieser Versuch muss zukünftig mit fundierteren Daten unterlegt werden, damit das Ziel, eine umfassende Ökobilanz für den Hausbau zu erstellen, erreicht werden kann.
Für den Versuch wird der Gesamtenergiebedarf für die Umrechnung in die Wirkungskategorien verwendet, da die hierfür erhobenen Werte fundiert sind. Diese Vorgehensweise wird gewählt, da bei den in dem Feld ÖKOBILANZ betrachteten Wirkungskategorien durchschnittlich 80% der Umweltwirkungen von der Energie verursacht sind.
Um einen Überblick für eine grobe Berechnung der Wirkungskategorien zu erhalten, werden die Wirkungskategorien mit einem Umrechnungsfaktor (Tabelle 31) belegt. Für folgende Wirkungskategorien werden Angaben mit Hilfe der Berechnungsgrundlage erhoben:

- Treibhauspotential: GWP
- Versauerung: AP
- Überdüngung: EP
- Bildung von bodennahem Ozon: POCP

Für die Berechnung der Wirkungskategorien werden Umrechnungsfaktoren verwendet, die durch den Gesamtenergiebedarf des Feldes ERGEBNISSE geteilt werden.
Es ist unstrittig, dass die Umrechnungsfaktoren keinen Ersatz für eine durchgängig durchgeführte Ökobilanz darstellen können. Der einzige Bezugswert für die Abschätzung der Umweltkategorien ist der Energiebedarf.
Es wurde versucht, aus bestehenden ganzheitliche Betrachtungen [Eyerer, Reinhardt, 2000; Hasch, 2001; Pohlmann, 1999; Speckels, 2001; Quak, 2001] einen Durchschnittswert zu ermitteln.
In der genannten Literatur schwankten einige Werte, so dass es mit einer bestimmten Unsicherheit verbunden ist, einen Umrechnungsfaktor anzugeben.
Unter Sensitivität wird der mögliche Fehler des Umrechnungsfaktors verstanden. Aus diesem Wert resultiert die Berechnung des MINIMUM- und des MAXIMUM-Wertes in der Darstel-

lung. Die Tabelle 31 stellt die Grundlagen für die Berechnung einer Ökobilanz für die betrachteten Gebäude über den gesamten Lebensweg dar.

Tabelle 31: Darstellung der Umrechnungsfaktoren für die Berechnung einer „energiebedingten Ökobilanz“

Wirkungskategorie	Faktor	Sensitivität
Treibhauspotential	12	± 2
Versauerung	4.000	± 500
Überdüngung	54.000	± 2.000
Bildung von bodennahem Ozon	7.500	± 500

Für die betrachteten Wirkungskategorien kann grundsätzlich folgende Aussage getroffen werden:

Eine Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs von Gebäuden hat positive Auswirkungen auf die betrachteten Wirkungskategorien einer Ökobilanz.

Es muss aber mit aller Deutlichkeit darauf hingewiesen werden, dass diese Aussage nur für eine grobe Orientierung der Umweltwirkungen dienen kann, da die Datengrundlage für eine detaillierte Aussage nicht fundiert genug ist. Sollte in Zukunft eine gesicherte Datengrundlage der Wirkungskategorien vorliegen, so ist eine Einbettung in die Berechnungsgrundlage jederzeit möglich.
Momentan gibt es keine durchgängige Datengrundlage für die ökologische Betrachtung von Baustoffen, wie sie in dem Kapitel 5.1 vorgestellt wurde. Es existieren lediglich fundierte Werte für die Berechnung der Kohlendioxidemissionen und den Energieverbrauch.
Zu den Umweltwirkungen

- Bodenbeanspruchung und
- Verringerung der Artenvielfalt

kann keine generelle Aussage getroffen werden. Diese Kategorien müssen zukünftig vertieft werden; eine Integration in die Berechnungsgrundlage scheint aber in näherer Zukunft nicht möglich.
Die Kategorie

- Ressourcenverbrauch

kann durch die dargestellte Menge an Baustoffen in der Berechnungsgrundlage abgeschätzt werden. Die Mengen an mineralischen und erneuerbaren Baustoffen werden in dem Feld EINGABE in Kilogramm angegeben, dies ermöglicht Rückschlüsse auf den Ressourcenverbrauch. Die Wirkungskategorie wird jedoch nicht ausgewiesen.

Die Wirkungskategorien

- aquatische Ökotoxizität AETP
- terrestrische Toxizität TETP
- Humantoxizität HTP

werden nicht berücksichtigt, da keine aussagefähige Korrelation mit dem Gebrauch von Energie [Kreißig, 2001] besteht oder die Wirkungskategorie an sich als nicht aussagefähig bezeichnet wird.

Die Ökobilanz ermittelt die Umweltwirkungen für den NORMAL-Bedarf des Hauses und für den OPTIMIERT-Bedarf des Gebäudes.

Die Abbildung 33 verdeutlicht die Darstellung der Berechnungen der betrachteten Wirkungskategorien:

Wirkungskategorie		Potential	Minimum	Maximum
Treibhauspotential: [kg CO2-äq.]	Normal:	213.454	182.961	256.145
	Optimiert:	158.335	135.716	190.002
Versauerung: [kg SO2-äq.]	Normal:	640	569	732
	Optimiert:	475	422	543
Überdüngung: [kg PO4-äq]	Normal:	47	46	49
	Optimiert:	35	34	37
Sommersmog: [kg Ethylenäq.]	Normal:	342	320	366
	Optimiert:	253	238	271

Abbildung 33: Darstellung des Feldes ÖKOBILANZ

Die Abbildung 33 stellt unter anderem das Treibhauspotential eines Beispielhauses dar. Diese Haus emittiert während des Lebensweges NORMAL 211.800 kg CO_2. Durch den Einsatz regenerativer Energiequellen kann das GWP reduziert werden, der OPTIMIERT Bedarf (Solaranlage: 7 m²; Photovoltaikanlage: 14 m²) weist 158.696 kg Kohlendioxidemissionen aus.

Diese Werte befinden sich in dem Betrachtungsrahmen

NORMAL: 182.961 bis 256.145

OPTIMIERT: 135.716 bis 190.002

der Wirkungskategorie Treibhauseffekt.

Die Schwankungen kommen durch die Verwendung der Maximal- und Minimalwerte zustande (siehe Tab. 31). Die Schwankungen sind nicht unerheblich, im Zuge einer groben Abschätzung und der Bildung von Orientierungswerten aber vertretbar.
Sollten in Zukunft fundiertere Daten für die Umrechnung zu den Wirkungskategorien erhältlich sein, so kann entweder der Sensitivitätsbereich verkleinert oder ein eigenständiges Tool für die Berechnung der relevanten Emissionen der Umweltwirkungskategorien in Anlehnung an die Berechnungsgrundlage erstellt werden.

6.6.1. Anwendung für die Praxis

Der Konsument, die Wirtschaft und die Politik verlangen nach detaillierten Aussagen über die Umweltwirkungen von Produkten. Zertifikate und Umweltlabels sind die Folge dieser Entwicklung. Umweltinstitute legen Grenzwerten für bestimmte Produkte fest, der Verbraucher und die Politik schließen diese Werte in ihr Handeln ein.
Bisher existieren Aussagen über den ökologischen Fußabdruck oder die ökologische Bewertung von Einzelprodukten. Die Ergebnisse dieser Studien werden für Zertifizierungen und Einteilungen in Produktklassen genutzt.
Ganzheitliche Betrachtungen für Häuser mit den entsprechenden Aussagen konnten bisher nur für einzelne Bauprojekte [Eyerer et al. 2000, Quak, 2001] und nicht allgemein erstellt werden.
Mit Hilfe der Berechnungsgrundlage ist das überschlägig möglich. Die Ergebnisse der ökologischen Bilanzierung auf der Grundlage der Gesamtenergie (Feld Ökobilanz) können dazu verwendet werden, dass z.B. für Gebäude Orientierungswerte in den betrachteten Umweltwirkungen über den gesamten Lebensweg festgelegt werden. Werden die Orientierungswerte erst einmal von der Wirtschaft und der Praxis akzeptiert, so kann eine zukunftsweisende, da ganzheitlich energiesparende, Bauweise entwickelt und praktiziert werden. Eine Überschreitung der Orientierungswerte würde dazu führen, dass zum Einen der Kunde das Gebäude nicht erwerben möchte, zum Anderen die Politik den Bau des Hauses mit Auflagen verbinden könnte. Der Haushersteller, unabhängig ob Holz- oder Massivhaus, wäre gezwungen, sein Hauskonzept zu optimieren. Eine Anhebung des Energiestandards für alle Gebäude wäre die Folge.

Die Umsetzung der Orientierungswertbildung in die Praxis bedarf jedoch eines gewissen Zeitraumes. Zum jetzigen Zeitpunkt beschäftigt sich die Bauwirtschaft noch nicht ausreichend mit den Wirkungskategorien einer Ökobilanz. Die erhältlichen Werte der Umweltwirkungen werden als nicht nachvollziehbares Zahlenwerk verstanden. Die Berechnungsgrundlage liefert mit dem Feld ÖKOBILANZ eine nachvollziehbare Darlegung von Werten der

verwendeten Wirkungskategorien. Dies gibt dem Verbraucher die Möglichkeit, Tendenzen abzuschätzen und sich mit den zum Teil theoretischen Werten einer Ökobilanz vertraut zu machen.

6.6.1.1. Orientierungswerte

Ein Vorschlag für eine Festlegung von Orientierungswerten kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht schlüssig vorgelegt werden, da die Anzahl der betrachteten Gebäude für eine Verallgemeinerung nicht ausreicht.
Aus der momentanen Sicht könnten folgende Werte für eine Orientierungswertbildung im Hausbau, betrachtet über 60 Jahre, jedoch realistisch sein:

- Treibhauspotential: 500.000 kg CO_2-Äquivalente
- Versauerung: 3.000 kg SO_2-Äquivalente
- Überdüngung: 100 kg Phosphatäquivalente
- Bildung von bodennahem Ozon: 2.500 kg Ethylenäquivalente

Die für Gebäude resultierenden Orientierungswerte müssen dem Haushersteller einen genügend großen Spielraum geben. Sie dürfen die Kreativität des Bauherren und Architekten nicht zu sehr einschränken und können nicht unmittelbar an den Passivhausstandard oder den Niedrigenergiestandard gebunden werden.
Verschiedene Einflüsse müssen für eine fundierte Orientierungswertbildung jedoch noch erhoben werden. Hierfür bedarf es der ganzheitlichen energetischen Berechnung von verschiedenen Gebäuden unterschiedlichen Standards.
Für eine Orientierungswertbildung bedarf es weiterer energetischer Berechnungen von unterschiedlichen Gebäuden und Haustypen.
Einfluss auf die Orientierungswerte haben:

- Größe des Hauses
- Energiestandard des Hauses
- Eingesetzte Baustoffe
- Größe der verwendeten Energieanlagen

Bei einer Verwirklichung von Orientierungswerten für den Hausbau müssen diese Fragestellungen beantwortet werden.

6.7. Schnittstellenproblematik

Der automatisierte Prozessablauf hat auch in der Bauindustrie die Planungsabläufe erheblich erleichtert. In den letzten Jahren wurden unterschiedliche Programme für die Planung und Konstruktion, technische Analysen, Kalkulation, Zeitplanung und auch Kostenverwaltung entwickelt. Diese Entwicklung hat jedoch größtenteils unabhängig voneinander stattgefunden. Die Programme sind deshalb nur auf die jeweiligen Bedürfnisse der Benutzergruppe zugeschnitten. Die Folge dieser Entwicklung ist eine Inkompatibilität der Software-Programme für den Baubereich untereinander.
Für die konstruktive Planung von Gebäuden stehen dem Architekten/Planer eine Vielzahl unterschiedlicher Softwareprogramme zur Verfügung. In der Praxis werden folgende Programme am häufigsten angewendet:

- Architektural Desktop™ (Marktführer)
- Allplan FT 16 (von Nemetschek)
- ArchiCAD ®
- ARCHLINE
- AutoCAD RELEASE 2
- 3D CAD/CAM Software im Holzbau
- Cadwork ®Infomatik (Programm aus der Fertigung)

Für die energetische Planung von Gebäuden werden unter anderem die Programme

- EUROWSV 3 (Berechnung für den Energiesparnachweis) und
- Enerbis (Energiebilanzierung von Gebäuden)

verwendet.
Diese Vielzahl an verwendeten Programmen erschwert eine ganzheitliche Betrachtung erheblich.
Im Zuge der Vereinfachung von Arbeitsschritten wäre eine Verknüpfung der hier entwickelten Berechnungsgrundlage mit der bestehenden Planungssoftware sinnvoll, so dass die Berechnungsgrundlage so früh wie möglich in die Planung eingreift und ganzheitliche Daten liefern kann. Diese Verknüpfung ist jedoch mit verschiedenen Problemen verbunden:

- Die Daten für die ökologische Betrachtung sind zu Beginn der Planung nicht erhältlich, da der Planer mit einer Grobplanung beginnt, die erst nach verschiedenen Absprachen mit dem Bauherrn zu einer detaillierteren Gestaltung wird.

- Nicht alle für die Berechnungsgrundlage erforderlichen Grunddaten werden in der Bauplanung erfasst.
- Der Planer arbeitet mit einer Fülle von Programmen, die untereinander nicht kompatibel sind. Bei einer Verknüpfung der Berechnungsgrundlage mit einer einzigen Planungssoftware kommt es folglich nicht zu der Erfassung aller für den Hausbau relevanten Daten.

Eine weitere Schwierigkeit besteht in den unterschiedlichen Planungsmethoden der Architekten [Zarstek, 2002]. In der Regel wird mit der Planung des Volumens/Wandkörpers, also der Ansicht des Hauses begonnen. Diese wird dem Bauherren vorgestellt, der seine Zustimmung geben soll. Die Einpassung des Hauses in das Gelände, die Planung eines Kellers, die Berechnung bestimmter Fenster oder eine energetische Berechnung wird im zweiten Schritt oder oft auch nur unzureichend durchgeführt.
Eine zu dem Planungsvorgang parallel durchgeführte und Optimierungsmöglichkeiten aufzeigende ganzheitliche Bilanzierung kann jedoch nur aussagekräftig sein, wenn möglichst früh in die Planung eingegriffen wird.
Die existierenden Softwareprogramme für die Berechnung von ökologischen Kennzahlen und ähnlichem haben die Problematik der Schnittstellen insofern gelöst, als dass die Programme als eigenständiges Wärmebedarfsberechnungsprogramm inklusive einer CAD-Konstruktionsberechnung gedacht sind. Diese Programme sind in ihrem Aufbau jedoch sehr komplex und werden aus diesem Grund nicht von der Mehrheit der Planer angenommen.
Eine weitere Möglichkeit ist die manuelle Eingabe von berechneten Werten in das Programm.

6.7.1. Problemlösung

Damit eine frühzeitige Abschätzung der Energie-, CO_2-Problematik in der Gebäudeplanung geschehen kann, muss eine standardisierte EDV-Schnittstelle geschaffen werden.
Das AIF-Forschungsvorhaben 12482 N/1 untersucht derzeit die Schaffung einer Schnittstelle zur Rationalisierung der Wärmebedarfsermittlung von Gebäuden. Diese Vorgehensweise kann auch für die Berechnungsgrundlage angewendet werden [Egle, 2002].
Die Schwierigkeit besteht in der Zuordnung der einzelnen Baustoffe aus der Planungssoftware in die entsprechenden Felder der Berechnungsgrundlage. Die heutigen Planungsprogramme im Hausbau können auch für komplexe Wandaufbauten oder sonstige Bauteile den Materialeinsatz berechnen. Diese Baustoffmengen müssen jedoch gruppiert und in das entsprechende Feld der Berechnungsgrundlage überführt werden.

Die Berechnungsgrundlage ist in ihrem Aufbau dahin optimiert, dass die einzugebende Datenmenge sehr gering ist. Hierdurch wird der Aufwand reduziert.

Ziel einer Schnittstelle ist es, dass die Planungssoftware selbständig die Baustoffmengen zusammenfasst und über eine standardisierte Schnittstelle weitergibt.

Aus der Stückliste der Gebäude sind die Mengen problemlos erhältlich. Eine Addition aller Einzelmengen eines Baustoffes führt zu der Gesamtmenge des verbauten Werkstoffes in dem Haus. Tabelle 32 zeigt eine nach Verwendung sortierte Materialangabe für Nadelholzbalken. Diese Mengen werden addiert und die Gesamtmenge in die Berechnungsgrundlage übergeben. In diesem Bespiel sind in dem Haus 21,38 m³ Holz verbaut. Die Planungssoftware müsste diese Menge an die Berechnungsgrundlage weiterleiten.

Die Abmessungen für das verwendete Bauholz sind in cm angegeben.

Tabelle 32: Verwendete Nadelholzsortimente in einem Haus

Posten	Abmessungen x)	Volumen xx)	Gewicht xxx)	Gewicht atro xxx)	Stückzahl
Auflager Balkon	24*6	0,016	8,1696	7,104	2
Balken	34*6	2,431	1241,2686	1079,364	63
Balken Balkon	24*6	0,475	242,535	210,9	13
Balken Innenwand	6*6	0,387	197,6022	171,828	56
Beplankung Dach	9*2	0,008	4,0848	3,552	1
Deckenbalken	24*6	3,484	1778,9304	1546,896	55
Fussbalken	16*6	0,076	38,8056	33,744	11
Fusspfette	16*6	0,306	156,2436	135,864	6
Gratsparren	16*6 u.17,5*6	0,082	41,8692	36,408	2
Latte Boden	6*4	0,402	205,2612	178,488	61
Latte Wand	6*4	0,7861	401,38266	349,0284	140
Pfette	16*6	0,407	207,8142	180,708	10
Pfette Abschluss	16*6 - 11,5*6	0,064	32,6784	28,416	13
Randbalken	16*6/10/16	0,923	471,2838	409,812	10
Riegel Fenster	16*6	0,401	204,7506	178,044	36
Riegel Wand	16*6	1,368	698,5008	607,392	30
Schifter	17,6/16*6	0,04	20,424	17,76	1
Schwelle	16*8,5	0,044	22,4664	19,536	1
Sparren	16/8*6	1,9171	978,87126	851,1924	46
Sparren quer	16*6	0,447	228,2382	198,468	10
Stiel	6/12*6	4,225	2157,285	1875,9	175
Stiel Innenwand	12*12	0,895	456,987	397,38	97
Stütze Balkon		0,039	19,9134	17,316	1
Stütze Decke		1,918	979,3308	851,592	134
Zange	16*3	0,246	125,6076	109,224	13
		21,3872 in m³	**10920,30432 in kg**	**9495,9168**	**987**

x) [cm] xx) [m³] xxx) [kg]

Die Materiallisten können beliebig gruppiert werden; sei es nach Baustoff, Lage im Haus, Menge oder ähnlichem. Auf diese Weise kann die Datenausgabe der Planungssoftware an das Architektentool angepasst werden.

Die Tabelle 33 verdeutlicht dies anhand einer Materialliste, wie sie zur Berechnung der Energie- und Kohlendioxidbilanzen benötigt wird. In diesem Fall wird der Dämmstoff Zellulose in einem kleinen Ausschnitt[39] aus der gesamten Materialliste dargestellt. Dies dient der Information, wie aus den Materiallisten eines Hauses die für die Berechnungsgrundlage benötigten Sachbilanzdaten erhalten werden können. Der zu dämmende Raum der Wand wird detailliert erfasst und in der Materialliste angegeben.

Tabelle 33: Auszug aus den Materiallisten für den Dämmstoff [Bartolles et al, 2001]

Bauelement	Material	Gewicht [kg]	Volumen [m³]
AW Nord	Zellulose	3,09	0,05512
AW Nord	Zellulose	7,771	0,13861
AW Nord	Zellulose	11,921	0,21262
AW Nord	Zellulose	11,789	0,21027
AW Nord	Zellulose	31,243	0,55726
		usw.	usw.
	Gesamt Außenwand Nord:	**639,405 kg**	**11,40457 m³**

Die gesamte Menge an Zellulosedämmstoff in dem betrachteten Haus beträgt 8.381 kg bei einer eingebrachten Menge von 149 m³. Die Schüttdichte beträgt folglich ~56 kg Zellulose/m³ zu dämmendem Raum.

Ziel der Arbeit ist es, ganzheitliche Aussagen über Gebäude treffen zu können.

Zusätzlich können mit Hilfe dieser Berechnungsgrundlage aber auch detaillierte Berechnungen bestimmter Wandelemente und Bauteile getroffen werden, z.B. kann der Dämmstoffbedarf der nördlichen Außenwand (AW NORD) oder die Wand als Einzelbauteil mit dieser Betrachtung problemlos ermittelt werden.

Eine Unterscheidung kann bis auf die Ebene der einzelnen Baustoffe heruntergerechnet werden. Die Mengenangaben in kg, t oder m³ sind detailliert möglich.

Diese Unterteilung ist im Hausbau zwar nicht vorteilhaft, da so das Haus in “gute Bauelemente” und “umweltschädliche Bauelemente” unterteilt werden könnte. Durch die Betrachtung von Einzelelementen eines Hauses können jedoch Gebäudeteile miteinander verglichen werden.

Ein Gebäude ist jedoch als Ganzes zu betrachten, ohne Fenster oder die Dacheindeckung usw. ist es nicht bewohnbar und erfüllt seinen Zweck nicht. Ökologische Bewertungen von Gebäuden müssen zwar die Komponenten betrachten, aber den Gesamtnutzen des Hauses, also die Bewohnung, einbeziehen.

[39] Es wird die nach Westen ausgerichtete Außenwand dargestellt.

Zusätzlich zu den mit Hilfe einer CAD-Software erhaltenen Daten über die Gebäudekonstruktion und die verwendeten Materialmengen müssen folgende Werte berechnet und in die Berechnungsgrundlage eingefügt werden:

- Betriebsenergiebedarf, ermittelt aus einer Wärmebedarfsermittlung
- Verwendete Fenstersysteme
- Dachfläche und Dachdeckung
- Betonstahlmatten als Bewehrung
- Betonstabstahl in den Wänden
- Befestigungsmittel aus Metall
- Transportentfernungen

Diese Werte sind momentan durch eine Einzelberechnung des Planers zu erhalten. Die Wärmebedarfsermittlung ist nach der EnEV gefordert und deshalb für die Berechnungsgrundlage erhältlich.
Die berechneten Werte müssen mit den Materialmengen, ermittelt in der CAD Planung, in das Architektentool eingefügt werden und eine Gesamtenergiebilanz und die CO_2-Emissionen über den Lebensweg wird erstellt.

Fazit

Eine standardisierte EDV-Schnittstelle kann den Aufwand der Dateneingabe minimieren. Diese Schnittstelle darf nicht auf eine Planungssoftware fixiert sein, da in der Praxis verschiedene Softwareprogrammen verwendet werden. Durch parallele Berechnung der Gebäudekonstruktion und der ökologischen Wirkungen des geplanten Hauses können frühzeitig getroffene Aussagen die Gebäudeplanung positiv beeinflussen. Die Schnittstellenschaffung für die Berechnungsgrundlage muss jedoch noch in einer Forschungskooperation in einem weiterführenden Projekt realisiert werden.

Berechnungsbeispiele

7

7. BERECHNUNGSBEISPIELE

Die Funktionsfähigkeit und Aussagekraft der Berechnungsgrundlage sowie die Datensammlung und Aufarbeitung wird anhand von zwei zu betrachtenden Gebäuden dargestellt. Die Hochschule Bremen – Fachbereich Architektur - hat mittels CAD Software zwei unterschiedlicher Häuser geplant, an denen eine energetische Bewertung und eine Erfassung der Kohlendioxidbilanz durchgeführt wird. Die Berechnung des Energiebedarfs während der Nutzung wurde ebenfalls von der Hochschule Bremen [Bartolles et al., 2000 und 2001] ermittelt.
Im ersten Beispiel handelt es sich um ein Niedrigenergiehaus mit einem Betriebsenergiebedarf von 48 kWh/m² beheizter Wohnfläche und Jahr. Dieses Haus sollte in Würzburg gebaut werden. Es trägt in der folgenden Berechnung den Namen **Würzburg**. Es zeichnet sich durch eine moderne Architektur, große Glasflächen und einen im Holzhausbau gängigen Wandaufbau aus (siehe Kap. 7.1).
Das zweite Haus soll in **Bremen** (siehe Kap. 7.2) gebaut werden und ist ebenfalls ein Niedrigenergiehaus mit einem Betriebsenergiebedarf von 36 kWh/m² beheizter Wohnfläche und Jahr. Bei diesem Haus wurde auf ein günstiges Außenwand-Volumen-Verhältnis geachtet, die Fensterflächen sind verringert und die Wandaufbauten an einen geforderten Passivhausstandard angepasst. Für diese Variante wird eine Optimierung durchgeführt (Kap. 8.4), so dass ein Passivhausstandard erzielt wurde.
Der Einfluss der Architektur und der sonstigen Kennwerte der Gebäude auf den Gesamtenergiebedarf und die Kohlendioxidemissionen über den gesamten Lebensweg wird hier ermittelt.

7.1. Haus Würzburg

Die Berechnungen beziehen sich auf ein „Architektenhaus“, welches in Würzburg erstellt werden sollte.
Das Haus wurde mittels CAD geplant und durch das Berechnungsprogramm energetisch berechnet. Die CAD-Software ermöglicht eine detailgetreue Darstellung des Hauses, die verbauten Materialien können bestimmten Bauelementen zugeordnet werden.
Die Planungssoftware gibt einen Überblick über den Holzrahmenaufbau dieser Variante.

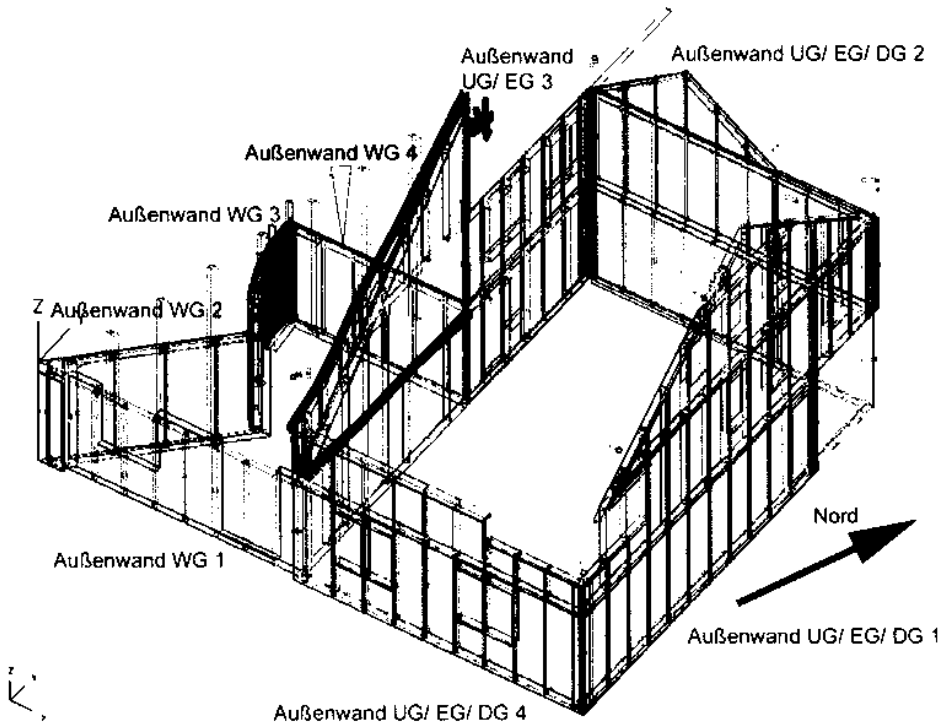


Abbildung 34: Holzrahmenkonstruktion des Würzburger Hauses [Zarsteck, 2000]

Eine Ansicht des Gebäudes im Endzustand zeigt die Abbildung 35.

Abbildung 35: Hausansicht Würzburg [Zarsteck, 2000]

7.1.1. Wandaufbau

Das Grundgerüst wurde in einem Rastermaß von 81,5 cm geplant. Bei dem Aufbau handelt es sich um einen herkömmlichen Wandaufbau mit einer Installationsschicht, einer tragenden Schicht, der Wärmedämmebene und der Wetterschutzschicht. Der Aufbau der Wand von außen nach innen stellt sich wie folgt dar:

- Zementgebundene Holzspanplatte
- Luftschicht/Lattung
- Holzfaserdämmplatte (DIN 68755-1)
- Nadelholzständer bzw. Zellulosedämmung
- Nadelsperrholz (DIN EN 315 + DIN EN 314 Teil 2 + 3)
- Installationsschicht mit Zellulosedämmung und Lattung
- Oriented Structural Board
- Gipsfaserplatte

Die Abbildung 36 stellt die einzelnen Baustoffe in dem Wandverbund dar. Die Detaillösung für die Eckverbindung wird aufgezeigt.

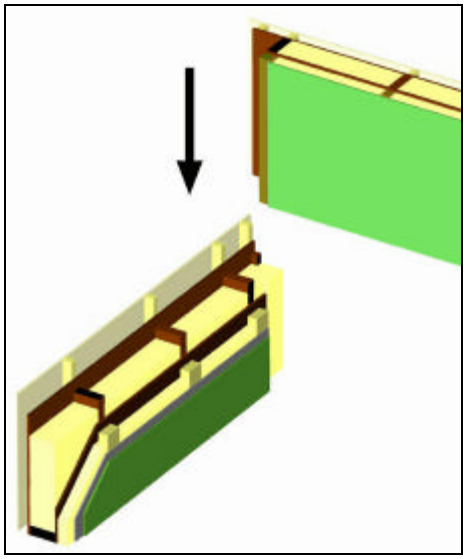


Abbildung 36: Wandaufbau Würzburg mit Eckverbindung [Zarsteck , 2000].

Die Wanddicke beträgt 35 cm bei einem Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,15 W/m²K. Ein Quadratmeter Wand hat ein Gewicht von 81 kg.

7.2. Haus in Bremen

Mit dem Haus Bremen wird ein typisches Niedrigstenergiehaus mit einem günstigen A/V Verhältnis, das bedeutet, das bewohnbare Gebäudevolumen (V) ist im Verhältnis zu der umhüllenden Umfassungsfläche (A) groß, errichtet. Betrachtet wird nur der beheizte Gebäudeteil. Hierdurch lassen sich nach Aussagen von verschiedenen Bauexperten Energieeinsparungen erreichen.

Ein Ziel dieses Baukonzeptes war es, zu prüfen, ob Positivhäuser[40] theoretisch realisiert werden können. Aus diesem Grund wurde in dem Bremer Haus ein erhöhter Anteil an Holz in Form von Brettstapelelementen verbaut. Hierdurch kommt es zu einer vermehrten Speicherung von Kohlenstoff.

Es wurden zwei Varianten des Gebäudes berechnet:

Der Unterschied zwischen **„Bremen“** und der optimierten Variante **„Bremen II“** (siehe Kapitel 8.4) besteht in der Verbesserung hinsichtlich der Gesamteigenschaften. Die Grundvariante „Bremen“ ist als Niedrigenergiehaus geplant, es kann jedoch nicht auf eine Heizanlage verzichtet werden. Bremen II kann auf eine Heizanlage verzichten, der Heizenergiebedarf wird durch solare und interne Wärmegewinne gedeckt.

Die Abbildung 37 verdeutlicht die Architektur dieses Hauses in der Ansicht.

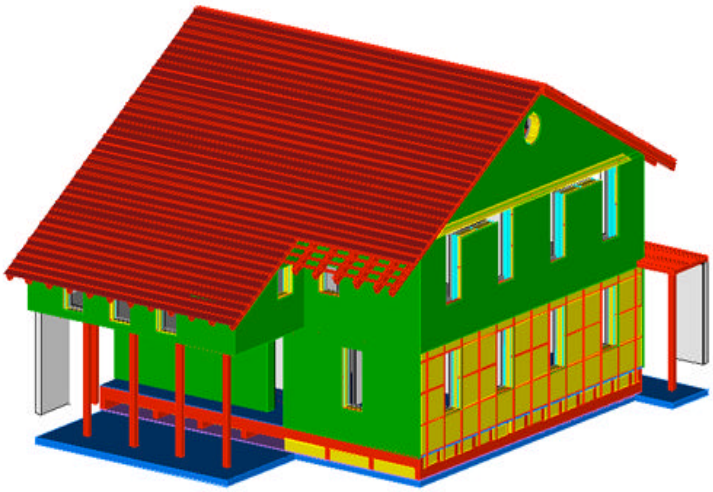


Abbildung 37: Hausansicht Bremen [Zarsteck, 2000]

[40] Definition Positivhaus: Gebäude, in dem durch die Verwendung von nachwachsenden Baustoffen mehr Kohlenstoff (der Atmosphäre entzogenes CO_2) gespeichert ist, als während des gesamten Lebensweges, begonnen bei der Herstellung der Baustoffe bis zur Entsorgung/Rückbau des Hauses, an Kohlendioxid emittiert wird. Die in der Berechnungsgrundlage erstellte Kohlendioxidbilanz muss folglich negativ sein.

7.2.1. Wandaufbau

Ein Ziel des modernen Hausbaus ist es, Nullemissions- oder Positivhäuser zu planen und zu realisieren. Für den Holzhausbau eignet sich der Begriff Positivhaus am besten.
Um dies zu erreichen, muss eine größere Menge an Holz in dem Haus verbaut werden. Im Bremer Haus wurde die Menge Holz durch den Einsatz von Brettstapelelementen in der Wand erhöht.
Dies hat zudem den Vorteil, dass die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes erhöht wird. Holz als Baustoff besitzt sehr gute Wärmespeicherfähigkeit. Hauser (2000) hat den Jahres-Heizwärmebedarf in Abhängigkeit von der Wärmespeicherfähigkeit der Baukonstruktion, dem Wärmeschutzniveau und der Nutzung betrachtet. Es ergibt sich, dass Holz als Baustoff mit den Baustoffen Porenbeton, Kalksandstein und Ziegel in der Wärmespeicherfähigkeit vergleichbar ist.
Der Wandaufbau des Bremer Hauses setzt sich aus folgenden Baustoffen zusammen. Die Darstellung geschieht von außen nach innen:

- Zementgebundene Holzspanplatte
- Luftschicht/Lattung
- Holzfaserdämmplatte (DIN 68755-1)
- Äußere Dämmschicht/Lattung
- Stegträger (TGI Träger mit einer Zellulosedämmung)
- Oriented Strand Board (Winddichtheit)
- Brettstapelwand
- Oriented Strand Board
- Gipskartonplatte

Abbildung 38 zeigt den Wandaufbau des Bremer Hauses.
Die Wand ist mit 45 cm um 10 cm dicker als die Wand des Würzburger Hauses. Der sehr niedrige Wärmedurchgangskoeffizient von 0,12 W/m²K entspricht dem Passivhausstandard. Das Gewicht der verwendeten Baumaterialien beträgt 116 kg/m² Wand.

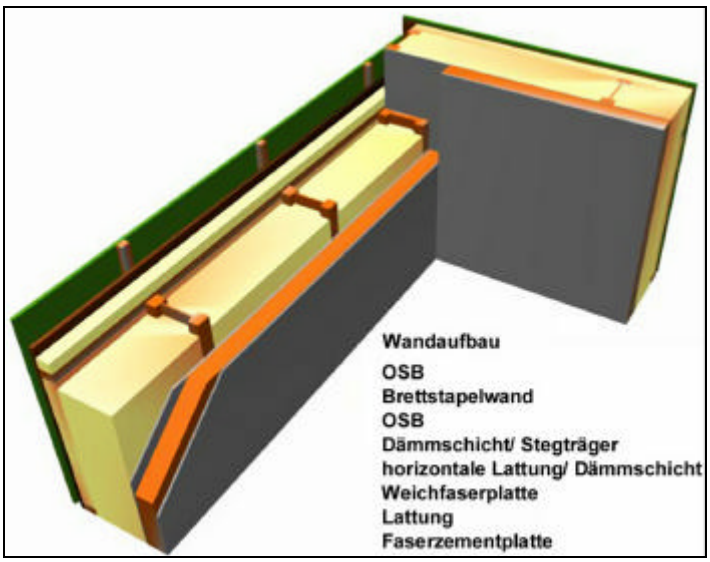


Abbildung 38: Wandaufbau Bremen mit Eckverbindung [Zarsteck, 2000]

7.3. Vergleich Würzburg und Bremen

Die Erstellung einer ökologischen Bewertung ist im Hausbau mit einer Fülle von Daten verbunden. Findet jedoch, in der Grundlage zu dieser Studie, eine CAD-Planung der Gebäude statt, so können die verbauten Baustoffmengen relativ einfach erhoben werden. Eine Sachbilanz (im Sinnen von ISO/EN/DIN 14.041) kann daraus abgeleitet werden. Die Daten der Sachbilanz werden mit Hilfe der Berechnungsgrundlage in eine Energie- und eine Kohlendioxidbilanz überführt. Die Grunddaten der betrachteten Gebäude werden in der Tabelle 34 zusammengefasst.

Tabelle 34: Vergleich der betrachteten Gebäude hinsichtlich ihrer Grundwerte

	Würzburg	**Bremen**
Wanddicke	35 cm	45 cm
Gewicht der Wand/m²	81 kg	116 kg
u-Wert	0,15 W/m²K	0,12 W/m²K
gesamte Wohnfläche	250 m²	210 m²
beheizte Wohnfläche	240 m²	190 m²
Nutzungsdauer	60 Jahre	60 Jahre
Betriebsenergiebedarf$_{(Primärenergie)}$	174 MJ/m² a	131 MJ/m² a
Gewicht der Baustoffe gesamt	**311 t**	**243 t**
Gewicht Holz und Holzwerkstoffe	**44 t**	**75 t**

Für die Berechnung des Moduls Nutzung wird in die Berechnungsgrundlage die beheizte Wohnfläche eingegeben, da nur für diese Fläche Energie benötigt wird.
Die Differenz zwischen den beiden Flächenangaben sind die unbeheizten Dachböden und Abstellräume. Obwohl der Wandaufbau des Würzburger Hauses „leichter“ ist, wird mit 1,24 t Baustoff je m² Wohnfläche mehr Baumaterial verwendet als in dem Bremer Haus mit 1,15 t/m² Wohnfläche.
Das Bremer Haus besteht zu 30% aus nachwachsenden Baustoffen, während im Würzburger Haus nur 14% regenerative Materialien verwendet wurden.

7.3.1. Betriebsenergiebedarf

Der Betriebsenergiebedarf setzt sich aus verschiedenen Faktoren zusammen. Das Gebäude muss während bestimmter Perioden beheizt **(Heizenergie)** werden.
Während der Nutzung eines Gebäudes wird Wasser verwendet, dieses muss **(Warmwasserenergie)** erwärmt werden.
Der energieoptimierte Hausbau reduziert den Transmissionsverlust durch die Wand. Damit ein Austausch der verbrauchten Luft durch Frischluft stattfinden kann, müssen bei hochgedämmten und luftdichten Häusern kontrollierte Be- und Entlüftungsanlagen eingebaut werden. Für den Betrieb dieser Anlagen wird elektrische Energie **(Lüftungsenergie)** benötigt. Die Bereitstellungsform der Energie kann unterschiedlich sein. Es können sowohl herkömmliche Heizmedien (Erdgas für den Heizenergiebedarf sowie für die Erwärmung des Warmwasserenergiebedarfs) als auch neue Energieträger (Solaranlagen zur Deckung des Warmwasserbedarfs, Photovoltaikanlage für die Deckung der elektrischen Energie und Holzpelletofen für die Deckung des Heizenergiebedarfs) zum Einsatz kommen.

Die Tabelle 35 gibt einen Überblick der für den Betrieb der Gebäude erforderlichen Energiemengen. Die Berechnung des Betriebsenergiebedarfs [Bartolles et al; 2001] bezieht sich auf den Primärenergiebedarf, die Wirkungsgrade der Energieträger wurden folglich in die Ermittlung einbezogen.

Tabelle 35: Vergleich der Betriebsenergie der Gebäude [Bartolles et al.; 2001]

Energiebedarf	Würzburg	Bremen
	$[kWh/m^2a]_{Primärenergie}$	$[kWh/m^2a]_{Primärenergie}$
Heizenergiebedarf [x]	27,47	14,39
Warmwasserenergiebedarf [xx]	15,82	15,82
Lüftungsenergiebedarf [xxx]	5,06	6,3
Gesamt:	**48,35 kWh/m² a**	**36,6 kWh/m² a**
Angabe in MJ:	**174,1 MJ/m²a**	**131,7 MJ/m²a**

[x] Thermische Energie, gedeckt mit Erdgas oder mit einer Holzheizung

[xx] Thermische Energie, gedeckt mit Solarkollektoren oder Erdgas

[xxx] Elektrische Energie, gedeckt mit Photovoltaikstrom oder aus dem öffentlichen Stromnetz

Das Bremer Haus mit einem Heizenergiebedarf von 14,39 kWh/m² entspricht den Anforderungen an den Passivenergiehausstandard. Rechnerisch kann folglich von einem Passivhaus gesprochen werden. Die benötigte Energie für den Luftaustausch mit der Umgebung darf im Passivenergiebau nicht vernachlässigt werden. Der Lüftungsenergiebedarf muss aus diesem Grund in eine ganzheitliche Betrachtung integriert werden um nicht den Anschein zu erwecken, dass Passivhäuser keine elektrische Lüftungsenergie benötigen.
Will der Bauherr oder Planer aus subjektiver Sicht auf den Einsatz einer kontrollierten Lüftungsanlage verzichten, da er die klassische Belüftung durch ein Öffnen der Fenster bevorzugt, so benötigt das Gebäude keine elektrische Lüftungsenergie. Allerdings hat dies starke Auswirkungen auf den Heizenergiebedarf.

7.4. Sachbilanz

Die Massenbilanzen der Gebäude bilden den Grundstein für weiterführende Erhebungen. Sie können somit als **Sachbilanz** im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung der DIN ISO EN 14.041 bezeichnet werden. Die aus der Berechnungsgrundlage resultierende Energiebilanz für die Herstellung der Materialien basiert auf den in der Massenbilanz erhaltenen Stoffmengen. Diese Daten können im Rahmen der Gebäudeplanung ermittelt werden und in die Berechnungsgrundlage eingegeben werden. Aus diesen Materiallisten wurden die Berechnungen der Energiebilanz (siehe Kap. 6.7) erstellt.
Im Folgenden werden die Gebäude mit ihren Baustoffmengen dargestellt, so dass auf übersichtliche Weise die verbauten Materialien zugeordnet werden können. Die Verwendung und der Einsatz der Baustoffe kann im Kapitel 7.1.1 und 7.2.1 nachgelesen werden.

7.4.1. Darstellung der einzelnen Massen in den Gebäuden

Die Tabelle 36 fasst den Baustoffeinsatz der betrachteten Häuser zusammen. Bei der Darstellung sind keine Optimierungen durch den Einsatz von Energieanlagen berücksichtigt, es handelt sich folglich um den NORMAL Zustand der Gebäude.

Tabelle 36: Darstellung der in den Häusern NORMAL verbauten Materialien

	Würzburg		**Bremen**	
	[t]	[m³]	[t]	[m³]
Wandaufbau:				
Zementgebundene Holzspanplatte	8,8	7,0	9,6	7,7
Holzfaserdämmplatte	1,1	5,5	2,0	10
Nadelsperrholz	13,1	21,4	/	/
Nadelholz	10,9	21,3	46,4	90,9
Zellulosedämmung	7,9	131,6	8,9	148,0
TGI Träger	/	/	1,2	2,4
Trittschalldämmung	/	/	1,2	6
Spanplatte	/	/	1,5	2,1
OSB	7,8	11,8	10,3	15,6
Gipskartonplatte	8,2	9,1	8,0	8,8
Betonteile				
Fundament	205,0	86,7	133,1	56,3
Gehwegplatten [1)]	18,9	7,9	/	/
Hochlochziegel	1,4	2,08	/	/
Stahl	11,5	4,6	6,8	2,7
Metall	0,8	0,3	0,6	0,2
Dacheindeckung	11,7	6,5	9,0	5
Fenster	4,1		4,3	

[1)] Zur Schalldämmung eingesetzt

Auffallend bei dem Bremer Haus sind die eingesetzten Mengen im Fensterbau. In dem Bremer Haus werden 3 Fenster weniger eingebaut als in dem Würzburger Haus.
Die eingebauten Fenster sind sogenannte Kastenfenster, bestehend aus Zweischeibenisolierglas und einem erhöhten Anteil an Holz. Es wurden 40 Fenstereinheiten in die Bremer Häuser und 43 Fenstereinheiten in das Würzburger Haus eingesetzt.

Die hohe Masse an Nadelholz (91 m³) bei den Bremer Häusern begründet sich in der Brettstapelbauweise. Auf diese Art und Weise wurde versucht, mehr Kohlenstoff bzw. mehr Kohlendioxid im Haus zu binden als über den gesamten Lebensweg emittiert wird (Positivhäuser).
Grundsätzlich besitzt der herkömmliche Holzbau mit seinen schlanken Wandaufbauten den Nachteil, dass die Wärme in dem Gebäude aufgrund der geringen Masse nicht gespeichert werden kann.
Holz als Baustoff besitzt jedoch sehr gute Wärmespeichereigenschaften. Das Bremer Haus wurde deshalb mit dieser großen Menge an Holz ausgestattet, damit die solaren Wärmegewinne gespeichert werden können. Ein Reduzierung des Heizenergiebedarfs des Hauses ist die Folge.
Für das Fundament des Würzburger Hauses wurde ~70 t Beton mehr verwendet als bei den Bremer Variante. Der Grund ist in der Architektur, der größeren Wohnfläche und der Hanglage des Hauses zu sehen[41]. Dies führt auch dazu, dass auf die Wohnfläche bezogen in dem Würzburger Haus mehr Masse verbaut ist. Die Folge dieser Faktoren ist ein erhöhter Einsatz an mineralischen Rohstoffen.

7.4.1.1. Würzburg

In der Abbildung 39 sind die verbauten Massen und Volumina in dem Würzburger Haus zusammengestellt. Es wird deutlich, dass auch bei dem Bau von Holzhäusern nicht auf den Einsatz von Stein und Beton verzichtet werden kann. Ein Fundament besteht immer aus mineralischen Baustoffen. Der Verbrauch an mineralischen Primärstoffen für den Baubereich in Deutschland betrug im Jahr 1997 ca. 767 Mio. t.
Der Anteil an Sekundärrohstoffen und Schnittholz belief sich auf 7%. Bis zum Jahr 2010 wird erwartet, dass der Verbrauch an Baustoffen sich auf 872 Mio. t erhöht. Der Anteil an Sekundärstoffen und Schnittholz wird schätzungsweise 11% betragen [Stein et al. 2000].
Die Evaluierung der mengenmäßigen Verteilung der Baustoffe im Hausbau ermöglicht Optimierungsmöglichkeiten.

Masse

Das gesamte Haus besteht aus 311 t Baustoffen. Die Abbildung 39 unterteilt die Baustoffe in die Kategorien Metall, mineralischer Baustoff (Stein & Betonteile), nachwachsender Baustoff (Holz, Holzwerkstoffe & Dämmung) und Fenster.

[41] Die Häuser wurden individuell geplant für einen bestimmten Käufer auf einem real existierenden Grundstück.

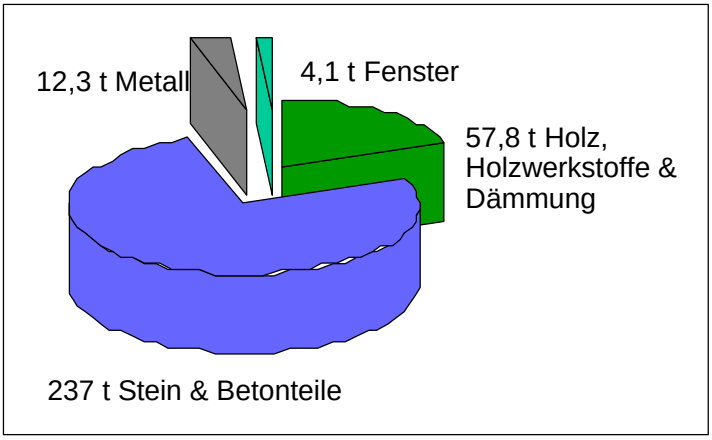


Abbildung 39: Darstellung der verbauten Masse in Tonnen, Haus Würzburg

Volumen

Eine Darstellung der verbauten Volumina verdeutlicht den hohen Anteil der leichteren Baustoffe, wie der Dämmung. Diese hat massenmäßig nur eine untergeordnete Bedeutung. Betrachtet man jedoch die Verteilung des Volumens des Hauses (Abbildung 40), so wird ersichtlich, dass die Dämmung ca. 40% des Gesamtvolumens ausmacht.

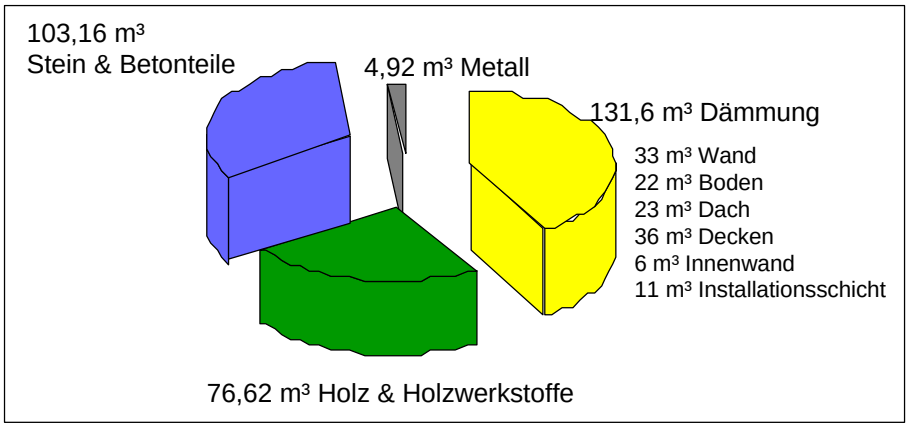


Abbildung 40: Darstellung des verbauten Volumens in m³, Haus Würzburg

Auffallend bei der Volumenbetrachtung von Gebäuden ist, dass der Anteil von Dämmstoffen sehr groß ist. Das hat unter anderem auch eine Bedeutung bei der Betrachtung des Moduls Transport. In dem Bremer Haus werden 131 m³ an Zellulosedämmstoff eingebracht. Um diese Menge zu transportieren, müssen einige Lastwagen die Baustelle oder die Produktionsfirma anfahren. Die einzublasende Zellulose wird in verpackten Säcken angeliefert. Diese haben ein Gewicht von 11 kg bei einem Volumen von ca. 0,3 m³.

Liefert der Dämmstoffhersteller mit einem 7,5 Tonner mit einem Ladevolumen von ~37,5 m³ (6m x 2,5m x 2,5m), so würden für das Würzburger Haus 4 Transporte für den Dämmstoff berechnet werden.

Wird für den Transport des Dämmstoffes ein 40 Tonner mit einem Ladevolumen von ~ 97,5 m³ (13m x 2,5m x 3m) verwendet, so muss die Baustelle zweimal angefahren werden. Bei dem leichtgewichtigen Baumaterial wird der Transport nicht durch die Masse, sondern durch das transportierte Volumen bestimmt und eingeschränkt.

7.4.1.2. Bremen

In dem Bremer Haus wurden ~68 t weniger Baumaterial verwendet als in dem Würzburger Haus (insgesamt 243 t). Der Anteil der mineralischen Baustoffe ist hier deutlich geringer, dafür wurde der nachwachsende Baustoff Holz vermehrt verwendet.
Die Abbildungen 41 und 42 stellen die verbauten Mengen in dem Bremer Haus dar.

Masse

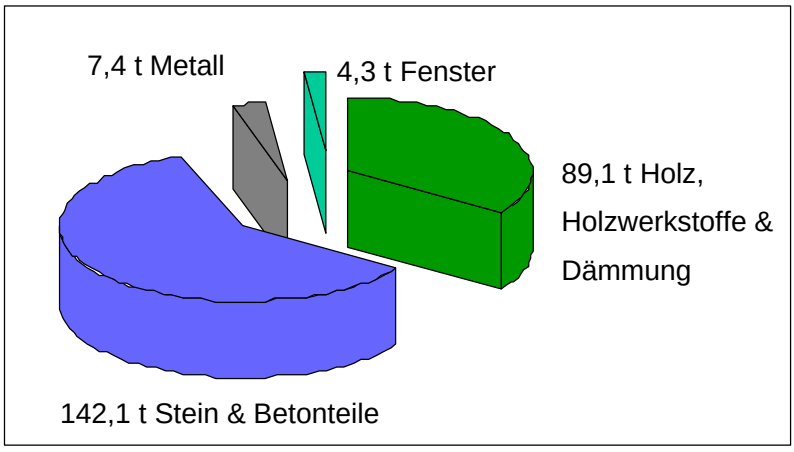


Abbildung 41: Darstellung der verbauten Massen in Tonnen, Haus Bremen

Volumen

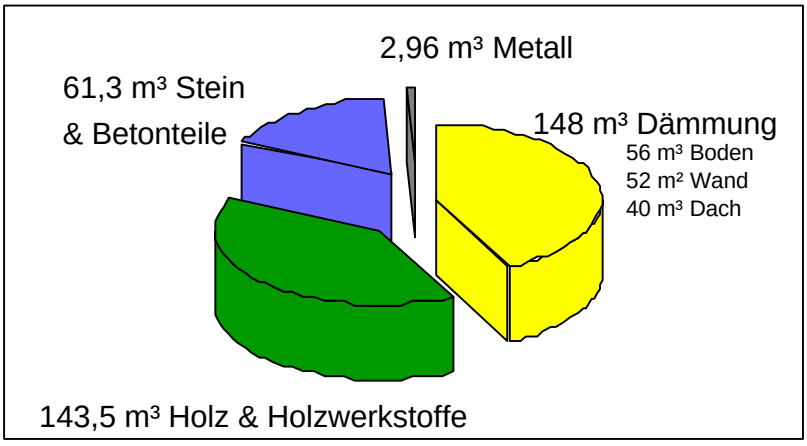


Abbildung 42: Darstellung des verbauten Volumens in m³, Haus Bremen

In dem Bremer Haus werden 17 m³ mehr an Zellulosedämmung als in dem Würzburger Haus eingebracht. Die Anteile an mineralischen Baustoffen und der Metallanteil wurde deutlich gesenkt. Der Nadelholzeinsatz in dem Haus wurde jedoch stark erhöht.
Die Berechnungsgrundlage betrachtet das gesamte Gebäude. Detailbetrachtungen beispielweise für einzelne Wandelemente, können jedoch auch durchgeführt werden; die Ermittlung der Baustoffmassen muss jedoch separat erhoben und eingegeben werden (siehe Kap. 7.5).
In der Abbildung 43 wurde die Materialliste für den Nadelholzeinsatz nach der Position des Nadelholzes im Gebäude unterteilt.

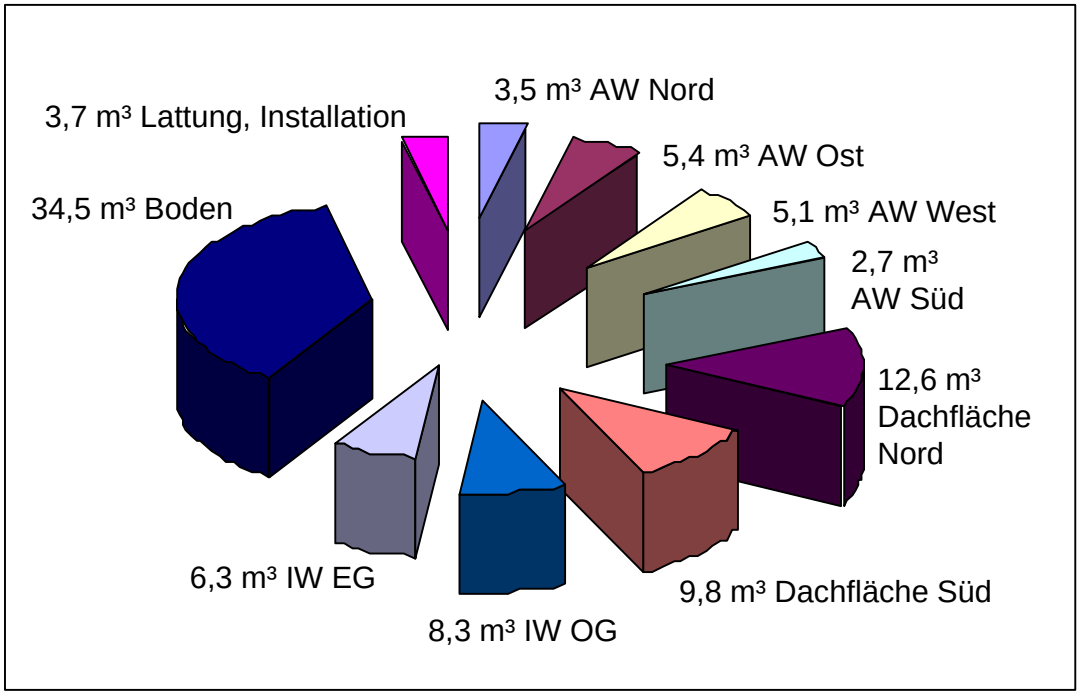


Abbildung 43: Detailbetrachtung des Nadelholzeinsatzes des Bremer Hauses

Diese Betrachtung ermöglicht eine Zuordnung des Baustoffes zu bestimmten Elemente des Hauses. Eine Einzelbetrachtung von Elementen kann so durchgeführt werden. Es fällt auf, dass ca. 15 m³ des Nadelholzes in den Innenwänden des Hauses verbaut sind. Hierdurch werden gute Schalldämmeigenschaften und sehr gute Wärmespeicherfähigkeiten des Gebäudes erreicht.

7.5. Einzelbetrachtung von Bauelementen

Das Planungstool ist für die ökologische Berechnung von kompletten Gebäuden konzipiert worden. Die Berechnungsgrundlage kann jedoch auch für die Einzelbetrachtung von Bauelementen genutzt werden. Das ermöglicht dem Planer, nicht das ganze Haus, sondern Teile davon zu betrachten und dadurch planerische Entscheidungen mit ökologischen Grundlagen zu unterlegen oder zu hinterfragen.
Verschiedene Bauelemente kann der Planer durch das Architektentool berechnen und miteinander vergleichen. Es können unter anderem die Fragestellungen

- Welcher Wandaufbau benötigt die geringste Herstellungsenergie?
- Welcher Wandaufbau ermöglicht eine hohe Kohlenstoffspeicherung?
- Welches Dämmmaterial soll aus ganzheitlich energetischer Sicht verwendet werden?
- Welche Auswirkungen hat es, wenn z.B. mineralische Baustoffe durch nachwachsende Baustoffe ersetzt werden und umgekehrt?

beantwortet werden. Grundlage für die Beantwortung der Fragen ist die Berechnung der Baustoffmassen.

7.5.1. Betrachtung von vergleichbaren Wandaufbauten

Ein Vergleich von verschiedenen Wandelementen verdeutlicht die Möglichkeit, mit dem entwickelten Programm frühzeitig planerische Entscheidungen mit fundierten ökologischen Daten zu hinterfragen.
Die Entscheidung des Bauherren, einen bestimmten Wandaufbau zu verwenden, wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Der Preis des Hauses ist nach wie vor ein sehr entscheidender Faktor und bestimmt in weiten Teilen den zu realisierenden Wandaufbau und den damit verbundenen Energiestandard des Hauses. Viele Bauherren können sich jedoch zu Beginn der Planung nicht über die Konstruktion des Wandaufbaus einigen. Dem Planer wird hierdurch die Möglichkeit gegeben, den Bauherren im Rahmen seiner Möglichkeit zu leiten und den Wandaufbau zu konzeptionieren.
Das Planungstool kann den Architekten und damit auch den Bauherren mit fundierten Daten bei der Entscheidungsfindung unterstützen.
Im Folgenden werden zur Anschauung vier verschiedene Wandaufbauten berechnet. Als Funktionale Einheit wird 1 m² Wand definiert.

Damit ein Vergleich durchgeführt werden kann, werden drei Wände mit einem vergleichbaren Wärmedurchgangskoeffizienten, geeignet für den Niedrigenergiebau, erstellt. Zusätzlich wir eine herkömmliche und gängige Massivwand berechnet.
Der berechnete Wandaufbau wird in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Darstellung der Kennwerte der Wandelemente und Wandaufbau [Bartolles et al., 2000; Herstellerinformationen von Fa. Haacke und 81fuenf Haus, Pohlmann, J, 2001]

	Wand 1 Haacke natur	**Wand 2 LBS Ökohaus**	**Wand 3 Stein Niedrig-Energiehaus**	**Wand 4 Stein herkömmlich**
u-Wert [W/m²K]	0,15	0,15	0,15	0,44
Gewicht [kg]	65	84	200	478
Dicke [cm]	39	35	52	40
Wandaufbau Außen → Innen	Siehe Abbildung 17 auf Seite 68	Siehe Abbildung 16 auf Seite 68	WDVS-Kratzputz Dämmstoff Porenbeton Gipsputz	Vormauerziegel Luft Mineralwolle Kalksandstein Gipsputz

Für die Berechnungsgrundlage müssen diese Daten mit den Gewichtsangaben angegeben werden. Die Abmessungen des verbauten Baustoffes sind bekannt, so dass die Massen ermittelt werden können.

Beispiel Gewichtsermittlung Nadelholzständer:

Der verbaute Nadelholzständer weist die Abmessungen 16 x 10 x 100[42] cm auf. Daraus resultiert ein Holzvolumen von 0,016 m³. Das Gewicht der Baustoffe kann der Datengrundlage (Kap. 5.11-5.14) entnommen werden (Nadelholz: 1 m³ entspricht 510 kg bei u = 15% [Speckels, 2000]). Für einen Nadelholzständer muss folglich ein Gewicht von 8,16 kg in die Berechnungsgrundlage eingegeben werden. Für die anderen verbauten Baustoffe der geplanten Wand wird analog vorgegangen.

Nach einer Eingabe der Baustoffmengen in das Planungstool resultieren aus den Wandaufbauten 1-4 folgende Werte.

[42] Es wird 1 m² Wandelement betrachtet.

Tabelle 38: Ergebnisse der Berechnungsgrundlage für den Vergleich von 1 m² Wandelement

	Wand 1	**Wand 2**	**Wand 3**	**Wand 4**
Herstellungsenergiebedarf der Wand [MJ]	421	404	744	935
gespeicherte nutzbare Energie [MJ]	589	968	0	0
CO_2-Emissionen zur Herstellung [kg]	23	30	121	89
entzogenes CO_2 [43][kg]	74	121	0	0
gebundenes C in dem Wandelement [kg]	20	34	0	0
Energiebilanz [MJ]	**- 168**	**- 564**	**744**	**935**
CO_2-Bilanz [kg]	**- 51**	**- 443**	**121**	**89**
Ökologische Bewertung[44]:				
GWP[45] [kg CO_2-äq.]	**~35**	**~33**	**~62**	**~78**
Versauerung [kg SO_2-äq.]	**~0,105**	**~0,101**	**~0,186**	**~0,233**
Überdüngung [kg PO_4-äq.]	**~0,007**	**~0,007**	**~0,013**	**~0,017**
Sommersmog [Ethylenäq.]	**~0,056**	**~0,053**	**~0,099**	**~0,124**

Dem Architekten werden durch diese Berechnung die Auswirkungen seiner Gebäudeplanung verdeutlicht. Die Wände 1-3 besitzen denselben u-Wert, ein Vergleich kann deshalb durchgeführt werden. Aus den Berechnungen der Tab. 38 können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Ein Wandelement in Holzbauweise benötigt weniger Energie zur Herstellung als eine massiv gebaute Wand.
- Durch die Verwendung von Holzbauelementen kann je nach Wandkonstruktion Kohlenstoff gespeichert werden. Steinwände speichern keinen Kohlenstoff.
- Holzwände weisen ein niedrigeres Gewicht bei vergleichbarem u-Wert auf.
- Aufgrund des geringen Gewichts kann jedoch weniger Wärme in dem Bauteil gespeichert werden.

[43] Während des Wachstums des Baustoffes der Atmosphäre entzogenes Kohlendioxid.

[44] Die berechneten Minimal- und Maximalwerte werden nicht in der Tabelle angegeben. Der berechnete Wert ist ein Durchschnittswert.

[45] Die Berechnung des Treibhauseffektes begründet sich auf dem Gesamtenergiebedarf, der gebundene Kohlenstoff wird dem GWP nicht entgegengerechnet. Die Wandelemente aus Holz weisen deshalb ein positives GWP auf und nicht, wie bei Waltjen et al. (1999), ein Negatives.

- Der Wandaufbau massiv gebauter Niedrigenergiehäuser ist sehr dick (52 cm). Die Folgen dieser Planung sind hohe Erstellungskosten und einen vergleichsweise geringeren Wohnraum.
- Die in dem Holzelement gespeicherte Sonnenenergie kann durch die thermische Verwertung am Ende des Lebensweges fossile Energieträger substituieren.

Waltjen et al. (1999) hat für Österreich vier verschiedene Wände berechnet. Die Ergebnisse dieser Studie (siehe Tabelle 7. und 8.) korrelieren mit den hier dargestellten. Der in der Wand gebundene Kohlenstoff wird in der Studie von Waltjen et al. dem GWP entgegengerechnet. Hierdurch kommt es zu einem negativen Treibhauspotential.
Das entwickelte Programm erfasst den gebundenen Kohlenstoff mengenmäßig, das Treibhauspotential wird jedoch aus dem Gesamtenergiebedarf ermittelt. Es kommt folglich nicht zu einem negativen Treibhauspotential.
Die Berechnungsgrundlage stellt jedoch den gebundene Kohlenstoff/Kohlendioxid den Gesamtemissionen entgegen, die erstellte Kohlendioxidbilanz wird demzufolge negativ, wenn in dem Produkt mehr Kohlenstoff gespeichert ist, als über den Lebensweg emittiert wird.
Die Tabelle 38 weist für die Holzwände eine negative CO_2-Bilanz aus, da mehr Kohlendioxid der Atmosphäre entzogen wurde als bei der Herstellung der Wand emittiert wird.

Ergebnisse

8

8. ERGEBNISSE

Ziel dieser Arbeit ist es darzustellen, dass mit dem entwickelten Architektentool fundierte ganzheitliche Aussagen über die **Gesamtenergiebilanz** und die **Kohlendioxidbilanz** von Wohngebäuden ermittelt werden können.

Die Abbildungen 44 und 45 zeigen das Feld ERGEBNISSE nach einer Eingabe der Baustoffmengen und der Energiebedarfsermittlung für die beiden Gebäude. Die Ergebnisse OPTIMIERT beziehen sich auf den Einsatz einer Solaranlage mit 6 m² und einer Photovoltaikanlage mit 10 m². Das Heizmedium für den Heizenergiebedarf ist Erdgas.

Für „Würzburg“ ergibt sich das in Abbildung 44 gezeigte Ergebnis. Für „Bremen“ das in Abbildung 45.

MODULE	Energie		CO2-Emissionen	
Herstellung	Normal:	776.691 MJ	Normal:	101.260 kg
	Optimiert:	822.325 MJ	Optimiert:	105.767 kg
Errichtung		15.000 MJ		2.325 kg
Instandhaltung	Normal:	151.936 MJ	Normal:	20.066 kg
	Optimiert:	262.079 MJ	Optimiert:	30.328 kg
Nutzung	Normal:	2.506.320 MJ	Normal:	157.338 kg
	Optimiert:	1.807.920 MJ	Optimiert:	102.481 kg
Rückbau	Normal:	46.431 MJ	Normal:	6.066 kg
	Optimiert:	54.220 MJ	Optimiert:	6.805 kg
Transport		20.866 MJ		1.475 kg
Gesamtenergiebedarf:		3.517.244 MJ	CO2-Gesamt:	288.530 kg
Optimiert:		2.982.410 MJ	Optimiert:	249.182 kg
Gespeicherte Energie:		917.600 MJ	Gespeichertes CO2:	91.810 kg
Nutzbare Energie:		734.080 MJ	Gebundenes C:	25.503 kg

Energiebilanz		CO2-Bilanz	
Normal:	2.783.164 MJ	Normal:	196.720 kg
Optimiert:	2.248.330 MJ	Optimiert:	157.372 kg

Abbildung 44: Feld Ergebnisse „Würzburg“

Das Feld Ergebnisse ermittelt für das Haus in Bremen (Optimiert: Solaranlagengröße von 4 m² und Photovoltaikanlagengröße von 9 m², Heizmedium Erdgas) folgende Aussage:

MODULE		Energie		CO2-Emissionen
Herstellung	Normal:	822.581 MJ	Normal:	77.957 kg
	Optimiert:	862.282 MJ	Optimiert:	82.125 kg
Errichtung		12.600 MJ		1.953 kg
Instandhaltung	Normal:	156.129 MJ	Normal:	20.498 kg
	Optimiert:	252.931 MJ	Optimiert:	29.992 kg
Nutzung	Normal:	1.501.950 MJ	Normal:	105.108 kg
	Optimiert:	994.350 MJ	Optimiert:	62.027 kg
Rückbau	Normal:	48.936 MJ	Normal:	4.923 kg
	Optimiert:	55.761 MJ	Optimiert:	5.606 kg
Transport		19.256 MJ		1.362 kg
	Gesamtenergiebedarf:	2.561.452 MJ	CO2-Gesamt:	211.800 kg
	Optimiert:	2.197.180 MJ	Optimiert:	183.064 kg
	Gespeicherte Energie:	1.500.350 MJ	Gespeichertes CO2:	150.116 kg
	Nutzbare Energie:	1.200.280 MJ	Gebundenes C:	41.699 kg

	Energiebilanz		CO2-Bilanz
Normal:	1.361.172 MJ	Normal:	61.684 kg
Optimiert:	996.900 MJ	Optimiert:	32.948 kg

Abbildung 45: Feld Ergebnisse „Bremen“

Die Berechnungsgrundlage ermöglicht, je nach der Intention des Betrachters, eine separate Betrachtung der Ergebnisse. Um die ganzheitlichen Zusammenhänge im Hausbau zu betrachten, werden die Ergebnisse der Berechnungsgrundlage in zwei einzelne Bilanzen unterteilt. Es wird eine

- Energiebilanz (Kapitel 8.1) und eine
- Kohlendioxidbilanz (Kapitel 8.2)

erstellt.

Zusätzlich werden Aussagen zu den Einzelfragen wie z.B.

- Einfluss der Transportentfernung (Kapitel 8.3)
- Optimierung des Bremer Hauses (Kapitel 8.4)
- ökologische Bewertung der drei betrachteten Häuser (Kapitel 8.5)

erarbeitet.

Die Berechnungsgrundlage fordert die Eingabe von Transportentfernungen. Das **Modul Transport** ist demnach in den Ergebnissen enthalten, es wurde für eine Vereinfachung der Berechnungsbeispiele wie folgt standardisiert.

- Holzhersteller → Produktion der Bauelemente 20 km
- Zusatzstoffe → Produktion/Baustelle 8 km
- Fenster → Produktion/Baustelle 60 km
- Produktion → Baustelle 40 km
- Baustelle → Entsorgung 10 km

Diese kurzen Transportentfernungen sind willkürlich gewählt und für beide Gebäude gleich angenommen. Der Einfluss der Transportentfernungen auf den Gesamtenergiebedarf und die CO_2-Emissionen wird in dem Kapitel „Einfluss der Transportentfernung“ auf Seite 199 detailliert betrachtet.

8.1. Energiebilanz

Erfahrungsgemäß werden circa 80% aller Umweltwirkungen einer Produktökobilanz von dem Energieeinsatz zur Herstellung des Produktes bestimmt [Hasch, 2001].
Eine Fokussierung auf den Energiebereich in dem hier entwickelten Verfahren scheint daher gerechtfertigt. Eine Reduzierung des Energiebedarfs entlastet die Umwelt in den Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung, Überdüngung und der Billdung von bodennahem Ozon.
Die **Energiebilanz** betrachtet den Energiebedarf der Gebäude in den Lebensphasen:

- Herstellung der Baustoffe,
- Produktion, Errichtung des Hauses,
- Instandhaltung/Materialaustausch während der Nutzung,
- Betrieb über 60 Jahre,
- Rückbau des Gebäudes und den
- Transport.

Die eingesetzten Energieträger für die Herstellung der Baustoffe werden in dieser Bilanz nicht unterschieden. Es wird lediglich die benötigte Energie jedes Lebensabschnittes zusammengestellt, die nötig ist, die einzelnen Lebensabschnitte energetisch zu versorgen und den Betrieb des Hauses zu gewährleisten.
Der Vorteil eines Passivhauses muss zum Beispiel aus einer solchen Bilanz nicht unmittelbar hervorgehen. Ein Passivhaus benötigt ebenso Heizenergie wie andere Gebäude, diese wird jedoch durch interne und solare Wärmegewinne gedeckt, so dass ein herkömmliches Heizmedium entfällt.
Bei Passivhäusern kann der Gesamtenergiebedarf jedoch geringer sein als bei anderen Gebäuden.

8.1.1. Gesamtenergiebedarf

In der Tabelle 39 wird der Gesamtenergiebedarf der betrachteten Gebäude dargestellt. Durch eine Variation der Größe der Energieanlagen können Optimierungspotentiale für die bewerteten Häuser abgeschätzt werden. Es kann beurteilt werden, wie groß die Solar- und Photovoltaikanlagen bemessen sein müssen, um eine Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs für das betrachtete Haus zu erreichen.

Dem Planer des Hauses können auf diesem Weg Entscheidungen erleichtert werden, den Einsatz von Energieanlagen zu überdenken und für das geplante Gebäude sinnvoll zu dimensionieren.

Tabelle 39: Darstellung des Gesamtenergiebedarfs der betrachteten Gebäude bei einer Variation der Energieanlagengröße

	Würzburg	**Bremen**
	Gesamtenergiebedarf $[MJ]_{Primär}$	Gesamtenergiebedarf $[MJ]_{Primär}$
NORMAL:	3.517.244	2.561.452
OPTIMIERT[46]**:**		
Solar 1 m² PV 1 m²	3.485.548	2.529.756
Solar 2 m² PV 3 m²	3.382.559	2.426.767
Solar 4 m² PV 8 m²	3.164.777	2.208.985
Solar 6 m² PV 10 m²	2.982.410	2.026.618
Solar 7 m² PV 14 m²	2.855.811	1.900.019
Solar 8 m² PV 14 m²	2.776.432	Die Anlagengröße deckt den Energiebedarf[47] des Hauses.
Solar 9 m² PV 14 m²	2.697.054	Die Anlagengröße deckt den Energiebedarf des Hauses.
Holzheizung Solar/PV 0/0	3.015.502	2.313.219
Holzheizung Solar/PV 7/14	2.354.069	1.651.787
Holzheizung Solar/PV 9/14	2.195.312	Die Anlagengröße deckt den Energiebedarf des Hauses.

[46] Berechnung des „energiebereinigten“ Gesamtenergiebedarfs durch den Einsatz von regenerativen Energiequellen. Der Energiebedarf des Hauses über die Nutzung verändert sich nicht, die Bereitstellung der Energie ist jedoch mit einem geringeren Energieträgereinsatz, der Verwendung von Sonnenenergie, verbunden.

[47] Warmwasser- und Lüftungsenergie

Eine graphische Darstellung der Entwicklung des Gesamtenergiebedarfs zeigt die Abbildung 46.

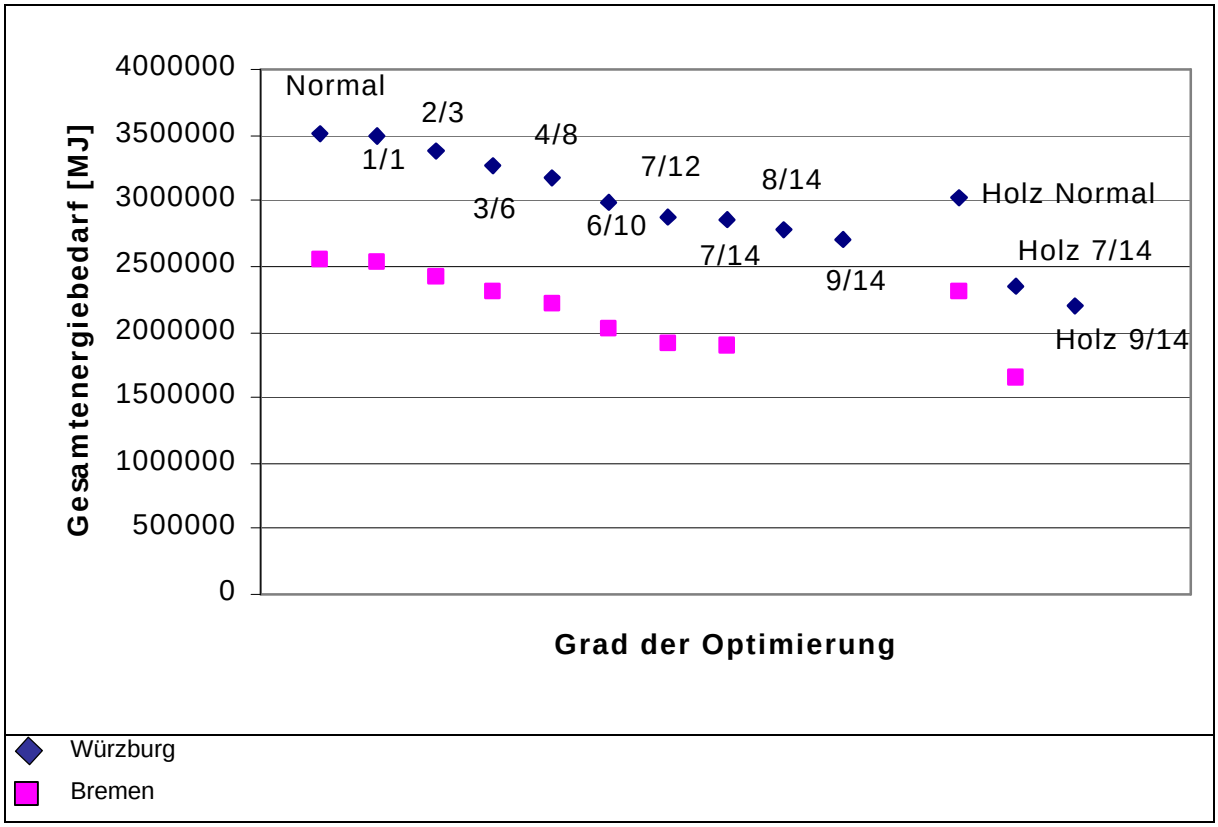


Abbildung 46: Darstellung des Gesamtenergiebedarfs der betrachteten Gebäude

Es zeigt sich, dass der Gesamtenergiebedarf des Bremer Hauses deutlich geringer ist als der Gesamtenergiebedarf des Würzburger Hauses.

Die Verwendung einer Holzheizung ist für das Würzburger Haus im Verhältnis zum Bremer Haus mit mehr Vorteilen verbunden. Die Energieaufwendungen über den gesamten Lebensweg können durch die Verwendung einer Holzheizung ohne die Verwendung von zusätzlichen Energieanlagen um 15% (0,5 Mio. MJ) reduziert werden.

Der Heizenergiebedarf des Bremer Hauses ist niedriger, eine Holzheizung bringt im Verhältnis nicht die Energieeinsparung wie bei dem Würzburger Haus. Der Normal-Bedarf des Bremer Hauses reduziert sich durch den Einsatz einer Holzheizung nur um ca. 10% (0,25 Mio. MJ).

Die Tabelle 40 demonstriert die Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs der Häuser durch den Einsatz einer Holzheizung.

Tabelle 40: Gesamtenergiebilanz der optimierten Häuser bei Verwendung einer Holzpelletheizung

	Würzburg (9 m² Solar; 14 m² PV)	**Bremen (7 m² Solar; 14 m² PV)**
Gesamtenergiebedarf über 60 Jahre + Holzheizung:	**2.195.312**	**1.651.787**
Nutzbare Energie des Gebäudes:	**734.080**	**1.200.019**
Energiebilanz („Nettobedarf") + Holzheizung	**1.461.232**	**451.507**

Für die Bildung einer Bilanz wird die in den Bauteilen gespeicherte Energie thermisch verwertet. Der Wirkungsgrad bei der thermischen Verwertung wird, wie in dem Kapitel „Abschneidekriterien" beschrieben, mit 80% angenommen. Durch die Verwendung einer Verbrennungsanlage mit einem Wirkungsgrad > 90% könnte die Energiebilanz des Bremer Hauses fast negativ werden.

Aus der Betrachtung des Gesamtenergiebedarfs können für die Praxis folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

Je höher der Heizenergiebedarf eines Hauses, desto vorteilhafter ist die Verwendung einer Holzheizung.

Die Verwendung von Energieanlagen hat einen positiven Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf der betrachteten Gebäude. Durch den Einsatz von Solar- und Photovoltaikanlagen reduziert sich der Gesamtenergiebedarf. Energetisch gesehen kann folgende Aussage getroffen werden:

Je höher der Bedarf an elektrischer Energie eines Hauses, desto sinnvoller ist der Einsatz von Photovoltaikanlagen.

8.1.2. Bedeutung der einzelnen Module an der Gesamtenergie

Ein weiteres Ziel dieser Studie ist es, die Bedeutung der verschiedenen Lebensabschnitte eines Gebäudes in ein Verhältnis zum Gesamtbedarf zueinander zu setzen.
Die Tabelle 41 verdeutlicht den Anteil der Module am Gesamtenergiebedarf der betrachteten Häuser ohne Energieanlagen.

Tabelle 41: Gesamtenergiebilanz der betrachteten Gebäude NORMAL über 60 Jahre

Modul	Würzburg	Bremen
	$[MJ]_{Primärenergie}$	$[MJ]_{Primärenergie}$
Herstellung	776.691	822.581
Instandhaltung (Materialaustausch)	151.936	156.129
Gebäudemontage (Produktion)	15.000	12.600
Betriebsenergiebedarf	2.506.320	1.501.950
Entsorgung	46.431	48.936
Transport	20866	19256
Gesamtenergiebedarf über 60 Jahre:	**3.517.244**	**2.561.452**
Nutzbare Energie des Gebäudes:	**734.080**	**1.200.019**
Energiebilanz („Nettobedarf“)	**2.783.164**	**1.361.172**

Auffallend ist, dass die Herstellung des Bremer Hauses energieintensiver als die Herstellung des Würzburger Hauses ist.

Hieraus resultieren verschiedene Fragen, da das Bremer Haus kleiner ist und weniger Baustoffe verbaut wurden. Zusätzlich ist der Anteil an nachwachsende Baustoffen sehr viel höher als in dem Würzburger Haus.

Verblüffend ist, dass trotz des hohen Einsatzes von nachwachsenden Rohstoffen in dem Bremer Haus der Herstellungsenergiebedarf so hoch ist. Die These, dass nachwachsende Rohstoffe in ihrer Herstellung weniger Energie benötigen als mineralische Baustoffe, kann durch diese Untersuchung nicht bestätigt werden, da keine vergleichbaren Massivhäuser erstellt wurden. Der Vergleich der Wandelemente in Kap. 7.5.1 zeigt jedoch, dass Wandelemente aus Holz in der Herstellung weniger Energie benötigen als mineralische Wandelemente. Das Bremer Haus wurde jedoch mit einem überdurchschnittlich hohen Holzanteil ausgestattet, der Herstellungsenergiebedarf ist demzufolge höher. Würde das Bremer Haus separat betrachtet werden, so könnte man zu der Schlussfolgerung kommen, dass Holzhäuser in dem Energiebedarf zur Herstellung nicht den erwarteten energetischen Vorteil haben.

Es muss jedoch zudem gefolgert werden, dass Holzhäuser aufgrund des Baumaterials einen geringeren Nutzungsenergiebedarf als mineralisch hergestellte Häuser haben, da der Wärmedurchgangskoeffizient der erstellten Wand geringer ist. Die Senkenfunktion durch die Speicherung von Kohlenstoff und Sonnenenergie gehört ebenfalls zu den positiven Eigenschaften von Holzgebäuden.

Betrachtet man den Energiebedarf für die Instandhaltung, so wird ersichtlich, dass die verwendeten Fenstersysteme keinen entscheidenden Einfluss auf den erhöhten Herstellungsenergiebedarf des Bremer Hauses haben. Das begründet sich auch darin, dass in dem Würzburger Haus drei Fenster mehr eingebaut wurden als in dem Bremer Haus.
Grundsätzlich kann gefolgert werden, dass sich Herstellungsenergiebedarf erhöht, je weniger Betriebsenergie benötigt wird.
Im Endeffekt benötigt das Bremer Haus aufgrund der geringen Nutzungsenergie des Hauses über 60 Jahre ganzheitlich jedoch weniger Energie.
Durch optimal bemessene Energieanlagen kann die Gesamtenergie reduziert werden. In der Tabelle 42 werden die optimierten Häuser mit den einzelnen Modulen dargestellt.
Der Warmwasser- und Lüftungsenergiebedarf wird fast vollständig mit Solar- und Photovoltaikanlagen bereit gestellt.

Tabelle 42: Gesamtenergiebilanz der betrachteten Gebäude im optimierten Zustand über 60 Jahre

Modul	**Würzburg (9 m² Solar; 14 m² PV)**	**Bremen (7 m² Solar; 14 m² PV)**
	$[MJ]_{Primärenergie}$	$[MJ]_{Primärenergie}$
Herstellung	834.912	876.344
Instandhaltung (Materialaustausch)	293.153	288.430
Gebäudemontage (Produktion)	15.000	12.600
Betriebsenergiebedarf	1.476.720	645.150
Entsorgung	56.403	58.239
Transport	20.866	19.256
Gesamtenergiebedarf über 60 Jahre:	**2.697.054**	**1.900.019**
Nutzbare Energie des Gebäudes:	**734.080**	**1.200.019**
Energiebilanz („Nettobedarf“)	**1.962.974**	**699.739**

Durch den Einsatz von Energieanlagen kann über den Zeitraum der Nutzung „energiebereinigt“ Energie erzeugt werden (siehe Datengrundlage regenerative Energiequellen in Kap. 5.1.7).
Das hat einen positiven Effekt auf den Energiebedarf. Selbstverständlich verändert sich der benötigte Energiebedarf des Hauses über den Betrieb durch den Einsatz von Energieanlagen nicht[48], durch die Verwendung von Sonnenenergie kann diese Energiemenge jedoch mit

[48] Heizenergiebedarf, Warmwasserbedarf und Lüftungsenergiebedarf sind nach wie vor vorhanden

einem geringeren Energieträgereinsatz gedeckt werden. Es wird durch die Nutzung von Sonnenenergie sozusagen freie Energie verwendet. Die Herstellung der Anlagen wird jedoch in dem Modul „Herstellung der Bauteile“ berechnet, so dass es während der Nutzung zu einem geringeren Energiebedarf kommt.
Es kommt bei beiden Gebäuden zu einer Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs. Die energieintensive Herstellung der Energieanlagen erhöht jedoch die Module Herstellung und Instandhaltung der Häuser.
Der prozentuale Anteil der einzelnen Module am Gesamtenergiebedarf wird in den Abbildung 47 bis 50 dargestellt.

8.1.2.1. Würzburg Normal

Der Gesamtenergiebedarf des Hauses beträgt 3,5 Mio. MJ. Die Abbildung 47 verdeutlicht die prozentuale Verteilung der Energie auf die einzelnen Module.

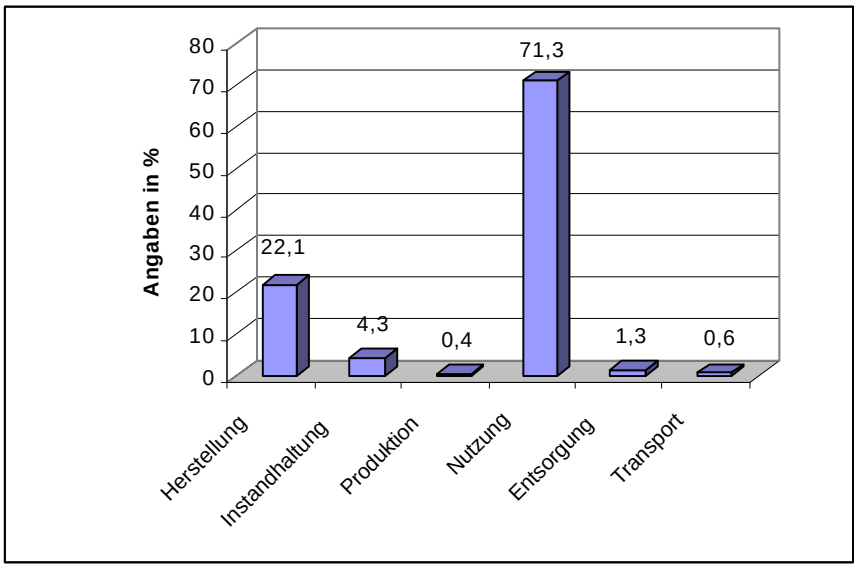


Abbildung 47: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebenswegmodule an der Gesamtenergie des Würzburger Hauses

Das Würzburger Haus benötigt im Verhältnis zu dem Bremer Haus mehr Heizenergie. Das hat einen Einfluss auf das Modul Nutzung. Mehr als 70% der Gesamtenergie werden in der Lebensphase des Bewohnens des Hauses verbraucht. Das Würzburger Haus ist ein Niedrigenergiehaus, bei herkömmlichen Gebäuden mit einem höheren Heizenergiebedarf wird das Modul Nutzung weit mehr als 90% des Gesamtenergiebedarfs betragen. Der Gesamtenergiebedarf der herkömmlichen Häuser wird zudem höher sein als der Gesamtenergiebedarf des Würzburger Hauses.

8.1.2.2. Würzburg Optimiert

Durch den Einsatz von Energieanlagen kann der Gesamtenergiebedarf des Würzburger Hauses auf 2,7 Mio. MJ reduziert werden. Hierdurch erhöht sich der Einfluss der Module Herstellung und Instandhaltung an dem Gesamtenergiebedarf (Abbildung 48) auf ca. 42%. Die Nutzung des Hauses trägt mit ca. 55% zu der Gesamtenergie bei.

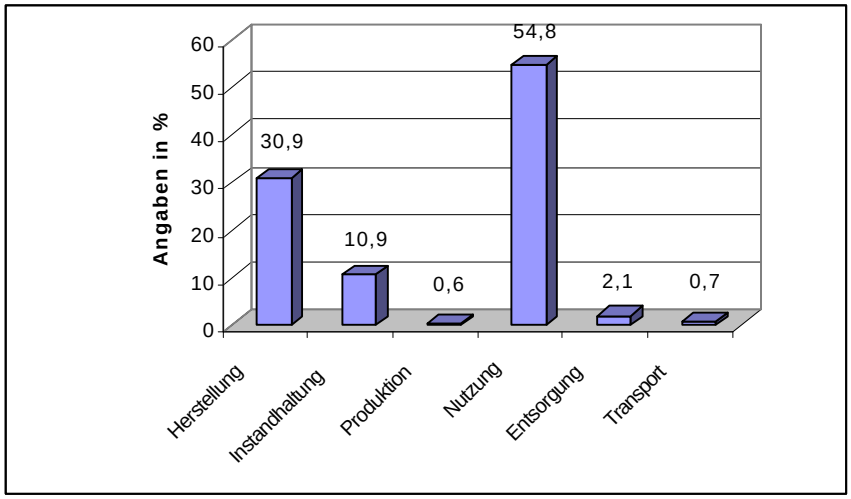


Abbildung 48: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebenswegmodule an der Gesamtenergie des Würzburger Hauses

8.1.2.3. Bremen Normal

Der Gesamtenergiebedarf des Bremer Hauses ohne Energieanlagen beträgt 2,6 Mio. MJ. Der Anteil des Moduls Nutzung dieses Niedrigstenergiehauses beträgt knapp 60%.
Der Herstellung und der Instandhaltung dieser Gebäude kommt folglich besondere Bedeutung zu. Eine Fokussierung auf die Nutzung des Hauses entbehrt jeglicher Grundlage. Die Forderung nach einer ganzheitlichen Betrachtung von Gebäuden kann an dieser Stelle nur mit Nachruck wiederholt werden.

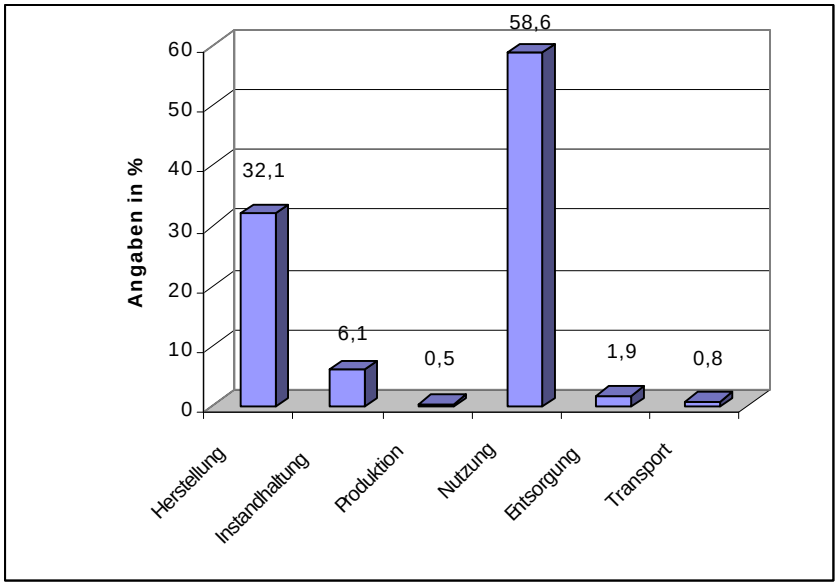


Abbildung 49: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebenswegmodule an der Gesamtenergie des Bremer Hauses

8.1.2.4. Bremen Optimiert

Durch den Einsatz von Solar- und Photovoltaikanlagen kann die Gesamtenergie um 0,7 Mio. MJ auf insgesamt 1,9 Mio. MJ verringert werden. Diese Reduzierung hat zur Folge, das der überwiegende Anteil der Energie für die Herstellung der Baustoffe verwendet werden muss. Das Modul Nutzung hat einen deutlich geringeren Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf des Hauses als die Module Herstellung und Instandhaltung.

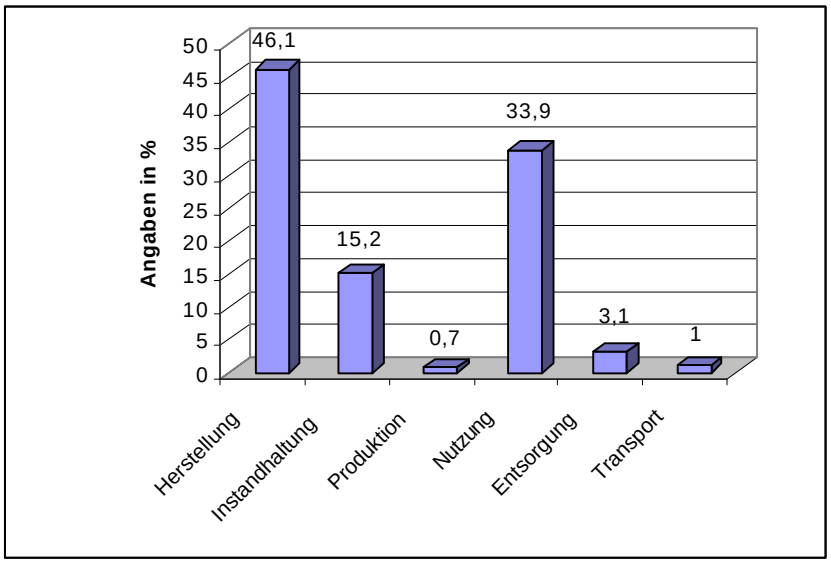


Abbildung 50: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebenswegmodule an der Gesamtenergie des Bremer Hauses

Aus der Abbildung 50 kann folgende Erkenntnis festgehalten werden:

- Die Module Herstellung der Baustoffe und Nutzung des Gebäudes haben bei energieoptimierten Gebäuden den größten Einfluss auf die Gesamtenergie eines Hauses.
- Die Lebensabschnitte Produktion und Entsorgung sind eher von untergeordneter Bedeutung.

8.1.3. Energiebedarf für die Herstellung der Baustoffe

In dem Kap. 8.1.2 ist ermittelt worden, dass der Energiebedarf für die Herstellung der Bauteile bei energieoptimierten Gebäuden einen großen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf hat. Das Modul Herstellung der Baustoffe und das Modul Instandhaltung werden in der Tabelle 43 bei unterschiedlichen Anlagengrößen detailliert dargestellt.

Tabelle 43: Energiebedarf zur Herstellung der Baustoffe

		Würzburg Herstellungs- und Instandhaltungs-energiebedarf über 60 Jahre [MJ]$_{Primär}$	**Bremen** Herstellungs- und Instandhaltungsener-giebedarf über 60 Jahre [MJ]$_{Primär}$
NORMAL:		776.691[49] + 151.936[50] **= 928.627 MJ**	822.581 + 156.129 **= 978.710 MJ**
OPTIMIERT:			
Solar	1 m²	797.905 + 199.964	843.795 + 204.157
PV	1 m²	**= 997.869 MJ**	**= 1.061.439 MJ**
Solar	3 m²	809.738 + 231.005	855.628 + 235.198
PV	6 m²	**= 1.040.743 MJ**	**= 1.090.826 MJ**
Solar	4 m²	814.917 + 244.313	860.807 + 248.506
PV	8 m²	**= 1.059.230 MJ**	**= 1.109.313 MJ**
Solar	7 m²	830.454 + 284.237	876.344 + 288.430
PV	14 m²	**= 1.114.691 MJ**	**= 1.164.774 MJ**
Solar	8 m²	832.683 + 288.695	Die Anlagengröße deckt den Energiebe-darf des Hauses.
PV	14 m²	**= 1.121.378 MJ**	
Solar	9 m²	834.912 + 293.153	Die Anlagengröße deckt den Energiebe-darf des Hauses.
PV	14 m²	**= 1.128.065 MJ**	
Holzheizung		792.055 + 167.300	837.945 + 171.493
Solar/PV	0/0	**= 959.355 MJ**	**= 1.009.438 MJ**

[49] Herstellungsenergiebedarf

[50] Instandhaltungsenergiebedarf

Durch den Einsatz von Solar- und Photovoltaikanlagen erhöht sich der Herstellungsenergiebedarf des Würzburger Hauses um ca. 200.000 MJ (Solar: 9m²; Photovoltaik: 14 m²). Die Herstellung eines Holzpelletofens hat keinen bedeutenden Einfluss auf den Herstellungsenergiebedarf des Hauses, es erhöht sich nur unwesentlich um 15.364 MJ.

8.1.4. Bedeutung der einzelnen Baustoffe

Die Entscheidung des Bauherren, bestimmte Baustoffe in dem Haus zu verwenden, hat neben den damit verbundenen Eigenschaften auf das Wohnklima auch einen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf. Holz als Bau- und Werkstoff ist in seinem Energiebedarf zur Herstellung nicht besser als fossile Baustoffe. Die mit dem Werkstoff verbundenen und die daraus resultierenden Gebäudeeigenschaften ermöglichen jedoch eine Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs.
Vergleicht man zwei Wandaufbauten aus unterschiedlichen Materialien (Holz und Stein), so kommt man zu folgenden Ergebnissen [Frühwald, Pohlmann; 2000, siehe auch Kap.7.5.1]:

- Ist die funktionale Einheit eine Wanddicke von 30 cm, so ist die Herstellung beider Wände ähnlich energieintensiv. Die Holzwand hat jedoch einen deutlich besseren Wärmedurchgangskoeffizienten und verbraucht deshalb viel weniger Gesamtenergie.
- Ist die funktionale Einheit ein vergleichbarer Wärmedurchgangswert, so ist die Wanddicke der Massivwand um ca. 25% dicker. Damit ist der Herstellungsenergiebedarf höher als bei der Holzwand. Ein etwas höherer Gesamtenergiebedarf ist die Folge. Zudem ist der aus dieser dicken Wand resultierende Wohnraum deutlich geringer.
- Betrachtet man den Energiegewinn, der durch eine thermische Verwertung entstehen kann, so ist die Steinwand der Holzwand in jeder Hinsicht unterlegen.
- Betrachtet man das Haus unter dem Aspekt der Kohlenstoffspeicherung, so ist in dem massiv gebauten Haus kein Kohlenstoff[51] gespeichert. In Holzhäusern wird je nach Wandaufbau Kohlenstoff gespeichert.

Der Einfluss der einzelnen Baustoffe auf den Herstellungsenergiebedarf für die betrachteten Häuser wird in der Tabelle 44 verdeutlicht. Die Werte dieser Tabelle können aus der Berechnungsgrundlage in dem Feld BERECHNUNG erhalten werden.

[51] mit Ausnahme des Daches

Tabelle 44: Mengenmäßiger Anteil der einzelnen Baustoffen am Herstellungsenergiebedarf einschließlich des Materialaustausch der Baustoffe über 60 Jahre (NORMAL)

Baustoff	Würzburg	Bremen
	[MJ]$_{Primärenergie}$	[MJ] $_{Primärenergie}$
Zementgebundene Holzspanplatten [1)]	80.942	88.300
Holzfaserdämmplatten	7.821	14.220
Nadelsperrholz	78.600	
Nadelholz	60.604	257.984
Zellulosedämmung	33.970	38.270
TGI Träger		7.164
Trittschalldämmung		8.532
Spanplatten		8.565
OSB	56.394	74.469
Gipskartonplatten	69.544	67.848
Betonteile		
Fundamente	117.055	76.000
Gehwegplatten	11.340	
Hohllochziegel	1.726	
Stahl	172.500	102.000
Metall	15.200	11.400
Dacheindeckung [1)]	53.820	41.400
Fenster [1)]	169.110	182.558
Gesamt:	**928.626**	**978.710**

[1)] Bauteil wird während der Nutzung aus Gründen der Materialermüdung einmal ausgetauscht.

Die Abbildungen 51 und 52 verdeutlichen den prozentualen Anteil der Baustoffe an dem Energiebedarf der Herstellung und Instandhaltung der betrachteten Einfamilienhäuser.

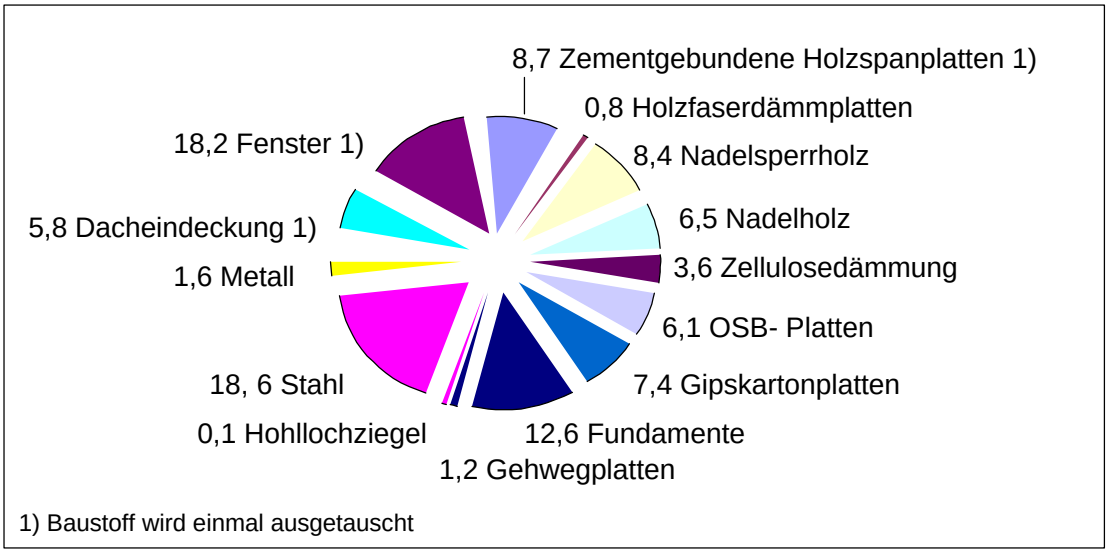


Abbildung 51: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an der Herstellungsenergie und der Instandhaltungsenergie des Hauses Würzburg ohne Energieanlagen

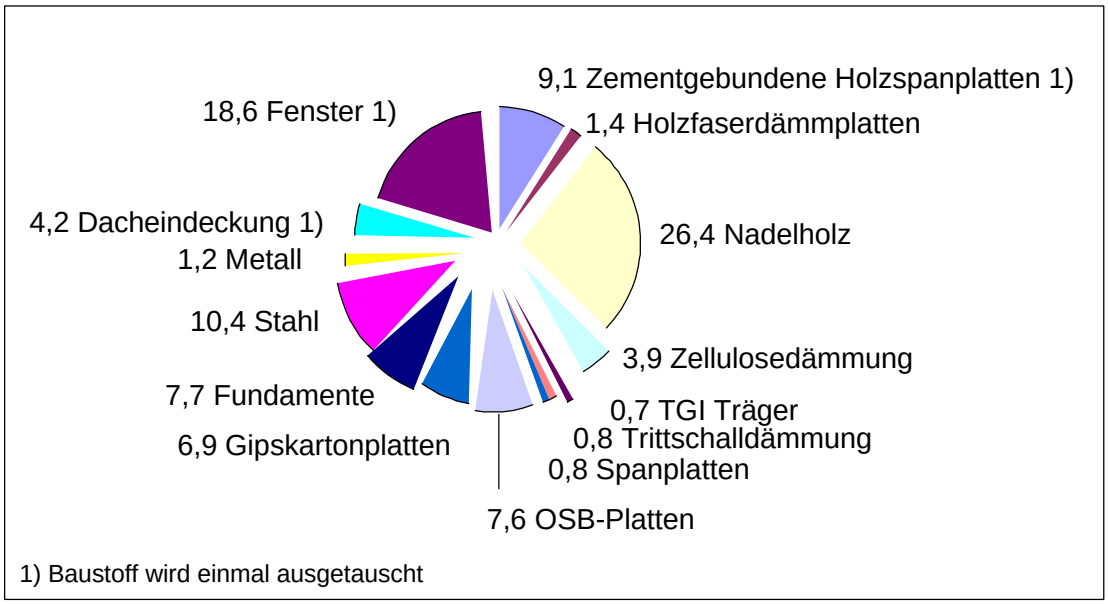


Abbildung 52: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an der Herstellungsenergie und der Instandhaltungsenergie des Bremer Hauses

Der Energiebedarf zur Herstellung der Baustoffe des Bremer Hauses (Abbildung 52) ist um 50.000 MJ höher als der Energiebedarf des Würzburger Hauses (Abbildung 51). Die energieintensiven Baustoffe sind bei beiden Häusern die Fenster und der Bewehrungsstahl. Der prozentual hohe Anteil der Fenster am Herstellungsenergiebedarf begründet sich auch durch den einmaligen Austausch der Fenstersysteme.

Betrachtet man den Bewehrungsstahl und das Betonfundament als eine Einheit, so trägt diese beim Bremer Haus mit 18% und beim Würzburger Haus mit 30% zum Herstellungsenergiebedarf bei.
Eine Unterteilung der Baustoffe in Baustoffkategorien ist in der Tabelle 45 dargestellt. Es wird in:

- nachwachsende Rohstoffe (Bauholz, Dämmung, Holzwerkstoffe)
- Fenster
- andere Werkstoffe (zementgebundene Holzspanplatte, Gipskartonplatte)
- Beton und Stahl (Metall, Beton, Fundament, Dachdeckung)

unterschieden.

Tabelle 45: Prozentualer Anteil von Baustoffgruppen am Herstellungsenergiebedarf der Baustoffe

	Würzburg [%]	**Bremen [%]**
nachwachsende Rohstoffe	~ 25	~ 41
Fenster	~ 18	~18
andere Werkstoffe	~ 16	~ 16
Beton und Stahl	~ 40	~ 23

Die prozentuale Verteilung des Herstellungsenergiebedarfs der Baustoffe für das Würzburger Haus kann tendenziell mit dem herkömmlichen Holzrahmenbau verglichen werden, während die Verteilung bei dem Bremer Haus mit einem Blockhaus verglichen werden kann.

8.2. Kohlendioxidbilanz

Es ist bekannt, dass Kohlendioxid das hauptverantwortliche Gas für den weltweiten Treibhauseffekt ist. Das Wissen um die Auswirkungen auf die globale Erwärmung hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. Die Bemühungen der Weltpolitik, dass Kyoto-Protokoll schnellstmöglich zu ratifizieren, belegt die Wichtigkeit, Kohlendioxidemissionen abzuschätzen und zu reduzieren.
In der vorliegenden Arbeit werden die Kohlendioxidemissionen für Gebäude über den gesamten Lebensweg ermittelt. Zusätzlich wird die Menge an gespeichertem Kohlenstoff (bzw. das der Atmosphäre entzogene Kohlendioxid) in den Bauprodukten berechnet. Die Ergebnisse können dazu verwendet werden, für den Hausbausektor als CO_2-Emittent realistische Einsparpotentiale abzuschätzen.
Die Verhandlungsparteien des Kyoto-Protokolls diskutieren momentan die Speicherfunktion von Wäldern und die Einbeziehung in das Protokoll [IPCC, 2000]. Durch die Senkenfunktion von Wäldern würden einige waldreiche Länder ihr Einsparpotential ohne zusätzliche Aufwand erreichen können. Das hat unter anderem dazu geführt, dass Kohlendioxidemissionen und Kohlendioxidsenken an dafür eingerichteten Börsen gehandelt werden.
Mit diesem Hintergrund ist es nicht einzusehen, das sich bis zum heutigen Zeitpunkt keine Gedanken über den in Holz und Holzprodukten langlebig gespeicherte Kohlenstoff gemacht werden. Durch den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen, beispielsweise im Bauwesen, kommt es zu einer Kohlenstoffsenke über den Zeitraum der Nutzung des Produktes.
Diese Senkenfunktion sollte ebenfalls in das Kyoto-Protokoll einbezogen werden. In den momentan gültigen IPCC-Richtlinien für die Aufstellung von Treibhausgasinventuren wird angenommen, dass das eingeschlagene Holz im Jahr des Einschlages vollständig oxidiert und dabei die in dem Holz gebundene Menge an Kohlendioxid freigesetzt wird.
Diese Vereinfachung wiederstrebt der Tatsache, dass gerade in Holzhäusern langfristig Holz verbaut und damit Kohlenstoff gespeichert ist.
Die in dem eingeschlagenen Holz gespeicherte Menge an Kohlendioxid oxidiert folglich nicht im Jahr des Einschlages, sondern wird der Atmosphäre über den Zeitraum der Nutzung des Hauses entzogen, in der Regel deutlich länger als 60 Jahre.
Das verbaute Vollholz kann nach diesem Zeitraum einer sogenannten Zweitnutzung, z.B. in Holzwerkstoffen oder als Dämmmaterial zugeführt werden, sodass es zu einer noch längerfristigen Speicherung kommt.

In diesem Kapitel werden die Kohlendioxidemissionen über den gesamten Lebensweg der betrachteten Gebäuden dargestellt und erläutert. Die in den betrachteten Gebäuden gebun-

dene Menge an Kohlenstoff, bzw. der Atmosphäre entzogenes Kohlendioxid wird dargestellt und in einer CO_2-Bilanz den Kohlendioxidemissionen über den gesamten Lebensweg entgegengerechnet.

8.2.1. Gesamte CO_2-Emissionen

Kohlendioxidemissionen entstehen unter anderem durch den Gebrauch von Energie (siehe Kap. 5.1.6). Der Mensch gebraucht Energie in vielfältiger Weise, sei es durch die Nutzung eines Autos oder die Verwendung von Energie am Arbeitsplatz. Hauptsächlich entstehen jedoch Kohlendioxidemissionen im privaten Bereich und hier vor allem im Wohnbereich.
Die Auswirkungen des Wohnens auf das weltweite Klima sind dem Menschen jedoch in den seltensten Fällen bewusst, da bisher keine mengenmäßige Erfassung der mit dem Wohnen verbundenen CO_2-Emissionen durchgeführt wurde.
Die Tabelle 46 verdeutlicht die gesamten Kohlendioxidemissionen, die während des Lebenslaufes eines Hauses entstehen.

Tabelle 46 a: CO_2-Emissionen über den Lebensweg eines Hauses (Nutzungszeitraum 60 Jahre)

	Würzburg	**Bremen**
	CO_2-Emissionen [kg]	CO_2-Emissionen [kg]
NORMAL:	288.530	211.800
OPTIMIERT:		
Solar 1 m² PV 1 m²	291.404	214.674
Solar 3 m² PV 6 m²	271.135	194.405
Solar 4 m² PV 8 m²	262.208	185.478
Solar 7 m² PV 12 m²	240.254	163.524
Solar 7 m² PV 14 m²	235.426	158.696
Solar 8 m² PV 14 m²	231.327	Die Anlagengröße deckt den Energiebedarf[52] des Hauses.
Solar 9 m² PV 14 m²	227.228	Die Anlagengröße deckt den Energiebedarf des Hauses.

[52] Warmwasser- und Lüftungsenergie

Durch den Einsatz einer Holzpelletheizung zur Bereitstellung der thermischen Wärme kann eine weitere Reduzierung der CO_2-Emissionen erreicht werden.

Tabelle 46 b: CO_2-Emissionen über den Lebensweg eines Hauses bei Verwendung eine Pelletheizung

	Würzburg	**Bremen**
Holzheizung: Solar/PV 0/0	268.223	203.902
Solar/PV 7/14	215.119	150.798
Solar/PV 9/14	206.921	Die Anlagengröße deckt den Energiebedarf des Hauses.

Das Würzburger Haus emittiert über den gesamten Lebensweg ca. 80 t mehr Kohlendioxid als das Bremer Haus (NORMAL Bedarf). Durch den Einsatz von Energieanlagen und einer kohlendioxidneutralen Holzheizung kann eine Verbesserung des Würzburger Hauses erreicht werden, so dass während des gesamten Lebensweges nur 55 t CO_2 mehr emittiert werden (der Betriebsenergiebedarf beider Häuser wird vollständig mit Energieanlagen gedeckt, es handelt sich um den OPTIMIERT Bedarf der Häuser).

8.2.2. Bedeutung der einzelnen Lebensabschnitte an den CO_2-Emissionen

Die Kohlendioxidemissionen verteilen sich in unterschiedlicher Weise auf die einzelnen Lebenswegabschnitte. Eine Optimierung der Kohlendioxidemissionen eines Hauses setzt die Kenntnisse über diese Verteilung voraus.

Tabelle 47: Kohlendioxidbilanz der einzelnen Module über 60 Jahre (NORMAL)

Modul	Würzburg	Bremen
	CO_2-Emissionen [kg]	CO_2-Emissionen [kg]
Herstellung	101.260	77.957
Instandhaltung	20.066	20.498
Produktion	2.325	1.953
Nutzung	157.338	105.108
Entsorgung	6.066	4.923
Transport	1.475	1.362
Kohlendioxidemissionen über 60 Jahre:	**288.530**	**211.800**
entzogenes Kohlendioxid:	**91.810**	**150.116**
gebundener Kohlenstoff:	**25.502**	**41.698**
CO_2-Bilanz[53] über einen Zeitraum von 60 Jahren	**196.720 kg CO_2-Emissionen**	**61.684 kg CO_2-Emissionen**

Es wird ersichtlich, dass die Energiebilanz sich in einigen Lebenswegabschnitten unterschiedlich zu der Kohlendioxidbilanz verhält. Grundsätzlich gilt, dass auch in der Kohlendioxidbilanz das Bremer Haus für die Umwelt vorteilhafter ist. Betrachtet man jedoch die verschiedenen Module, so wird folgendes deutlich:

- Die Lebensabschnitte Herstellung und Instandhaltung der **Energiebilanz** weisen für das Würzburger Hauses einen geringeren Bedarf aus.

[53] Subtraktion der Emissionen und des Kohlendioxides, welches der Atmosphäre durch das Wachstum des nachwachsenden Baustoffes entzogen wurde. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, damit nachgeprüft werden kann, ob es sich bei dem geplanten Gebäude um eine Positivhaus handelt oder nicht.

- In diesen Lebensabschnitten der **Kohlendioxidbilanz** emittiert dieses Haus jedoch mehr CO_2 als das Bremer Haus. Das begründet sich in den verwendeten Baustoffen.
- Bei der Herstellung von Stein, Bewehrungsstahl und anorganische Baustoffe wird verhältnismäßig mehr Kohlendioxid emittiert als bei organischen Baustoffen.
- Der Anteil dieser Baustoffe in dem Würzburger Haus ist deutlich höher als in dem Bremer Haus[54], folglich weisen diese Module höhere Emissionen aus.

Die Kohlendioxidbilanz verändert sich durch den Einsatz von Energieanlagen erheblich. In der Tabelle 48 sind die Emissionen des Hauses bei fast vollständiger Energiebereitstellung des Warmwasser- und Lüftungsenergiebedarfs durch Energieanlagen dargestellt.

Tabelle 48: Kohlendioxidbilanz der Häuser OPTIMAL

Modul	**Würzburg (9 m² Solar; 14 m² PV)**	**Bremen (7 m² Solar; 14 m² PV)**
	CO_2-Emissionen [kg]	CO_2-Emissionen [kg]
Herstellung	106.500	82.947
Instandhaltung	32.152	32.084
Produktion	2.325	1.953
Nutzung	77.843	34.598
Entsorgung	6.933	5.752
Transport	1.475	1.362
Kohlendioxidemissionen über 60 Jahre:	**227.228**	**158.696**
entzogenes Kohlendioxid:	**91.810**	**150.116**
gebundener Kohlenstoff:	**25.502**	**41.698**
CO_2-Bilanz über einen Zeitraum von 60 Jahren	**135.419 kg Emissionen**	**8.580 kg Emissionen**
CO_2-Bilanz über einen Zeitraum von 60 Jahren + Holzheizung	**115.112 kg Emissionen**	**682 kg Emissionen**

[54] Siehe Kapitel 7.4 (Sachbilanz)

Das Bremer Haus, ausgestattet mit 7 m² Solar- und 14 m² Photovoltaikanlage, emittiert über einen Lebensweg von 60 Jahren 8,5 t Kohlendioxid. Durch den Einsatz eines Holzpelletofens kann die CO_2- Bilanz des Bremer Hauses ausgeglichen werden. Das Haus erhält in diesem Ausbau und mit dieser Ausstattung an Energieanlagen fast den Status eines Positivhauses, da über den gesamten Lebensweg nur 682 kg Kohlendioxid mehr emittiert wird als in den Baustoffen gebunden ist und nach der Nutzung des Hauses fossile Energieträger substituiert werden können. Durch die optimale Ausstattung mit Energieanlagen können die Kohlendioxidemissionen des Würzburger Hauses um 60 t CO_2 verringert werden (Bremen um 53 t). Für Würzburg entspricht das einer Verbesserung um 22% (Bremen: 26%).

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über den prozentualen Anteil der einzelnen Lebensabschnitte an den Gesamtemissionen der Häuser in normalem und optimiertem Zustand.

8.2.2.1. Würzburg Normal

Ähnlich der Energiebilanz wird auch in der Kohlendioxidbilanz in dem Lebensabschnitt Nutzung der Hauptanteil der Emissionen verursacht. Die Gesamtemissionen des Würzburger Hauses ohne Energieanlagen betragen 288 t CO_2.

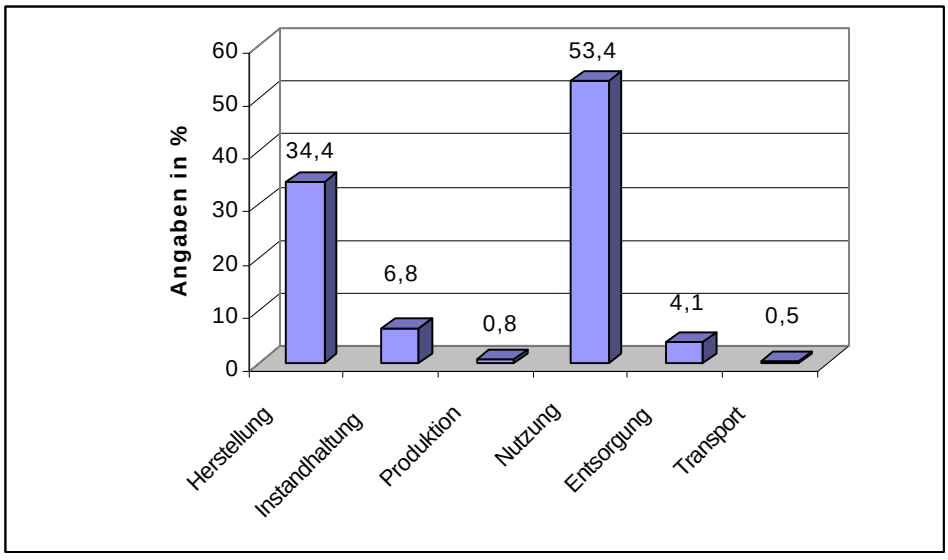


Abbildung 53: Prozentualer Anteil der Lebensabschnitte an den gesamten CO_2-Emissionen des Würzburger Hauses

Das Modul Nutzung der Energiebilanz hatte jedoch mit >70% einen deutlich höheren Einfluss. In der Kohlendioxidbilanz dieses Hauses werden ca. 50% aller Emissionen verursacht.

Bei der Herstellung und der Instandhaltung des Hauses entstehen ca. 41% der treibhausrelevanten Kohlendioxidemissionen. Es zeigt sich wieder, dass eine Fokussierung auf die Nutzung des Hauses auch in der Kohlendioxidbilanz nicht als Referenzgröße für eine allgemeingültige Aussage dienen kann.

8.2.2.2. Würzburg Optimiert

Durch den Einsatz von Anlagen zur Nutzung von Solarenergie (Solaranlage: 9 m² und Photovoltaikanlage: 14 m²) kommt es zu einer deutlichen Reduzierung der Kohlendioxidemissionen über den gesamten Lebensweg um ca. 60 t auf 227 t CO_2.
Die Abbildung 54 verdeutlicht die prozentuale Verteilung der Kohlendioxidemissionen des optimierten Würzburger Hauses. Die Hauptemissionen entstehen in den Lebensphasen Herstellung und Instandhaltung (ca. 59%).

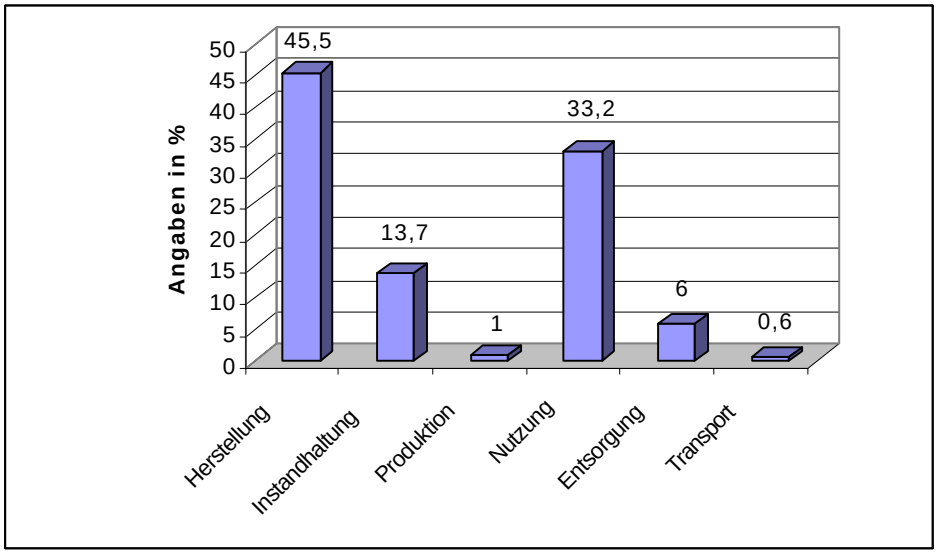


Abbildung 54: Prozentualer Anteil der Lebensabschnitte an den gesamten CO_2-Emissionen des Würzburger Hauses

8.2.2.3. Bremen Normal

Die CO_2-Emissionen des Bremer Hauses sind geringer als die des Würzburger Hauses. Die geringe Betriebsenergie des Hauses ist in Folge eines hoch gedämmten Wandaufbaus niedriger, zudem ist die beheizte Wohnfläche des Hauses um 40 m² kleiner.
Über den gesamten Lebensweg emittiert das Bremer Haus 211 t CO_2.
Der prozentuale Anteil des Moduls Nutzung ist hierdurch verringert und beträgt knapp 50%.

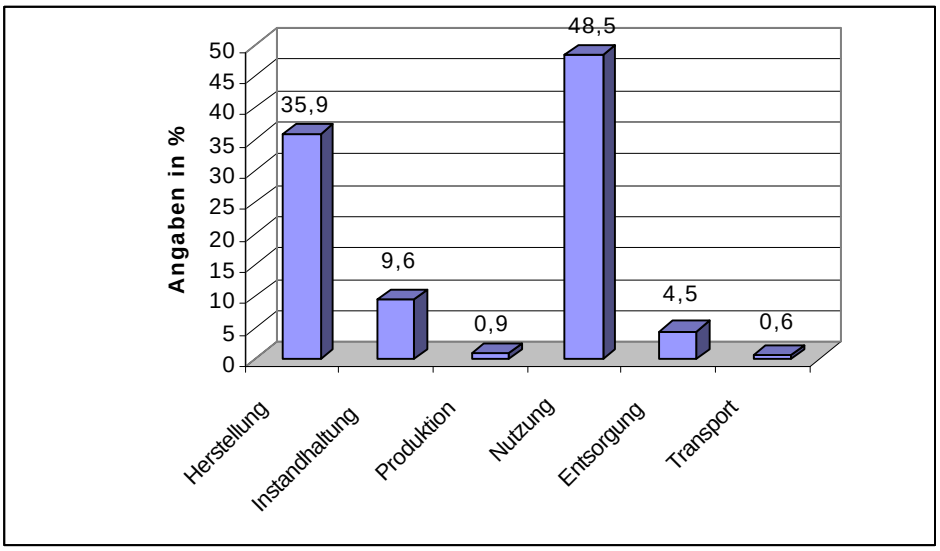


Abbildung 55: Prozentualer Anteil der Lebensabschnitte an den gesamten CO_2-Emissionen des Bremer Hauses

8.2.2.4. Bremen Optimiert

Durch die Verwendung von Energieanlagen können die Gesamtemissionen des Bremer Hauses um 53 t auf 158 t CO_2 reduziert werden. Während der Herstellung und der Instandhaltung des Hauses entstehen 70% der CO_2-Emissionen.

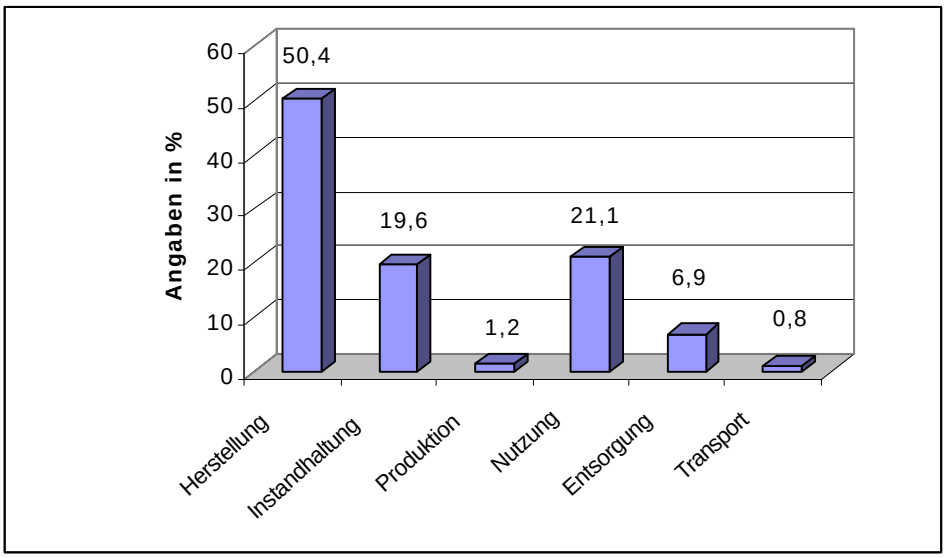


Abbildung 56: Prozentualer Anteil der Lebensabschnitte an den gesamten CO_2-Emissionen des Bremer Hauses

8.2.3. CO_2-Emissionen bei der Herstellung der Baustoffe

Der Einfluss der Module Herstellung und Instandhaltung auf die Kohlendioxidemissionen ist im Niedrigenergiebau sehr groß. Hier können zwischen 30 und 70% der CO_2-Emissionen entstehen. Durch den Einsatz von Energieanlagen erhöht sich der Anteil noch. In Tabelle 49 sind verschiedene Kollektorflächen für die betrachteten Häuser berechnet und es werden die Auswirkungen auf die Module der Produktherstellung gezeigt. Die Emissionen über den gesamten Lebensweg verhalten sich gegenläufig zu der dargestellten Entwicklung, je größer die Kollektorflächen dimensioniert werden, desto geringer werden die Gesamtemissionen.

Tabelle 49: CO_2-Emissionen bei der Herstellung und Instandhaltung der Gebäude

	Würzburg	**Bremen**
	CO_2-Emissionen bei der Herstellung und Instandhaltung der Baustoffe [kg]	CO_2-Emissionen bei der Herstellung und Instandhaltung der Baustoffe [kg]
NORMAL:	101.260 + 20.066 **= 121.326 kg**	77.957 + 20.489 **= 98.446 kg**
OPTIMIERT:		
Solar 1 m²	104.337 + 26.662	81.034 + 27.094
PV 1 m²	**= 130.999 kg**	**= 108.128 kg**
Solar 2 m²	104.641 + 27.449	81.338 + 27.881
PV 3 m²	**= 132.090 kg**	**= 109.219 kg**
Solar 4 m²	105.338 + 29.291	82.035 + 29.723
PV 8 m²	**= 134.629 kg**	**= 111.758 kg**
Solar 7 m²	106.071 + 31.115	82.768 + 31.547
PV 12 m²	**= 137.186 kg**	**= 114.315 kg**
Solar 7 m²	106.250 + 31.652	82.947 + 32.084
PV 14 m²	**= 137.902 kg**	**= 115.031 kg**
Solar 8 m²	106.375 + 31.902	Die Anlagengröße deckt den Ener-
PV 14 m²	**= 138.277 kg**	giebedarf[55] des Hauses.
Solar 9 m²	106.500 + 32.152	Die Anlagengröße deckt den Ener-
PV 14 m²	**= 138.652 kg**	giebedarf des Hauses.
Holzheizung	104.248 + 23.054	80.945 + 23.486
Solar/PV 0/0	**= 127.302 kg**	**= 104.431 kg**
Holzheizung	109.238 + 34.640	85.935 + 35.072
Solar/PV 7/14	**= 143.878 kg**	**= 121.007 kg**
Holzheizung	109.488 + 35.140	Optimum Strom und Warmwasser
Solar/PV 9/14	**= 144.628 kg**	erreicht

[55] Warmwasser- und Lüftungsenergie

8.2.4. Bedeutung der einzelnen Baustoffe

Der Einsatz verschiedener Baustoffe kann die Kohlendioxidbilanz eines Hauses maßgeblich beeinflussen. Tabelle 50 verdeutlicht den Einfluss der Baustoffe an den CO_2-Emissionen der Herstellung und der Instandhaltung.

Betrachtet man die durch die Verwendung des Baustoffes resultierenden CO_2-Emissionen, so muss die Kohlendioxidneutralität von Holz- und Holzprodukten ebenfalls berücksichtigt werden.

Einige wenige nicht regenerative Baustoffe, wie zum Beispiel Kunststoffe, bestehen ebenfalls aus dem chemischen Baugerüst Kohlenstoff. Die Verwendung dieses Baustoffes könnte folglich als Kohlenstoffspeicher bezeichnet werden. Da die Zeit der Entstehung des Baustoffes jedoch sehr lang ist und es sich demzufolge um einen, in absehbarer Zeit, nicht wiederholbaren Prozess handelt, werden diese Baustoffe nicht als Kohlenstoffspeicher bezeichnet.

Nachwachsende Rohstoffe werden in deutlich kürzerer Zeit „produziert“ und können verwendet werden.

Der Baum beispielsweise benötigt bis zur Nutzung im Bausektor zwischen 25[56] und 80[57] Jahre, die Bindung und Speicherung von Kohlendioxid geschieht sehr viel kürzer als bei allen anderen Baustoffen. Während eines 60 jährigen Nutzungszeitraums eines Hauses wächst der in dem Haus verbaute nachwachsende Rohstoff folglich wieder nach. Diese Form der Kohlendioxidneutralität kann von keinem anderen Baustoff erreicht werden.

Die Tabelle 50 betrachtet die CO_2-Emissionen des Hauses NORMAL und stellt die in den Baustoffen gebundene Menge an Kohlendioxid entgegen.

Es zeigt sich, dass in den nachwachsenden Baustoffen des Bremer Hauses mehr Kohlendioxid gespeichert ist, als bei der Herstellung und Instandhaltung der gesamten Baustoffe[58] emittiert wird.

[56] Durchforstungsholz für Holzwerkstoffen

[57] Massivholz für Holzständer, Brettschichtholz und Konstruktionsvollholz

[58] nachwachsend und mineralisch

Tabelle 50: Mengenmäßige Erfassung der CO_2-Emissionen der einzelnen Baustoffen an den Emissionen für die Herstellung und den Instandhaltung der beiden Häuser über 60 Jahre

Baustoff	Würzburg	Bremen
	[kg CO_2]	[kg CO_2]
Zementgebundene Holzspanplatten [1)]	8.132	8.870
Holzfaserdämmplatten	341	620
Nadelsperrholz	5.240	
Nadelholz	3.084	13.131
Zellulosedämmung	2.551	2.874
TGI Träger		354
Trittschalldämmung		372
Spanplatten		616
OSB	2.590	3.419
Gipskartonplatten	3.845	3.752
Betonteile		
Fundamente	20.951	13.602
Gehwegplatten	11.340	
Hohllochziegel	211	
Stahl	28.750	17.000
Metall	2.289	1.716
Dacheindeckung [1)]	7.020	5.400
Fenster [1)]	24.980	26.724
CO_2-Emissionen:	**121.324 kg**	**98.450 kg**
gespeichertes CO_2 in den Baustoffen:	**91.810 kg**	**150.116 kg**

[1)]: Bauteil wird während der Nutzung aus Gründen der Materialermüdung einmal ausgetauscht.

Die Abbildung 57 gibt den prozentualen Anteil der verbauten Baustoffe an den CO_2-Emissionen der Gebäude wieder. Die Abbildung bezieht sich auf den Normalzustand der Häuser.

Es wird ersichtlich, dass das Würzburger Haus ca. 20.000 kg mehr Kohlendioxid bei der Herstellung der Baustoffe emittiert. Dies begründet sich überwiegend in dem hohen Verbrauch der Baustoffe Beton und Stahl.

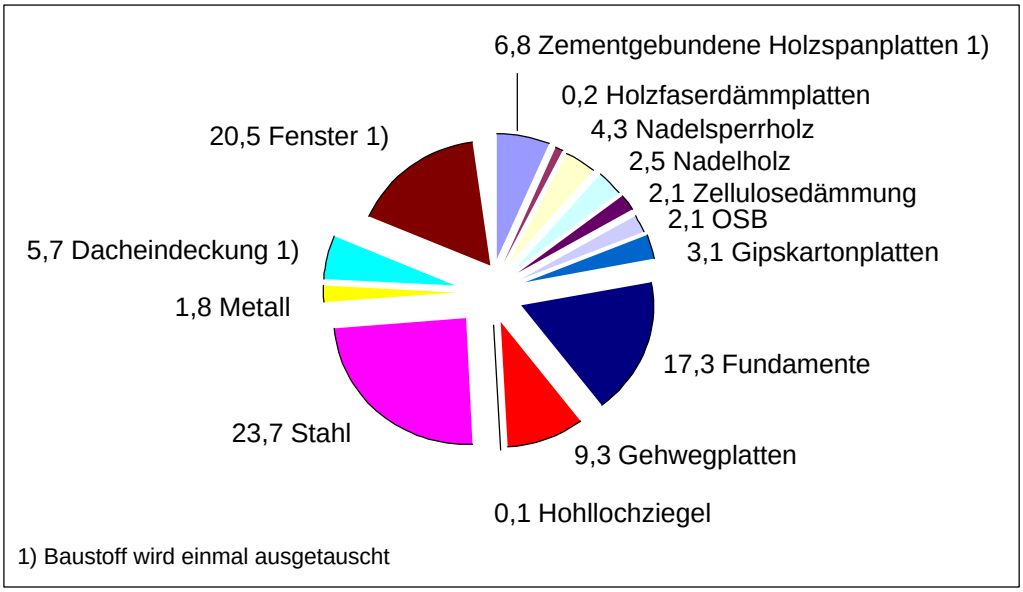


Abbildung 57: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an den CO_2-Emissionen der Herstellung und der Instandhaltung des Hauses Würzburg ohne Energieanlagen

Für das Bremer Haus ergibt sich folgende Verteilung der CO_2-Emissionen an dem Herstellungsbedarf der Baustoffe.

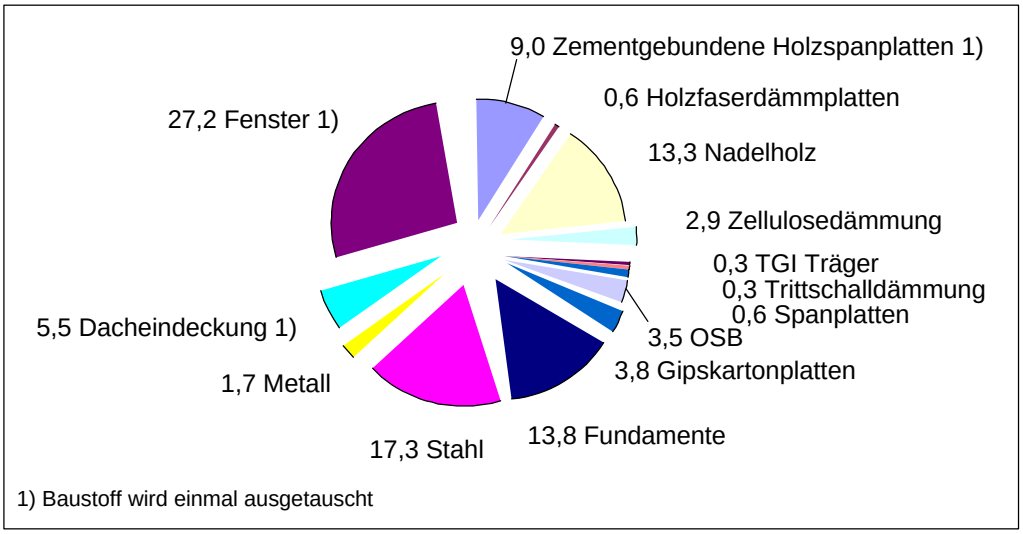


Abbildung 58: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an den CO_2-Emissionen der Herstellung und der Instandhaltung Bremen ohne Energieanlagen

Unterteilt man die Baustoffe wie bei der Energiebilanz in verschiedene Kategorien, so zeigt sich, dass die mineralischen Baustoffe einen sehr großen Einfluss auf die Kohlendioxidbilanz haben.

Tabelle 51: Prozentualer Anteil verschiedener Baustoffklassen der CO_2-Emissionen

	Würzburg [%]	**Bremen [%]**
nachwachsende Rohstoffe	~ 11	~ 21
Fenster	~ 20	~27
andere Werkstoffe	~ 10	~ 13
Beton und Stahl	~ 58	~ 39

Als Fazit kann zusammengefasst werden:

- Bei der Herstellung eines Holzhauses kann in den nachwachsenden Baustoffen mehr Kohlendioxid gespeichert sein, als bei die Herstellung und Instandhaltung des gesamten Hauses emittiert wird.
- Holz als Kohlendioxidspeicher und Senke emittiert während der Herstellung weniger Kohlendioxid als fossile Baustoffe.
- Der Einfluss von Fenstersystemen auf die Kohlendioxidbilanz ist relativ groß.

8.3. Einfluss der Transportentfernung

Auf dem deutschen Baumarkt agieren verschiedene Fertighaushersteller, die an einem Produktionsort die Vorfertigung der Gebäude betreiben. Dieser zentrale Standort bedingt die Frage des Einflusses der Transportentfernungen auf die Gesamtenergiebilanz und die Kohlendioxidemissionen. Die Fertighausindustrie mit ca. 30% Marktanteil am Holzhausbau zeichnet sich in der Regel durch einen Produktionsstandort aus. Die produzierten Bauelemente werden per LKW zu dem Errichtungsort/Baustelle transportiert. Die Transportentfernung von der Produktion zu dem Errichtungsort schwankt folglich innerhalb Deutschlands stark. Die Herkunft der verwendeten Materialien kann ebenfalls Auswirkungen auf die Bilanz eines Hauses haben. Im Blockhausbau ist es üblich, dass die Bohlen aus Skandinavien importiert werden, dies erhöht den Einfluss des Transportes. Die in Deutschland ansässigen Kleinbetriebe produzieren ihre Häuser für den regionalen Markt, die Transportentfernung von der Produktion zum Errichtungsort ist gering.
Für eine Betrachtung der Transportentfernungen werden drei verschiedene Annahmen getroffen, welche in der Entfernung willkürlich getroffen wurden. Für die Einzelbetrachtung eines Hauses muss der Planer Durchschnittsentfernungen ermitteln.

- Annahme 1: kurze Transportwege
- Annahme 2: mittlere Transportentfernungen
- Annahme 3: weite Transportentfernungen

Die Tabelle 52 definiert die betrachteten Transportentfernungen. Die Berechnungen wurden für die Normal-Variante des Bremer Hauses durchgeführt.

Tabelle 52: Definition der Transportentfernungen für die getroffenen Annahmen

Transportstrecke			kurze Wege [km]	mittlere Wege [km]	weite Wege [km]
Holzhersteller	→	Produktion	10	40	200
Zusatzstoffe	→	Produktion/Baustelle	8	35	125
Fenster	→	Produktion/Baustelle	20	60	350
Produktion	→	Baustelle	5	28	75
Baustelle	→	Entsorgung	15	60	250

Die Auswirkungen dieser angenommenen Transportentfernungen für das Modul Transport werden in der Tabelle 53 verdeutlicht.

Tabelle 53: Auswirkung der Transportentfernungen auf die Gesamtbetrachtung des Bremer Hauses

	Energieeinsatz [MJ]	CO_2-Emissionen [kg]
kurze Wege	12.141	859
mittlere Wege	50.693	3.585
weite Wege	205.602	14.539

Kurze Transportentfernungen sind mit einem geringeren Energieeinsatz verbunden. Die Kohlendioxidemissionen steigen bei weiten Transportentfernungen an.

8.3.1. Energie

Die folgenden Tabellen (54 und 55) verdeutlichen den prozentualen Anteil des Moduls Transport. Es wird der Einfluss auf den Normal- und den Optimierten Hausbau verdeutlicht.

Tabelle 54: Einfluss der Transportentfernungen auf den Gesamtenergiebedarf des Bremer Hauses

	Annahme 1 [MJ]	**Annahme 2 [MJ]**	**Annahme 3 [MJ]**
Gesamtenergie:			
Normal:	2.554.337	2.592.889	2.747.799
Optimiert:	1.892.904	1.931.457	2.086.366
Modul Transport	12.141	50.693	205.602
	Prozent [%]	**Prozent [%]**	**Prozent [%]**
Normal:	0,4 %	1,9 %	7,5 %
Optimiert:	0,6 %	2,6%	9,8 %

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die Transportentfernung bei sehr weiten Transportwegen bis zu 10% an den Gesamtemissionen beteiligt sein kann.

8.3.2. Kohlendioxid

Der Einfluss der Transportentfernungen auf die Kohlendioxidbilanz eines Hauses wird in Tabelle 55 dargestellt.

Tabelle 55: Einfluss der Transportentfernungen auf die CO_2- Gesamtemissionen

	Annahme 1 [kg CO_2]	**Annahme 2 [kg CO_2]**	**Annahme 3 [kg CO_2]**
CO_2-Emissionen:			
Normal:	216.219	218.946	229.900
Optimiert:	163.945	166.671	177.625
Modul Transport	859	3.585	14.539
	Prozent [%]	**Prozent [%]**	**Prozent [%]**
Normal:	0,4 %	1,6 %	6,3 %
Optimiert:	0,5 %	2,1%	8,2 %

Ähnlich der Energiebetrachtung ist der Einfluss weiter Transportentfernungen auf die Kohlendioxidbilanz. Beispielsweise kann eine ausgeglichene Kohlendioxidbilanz eines Hauses (Positivhaus) durch weite Transportentfernungen negativ werden. Ein vergleichbares Gebäude, errichtet in der Nähe des Herstellers wird eine deutlich bessere Kohlendioxidbilanz aufweisen.

Zusammenfassend kann gesagt werden:
Es zeigt sich, dass die Transporte einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf und die Gesamtemissionen haben. Auf das Modul Transport wirken verschiedene Faktoren ein:

- Die Transportentfernungen an sich,
- die Größe des Hauses und
- die verbauten Baustoffe in dem Gebäude.

Dieser Abschätzung ist auch zu entnehmen, dass ein regionaler Anbieter von Gebäuden gesamtheitlich Vorteile gegenüber weiter entfernten Herstellern besitzt.

8.4. Optimierung des Bremer Hauses

Bei dem Haus Bremen wurde der Versuch unternommen, die Kohlendioxidbilanz durch den vermehrten Einsatz von Holz und Holzprodukten und durch die Reduzierung des Betriebsenergiebedarfs positiv zu beeinflussen.

Die optimierte Variante des Bremer Hauses **(Bremen II)** ist als Passivenergiehaus geplant worden. In dem Bremer Haus I wurden Kastenfenster mit einer Zweischeibenisolierverglasung eingebaut. In das Bremer Haus II wurde dieselben Fensterabmessungen, jedoch als Dreischeibenisolierglas mit entsprechenden Wärmewerten eingebaut. In die Wände wurden 1.300 kg mehr Zellulose eingeblasen als in Bremen I. Der Anteil an Brettstapelelementen wurde um 200 kg erhöht. Der Betriebsenergiebedarf von Bremen II reduziert sich in Folge dieser Gebäudeoptimierung und teilt sich folgendermaßen auf:

- Heizenergiebedarf: 9,7 kWh/m²Jahr
- Warmwasserenergiebedarf: 15,82 kWh/m²Jahr
- Lüftungsenergiebedarf 6,3 kWh/m²Jahr
- Gesamtenergiebedarf: 31,9 kWh/m²Jahr

Der niedrige Heizenergiebedarf von 9,7 kWh/m² und Jahr während der Nutzung wird bei dieser Variante durch interne und solare Wärmegewinne gedeckt. Es ist folglich kein zusätzliches Heizmedium nötig. In die Berechnungsgrundlage muss demzufolge ein Heizenergiebedarf von 0 MJ eingegeben werden.

MODULE		Energie		CO2-Emissionen
Herstellung	Normal:	862.150 MJ	Normal:	83.396 kg
	Optimiert:	907.784 MJ	Optimiert:	87.903 kg
Errichtung		12.600 MJ		1.953 kg
Instandhaltung	Normal:	188.285 MJ	Normal:	25.429 kg
	Optimiert:	298.428 MJ	Optimiert:	35.691 kg
Nutzung	Normal:	911.430 MJ	Normal:	74.401 kg
	Optimiert:	213.030 MJ	Optimiert:	19.544 kg
Rückbau	Normal:	52.522 MJ	Normal:	5.441 kg
	Optimiert:	60.311 MJ	Optimiert:	6.180 kg
Transport		19.362 MJ		1.369 kg
	Gesamtenergiebedarf:	2.046.348 MJ	CO2-Gesamt:	191.989 kg
	Optimiert:	1.511.514 MJ	Optimiert:	152.641 kg
	Gespeicherte Energie:	1.535.500 MJ	Gespeichertes CO2:	153.633 kg
	Nutzbare Energie:	1.228.400 MJ	Gebundenes C:	42.676 kg
		Energiebilanz		CO2-Bilanz
	Normal:	817.948 MJ	Normal:	38.356 kg
	Optimiert:	283.114 MJ	Optimiert:	-992 kg

Abbildung 59: Ergebnisdarstellung Bremen II (Solar 6 m² und PV 10 m², Erdgas)

Die Darstellung der Ergebnisse wird wie für das Würzburger und Bremer Haus in eine Einzelbetrachtung des Energiebedarfs und eine Einzelbetrachtung der Kohlendioxidemissionen unterteilt.

8.4.1. Energie

Der Betriebsenergiebedarf des Bremer II Hauses bezüglich Warmwasserbedarf und Lüftungsenergiebedarf ist identisch mit dem Bremer Haus. Für eine Optimierung des Hauses werden folglich 7 m² Solaranlage und 14 m² Photovoltaikanlage verwendet. Der geringe Heizenergiebedarf (9,7 kWh/m²a) von Bremen II deckt sich durch interne und solare Energiegewinne [Bartolles, 2001], es wird demzufolge kein thermischer Energieträger benötigt.
Die energetische Betrachtung des Hauses über den gesamten Lebensweg ist in der Tabelle 56 dargestellt und unterteilt sich in den Bedarf des Gebäudes ohne Energieanlagen (NORMAL) und in den Bedarf, der bei der Verwendung von regenerativen Energiequellen entsteht (OPTIMIERT).

Tabelle 56: Darstellung der einzelnen Module an dem Gesamtenergiebedarf NORMAL und OPTIMIERT (Bremen II)

Modul	**Energie**	**Energie (7 m² Solar; 14 m² PV)**
	$[MJ]_{Primärenergie}$ **NORMAL**	$[MJ]_{Primärenergie}$ **OPTIMIERT**
Herstellung	862.150	915.913
Instandhaltung (Materialaustausch)	188.285	320.586
Gebäudemontage (Produktion)	12.600	12.600
Betriebsenergiebedarf	911.450	54.630
Entsorgung	52.522	61.825
Transport	19.362	19.362
Gesamtbedarf:	**2.046.348**	**1.384.915**
Gespeicherte Menge über 60 Jahre:	**1.535.500**	**1.535.500**
Nutzbare Menge:	**1.228.400**	**1.228.400**
Bilanz („Nettobedarf“)	**817.948**	**156.515**

Das Bremer Haus I hat während des Lebensweges einen Energieverbrauch von 2,5 Mio. MJ. Durch eine Optimierung des Hauses durch den Einsatz von höherwertigen Fenstersystemen

und einer geringfügigen Verbesserung des Wandaufbaus kann der Gesamtenergiebedarf um 0,5 Mio. MJ auf 2,04 Mo MJ reduziert werden.
Durch eine fast vollständige Bereitstellung der Warmwasser- und Lüftungsenergie mit Energieanlagen kann der Gesamtenergiebedarf weiter reduzier werden, so dass über den gesamten Lebensweg, also über 60 Jahre, noch 1,3 Mio. MJ aufgewendet werden müssen.
Bremen II ist ein Passivenergiehaus mit einem sehr hohen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen. Hierdurch ist eine sehr große Menge an „Sonnenenergie“ in dem Gebäude gespeichert, welche bei einer thermischen Verwertung fossile Energieträger substituieren kann.
Die in dem Haus gespeicherte Energiemenge führt bei einem Wirkungsgrad der Verbrennung von 80% dazu, dass bei einer Ermittlung der „Nettobedarfs“ über den gesamten Lebensweg nur ca. 800.000 MJ zusätzliche Energie aufgewendet werden müssen.
Der prozentuale Anteil der einzelnen Module am Gesamtenergiebedarf wird in den Abbildungen 59 und 60 dargestellt.

8.4.1.1. Bremen II Normal

Der Gesamtenergiebedarf des Hauses beträgt 2,04 Mio. MJ. Der Hauptanteil dieser Energie wird für die Herstellung der Baustoffe benötigt, das Modul Nutzung über 60 Jahre verbraucht nicht einmal 50% des Gesamtenergiebedarfs.

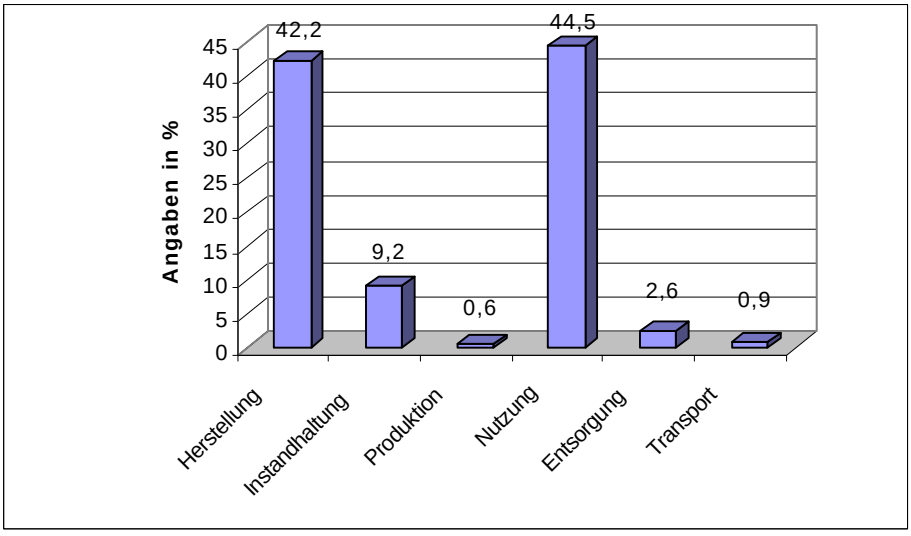


Abbildung 60: Prozentualer Anteil der einzelnen Module an der Gesamtenergie der Variante Bremen II (Normal)

8.4.1.2. Bremen II Optimiert

Durch die Optimierung reduziert sich der Gesamtenergiebedarf von Bremen II auf 1,3 Mio. MJ. Das entspricht einer Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs um 35%.
Das Modul Nutzung kann mit einem Anteil von ~4% des Gesamtenergiebedarfs praktisch vernachlässigt werden. Die Herstellung der Baustoffe trägt zu ~90% zum Gesamtenergiebedarf bei. Die Fokussierung auf den Zeitraum der Nutzung ist bei Passivhäusern folglich sinnlos.

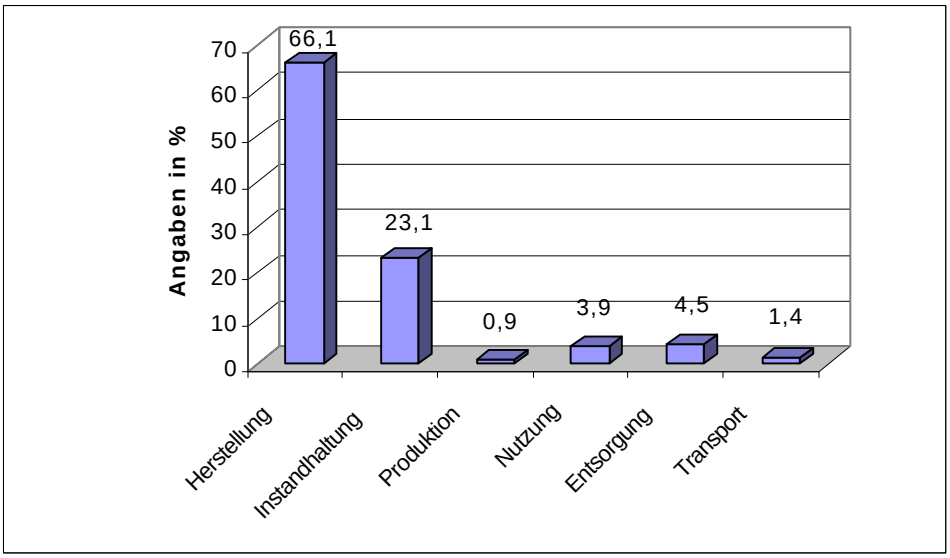


Abbildung 61: Prozentualer Anteil der einzelnen Module an der Gesamtenergie der Variante Bremen II (Optimiert)

8.4.1.3. Anteil der Baustoffe an dem Energiebedarf der Herstellung

In den Abbildungen 60 und 61 ist aufgezeigt worden, dass die Herstellung der Baustoffe für das betrachtete Passivhaus in den Lebensabschnitten Herstellung und Instandhaltung zwischen 50 und 90% des Gesamtenergiebedarfs verbrauchen.
Die Abbildung 62 verdeutlicht die Bedeutung der Baustoffe an dem Herstellungsenergiebedarf des Hauses.

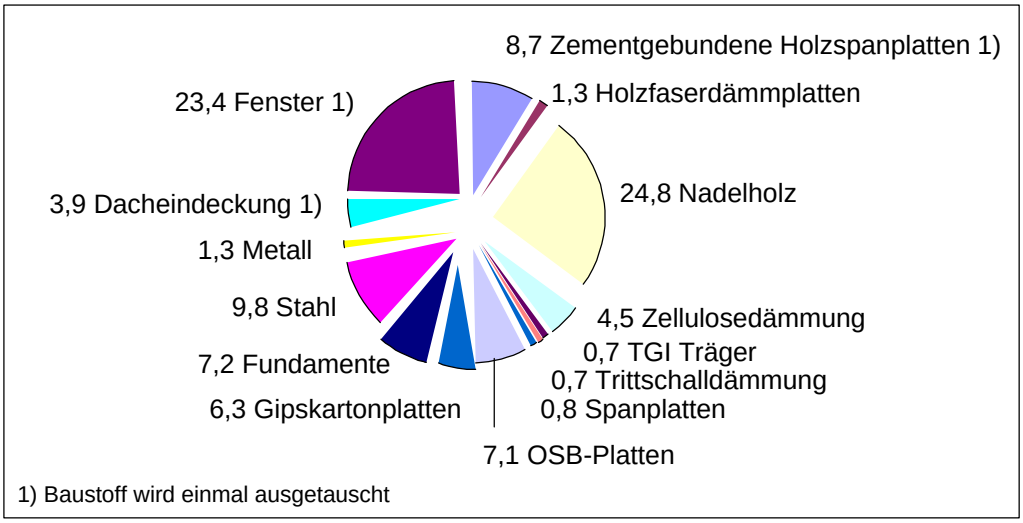


Abbildung 62: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an der Herstellungsenergie (Normal)

Die Fenstersysteme des Bremer Hauses I hatten einen prozentualen Anteil am Herstellungsbedarf von ca. 18%. Durch den Einsatz von passivhausgeeigneten Fenstern mit einer Dreischeibenisolierverglasung steigt der Energieanteil der Fenstersysteme auf 23,4% an. Zum Einen ist mit Hilfe dieser Fenster eine Reduzierung des Gesamtenergiebedarfes erreicht worden (NORMAL Bremen I: 2.5 Mio. MJ/ Bremen II: 2,0 Mio. MJ; OPTIMIERT Bremen I: 1,9 Mio. MJ/ Bremen II: 1,3 Mio. MJ), zum Anderen ist die Herstellung der Dreischeibenisolierverglasung um den Faktor 1,3 energieintensiver als die Herstellung der Zweischeibenisolierverglasung. Ein Austausch der Fenster während der Nutzungsperiode erhöht diesen Einfluss.

Der Einsatz von Brettstapelelementen führt auch bei Bremen II zu einem prozentual hohen Energieanteil des Nadelholzes. Andererseits erhöht sich durch diese Bauteile die gespeicherte Menge an Energie und Kohlendioxid in dem betrachteten Gebäude.

8.4.2. Kohlendioxid

Bei Passivhäusern wird angenommen, dass sie ihren Heizenergiebedarf durch interne und solare Wärmegewinne decken können. Aus diesem Grund wird häufig in diesen Häusern auf eine Heizungsanlage verzichtet. Dieses wird als Vorteil des Passivhauses in der Kohlendioxidbilanz des Gebäudes sichtbar, da hier kein herkömmliches Heizmedium benötigt wird, welches Kohlendioxid emittiert.

Bremen II als Passivhaus hat einen sehr geringen Heizenergiebedarf. Zusätzlich ist die eingebrachte Menge an Holz und Holzwerkstoffen sehr groß, so dass das Ziel, ein Positivhaus[59] zu erstellen, erreicht wird.

Die Tabelle 57 stellt die Kohlendioxidemissionen der einzelnen Lebensabschnitte von Bremen II über einen Lebensweg von 60 Jahren dar.

Tabelle 57: Darstellung der einzelnen Lebensabschnitte an den CO_2-Gesamtemissionen NORMAL und OPTIMIERT

Modul	**CO_2-Emissionen**	**CO_2-Emissionen (7 m² Solar; 14 m² PV)**
	[kg] **NORMAL**	[kg] **OPTIMIERT**
Herstellung	83.396	88.386
Instandhaltung (Materialaustausch)	25.429	37.015
Gebäudemontage (Produktion)	1.953	1.953
Nutzung	74.401	3.891
Entsorgung	5.441	6.270
Transport	1.369	1.369
Kohlendioxidemissionen über 60 Jahre:	**191.989**	**138.885**
entzogenes Kohlendioxid:	**153.633**	**153.633**
gebundener Kohlenstoff	**42.675**	**42.675**
CO_2-Bilanz über einen Zeitraum von 60 Jahren	**38.356 kg CO_2-Emissionen**	**- 14.748 kg CO_2-Emissionen**

[59] (die CO_2-Bilanz wird negativ)

Das betrachtete Haus hat mit der Ausstattung an Energieanlagen (Solar 7 m²/ PV 14 m²) eine negative Kohlendioxidbilanz von ca. 15 t CO_2 und ist dadurch ein **Positivhaus**.

Verändert man die Größe der Energieanlagen in der Berechnung, so kann für Bremen II eine ausgeglichen Kohlendioxidbilanz mit einer Solaranlagengröße von 6 m² und einer Photovoltaikanlagengröße von 10 m² erreicht werden. Die Kollektorfläche kann folglich um insgesamt 5 m² im Verhältnis zu der optimalen Energieanlagengröße reduziert werden. Hierdurch können die Erstellungskosten des Hauses verringert werden.
Eine Verbesserung durch den Einsatz einer Holzheizung kann für das Bremer Haus II nicht erreicht werden, da das Haus seinen Heizenergiebedarf nicht durch einen herkömmlichen Energieträger, sondern durch solare und interne Wärmequellen deckt.

Die Abbildungen 63 und 64 verdeutlichen die prozentuale Verteilung des Kohlendioxidemissionen auf die einzelnen Lebensabschnitte von Bremen II.

8.4.2.1. Bremen II Normal

Die Verteilung der Kohlendioxidemissionen verhält sich ähnlich der Energie. Das Modul Herstellung der Baustoffe verursacht den Hauptanteil der CO_2-Emissionen. Die Gesamtemissionen betragen 191 t CO_2.

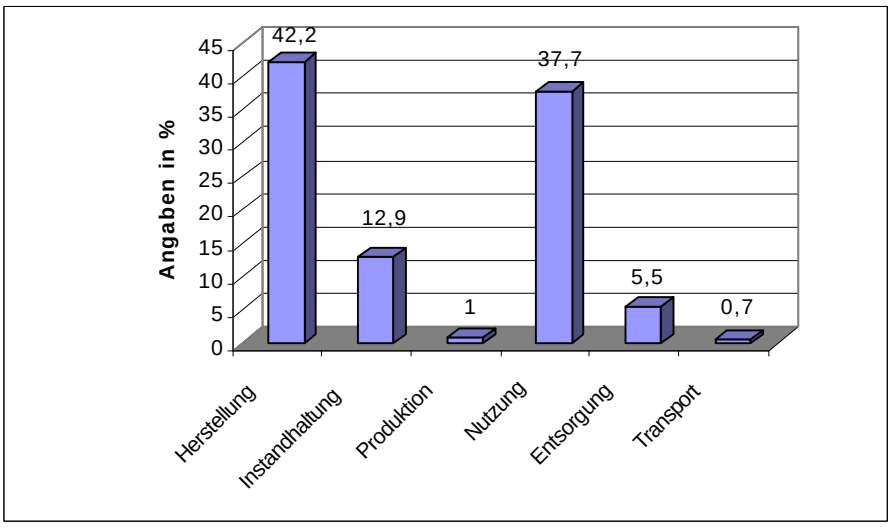


Abbildung 63: Prozentualer Anteil der Module an den CO_2-Gesamtemissionen Bremen II Normal

8.4.2.2. Bremen II Optimiert

Durch den Einsatz von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energie erhöht sich der Anteil der Kohlendioxidemissionen der Herstellung und Instandhaltung. Die Gesamtemissionen reduzieren sich jedoch um 53 t auf 138 t CO_2.

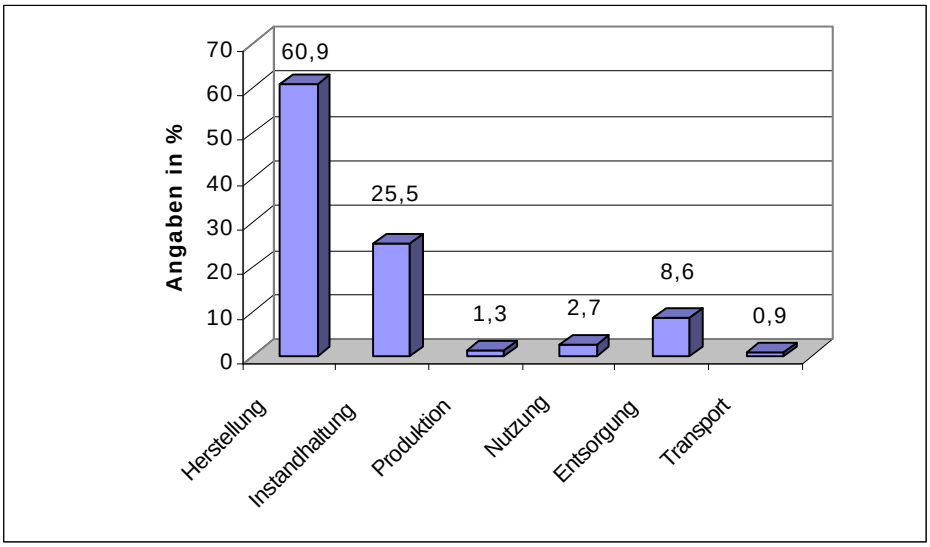


Abbildung 64: Prozentualer Anteil der Module an den CO_2-Gesamtemissionen Bremen II Optimiert

8.4.2.3. Anteile der Baustoffe an den CO_2-Emissionen

Bei der Betrachtung der Häuser Würzburg und Bremen hat sich gezeigt, dass die mineralischen Baustoffe prozentual den höchsten Anteil an den CO_2-Emissionen der Herstellung haben. Die Fenster hatten mit ca. 23 % ebenfalls einen nicht geringen Anteil am Herstellungsenergiebedarf.

Bei dem Bremer Haus II haben die Fenster mit 32% der CO_2-Emissionen der Baustoffherstellung den höchsten Anteil (siehe Abbildung 65).

In dem Haus wurden zum Großteil Holzfenster mit einem Rahmen zum Öffnen eingebaut. Der große Einfluss der Fenster an den Emissionen zeigt allerdings die Konsequenz, dass der Anteil der Fenster mit Rahmen verkleinert werden kann. Festverglaste Fenster könnten eine deutliche Verbesserung darstellen, da der Rahmenanteil geringer ist und deshalb weniger baustoffbedingte Emissionen auftreten.

Der natürliche Luftaustausch durch ein Öffnen der Fenster wird im Passivhausbau durch eine kontrollierte Be- und Entlüftung ersetzt. Die Fensterindustrie erstellt aufwendige Konstruktionen, um einen geringen Wärmedurchgangskoeffizienten zu erreichen. Die Problemzone ist der Fensterflügel am Übergang zum Fensterrahmen. Wenn festverglaste Fenster

verwendet werden, können zum Einen bessere Wärmedurchgangskoeffizienten erreicht werden, zum Anderen würden sich der Herstellungsenergiebedarf und die Kohlendioxidemissionen der Baustoffherstellung verringern.

Die Gesamtbilanz des Hauses könnte verbessert werden.

Bei der Herstellung und Instandhaltung der Baustoffe werden 108 t Kohlendioxid emittiert (NORMAL). In den Baustoffen ist jedoch 153 t CO_2 gespeichert.

Die Abbildung 65 verdeutlicht den prozentualen Anteil der verbauten Baustoffe an den Emissionen der Herstellung.

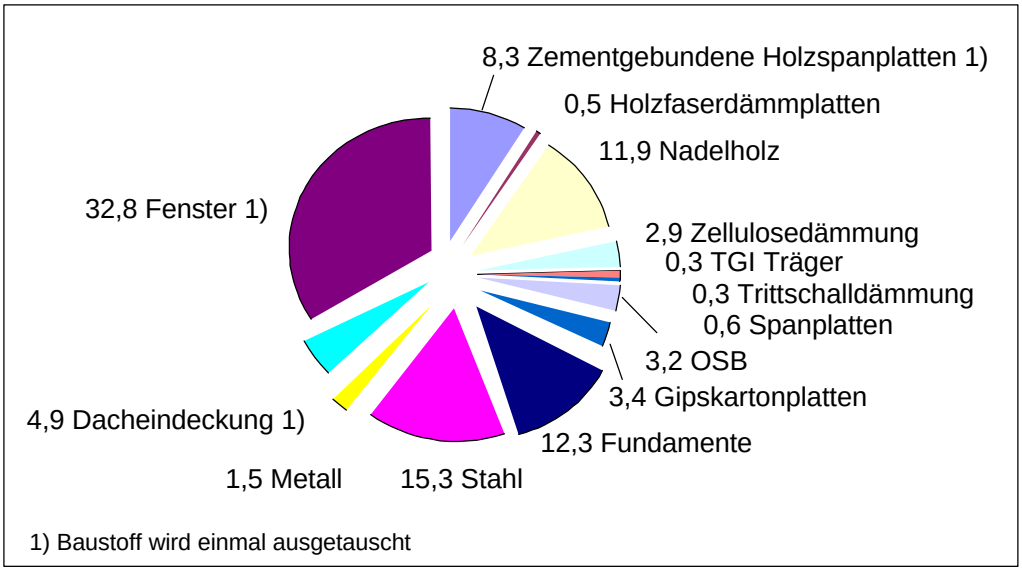


Abbildung 65: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an den CO_2-Emissionen der Herstellung und der Instandhaltung von Bremen II ohne Energieanlagen

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Das Modul „Herstellung der Baustoffe“ ist hauptverantwortlich für den Gesamtbedarf eines Passivhauses.
- Die Fokussierung auf die Nutzung des Hauses ist bei energieoptimierten Gebäuden nicht sinnvoll und besitzt ganz besonders bei Passivhäusern keine wissenschaftliche Grundlage.
- Die Erstellung von Häusern mit einer negativen Kohlendioxidbilanz über den gesamten Lebensweges des Hauses ist möglich.
- Die in dem Gebäude gebundene Menge an Kohlenstoff kann sehr hoch sein.
- Dieser Kohlenstoff wird der Atmosphäre langfristig entzogen.

8.5. Ökobilanz

Das **Feld Ökobilanz** im entwickelten Programm ermittelt die energiebedingten Wirkungen in den Kategorien

- Treibhauseffekt,
- Versauerung,
- Überdüngung,
- Bildung von bodennahem Ozon.

Die Umrechnung der Gesamtenergie in die Wirkungskategorien ist, wie in dem Kapitel 6.6 beschrieben, mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Die Angaben für die Sensitivität der Werte resultieren aus dieser Unsicherheit.
In den Abbildungen 67, 69, 71 und 73 werden drei Energiepotentiale in Wirkungskategorien umgerechnet und dargestellt. Die angegebenen Werte zu den Wirkungskategorien beziehen sich auf:

- den Normal-Zustand der betrachteten Häuser
- den Zustand der höchsten Optimierung mit Solar- und Photovoltaikanlagen
- den Zustand der höchsten Optimierung mit Solar- und Photovoltaikanlagen und den Einsatz einer Holzheizung

Zwischen dem Normal-Zustand eines Hauses und dem Optimierten-Zustand gibt es je nach der Größe der verwendeten Energieanlagen verschiedene Emissionen. Die Gebäudeoptimierungen durch den Einsatz von Energieanlagen befinden sich zwischen den angegebenen Werten des Normal- und des Optimiert-Zustandes.
Die Festlegung auf einen Wert in den Abbildungen kann aus Gründen der Umrechnungssensitivität nicht stattfinden. Durch die gewählte Form der „Raute“ in den Darstellungen können Datenbereiche angegeben werden, die die Schwankungsbreite wiederspiegeln.

8.5.1. Treibhauspotential

Vereinfacht ausgedrückt bedeutet Treibhauseffekt die Erwärmung der Erdoberfläche durch in die Atmosphäre gelangende Gase. Durch die zunehmende industrielle Entwicklung der letzten Jahrzehnte ist die Konzentration an Gasen, die den Treibhauseffekt verursachen, stark angestiegen. Hauptverantwortlich an dem Treibhauseffekt sind die Spurengase Kohlendioxid (CO_2), Distickstoffmonoxid (N_2O), Methan (CH_4), Ozon (O_3) und die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW).

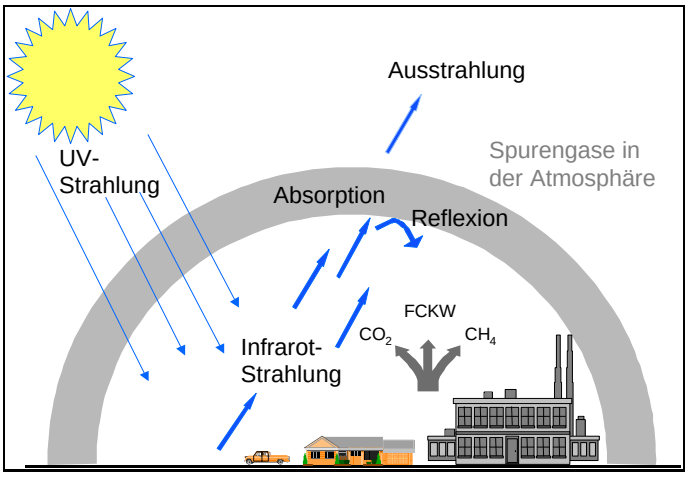


Abbildung 66: Graphische Darstellung des Treibhauseffektes [Gabi, 2000]

Das Global Warming Potential eines Spurengases setzt diese Gase in ein Verhältnis zum Kohlendioxid gleicher Masse. Die Berechnung des Treibhauspotentials erfolgt durch die Multiplikation der emittierten Menge eines Spurengases mit dem jeweiligen Treibhauspotential. Im Anschluss werden die Beträge addiert, so dass der Treibhauseffekt als Kohlendioxidäquivalente (CO_2- äq.) Zahl feststeht.

Die Abbildung 67 stellt das Treibhauspotential der betrachteten Gebäude über den gesamten Lebensweg dar.

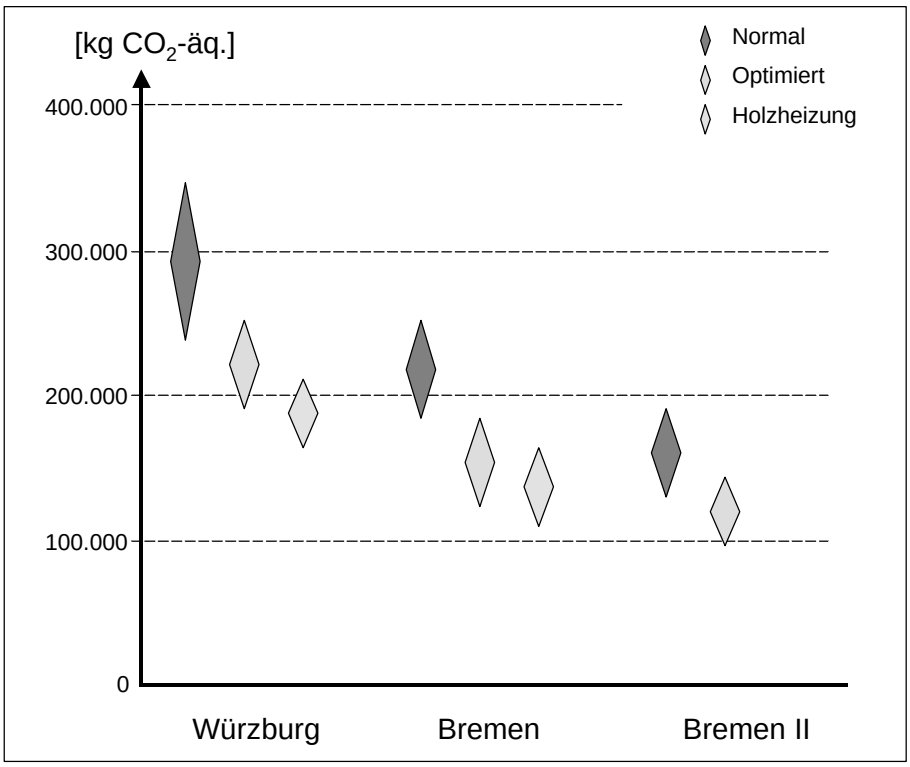


Abbildung 67: Vergleich der Häuser in der Wirkungskategorie Treibhauseffekt

Für die betrachteten Häuser wird ein Treibhauspotential zwischen 340.000 kg CO_2-äq. (Würzburg Normal) und 90.000 kg CO_2-äq. (Bremen II optimiert) ausgewiesen. Durch eine Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs kommt es zu einer deutlichen Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen. Der Einsatz einer Holzheizung verringert die Emissionen zusätzlich, da Holz als Energieträger kein fossiles Kohlendioxid emittiert. Die Wirkungskategorie „Treibhauseffekt“ kann hierdurch verbessert werden.
Das Haus Bremen II zeigt keine Verbesserung durch den Einsatz einer Holzheizung. Diese Tatsache ist darauf zurück zu führen, dass das Haus keinen zusätzlichen Energieträger außer der Sonne und den internen Wärmequellen zur Deckung des Heizenergiebedarfs benötigt, eine Holzheizung ist nicht erforderlich.
Das in dem Haus gebundene CO_2 wird in dieser Kategorie nicht berücksichtigt und dem emittierten CO_2 nicht entgegengestellt. Es kann folglich zu keinem negativen Treibhauspotential kommen.
Die entwickelte Berechnungsgrundlage ermittelt die Kohlendioxidemissionen (äq.) entlang des gesamten Lebensweges und erstellt eine Kohlendioxidbilanz in dem Feld ERGEBNISSE. Der gebundene Kohlenstoff wird mengenmäßig ermittelt den Kohlendioxidemissionen des gesamten Lebensweges in einer Kohlendioxidbilanz entgegengestellt. Ist diese Bilanz negativ, so ist in dem Haus mehr Kohlenstoff, bzw. Kohlendioxid, gespeichert, als über den gesamten Lebensweg emittiert wird. Eine Berücksichtigung der Kohlenstoffsenke Holz findet in den Berechnungen folglich statt.

8.5.2. Versauerung

Die Versauerung ist, wie der Treibhauseffekt auch, ein globales Umweltproblem. Sie erklärt sich durch die bei Verbrennungsprozessen freiwerdenden Mengen an Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxiden (NO_x) und anderen Stoffen.

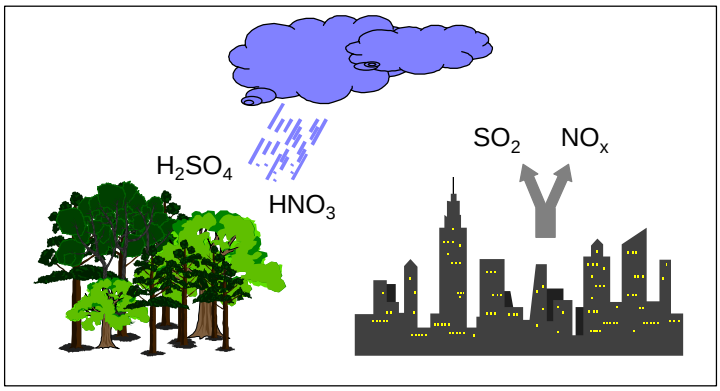


Abbildung 68: Vorgang der Versauerung [Speckels, 2001]

Gelangen diese Stoffe in die Atmosphäre, so wandeln sie sich in schweflige Säure und Salpetersäure um und kommen als saurer Regen zur Erde zurück. Es kommt zu einer Übersäuerung der Böden und der Oberflächenwasser.

Die Stoffe, die ein Versauerungspotential haben, werden in Schwefeldioxidäquivalenten ausgedrückt. Die Versauerung errechnet sich insofern durch Multiplikation der durch das Produkt emittierten Menge an Schwefeldioxid (SO_2), Ammoniak (NH_3), Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF), Schwefelwasserstoff (H_2S), Methan (CH_4) und Stickoxide (NO_x) mit ihrem jeweiligen Versauerungspotential und anschließender Addierung der Teilbeträge.

Holz als Energieträger emittiert während der thermischen Nutzung Stickoxid. Durch eine vollständige Verbrennung des Brenngutes (bei Einhaltung stöchiometrischer Verhältnisse, also ohne größeren Luftüberschuss) bei entsprechend hohen Temperaturen können diese Emissionen in gewissem Maß verringert werden. Die verwendete Verbrennungstechnologie ist von entscheidender Bedeutung. Erdgas emittiert bei der Verbrennung ebenfalls Stickoxide. Die Berechnungsgrundlage als ein allgemeines Tool kann die Verbrennungstechnologie nicht berücksichtigen. In der Wirkungskategorie wird folglich eine Gleichstellung der beiden Energieträger bezüglich der Emissionen von Stickoxiden angewendet.

Die Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs durch die Verwendung einer Holzheizung führt demzufolge nicht zu geringeren Stickoxidäquivalenten.

Die Abbildung 69 stellt die SO_2-Äquivalente der drei Gebäude dar.

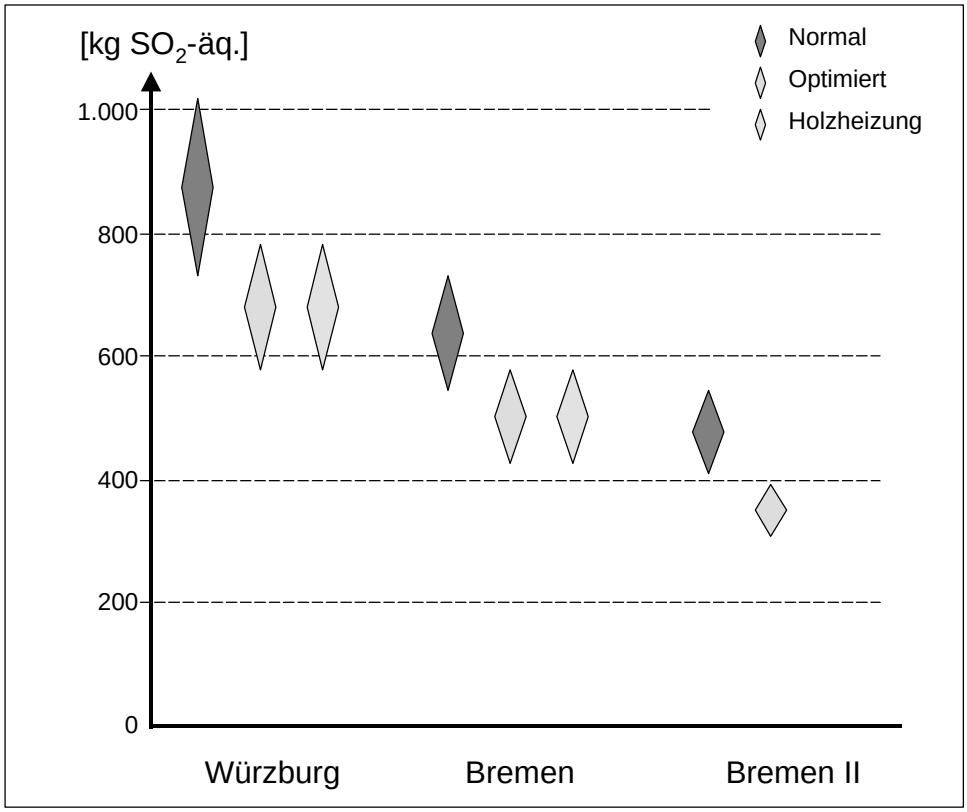


Abbildung 69: Vergleich der Häuser in der Wirkungskategorie Versauerung

Die Schwefeldioxid-Emissionen der betrachteten Gebäude schwanken zwischen 1.000 kg SO_2-äq und 250 kg SO_2-äq..
Die Wirkungskategorie Versauerung kann durch den Einsatz der Energieanlagen (Solar- und PV-Technik) deutlich verbessert werden, durchschnittlich um ca. 30%.
Generell kann für die Wirkungskategorie Versauerung folgende Aussage getroffen werden:

- Durch die Nutzung von Holz als Energieträger kommt es zu keiner Reduzierung der Schwefeldioxidäquivalente und damit zu keiner Verbesserung der Wirkungskategorie Versauerung im Verhältnis zu der Nutzung von Erdgas.
- Die Reduzierung der Gesamtenergie führt zu einer Verringerung der SO_2-äq Emissionen und damit zu einer geringeren Versauerung.

8.5.3. Überdüngung

Stoffe und Substanzen wirken in unterschiedlicher Weise auf ein Ökosystem ein. Sie können zum Beispiel die Böden beeinflussen, von denen die Menschheit profitieren will. Durch den Nährstoffeintrag in ein Ökosystem beginnen die Pflanzen mit der Bildung von Biomasse. Ein erhöhter Nährstoffeintrag führt zu einer Überdüngung des Ökosystems. Die Eutrophierung (EP) als Wirkungskategorie erfasst den übermäßigen Nährstoffeintrag auf ein System. Sie ist eine lokal wirkende Kategorie. Bezugsgröße für alle emittierten Stickstoff- und Phosphorverbindungen ist das Phosphatäquivalent PO_4^{3-}. Die Berechnung der Überdüngung erfolgt analog der anderen Wirkungskategorien durch Multiplikation der beteiligten Stoffe mit dem Äquivalenzfaktor und einer anschließenden Addition der Teilbeträge.

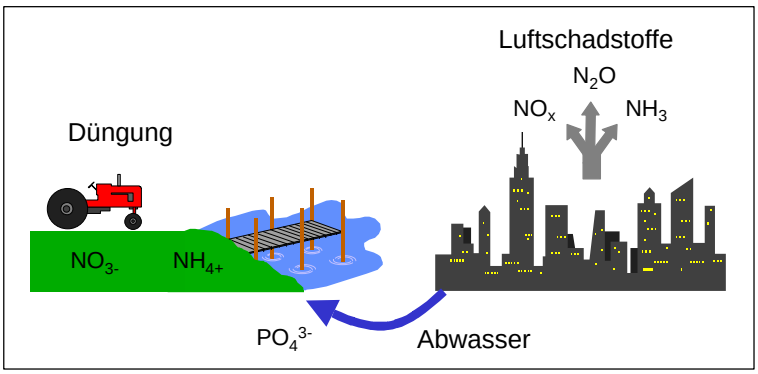


Abbildung 70: Vorgang der Überdüngung [Speckels, 2001]

Das Überdüngungspotential der betrachteten Gebäude ist in der Abbildung 71 dargestellt.

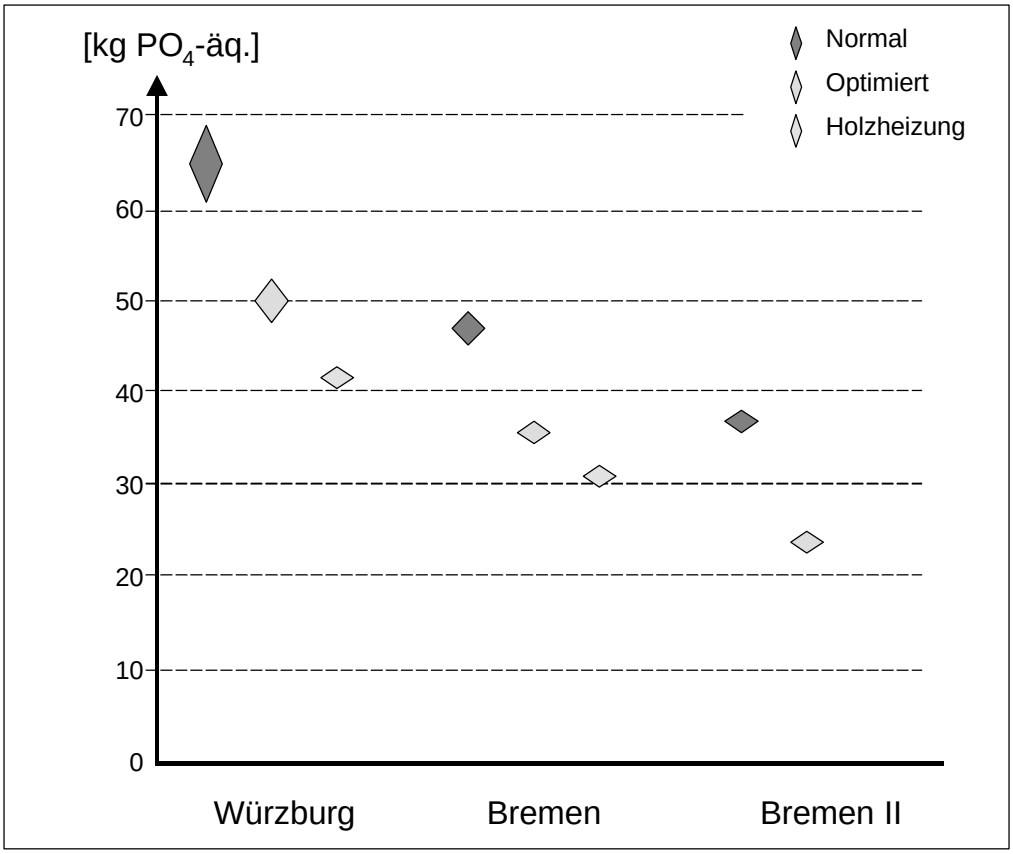


Abbildung 71: Vergleich der Häuser in der Wirkungskategorie Überdüngung

Durch die Herstellung der Häuser, den Betrieb über 60 Jahren und eine anschließende Entsorgung des Gebäudes kommt es zu Phosphoräquivalent-Emissionen von weniger als 80 kg.

Das Würzburger Haus verursacht die größte Menge an Emissionen, durch eine Reduzierung der Betriebsenergie mit Hilfe von Energieanlagen kommt es jedoch zu einer deutlichen Verbesserung der Wirkungskategorie Überdüngung.

8.5.4. Sommersmog (Bildung von bodennahem Ozon)

Die Hauptursache dieser auch als Sommersmog bezeichneten Umweltwirkung sind die Stickoxide und Kohlenwasserstoffe. Sie entstehen aus Abgasen der Industrie und der Kraftfahrzeuge. Die Stickoxide werden durch kurzwelliges Licht in Stickstoffmonoxid (NO) und atomaren Sauerstoff (O) umgewandelt. An den atomaren Sauerstoff lagert sich ein Sauerstoffmolekül (O_2) an und es entsteht Ozon (O_3).

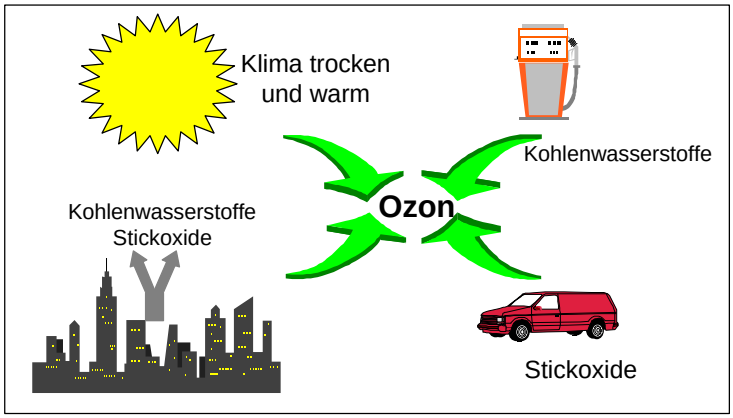


Abbildung 72: Vorgang der Bildung von bodennahem Ozon [Speckels, 2001]

Die Abbildung 73 stellt die Wirkungskategorie „Bildung von bodennahem Ozon“ der drei betrachteten Gebäude dar.

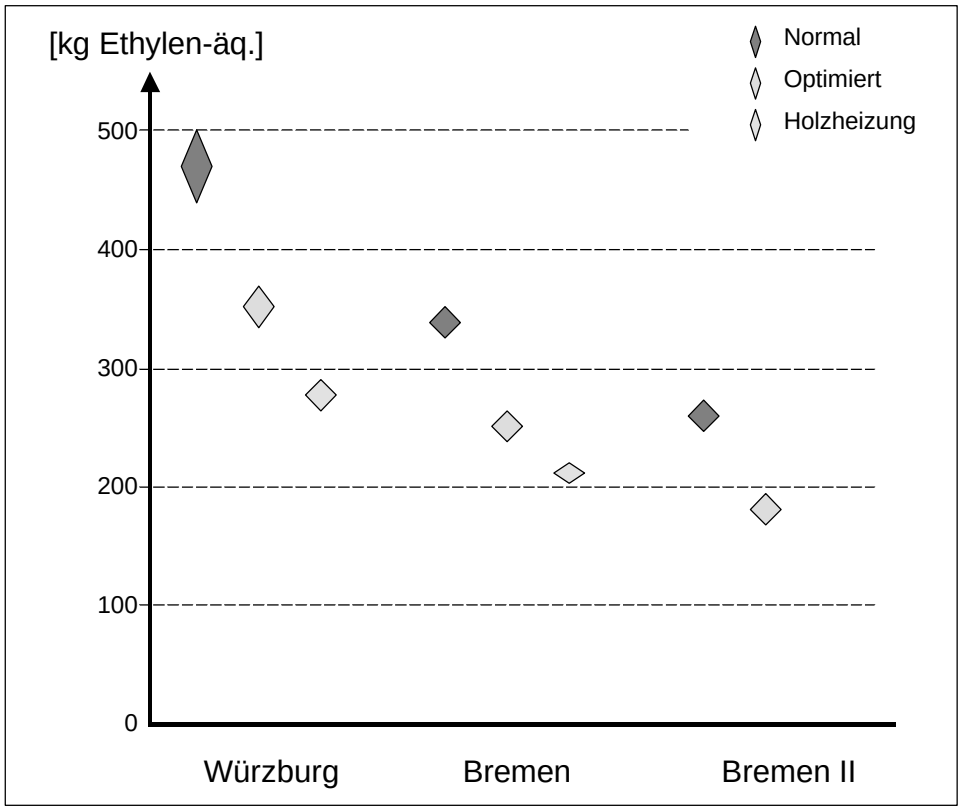


Abbildung 73: Vergleich der Häuser in der Wirkungskategorie Bildung von bodennahem Ozon

Die betrachteten Häuser verursachen über den gesamten Lebensweg zwischen 500 und 190 kg Ethylenäquivalente.

8.5.5. Vergleich mit Literaturwerten

Die Erstellung von Ökobilanzen für Wohngebäude erfordert in der Regel einen hohen Zeitaufwand, sodass bisher wenig ökologische Betrachtungen für komplexe Produkte, wie Gebäude, durchgeführt wurden. Die in dieser Studie erhobenen Daten können mit zwei Studien aus der Literatur vergleichend betrachtet werden. Hierbei handelt es sich um die Studie des Öko-Instituts von Quak (2001) und des IKP`s von Eyerer et al. (2000).
Ein ökologischer Vergleich von Gebäuden kann zur jetzigen Zeit jedoch noch nicht durchgeführt werden, da die Funktionale Einheit und der verwendete Bilanzraum nicht übereinstimmt.
Die erhobenen Daten können folglich lediglich dazu beitragen, Größenordnungen zu ermitteln und die in dieser Studie errechneten Werte zu überprüfen.

8.5.5.1. Studie Öko-Institut

Quak (2001, Anhang 4) führte eine ökologische Bewertung für verschiedene Niedrigenergiehäuser durch. Der betrachtete Lebensweg erstreckte sich auf 80 Jahre.
Die Wohngebäude sind massiv[60] gebaut worden und besitzen eine beheizte Wohnfläche von 177 – 200 m².
Die Detailplanung des Hauses und der Lebensphasen ist der Studie jedoch nicht zu entnehmen, eine Beschreibung kann hier folglich nicht erfolgen.
Die ökologische Bewertung wurde mit der Software „ECOPRO“ durchgeführt.

8.5.5.2. Studie IKP

Eyerer (2000, Seite 208 bis 221) betrachtet sowohl ein Einfamilienhaus als auch ein Mehrfamilienhaus über einen Lebensweg von 60 Jahren. Die Gebäude wurden in Massivbauweise erstellt, das EFH wies einen spezifische Heizwärmebedarf von 73 kWh/m²a bei einer Gebäudegrundfläche von 85 m², das MFH mit einer Gesamtwohnfläche von 864 m² hat einen Heizenergiebedarf von 52 kWh/m²a.
Für die ökologische Betrachtung wurde die Software „Build-it“ verwendet.

Die Ergebnisdarstellung beider Studie ist mit der durchgeführten Erhebung nicht vergleichbar, da die Betrachtung in Bauelementen (Außenwände, Innenwände, Dach etc.) und nicht über die verbauten Baustoffe als komplettes Haus durchgeführt wurde.

[60] Ausnahme Haus D: Holzständerbau mit Mineralwolle und Leichtziegel, beheizt mit Elektroöfen.

Der Vorteil dieser Betrachtung ist, dass die Bauelemente zueinander gewichtet werden können, nachteilig stellt sich aber dar, dass die Lebensphasen nicht erhoben und miteinander verglichen werden können. Der Einfluss der einzelnen Baustoffe am Herstellungsbedarf wurde nicht dargestellt, Optimierungspotential kann so nicht ermittelt werden.

8.5.5.3. Darstellung der Ergebnisse

Die Tabelle 58 fasst die erhobenen ökologischen Daten bisheriger Studien zusammen.

Tabelle 58: Darstellung von Literaturwerten im Vergleich zu der vorliegenden Studie

Wirkungskategorie	**Vorliegende Studie**	**Quak [2001]**	**Eyerer [2000]**	
			EFH	**MFH**
Treibhauspotential [kg CO_2-äq.]	90.000 - 340.000	545.000 - 296.000	255.000	882.000
Versauerung [kg SO_2-äq]	250 - 1.000	1.150 - 4.110[61]	259	2.000
Überdüngung [kg PO_4-äq]	22 - 70	97 - 185	29	199
Sommersmog [kg Ethylen-äq.]	190 - 500	178 - 280	54	131

Für die Betrachtung der ökologischen Bewertung durch die Berechnungsgrundlage kann zusammengefasst werden:

- Die Berechnungsgrundlage ermittelt verschiedene Umweltkategorien anhand des Gesamtenergiebedarfs für Gebäude.
- Bei dem angegebenen Umweltkategorien handelt es sich um Datenbereiche, da kein detaillierter Wert angegeben werden kann.
- Eine Abschätzung von Orientierungswerten kann aus diesen Berechnungen erfolgen.
- Die errechneten Werte stimmen mit bereits erhobenen Daten überein.

[61] Der Heizenergiebedarf des betrachteten Hauses (Holzrahmenbauweise) wurde mit einem Elektroofen gedeckt.

Ergebnisdiskussion – Planungsmethoden

9

9. ERGEBNISSDISKUSSION-PLANUNGSMETHODEN

Die vorliegenden Ergebnisse ermöglichen gezielte Aussagen über verschiedene Einflüsse der ganzheitlichen Ermittlung von Energiebilanzen und Kohlendioxidemissionen von Holzhäusern. Die Methodik der Ökobilanz evaluiert den komplizierten Lebensweg von Gebäuden in seinen einzelnen Abschnitten mit fundierten Daten.

Das folgende Kapitel diskutiert die Ergebnisse. Zusätzlich werden aus den Energie- und Kohlendioxidbilanzen verschiedene Planungsempfehlungen hinsichtlich einer Reduzierung des Gesamtenergieeinsatzes und einer Reduzierung der Kohlendioxidemissionen abgeleitet.

9.1. Energie

Der Gesamtenergiebedarf bei Gebäuden mit einem verhältnismäßig hohen Betriebsenergiebedarf wird im Wesentlichen von dem Modul Betrieb des Hauses beeinflusst. Je geringer der Betriebsenergiebedarf des Hauses wird, desto bedeutender werden die Module Herstellung und Instandhaltung.
Die geringste Gesamtenergie der untersuchten Haustypen benötigt das Haus Bremen II. Die beiden anderen Häuser haben in dem Normal-Bedarf einen um ~21% (Bremen) und ~58% (Würzburg) höheren Gesamtenergiebedarf.
Für die Ergebnisdiskussion der ENERGIE werden im Folgenden nur die beiden Varianten des Bremer Hauses (Bremen I und Bremen II) im nicht optimierten Zustand betrachtet. Diese Häuser können aufgrund derselben Gebäudegröße und derselben Architektur sehr gut direkt miteinander verglichen werden.
Bremen II zeichnet sich durch einen sehr geringen Energiebedarf während der Nutzung aus, das Haus deckt seinen Heizenergiebedarf durch interne und solare Wärmegewinne infolge des hervorragend gedämmten Gebäudekerns und entsprechend hochwertiger Fenster[62].
Aufgrund dieser Eigenschaften ist der Herstellungsbedarf des Gebäudes im Verhältnis zu Bremen I erhöht. Die Herstellung von Passivhäuser ist, wie allgemein schon spekuliert wurde, mit einem Mehraufwand von Energie verbunden. Die Module Instandhaltung/Materialaustausch und Entsorgung korrelieren damit, lediglich das Modul Betrieb ist energieextensiver als bei Bremen I. Während des Betriebes über 60 Jahre wird jedoch soviel Energie eingespart, dass das Passivhaus gesamtheitlich über den angenommenen Zeitraum weniger Energie verbraucht.

[62] Dreischeibenisolierverglasung

Die Betriebsenergie hat einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtenergie; ~60% der Gesamtenergie werden bei Bremen I von der Betriebsenergie benötigt. Bremen II verbraucht einen erhöhten Anteil bei der Herstellung, die Betriebsenergie hat hier nur einen Anteil von 45% an der Gesamtenergie.
Die Lebensdauer von Baustoffen/Bauteilen und die Nutzungszeit des Gebäudes haben großen Einfluss. Kürzere Lebenswege (z.B. 40 Jahre) würden die getroffenen Aussagen umkehren, längere Lebenswege (z.B. 80 Jahre) bestätigen.
Die Verwendung von Holz und Holzprodukten im Hausbau besitzt zusätzlich zu der Kohlenstoffspeicherung auch einen energetischen Vorteil. Die thermische Verwertung des Holzes nach dem Lebensweg setzt Energie frei, die fossile Energieträger substituieren kann. Durch die hohe Menge an eingebautem Holz in der verbesserten Variante (Bremen II) kann 1,4 Mio. MJ Energie aus fossilen Energieträgern ersetzt werden. Das Bremer Haus hat einen Energiebedarf während der Nutzung von ~1,0 Mio. MJ. Theoretisch kann der Energiebedarf während der Nutzung des Bremer Hauses durch den Rückbau eines vergleichbaren Hauses $1^1/_2$ mal gedeckt werden.
Das Würzburger Haus weist aufgrund seiner geringeren Menge an Holz und Holzprodukten nur einen Energieinhalt von 0,85 Mio. MJ auf. Das Haus hat zudem noch einen höheren Gesamtenergiebedarf im Verhältnis zu den Bremer Häusern von 3,5 Mio. MJ.
Die vermehrte Verwendung von Holz im Bau kann aus diesen Gründen begrüßt werden, zum Einen wird über den Zeitraum der Nutzung der Atmosphäre Kohlendioxid entzogen, zum Anderen dient Holz nach der Nutzung der Substitution von fossilen Energieträgern. Hierdurch kann die Umwelt zweifach entlastet werden.

9.2. Kohlendioxid

Die Kohlendioxidbilanz wird ähnlich der Energiebilanz von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Im folgenden wird dies an den Einflüssen

- eingesetzte Baustoffe
- Kennwerte des Gebäudes
- verwendete Energieträger
- sonstige Faktoren

näher betrachtet. Diese Einflüsse werden detailliert dargestellt. Die Ergebnisse der Energiebilanz können im Wesentlichen auf die Aussagen zur CO_2-Bilanz übertragen werden.
Im Zuge der Realisierung von Positivhäusern soll die Ergebnisdiskussion jedoch im Zusammenhang mit der Kohlendioxidbilanz stattfinden.

9.2.1. Eingesetzte Baustoffe

Die Wahl der verwendeten Baustoffe spiegelt sich in der Kohlendioxidbilanz wieder, da bei der Herstellung einiger Baustoffe, zumeist mineralischer Baustoffe, mehr CO_2 emittiert wird als bei anderen. Zusätzlich haben Holz und Holzprodukte den Vorteil, dass sie Kohlenstoff speichern. Hierdurch entsteht in dem Baustoff eine Kohlenstoffsenke, d.h. der Kohlenstoff wird über den gesamten Lebensweg der Atmosphäre entzogen. Diese Tatsache kann mit Hilfe von Ökobilanzen bzw. Kohlenstoffbilanzen erfasst und berechnet werden.
Der Bauherr und der Planer hat die Möglichkeit, das Gebäude hinsichtlich der Kohlendioxidbilanz zu optimieren.
Baustoffe, die kein Kohlenstoff speichern, können gegen kohlendioxidneutrale Baustoffe ersetzt werden. Die Baustoffhersteller der Holzwirtschaft bieten hierfür marktfähige Produkte. So lassen sich beispielsweise

- Gipskartonplatten gegen Holzfaserplatten ersetzen,
- als Dämmmaterial nachwachsende Rohstoffe verwenden,
- Trittschalldämmung in Form von Vollholz einbringen.
- Wärmespeicherpuffer in Form von Brettstapelelementen oder Holzwerkstoffen schaffen.

Diese Varianten verbessern durch die Wahl des Baustoffes die Kohlendioxidbilanz und verringern den Treibhauseffekt.

9.2.2. Kennwerte des Gebäudes

Die Nutzung eines Gebäudes hat einen erheblichen Einfluss auf die CO_2-Emissionen über den gesamten Lebensweg. Es wurden in dieser Arbeit Häuser mit einem hochgedämmten Wandaufbau und weiteren für den Niedrigenergiebau geeigneten Komponenten betrachtet. Hierdurch konnten die Gesamtemissionen des Treibhausgases Kohlendioxid gering gehalten werden. Bremen II wurde mit hochwertigeren Fenstersystemen ausgestattet als die Grundvariante (Bremen I). Dies hat sich auch in der Kohlendioxidbilanz bemerkbar gemacht, da auf ein externes Heizmedium, außer Solarenergie und interne Wärmegewinne, verzichtet werden konnte. Die Gesamtemissionen dieser Variante wurden um 20 t CO_2 im Verhältnis zu der Grundvariante reduziert.
Die angestrebte Reduzierung der Kohlendioxidemissionen kann folglich mit Gebäuden erreicht werden, welche während des Betriebs weniger Energie benötigen.

Die Herstellung und Unterhaltung dieser „Passivenergiehäuser“ ist jedoch mit einem erhöhten Kohlendioxidausstoß verbunden. Bremen II „emittiert“ während der Herstellung und der Instandhaltung 108 t CO_2, Bremen I dagegen 10 t weniger.

9.2.3. Verwendete Energieträger

Energieerzeugung ist generell mit dem Ausstoß von Kohlendioxid verbunden (siehe Datengrundlage „Berechnung der Energieträger“ auf Seite 90). Eine Verringerung der benötigten Energie reduziert folglich auch die Kohlendioxidemissionen.
Durch die Wahl der verwendeten Energieträger lassen sich jedoch Kohlendioxidemissionen begrenzen. In die Berechnungsgrundlage können aus diesem Grund verschiedene Energieträger zur Deckung des Betriebsenergiebedarfs eingegeben werden, so dass eine Modellierung der Nutzungsphase durchgeführt werden kann.

9.2.3.1. Erdgas

Erdgas als Heizmedium verursacht 0,19 kg CO_2-Emissionen pro kWh (0,052 kg CO_2/MJ). Der Heizenergiebedarf und ein Teil des Warmwasserenergiebedarfs der betrachteten Gebäude wurde mit Erdgas als Energieträger bewertet. Auffallend bei Bremen II ist, dass keine Emissionen aus der Heizenergie entstanden sind. Dieses Haus deckt seinen Heizenergiebedarf durch interne und solare Wärmegewinne, ein externes Heizmedium entfällt. Auf diese Art und Weise kann die Kohlendioxidbilanz des Gebäudes verbessert werden.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, das die kontrollierte Be- und Entlüftungsanlage in den Bremer Häusern mehr **elektrische Energie** als das Würzburger Haus benötigten (Bremen 6,39 kWh/m²a; Würzburg 5,06 kWh/m²a).
Die Reduzierung des Heizenergiebedarfes eines Passivhauses ist mit erhöhten Energie und Kohlendioxidemissionen in der Be- und Entlüftung verbunden. In den geplanten Häusern wird pro Jahr für den Betrieb der Belüftungsanlagen 1.214 kWh[63] elektrische Energie benötigt. Diese Energie kann im Idealfall durch eine Photovoltaikanlage von 14 m² fast vollständig gedeckt werden. Wird anstelle der Photovoltaikanlage für die Deckung der Lüftungsenergie der Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen, so sind für die betrachteten Gebäude ~677 kg CO_2-Emissionen/Jahr zusätzlich zu erwarten.

[63] Würzburg und Bremen weisen denselben Lüftungsenergiebedarf für das Gebäude auf, da die belüftete Wohnfläche des Würzburger Hauses größer ist (Bremen: 190 m² x 6,39 kWh = 1.214 kWh/Jahr; Würzburg: 240 m² x 5,06 kWh = 1.214 kWh/Jahr).

Auf eine Lebensdauer von 60 Jahren würden sowohl das Bremer Haus als auch das Würzburger Haus ~40 t mehr an treibhausfördernden CO_2-Emissionen verursachen. Bremen II würde den Status eines Positivhauses verlieren, da die Kohlendioxidbilanz mit emittierten 17 t CO_2 negativ wird – wenn Strom konventionell erzeugt wird.

9.2.3.2. Holzpelletofen

Die thermische Verwertung von Holz zum Zweck der Substitution von fossilen Energieträgern erlangt zunehmend Bedeutung. In der Berechnungsgrundlage kann der Planer als Heizmedium Erdgas oder Holzpellets verwenden.
Durch die Nutzung von regenerativer Biomasse kann der Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes reduziert werden. Der Betrieb der Anlage kann jedoch nicht als energie- und kohlendioxidfrei (neutral) bezeichnet werden, da die Herstellung der Holzpellets mit dem Verbrauch von Energie verbunden ist. Für die Verwendung von Holzpelletöfen kann folgende Faustformel verwendet werden:

> Je höher der Heizenergiebedarf eines Hauses ist, desto vorteilhafter wirkt sich der Einsatz eines Holzpelletofens aus.

9.2.3.3. Solaranlagen

Solaranlagen dienen als Energiewandler von Sonnenenergie zu Warmwasser. Der gesamte Warmwasserbedarf aller drei Häuser kann durch Solaranlagen gedeckt werden.
Um den Warmwasserenergiebedarf decken zu können, wurden Bremen I und II mit einer 7 m² großen Solaranlage, Würzburg mit 9 m², ausgestattet.
Die Verwendung von Sonnenenergie verursacht durch die Herstellung der Anlagen Kohlendioxidemissionen (siehe Datengrundlage Solaranlagen auf Seite 93). Diese Emissionen sind jedoch geringer, als wenn man den Energiebedarf mit herkömmlichen Energieträgern deckt. Solaranlagen beeinflussen insofern die Kohlendioxidbilanz positiv.
Momentan ist die Erstellung dieser Anlagen mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden, so dass die Kollektorfläche ökonomisch vernünftig kalkuliert werden muss.
In Zukunft ist jedoch davon auszugehen, dass durch die vermehrte Nachfrage die Herstellungskosten verringert werden. Die ökonomische wird sich der ökologischen Amortisationszeit damit annähern.

9.2.3.4. Photovoltaikanlagen

Der elektrische Strom für die kontrollierte Be- und Entlüftungsanlage wurde bei den betrachteten Gebäuden durch den Einsatz von Photovoltaikanlagen gedeckt. Die Gebäude besitzen beide eine nach Süden ausgerichtete und im optimalen Winkel geneigte Dachfläche von mehr als 80 m². Diese Fläche könnte theoretisch mit Solar- und Photovoltaikanlagen bestückt werden.
Eine 16 m² große Photovoltaikanlage produziert theoretisch 4.800 MJ Energie pro Jahr und deckt so den Strombedarf (Lüftungsenergiebedarf) der Gebäude. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Leistung der Anlage an die jeweilige Sonneneinstrahlung gebunden ist. Die Dachneigungen von 30 Grad lassen eine optimale Sonnenausnutzung im Sommer zu (mit Überschuss), im Winter ist jedoch mit einer Unterdeckung zu rechnen, da die Sonne tiefer steht und nicht im optimalen Winkel auf die Kollektoren trifft. Über das Jahr verteilt ermöglicht die Anlage jedoch eine rechnerische Deckung des Strombedarfs. In der Praxis wird der im Sommer erzielte Überschuss in das öffentliche Netz eingespeist. Hierfür erhält der Photovoltaikanlagenbetreiber eine Vergütung[64].

9.2.4. Sonstige Faktoren

Unter sonstigen Faktoren werden einige Berechnungen aufgezeigt, die einen Einfluss auf die Kohlendioxidbilanz haben, sich jedoch nicht eindeutig zuordnen lassen. Hierbei handelt es sich um:

- die Größe des Gebäudes
- den Zeitraum der Betrachtung

9.2.4.1. Größe der Gebäude

Die Größe des Hauses hat einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtenergie und die Kohlendioxidemissionen über den gesamten Lebensweg des Hauses.
Aussagen über die ökologisch optimale Größe eines Hauses aus dieser Bilanz abzuleiten ist jedoch nicht möglich. Die Frage, ob Einfamilienhäuser oder Mehrfamilienhäuser energetisch vorteilhafter sind, könnte allerdings prinzipiell beantwortet werden. Vorraussetzung für die

[64] Eine Einspeisung der Energie in das öffentliche Netz wird derzeit vom Staat bis zum Jahr 2020 mit einem garantierten Abnahmepreis gefördert. Dieser reduziert sich jedes Jahr für neu in Betrieb genommene Anlagen um 5%. Im Jahr 2001 wurde Strom aus solarer Strahlungsenergie mit 0,51 €/kWh gefördert. Im Jahr 2002 in Betrieb genommene Anlagen werden mit 0,48 €/kWh gefördert [EEG, 2000].

Lösung dieser Fragestellung ist jedoch, dass verschiedene Bausysteme mit dem entwickelten Rechenprogramm untersucht werden.
Momentan wird angenommen, dass bei vergleichbaren Wohnflächen Mehrfamilienhäuser aufgrund ihrer geringeren wärmeabstrahlenden Außenfläche ganzheitlich weniger Energie verbrauchen.
Das Würzburger Haus ist mit 250 m² Wohnfläche um 40 m² größer als die beiden Bremer Häuser. Die erhöhten Emissionen zur Herstellung der Baustoffe des Hauses können hierauf zurückgeführt werden, da zum Beispiel 70 t Beton mehr im Fundament des Würzburger Hauses eingebracht werden müssen. Die Dachfläche in Würzburg (somit auch proportional die damit verbundenen Materialien) ist um 60 m² größer als bei den Bremer Häusern. Die Hauptemissionen werden jedoch bei der Nutzungsphase deutlich, da bei dem Würzburger Haus eine beheizte Wohnfläche von 240 m², bei den Bremer Varianten 190 m² in die Berechnung einfließen.
Eine vergleichende Ökobilanz kann nur durchgeführt werden, wenn die Funktionalen Einheiten in einer vernünftigen Weise verglichen werden können. Bei den betrachteten Gebäuden ergeben sich sehr viele Unterschiede, die einen Vergleich nicht ermöglichen. Insofern kann man bei dem Würzburger und dem Bremer Haus nicht von einem Vergleich sprechen, sondern „nur“ von einer Einzelbilanz.

9.2.4.2. Zeitraum der Betrachtung

Der gewählte Untersuchungszeitraum hat einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch und die Kohlendioxidemissionen. Durch die Reduzierung der Nutzungsphase lassen sich auch die in dieser Phase anfallenden Emissionen reduzieren. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass das Ziel dieser Studie in der realistischen Bilanzierung über einen in der Praxis üblichen Nutzungszeitraum war.

9.3. Energieeinsatz – Kohlendioxidemissionen

Die Berechnungsgrundlage ermöglicht eine relativ unabhängige Betrachtung des Energieeinsatzes und der Kohlendioxidemissionen. Der Vorteil der Datenerhebungen besteht darin, dass die Herstellungswerte der Baustoffe in diesen beiden Aussagen (Energie, Kohlendioxid) nicht aneinander gebunden sind, sondern unabhängig voneinander in die Berechnung einfließen. Hierdurch kann der Anwender entscheiden, ob er sein Haus hinsichtlich des Energieeinsatzes oder der CO_2-Emissionen optimieren will.

Dieser Unterschied wird in dieser Studie folgendermaßen deutlich:
Im Modul Herstellung ist die verbesserte Variante des Bremer Hauses (Bremen II) am energieintensivsten. Sie ist jedoch mit weniger Kohlendioxidemissionen als das Würzburger Haus verbunden. Das Haus in Würzburg weist hier die höchsten CO_2-Emissionen auf.
Die Ursache ist in den eingesetzten Materialien zu sehen, welche in den Gebäuden verbaut wurden. Das Würzburger Haus weist einen höheren Anteil an Betonfundament (~70 t) und anderen massiven Baustoffen (Bewehrungsstahl, Betonplatten und Hohllochziegel) auf. Das Gebäude ist hierdurch in den Trittschalleigenschaften verbessert worden; hinsichtlich der Kohlendioxidemissionen hat jedoch eine Verschlechterung stattgefunden. Im verbesserten Bremer Haus sind bewusst viele Holz- und Holzwerkstoffprodukte vorgesehen, deren Herstellung vor allem sehr wenig „fossiles CO_2“ verursachten. Die Bauherrschaft und der Planer erhalten somit die Möglichkeit, sich zwischen verschiedenen Wirkungen zu entscheiden.

Die grundsächliche Tendenz, dass ein hoher Energieeinsatz mit hohen CO_2-Emissionen verbunden ist, wird jedoch auch hier nicht wiederlegt.

9.4. Variation des Heizenergiebedarfs

Allgemeingültige Aussagen bezüglich des Gesamtenergiebedarfs können aus den drei betrachteten Gebäuden nicht abgeleitet werden. Diese Einfamilienhäuser entsprechen dem absolut oberen Standard des energiesparenden Bauens. Der Bestand der Gebäude in Deutschland hat zumeist einen deutlich höheren Betriebsenergiebedarf.
Im Folgenden wird der Versuch unternommen, allgemeingültige Aussagen für verschiedene Energiestandards zu generieren Um dies zu erreichen, wird der Heizenergiebedarf des Bremer Hauses jeweils um 10 kWh/m²Jahr (Werte von 10 bis 110) bei gleichbleibenden Gebäudebedingungen verändert. Die Gebäudemassen werden bei dieser Variation des Heizenergiebedarf nicht verändert. Der Warmwasserenergiebedarf und der Lüftungsenergiebedarf wird nicht beachtet und mit dem Wert 0 angenommen.
Ziel ist es, den Einfluss eines höheren Heizenergiebedarfs auf den Gesamtenergiebedarf zu ermitteln.
Die Abbildung 74 verdeutlicht die Zunahme der Gesamtenergie bei einer Erhöhung des Betriebsenergiebedarfs bei gleichbleibendem Herstellungsenergiebedarf.

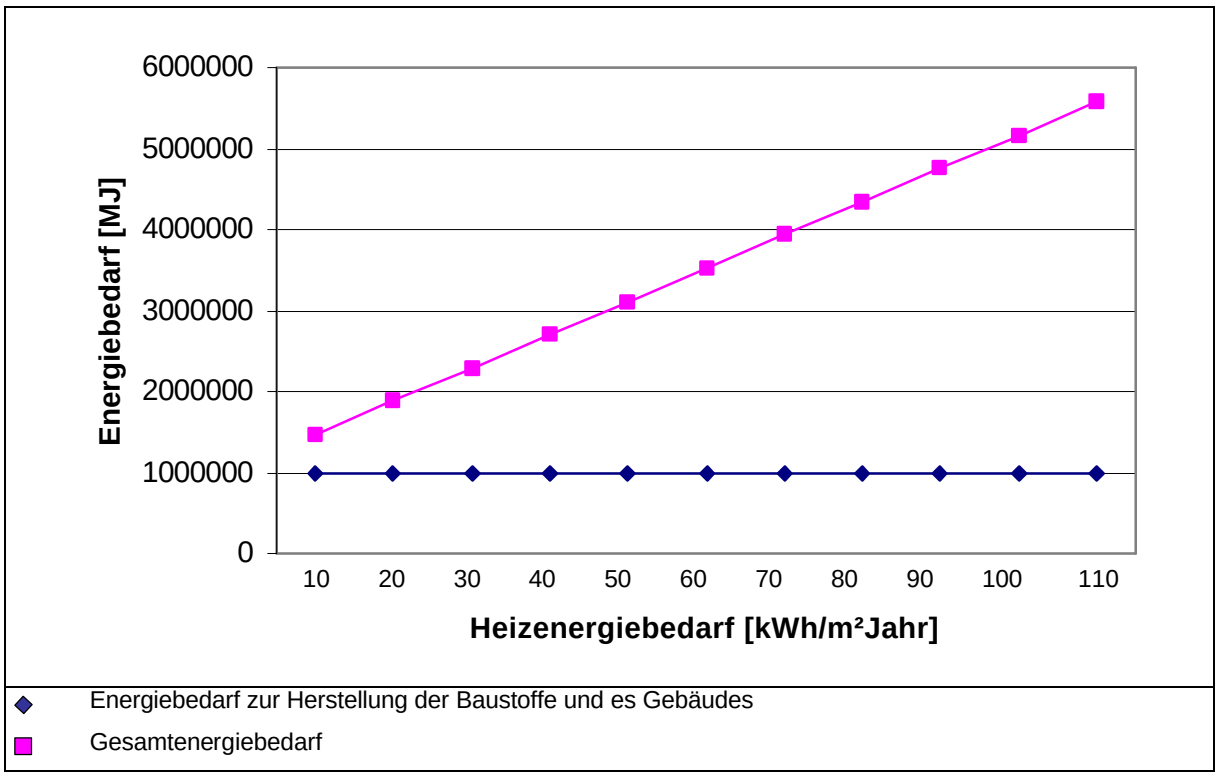


Abbildung 74: Gesamtenergiebedarf des Hauses und der Anteil der Herstellungsenergie

Durch die Erhöhung des Heizenergiebedarfs steigert sich die Gesamtenergie des Hauses je 10 kWh um 410.400 MJ. Der Ausgangswert beträgt bei einem Heizenergiebedarf von 10 kWh/m²Jahr 1,47 Mio. MJ Gesamtenergie.

Die Zunahme der Gesamtenergie und der prozentuale Anteil der Herstellungsenergie des Hauses am Gesamtenergiebedarf ist in der Abbildung 75 dargestellt.

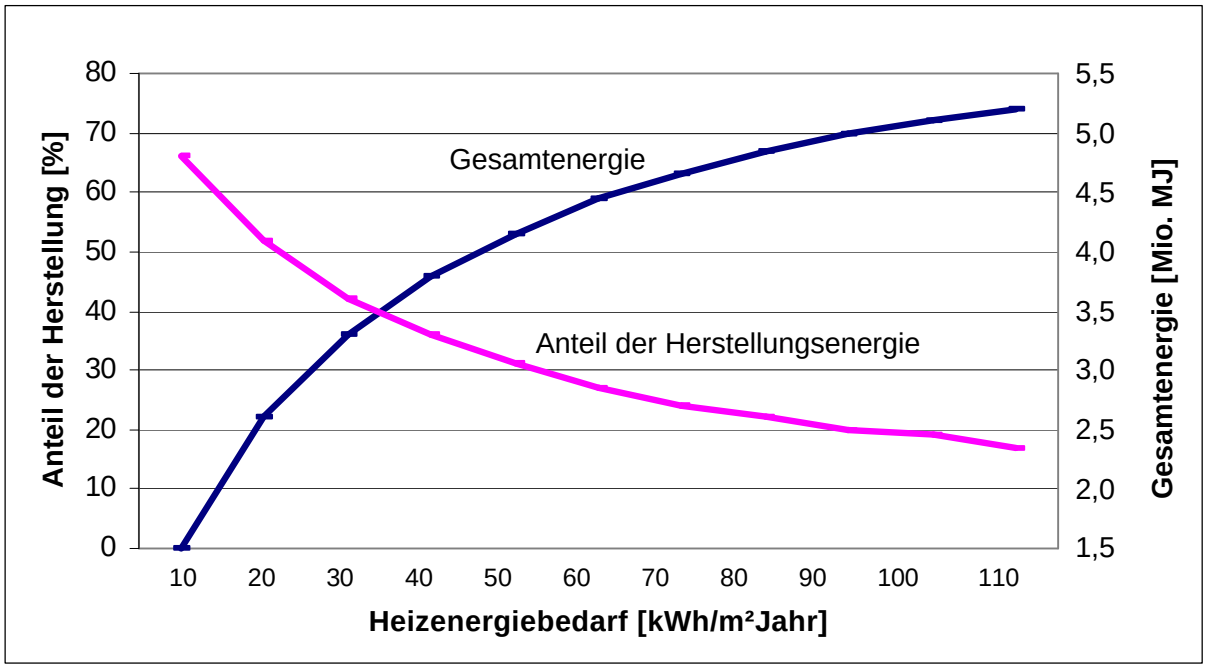


Abbildung 75: Prozentualer Anteil der Herstellungsenergie an der Gesamtenergie

Der Schnittpunkt der beiden Kurven kann nicht als ein Optimum betrachtet werden, da die Abbildung nur eine allgemeine Korrelation von dem Gesamtenergiebedarf und dem Herstellungsenergiebedarf der Baustoffe darstellt. Aus der Abbildung kann folgendes abgeleitet werden:

- Der Herstellungsenergiebedarf der Baustoffe wird bei ansteigendem Gesamtenergiebedarf prozentual geringer.
- Der Einfluss der Nutzung ist bei Gebäuden mit einem hohen Heizenergiebedarf größer als bei Niedrig- und Passivenergiehäusern.
- Durch eine Verringerung des Heizenergiebedarfs kann die Gesamtenergie reduziert werden.

Zusammenfassung

10

10. ZUSAMMENFASSUNG

Die zu Ende gehenden fossilen Energieträger zwingen Politik und Wirtschaft zu energiesparendem Handeln. Die Veränderung des Klimas der Erde, verursacht durch menschliches Handeln, führt zu nationalen und internationalen Klimaschutzbemühungen.
Eine Reduzierung der Treibhausgase wird international angestrebt. Das Protokoll von Kyoto, das diese Bestrebungen mit verbindlichen Reduktionszahlen ausstattet, wird im Jahr 2002 durch alle beteiligten Länder ratifiziert werden. Hierdurch werden die Unterzeichnerländer gezwungen, den CO_2-Austoß zu reduzieren. Deutschland hat sich verpflichtet, den Kohlendioxidausstoß um 21%, bezogen auf das Basisjahr 1990, zu reduzieren.
Der Wohnsektor ist zu wenigstens 30% an den bundesdeutschen Kohlendioxidemissionen durch den Gebrauch von Energie beteiligt. Die Bundesregierung hat auch aus diesem Grund die Energiesparverordnung zum 1. Februar 2002 in Kraft gesetzt und setzt hiermit ein politisches Zeichen.
Die Energieeinsparverordnung reduziert den Energiebedarf während der Nutzung des Hauses um 30% im Bezug auf die Wärmeschutzverordnung von 1995. Um die Energiesparverordnung umzusetzen, sind jedoch aufwendigere Konstruktionen erforderlich, die in der Herstellung des Hauses viel Energie benötigen.
Die echte Energieeinsparung kann nur dargestellt werden, wenn die Herstellung des Gebäudes in die Berechnung eingeschlossen wird, bzw. besser, wenn das Haus über den gesamten Lebensweg betrachtet wird.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ökologische Betrachtungen für den Hausbau, den Hausbetrieb und den Rückbau anzustellen. Es wurden ganzheitliche lebenswegbezogene Energiebilanzen und Kohlendioxidbilanzen für zwei verschiedene Holzbaukonstruktionen berechnet.

Um den gesamten Lebensweg der Gebäude zu betrachten wurde die Methodik der Ökobilanz gewählt.
Ökologische Bewertungen sind ein modernes Hilfsmittel, die ökologischen Vorteile und Nachteile eines Produktes darzustellen (Kapitel 3). Diese Darstellung geschieht ganzheitlich unter Einbezug aller relevanten Einflüsse und Lebensphasen. Sachlich vollständig erstellte Bilanzen können wichtige Schritte in der Optimierung von Einzelprozessen, aber auch des Gesamtproduktes liefern. Sie dienen mittlerweile als Entscheidungsgrundlage bei der Produktauswahl und Verfahrensgestaltung unter ökologischen Gesichtspunkten.

Die ökologische Bewertung verlangt die Betrachtung des Produktes über den gesamten Lebensweg und kann fundierte Daten für den Gesamtenergiebedarf und die CO_2-Emissionen über den gesamten Lebensweg liefern.

In Deutschland werden jährlich ca. 190.000 Baugenehmigungen für Ein- und Zweifamilienhäuser erteilt. Der Anteil der Holzhäuser am deutschen Neubaumarkt beträgt etwa 15%.
In Deutschland werden 37 Mio. Wohneinheiten bewohnt. Viele dieser Häuser weisen einen niedrigen Energiestandard auf. In Kapitel 4 werden Möglichkeiten des Energiesparens für diese Gebäude und Zusammenhänge im energieoptimierten Wohnungsbau dargestellt.

Die Erstellung von ökologischen Betrachtungen für Gebäude ist sehr komplex. Die benötigte Datenmenge für die Berechnung des Gesamtenergiebedarf und der Kohlendioxidemissionen von Wohngebäuden ist vielschichtig. Ein transparenter Aufbau der ökologischen Betrachtung ist sehr wichtig, um die erhobenen Werte nachzuvollziehen. Aus diesem Grund wurde ein Planungstool entwickelt. Dieses Tool ermittelt nach den Grundlagen der ganzheitlichen Bewertung, der Ökobilanzierung, den Gesamtenergiebedarf, die Kohlendioxidemissionen eines Hauses und eine vereinfachte Ökobilanz auf der Basis des Gesamtenergiebedarfs über den gesamten Lebensweg.
In der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Berechnungsgrundlage für den Hausbau vorgestellt (Kapitel 5 und 6).
Die vorgestellte Berechnungsmethode betrachtet die einzelnen Lebensabschnitte eines Hauses:

- die Herstellung der Baustoffe,
- die Errichtung/Produktion des Hauses,
- die Nutzung,
- die Instandhaltung während des Betriebs,
- der Rückbau des Hauses,
- die anfallenden Transporte,
- die in den Bauteilen aus nachwachsenden Rohstoffen gespeicherte nutzbare Energie, welche nach dem Rückbau des Hauses der Energieerzeugung zugeführt werden und fossile Energieträger substituieren kann,
- die in den Baustoffen bzw. im Gebäude gebundene Menge an Kohlenstoff, bzw. die der Atmosphäre während des Wachstums des Baustoffes entzogene Menge an Kohlendioxid.

Damit eine planerische Optimierung des Hauses durchgeführt werden kann, wurden regenerative Energiequellen in die Datengrundlage (Kapitel 5) des entwickelten Tools integriert
Damit ist es möglich, fast bezugsfertige Gebäude ganzheitlich zu betrachten und die verschiedenen Lebensabschnitte in ein Verhältnis zueinander zu setzen. Eine Optimierung des geplanten Gebäudes ist mit der entwickelten Berechnungsgrundlage möglich.
Die Abbildung 76 zeigt die Bildschirmansicht der entwickelten Berechnungsgrundlage mit dem Feld „Ergebnisse“.
Die Felder „Normal“ der Darstellung betrachten den Lebensweg des Hauses ohne den Einsatz von regenerativen Energiequellen, wie der Nutzung von Sonnen- und Holzenergie. Die Felder „Optimiert“ weisen den Energiebedarf und die CO_2-Emissionen des Hauses bei der Verwendung von regenerativen Energieträgern auf.

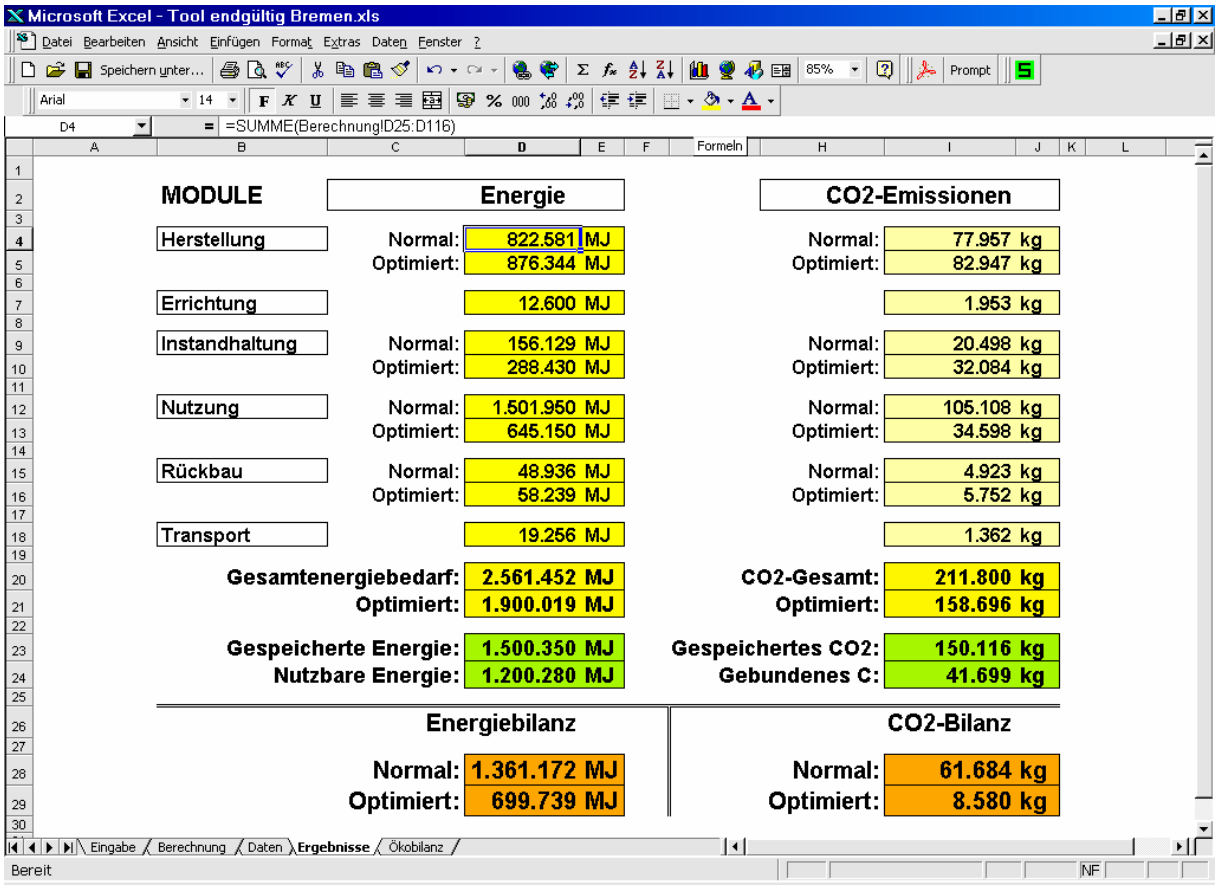


Abbildung 76: Bildschirmansicht der entwickelten Berechnungsgrundlage, Zusammenfassung für ein Haus, vergl. Kap. 5 und 6)

Es zeigt sich, dass durch den Einsatz von Solar- und Photovoltaikanlagen die Kohlendioxidemissionen des betrachteten Hauses um 53 t CO_2 reduziert werden können (CO_2-Gesamt: 211 t ; Optimiert: 158 t).

Zusätzlich werden in der entwickelten und vorgestellten Berechnungsgrundlage nach der Methodik der Ökobilanzierung die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung, Überdüngung und die Bildung von bodennahem Ozon anhand des Gesamtenergiebedarfs betrachtet (Kapitel 6.6 und 8.5).

In der Arbeit wurden zwei Gebäude mit einem geringen Betriebsenergiebedarf, architektonisch geplant von der Hochschule Bremen – Fachbereich Architektur, ganzheitlich betrachtet (Kapitel 7).
Das eine Haus wurde hinsichtlich seiner Eigenschaften zu einem Passivhaus optimiert (Bremen II), das seinen Heizenergiebedarf nur durch die Sonneneinstrahlung und die internen Wärmegewinne decken kann.
Diese Tatsache ermöglicht einen direkten Vergleich von zwei in Größe und Architektur identischen Gebäuden (Bremen I und Bremen II), da die funktionale Einheit, der Gebrauchnutzen, identisch ist.
Die Ergebnisse (Kapitel 8) bringen hinsichtlich des Gesamtenergiebedarfes und der Kohlendioxidemissionen folgende Erkenntnis:

- Passivhäuser haben einen erhöhten Herstellungs- und Instandhaltungsenergiebedarf, der Gesamtenergiebedarf über den Lebensweg ist jedoch reduziert.
- Der Herstellungs- und Instandhaltungsenergiebedarf erhöht sich absolut, wenn weniger Betriebsenergie während der Nutzung erforderlich ist.
- Der Einfluss der Betriebsenergie auf die Gesamtenergie ist umso größer, je höher der Energiebedarf während der Nutzung ist.
- Die Lebensabschnitte Herstellung der Baustoffe, Instandhaltung und Nutzung haben den größten Einfluss auf die Gesamtenergie und die CO_2-Emissionen. Das bedeutet, dass eine Fokussierung auf die Betriebsenergie bei energieoptimierten Häusern, wie sie nach der EnEV geplant werden sollen, nicht sinnvoll ist.
- Die Lebensabschnitte Errichtung (Aufbau des Hauses aus vorgefertigten Bauteilen) und Rückbau sind zu vernachlässigen.
- Die Transporte haben nur bei sehr weiten Transportentfernungen eine größere Bedeutung.
- Die Verwendung von Anlagen zur Nutzung der Sonnenenergie hat einen positiven Einfluss auf die Energie- und Kohlendioxidbilanz eines Hauses.
- Mineralische Baustoffe und Verbindungsmittel haben einen negativen Einfluss auf die Kohlendioxidbilanz.

- Positivhäuser können durch eine Reduzierung des Betriebsenergiebedarfs und die vermehrte Verwendung von Holz und Holzprodukten realisiert werden.
- Auch Holzhäuser bestehen massenmäßig zu einem Großteil aus fossilen Baustoffen, da Keller, Bodenplatte, Dacheindeckung[65] und Verbindungsmittel nicht aus nachwachsenden Baustoffen gefertigt werden.
- Der Vorteil von Holzhäusern ist in ihrer energiesparenden Konstruktion, und damit verbunden mit einem verringerten Betriebsenergiebedarf zu sehen.
- Durch die thermische Verwertung von Holz und Holzprodukten am Ende der Nutzungsphase kann die Gesamtenergiebilanz eines Hauses deutlich verbessert werden. Fossile Energieträger können substituiert werden.
- In Holzhäusern wird langfristig Kohlenstoff gebunden.
- Die Kohlenstoff- bzw. Kohlendioxidbilanz wird durch die Verwendung von Holz und Holzprodukten erheblich verbessert.

Die Verwendung von Holz- und Holzprodukten im Hausbau bietet die Möglichkeit, Kohlenstoff längerfristig zu binden und auf diese Weise die Emissionen des Treibhausgases Kohlendioxid zu verringern. Das entwickelte Arbeitstool berechnet Energie- und Kohlendioxidbilanzen.
Ganzheitlich betrachtet können für den Hausbau folgende Aussagen gemacht werden:

- Der ökologische Vorteil von Holzhäusern ist nicht ausschließlich die Herstellung des Produktes, sondern die Möglichkeit, bei einem etwas geringeren Herstellungsenergiebedarf Wandaufbauten zu erstellen, deren Betriebsenergiebedarf reduziert ist oder umgekehrt (bei gleich hohem Betriebsenergiebedarf deutlich schlankere Wandkonstruktionen mit einer einhergehenden Materialeffizienz zu erstellen).
- Holzhäuser haben gegenüber dem Massivbau deutliche Vorteile in der Kohlenstoffspeicherung, Konstruktion, Wohnklima und der Verwendung von nachwachsenden und umweltgerechten Baustoffen.

Die vorliegende Arbeit ermöglicht fundierte Aussagen über die „Kohlenstoffsenke Holzhaus“.
Vergleicht man Holzhäuser mit Steinhäusern[66], so kann bezüglich der Kohlendioxidemissionen und der Kohlendioxidbilanz die folgende Abbildung den Vorteil den Vorteil von Holzhäusern verdeutlichen:

[65] Ausnahme Reet-, Gras- und Holzschindeldächer

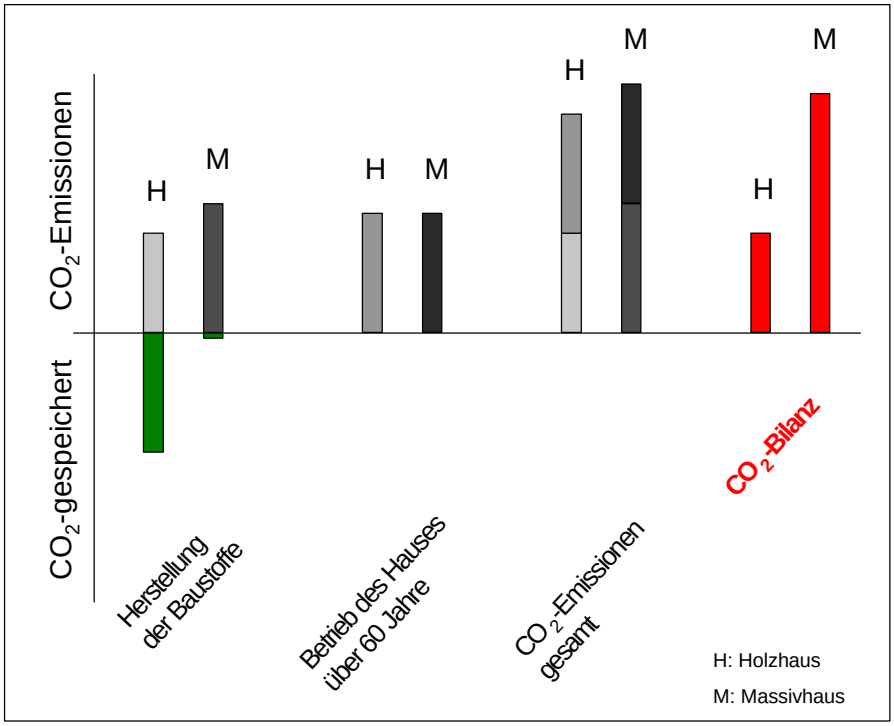


Abbildung 77: Holzhäuser als langfristige Kohlenstoffsenke mit positiver CO_2-Bilanz (genereller Vergleich)

Mit dieser Arbeit wurde die Möglichkeit geschaffen, den gesamten Lebensweg von Gebäuden, von der Herstellung der Baustoffe bis zur Entsorgung des Hauses, ökologisch zu betrachten und den Gesamtenergiebedarf und die Kohlendioxidemissionen zu berechnen.

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen verschiedene Einflussgrößen im Hausbau, so dass in Zukunft mit diesen Planungsmethoden (Kapitel 9) ein Tool gegeben ist, den Gesamtenergiebedarf und die Kohlendioxidemissionen im Hausbau zu reduzieren.

Um den Lebensweg eines Hauses vollständig zu betrachten, muss die Entsorgung des Gebäudes mit bewertet werden. Für Holzhäuser gilt folgendes:

- Die thermische Verwertung von Holz ist mit verschiedenen Vorteilen verbunden, sie ist ökologisch jeder anderen Entsorgungsart vorzuziehen und kann aufgrund des Energiegewinns fossile Energieträger substituieren oder kohlendioxidneutrale Energie erzeugen.
- Die Weiterverwertung von Bauelementen und Bauteilen von Holzhäusern ist möglich, z.B. können sie in Holzwerkstoffen verwertet werden.

[66] Annahme: Beide Gebäude haben denselben Wärmedurchgangskoeffizient, geeignet für den Niedrigenergiebau. Die Steinwand ist demzufolge ~15 cm dicker als die Holzwand.

Das vorgestellte Berechnungsverfahren ermöglicht fundierte und nachvollziehbare Energiebilanzen und Kohlendioxidbilanzen für den Hausbau zu erstellen.

10.1. Weiterer Forschungsbedarf

Mit Hilfe dieser Arbeit sind verschiedene Zusammenhänge im Hausbau erfasst und bewertet worden.
Forschungsbedarf für Energiebilanzen und Kohlendioxidbilanzen existiert jedoch noch in weiteren ökologischen Betrachtungen von Gebäuden, da verschiedene Faktoren, wie z. B. den Einfluss der Hausgröße auf den Gesamtenergiebedarf, untersucht werden müssen. Die geplanten Häuser dieser Studie waren mit einer Wohnfläche von über 200 m² relativ groß.

- Es stellt sich demnach die Frage, ob sich diese Ergebnisse auf kleinere Gebäude oder eventuell sogar Mehrfamilienhäuser übertragen lassen.

Diese Fragestellung kann durch Berechnung verschiedener und in der Planung zugänglicher Standardgebäude, wie sie z.B. von den Mitgliedsunternehmen des Bundesverbandes Deutscher Fertigbau geplant werden, beantwortet werden. Hier bedarf es jedoch der Unterstützung durch die Verbände und die Wirtschaft.
Durch die Betrachtung weiterer Gebäude könnten Orientierungswerte errechnet werden, die der Wirtschaft und der Politik zur Projektplanung und bei weiteren Energieeinsparungen dienen können.

Durch die Berechnung von Standardgebäuden der Industrie kann eine weiterer Forschungsbedarf und eine Forderung der Ökobilanzierung betrachtet werden, die Integration der in weiten Teilen theoretischen Ökobilanzierung in die deutsche Wirtschaft. Momentan ist die ökologische Betrachtung ein Spielfeld der Wissenschaft. Die Akzeptanz der Wirtschaft scheitert an der Vereinzelung der Ergebnisse der Ökobilanz.
Ziel der Wissenschaft muss es sein, die Ökobilanz als wissenschaftlich fundiertes Managementsystem an die Wirtschaft weiterzugeben und nur noch beratend zur Seite zu stehen.

Ein Problem der Ökobilanzierung ist jedoch, dass momentan keine standardisierte Datengrundlage existiert. Hier bedarf es erheblichen Forschungsbedarf, um die von unterschiedlichen Instituten erstellten Datengrundlagen zu sichten und zu evaluieren. Erste Ansätze wurde mit der vorliegenden Arbeit erarbeitet.

Die Ökobilanz fordert den Vergleich verschiedener Systeme bei identischer Funktionaler Einheit. In weiteren Forschungsvorhaben sollten verschiedene Bausysteme geplant und berechnet werden, damit diese Forderung realisiert werden kann.
Diese Studie untersuchte die Holzrahmenbauweise. Diese Häuser weisen in der Regel verbesserte Gebäudekennwerte und damit verbunden einen niedrigen Nutzungsenergiebedarf auf. Der Nutzungsenergiebedarf hat sich gesamtenergetisch als bedeutend erwiesen. Ein Vergleich mit beispielsweise massiv gebauten Häusern würde weitere Erkenntnisse erbringen. Unterschiedliche Holzhäuser verschiedener Bauart können mit Hilfe der ganzheitlichen Betrachtung verglichen werden.

Die Realisierung von Positivhäusern kann bei der Verringerung der Kohlendioxidemissionen und dem Kyoto-Protokoll eine entscheidende Bedeutung erhalten. Hier bedarf es weiteren Berechnungen von Gebäuden, um repräsentative Aussagen über die Senkenfunktion von Holzprodukten, in diesem Fall Holzhäusern, treffen zu können.
Durch den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen kommt es zu einer langfristigen Kohlenstoffsenke über den Zeitraum der Nutzung des Produktes. Diese Senkenfunktion sollte ebenfalls in die Kyoto-Protokoll-Mechnismen einbezogen werden.

- Für die momentan geführte Diskussion über die Speicherfähigkeit von Holzprodukten müssen fundierte Daten durch die Betrachtung von verschiedenen Hauskonstruktionen erhoben werden. Die Menge des in Holzhäusern verbauten Holzes kann hierdurch erfasst und in die internationalen Klimaschutzbemühungen eingebracht werden.

Für die weiteren Untersuchungen bezüglich des Gesamtenergiebedarfs von Wohngebäuden und die Kohlendioxidemissionen über einen bestimmten Zeitraum kann die entwickelte Berechnungsgrundlage insofern Hilfestellung leisten, indem sie in der Bauwirtschaft und der Wissenschaft eingeführt und angewendet wird. Hierfür bedarf es der Schaffung einer Datenschnittstelle.
Diese Schnittstelle muss in einem weiteren Verbundforschungsprojekt erarbeitet werden.

Verzeichnisse

11

11. VERZEICHNISSE

11.1. Literaturverzeichnis

Adebahr, S., 1995:
Stoff- und Energiebilanzen für Konstruktionsholz, Diplomarbeit an der Universität Hamburg

Andresen, A, 2002:
Bericht über die Planung der E.O.N Kraftwerke zum Bau eines neuen Biomassekraftwerkes in Stapelfeld; in Der Thie 1/02 Seite 7

Anon., 1996:
Bauen mit Holz; Fachzeitschrift der Holzbaupraxis im Zimmererhandwerk für den konstruktiven Holzbau, Ausbau und Trockenbau; Schlagwortverzeichnis

Anon., 1994:
BEW Forschungsprojekt: Energie- und Stoffbilanzen von Gebäuden, Universität Karlsruhe; Schlussbericht

APA, 1999:
(The Engineered Wood Association), Innovative Holzbausysteme – gestalterische Perspektiven, Tagungsband

Bartolles, R.; Gerken, D.; Zarsteck, F.; Schloer, C., 2000/2001:
Architektonische Planung und Berechnung verschiedener Gebäude und Gebäudekennwerte, Bremen

Bartolles, R.; Frühwald, A.; Gerken, D.; Pohlmann, C. M.; Zarsteck, F.; Schloer, C., 2001:
Planungsmethoden zur Reduzierung des Gesamtenergiebedarfes von Wohngebäuden mit Hilfe von Ökobilanzen unter besonderer Berücksichtigung der Erzielung positiver Umweltwirkungen hinsichtlich des Treibhauseffektes, Abschlußbericht der Fachhochschule Bremen, Fachbereich Architektur und der Universität Hamburg, Ordinariat für Holztechnologie, 2001

Bäumle, B., 1999:
Erstellung von Cliparts für Lebenswege, Hamburg

BDF, 2000 - 2002:
Monatlich ermittelte Produktionszahlen der Mitgliedsfirmen, Bad Hornef

BMWi, 2000 :
„Energie Daten 2000“, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW), 2001:
Leitfaden Nachhaltiges Bauen

Buehler, B., 2000:
Vorstellung und Demonstration der BauBioDataBank, Buxtehude

Bröker, F.-W., 1994:
Wohn- und Lebensqualität - ein Holzhaus passt sich an, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten; Bauen mit Holz im ländlichen Bereich mit Bauanleitungen

Corte, H., 2002:
Vortrag im Rahmen des holzphysikalischen Seminars an der Universität Hamburg

Doka; G.; Vollmer, M.; Frischknecht, R.; Hofstetter, P.; Knoepfel, I., 1995:
ÖKOINVENTARE FÜR ENERGIESYSTEME, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, TEIL XII, PHOTOVOLTAIK, Bundesamt für Energiewirtschaft und Nationalen Energie-Forschungs-Fonds NEFF

Damberger, B. F., 1995:
„Vergleich von „Ziegelbauten“ mit „Holzbauten“ in Bezug auf den globalen und regionalen CO_2-Haushalt und die erzeugten Güter- und Energieströme“, Diplomarbeit, Universität Wien

Egle, J.; Höttges, K., 2001:
Zwischenbericht des AIF-Forschungsvorhabens 12482 N71; Rationalisierung der Wärmebedarfsermittlung von Gebäuden durch eine standardisierte EDV-Schnittstelle; Chiemsee

Egle, J., 2002:
Gespräch über die Schnittstellenproblematik der Berechnungsgrundlage, Kassel

Ehlers, A.C., 1999:
Umweltgerechtes Planen und Bauen in Schleswig-Holstein; Kriterien – Beispiele – Bilanzen; Ministerium für Frauen, Jugend, Wohnungs- und Städtebau des Landes SH

Energiestiftung Schleswig-Holstein, 2001:
Auszeit, alles zum Thema Stand-By, Kiel

EPF, 2000:
European Panel Federation, Annual Report

Eyerer, P.; Reinhardt, H.-W, Kreissig, J., Kümmel, j., Betz, M., Baitz, M., Hutter, V., Saur, K.,Schoech, H., 2000:
Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden, Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung, Birkhäuser Verlag Basel

Feist, W., 1998:
„Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ausgewählter Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand“, Darmstadt

Feist, W., 2001:
Vortrag und Diskussion über den Bau von Passivhäusern anlässlich des 6. Fachkongress Umwelt, Gebäude & Gesundheit, Nürnberg

Feist, W.; Borsch-Laaks, R., 1993:
Das Niedrigenergiehaus – Neuer Standard für energiebewusstes Bauen. Heidelberg, C.F. Müller Verlag

Forintek Canada Corp., 1993:
Building materials in the context of sustainable development; Raw material balances, energy profiles and environmental unit factor estimates for structural steel products; By Stelco technical services limited

Frischknecht, R.; Hofstetter, P.; Knoepfel, I.; Gränicher, H.-P., 1995:
ÖKOINVENTARE FÜR ENERGIESYSTEME; Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Bundesamt für Energiewirtschaft. und Nationalen Energie-Forschungs-Fonds NEFF, 2. Auflage, Zürich

Frühwald; A., 1999 – 2002:
Vorträge zu den Themen: Ökobilanzen, CO_2- Emissionen, Kohlenstoffspeicherung von Wäldern und Holzprodukten, Kyoto-Protokoll

Frühwald, A; Wegener, G.; Scharai-Rad, M.; Hasch, J., 1997:
Erstellung von Ökobilanzen für die Forst- und Holzwirtschaft, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung ev. München, Informationsdienst Holz

Frühwald, A.; Wegener, G.; Scharai-Rad, M.; Hasch, J., 1996:
Grundlagen für Ökoprofile und Ökobilanzen in der Forst- und Holzwirtschaft, Studie Deutsche Gesellschaft für Holzforschung ev. München in Zusammenarbeit mit Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg

Frühwald, A; Wegener, G.; Scharai-Rad, M., Hasch, J., 1996:
Querschnittanalyse zur ökologischen Bilanzierung von Holzprodukten in Deutschland, Europa und Nordamerika, Studie Deutsche Gesellschaft für Holzforschung ev. München in Zusammenarbeit mit Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg

Frühwald, A.; Pohlmann, C.M., 2000:
Ökobilanzen im Hausbau; „Techniker Tagung des Bundesverbandes Deutscher Fertigbau“, Bad Griesbach, Tagungsband

Frühwald, A.; Pohlmann, C.M., 2000:
Öko-Audit für Produktionsstätten, Buxtehude, Tagungsband

Frühwald, A.; Scharai-Rad; M. Hasch, J., 1999:
Ökologische Bewertung von Spanplatten; Schlussbericht, Universität Hamburg

Frühwald, A.; Scharai-Rad, M.; Speckels, L., 1999:
Life Cycle Assessment of Forestry and Forest Products; Allocation of energy consumption to sawmill products and by-products, Hamburg

Frühwald, A.; Scharai-Rad, M.; Hasch, J., 2000:
Ökologische Bewertung von Holzwerkstoffen; Schlussbericht, Universität Hamburg

Frühwald, A., Wegener, G., Pohlmann, C.M., 2001:
Informationsdienst Holz, Holz – Rohstoff der Zukunft; 2001; Herausgeber: Arbeitsgemeinschaft Holz e.V., Düsseldorf

Gabi, 2000:
(Ganzheitliche Bilanzierung) Dokumentation der Wirkkriterien in der Ökobilanzsoftware und Datenbank GaBi

Gürzenig, T., 2001:
Kontrolle der Sachbilanzen für die Photovoltaik- und Solaranlagen, Fachbereich Maschinenbau, Ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, Essen

Gemeinhardt, M., 1995:
Wohnblockhaus - ein Weg zum ökologisch orientierten Bauen, Diplomarbeit an der Universität Hamburg

Gränicher, H.-P., Frischknecht, R.; Hoftetter, P.; Knoepfel, I., 1995:
ÖKOINVENTARE FÜR ENERGIESYSTEME, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, TEIL XI, SONNENKOLLEKTOR, Bundesamt für Energiewirtschaft und Nationalen Energie-Forschungs-Fonds NEFF

Gruß, A.; Gemeinde Großhansdorf, 2001:
Errichtung einer Photovoltaikanlage/Sachstandsbericht und Aussprache; Vorlage für die Sitzung des Bau- und Umweltausschusses am 1. Februar 2001, Großhansdorf

Hasch, J., 2001:
Ökologische Betrachtung von Holzspan- und Holzfaserplatten; Dissertation am Fachbereich Biologie, Ordinariat für Holztechnologie, Hamburg

Hauser, G.2000:
Die Wirkung der Speicherfähigkeit von Bauteilen und ihre Berücksichtigung in der EnEV, Jahresbericht des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen e.V.; Kassel

Holzlexikon, 1988:
DRW-Verlag Stuttgart, 3. Auflage

Holzrahmenbau, 1995:
Bund dt. Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V., Bruderverlag, Karlsruhe

Informationsdienst Holz:
- Niedrigenergiehäuser – Planungs- u. Ausführungsempfehlungen
- Niedrigenergiehäuser – bauphysikalische Entwurfsgrundlagen
- Wohngesundheit im Holzbau
- Brettstapelbauweise
- Holzskelettbau
- Holzrahmenbau
- Skelettbaudetails Teil 1
- Skelettbaudetails Teil 2
- Holzbau Handbuch: Teil 1 Folge 3: Bauen mit Holzwerkstoffen
- Mehrgeschossiger Wohnungsbau in Holz
- Fenster: Grundlagen, Konstruktionen, Details
- Das Holzhaus, Argumente für eine wachsende Alternative

Herausgeber: Arbeitsgemeinschaft Holz e.V., Düsseldorf

IKP Stuttgart, 1997:
GABI 3.0; Computerprogramm für die ganzheitliche Bilanzierung von Prozessen

IPCC, 1999:
Grenze für Kohlendioxid-Emissionen erreicht, Wissenschaftler warnen vor Klimakatastrophe; Pressetext Austria, www.goo.de

IPCC, 2000:
Summary for Policymakers; Land Use, Land-Use Change, and Forestry, Montreal, Canada

IVH:
(Industrieverband Hartschaum e.V.) Umwelt & Dämmen; Lebenswegbilanz des Dämmstoffes Styropor, Heidelberg

IWR:
Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien c/o Universität Münster

Jahrmann; H.J., 2001:
EDV-gestützte energetische und ökologische Gebäudeoptimierung unter gesamtheitlicher Betrachtung in Fachtagungen Holzbau, der Holzbau und die Energieeinsparverordnung, Düsseldorf

Jannach, H., 2001:
Nachhaltiges Wirtschaften am Beispiel eines holzverarbeitenden Betriebes, Diplomarbeit im Studiengang internationale Wirtschaft und Management der FHS Kufstein Tirol

Karjalinen, T.; Liski, J.; Pussinen, A.; Lapvetlainen, T.; Eggers, T., 2000:
Carbon Sequestration in Forests. EFI-News Vol. 8, Nr.1, S. 5-7

Kasser, U.; Pöll, M., 1998:
Harmonisierung von Grauer Energie im Baustoffbereich; Ergänzender Bericht zu „Graue Energie von Baustoffen“, 2. Auflage, unveröffentlicht

Klaas, U., 2001:
7. internationales Holzbau Forum, 2001, Tagungsband; Garmisch Partenkirchen

Kohler, N., Klinlele, M., 1996:
KOBEK – Methode zur kombinierten Berechnung von Energiebedarf, Umweltbelastung und Baukosten in frühen Planungsstadien, Karlsruhe, Institut für Industrielle Planung

König, H., 2000:
Vorstellung und Demonstration der Berechnungsgrundlage LEGOE, Baumesse München

Kraft, R., 2000:
Ökologische Betrachtung der Herstellung eines Hauses aus LIGU-Holzbauelementen, Diplomarbeit an der Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Ordinariat für Holztechnologie

Krapf, G., 2001:
Evaluierung bestehender Pilot- und Demonstrationsanlagen zur regenerativen Energieerzeugung auf Basis Biomasse in der Bundesrepublik Deutschland – Kurzfassung des Endberichts, Rimpar

Kreissig, J., 2001:
Diskussion über die Berechnung von Wirkungskategorien anhand des Energieaufwandes, Nürnberg

Lignacon, 1998:
Holzbau in Deutschland, empirische Analyse des handwerklichen Holzwohnungsbaus in der Bundesrepublik Deutschland; S. 101

Lohmann, U., 1993:
Holzhandbuch. DRW-Verlag

Lundie, S., 1999:
„Ökobilanzierung und Entscheidungstheorie“ ,Springer-Verlag Berlin, Heidelberg

Lutzer, H., 1996:
Ökobilanzierung der Firma Kjeldstad Sagbruk & Hovleri AS, nach dem Ansatz der IÖW-Ökobilanzierungsmethodik; Diplomarbeit an der Universität Hamburg

Marutzky, R., Seeger, K., 1999:
Energie aus Holz und anderer Biomasse, Grundlagen – Technik – Entsorgung – Recht; DRW-Verlag

Mötzl, H.; Zelger, T., 2000:
Ökologie der Dämmstoffe; Grundlagen der Wärmedämmung – Lebenszyklusanalyse von Wärmedämmstoffen – optimale Dämmstandards, IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und – ökologie, Donau-Universität Krems, Zentrum für Bauen und Umwelt; Springer Wien New York

Münzenberg, U.; Thumulla, J., 2001:
Raumklimaaufzeichnungen als baubiologisches Werkzeug zur Problemlösung von Feuchtigkeit in Gebäuden, 6. Fachkongress Umwelt, Gebäude & Gesundheit, Nürnberg, Tagungsband, Seite 348 – 354

Nabuurs, G. J.; Sikkema, R., 1998:
The Role of Harvested Wood Products in National Carbon Balances – an evaluation of alternatives for IPCC guidelines, Institute for Forestry and Nature Research (IBN-DLO), Wageningen

Natterer, J.; Herzog, T.; Volz, M., 1996:
Holzbau Atlas; Sonderausgabe der Arbeitsgemeinschaft Holz, Düsseldorf

Natterer, J.; Hoor, D.; Götz, K.-H.; Möhler, K., 1978:
Holzbau Atlas; Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München

Ockelmann, T., 2001:
Ökobilanz des HUF Sonnenhauses, Diplomarbeit an der Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Ordinariat für Holztechnologie

Öko-Institut, 2000:
Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Schleswig-Holstein, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Natur und Forsten des Landes SH, Darmstadt

ÖKO TEST, 2000: Sonderheft Energie, Nr. 32 Nov.

ÖKO TEST, 2000: Sonderheft Häuser, Nr. 31 Mai

Pohlmann, C. M. Frühwald, A., 2001:
Interner Abschlussbericht des Forschungsvorhabens Planungsmethoden zur Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs von Wohngebäuden mit Hilfe von Ökobilanzen, Universität Hamburg, Ordinariat für Holztechnologie; unveröffentlicht

Pohlmann, C.M., 2001:
Life Cycle Assessment in the wooden house building sector; 5^{TH} Symposium EUROWOOD (Information technology: improving the future prospects of wood in construction), CTBA, Bordeaux, Tagungsband

Pohlmann, C.M., 1999:
Ökobilanz für den Rohbau eines Holzhauses; Diplomarbeit an der Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Ordinariat für Holztechnologie

Pohlmann, J. 1999 - 2002:
Berechnung von Massivhäusern und Einsicht in Planungsgrundlagen des Massivbaus, Hoisdorf

Pohlmann, R., 2000:
Diskussion über das Konstruktionsprinzip des 81fuenf Hauses, Kiefen

Quak, D., 2001:
Einfluss von Energiestandard und konstruktiven Faktoren auf die Umweltwirkungen von Wohngebäuden – eine Ökobilanz, Öko-Institut, Institut für angewandte Ökologie e.V.; Werkstattreihe Nr. 126, Freiburg

Richter, K.; Brunner, K.; Bertschinger, H., 1996:
Ökologische Bewertung von Wärmeschutzgläsern, Integraler Vergleich verschiedener Verglasungsvarianten; EMPA Abt. Holz im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft

Richter, K.; Sell, J., 1992:
„Ökobilanzen von Baustoffen und Bauprodukten aus Holz“, Arbeitsbericht Nr. 115 / 24 der EMPA, Dübendorf

Richter, K. et al., 1995:
„Energie- und Stoffbilanzen bei der Herstellung von Wärmedämmstoffen“, Studie der EMPA Dübendorf im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft

Richter, K., 2001:
„Ökoeffizientes Ressourcenmanagement: Erkenntnisse aus vergleichenden Ökobilanzen und Folgerungen für die Holzwirtschaft, Tagungsband, Rosenheim

Ristl, M., 1996:
Erstellung einer Sachbilanz für Brettschichtholz als Grundlage für eine Ökobilanzierung; Diplomarbeit an der Universität Hamburg

Schmidt-Bleek, F., 1998:
Das MIPS-Konzept, weniger Naturverbrauch – mehr Lebensqualität durch Faktor 10, Droemersche Verlagsanstalt Th. Knaur Nachf., München

Schulz, R., 2002:
Gespräch über energiesparende Elektrogeräte, Ahrensburg

Schweinle, J.; Thoroe, C., 2001:
Vergleichende Ökobilanzierung der Rundholzproduktion in verschiedenen Forstbetrieben, Mitteilungen der BFH, Hamburg

Seeger, K., 2002:
Gespräch über den Herstellungsenergiebedarf von Holzpellets

Selk, D: Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen e.V. Kiel; Mitteilungsblätter:
- Optimiertes Bauen, 1999
- Umweltfreundliches Bauen, 1996
- Niedrig-Energiehäuser, 1999
- Zukunftsweisende Wohnprojekte, 2000

Sell, J., 1997:
Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten, Baufachverlag AG Zürich Lignum

Speckels, L., 2001:
Ökologische Betrachtung von Gebrauchtholz, Dissertation im Fachbereich Biologie, Ordinariat für Holztechnologie, Hamburg

Speckels, L.; Frühwald, A.; Scharai-Rad, M.; Welling, J., 2000:
Ökologische Bilanzierung von Bauschnittholz und veredelten Vollholzprodukten, Schlussbericht

Stein, V., Schmidt, M., Bartolomai, B., Schulz, E., 2000:
Der Bedarf an mineralischen Baustoffen, Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.; Frankfurt, S. 64

Thoroe, C.; Schweinle, J., 1996:
Ökobilanzierung in der Forstwirtschaft, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg

Thoroe, C.; Schweinle, J., 1996:
Analyse und Bewertung der forstlichen Produktion als Grundlage für weiterführende forst- und holzwirtschaftliche Produktlinien- Analyse; Studie, bewilligt von der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München, Hamburg

Venschott, D., 2000:
Neue Holzwerkstoffe, Diplomarbeit an der Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Ordinariat für Holztechnologie

Umweltbundesamt, 1992:
Ökobilanzen für Produkte. Bedeutung, Sachstand, Perspektiven. Broschüre, Umweltbundesamt Berlin

Umweltbundesamt (Hrsg.), 1997:
„Materialien zu Ökobilanzen und Lebensweganalysen“, Aktivitäten und Initiativen des Umweltbundesamtes, Berlin, UBA-Texte 26/97

Wagner, H.-J.; Schuchard, R.; Temming, H.; Petersdorff, C.; Boermann, T., 2001:
Zwischenbericht „Ökologische Bewertung im Gebäudebereich“, Forschungsprojekt des Landes Nordrhein Westfalen, 2001

Waltjen, T.; Mötzl, H.; Mück, W.; Torghele, K.; Zelger, T., 1999:
Ökologischer Bauteilkatalog, bewertete gängige Konstruktionen; IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und – Ökologie, Donau-Universität Krems, Zentrum für Bauen und Umwelt; Springer Wien New York

Wegener, G; Frühwald, A.; Scharai-Rad, M.; Hasch, J., 1994:
Bewertung von Holz im Vergleich mit anderen Werkstoffen unter dem Aspekt der CO_2-Bilanz., Forschungsbericht; DGfH, München

Wegener, G., Wind, C., Zimmer, B., Frühwald, A., 2000:
Agenda 21, Wald und Holz in Städten und Gemeinden, Holzabsatzfonds, Bonn

Weibel, T.; Stritz, A., 1995:
Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien, Institut für Energietechnik, ETHZ; Zürich

Winter, S., 2002:
Wertermittlung und Lebensdauer von Holzgebäuden, Informationsdienst Holz; holzbau handbuch Reihe 3 Teil 1 Folge 2

Winter, S., 2002:
Vortrag über die Wertermittlung und Lebensdauer von Holzgebäuden, 3. Hochschultag, Nürnberg

Wolf, J., 1995:
bauen, modernisieren, einrichten, Informationsdienst für Bauherren und Modernisierer, Heinze Verlag

Zarsteck, F., 2002:
Gespräch über die Verknüpfung von Softwareprogrammen im Hausbau und die Vorgehensweise von Planern und Architekten

Zarsteck, F., 2000:
CAD-Planung von Gebäuden, Fachhochschule Bremen – Fachbereich Architektur

Zimmer, B., 2002:
Gespräch über Holzpellets – Unter Verweis auf eine entstehende Diplomarbeit an der FH Kuchl, Österreich, Heidelberg

11.1.1. Normen - Gesetze - Verordnungen

DIN 1052 Teil 1	Holzbauwerke; Berechnung und Ausführung, 1995
DIN 1052 Teil 2	Holzbauwerke; Mechanische Verbindungen, 1995
DIN 1052 Teil 3	Holzbauwerke; Holzhäuser in Tafelbauart, Berechnung und Ausführung, 1995
DIN 68 705 Teil 3	Sperrholz; Bau-Furniersperrholz, 1980
DIN 68 763	Spanplatten; Flachpressplatten für das Bauwesen; Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Überwachung, 1990
DIN 68800:	Teil 2 und 3; Entwurf von 1994
DIN 4108-5	Wärmeschutz im Hochbau- Teil 5: Berechnungsverfahren, 1981
DIN 4108-7	Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden- Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden- Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie Beispiele, Entwurf 2000
DIN V 4108-6	Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden- Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs, Entwurf 2000

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden- Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Entwurf 2000

DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement-Ökobilanz-Prinzipien und allgemeine Anforderungen

DIN EN ISO 14041 Umweltmanagement-Ökobilanz-Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz

DIN EN ISO 14042: Umweltmanagement-Ökobilanz-Wirkungsabschätzung

DIN EN ISO 14043 Umweltmanagement-Ökobilanz-Auswertung

EEG Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2000 Teil 1 Nr. 13, ausgegeben zu Bonn am 13. März 2000

EnEV Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden; 16.11,2001

EnEV Allgemeine Begründung der Verordnung

EnEV Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 13 der Energieeinsparverordnung (AVV Energiebedarfsausweis); Entwurf vom 30.11.2001

EN 300 Platten aus langen, schlanken, ausgerichteten Spänen (OSB), Definition, Klassifizierung und Anforderungen, Deutsche Fassung, 1997

EN V Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, 1999

EN 312 Teil 1-7 Spanplatten; Anforderungen, 1996

EN 622 Teil 1-5 Faserplatten; Anforderungen, 1997

EN 636 Teil 1-3 Sperrholz, Anforderungen, 1997

ISO CD 14048 Environmental management- LCA- LCA Data Format

ISO TR 14049 Environmental management-LCA- Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition an inventory analysis

17. BimSchV Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähliche brennbare Stoffe – 17. BimSchV, 23 November 1990

11.1.2. Firmenrecherche

Firma Alligator Planungsmappe für Architekten, Ingenieure und Fachleute der Solartechnik, 2000

Firma Cordes Datenaufnahme zur ökologischen Bewertung 1999; 2000, Waffensen

Firma Glunz Moderner Holzrahmenbau, 2000

Niedrigenergiewand, 2000

Geschossdecke, 2000

	Allgemeine gesetzliche Anforderungen, 2000
Firma Haacke	Firmenbesichtigungen in 1999 und 2000, Celle; Produktinformation der Firma
Firma HUF Haus	Firmenbesichtigung 2001, Hartenfels
Firma Kronopol	Handbuch für das Holzbauunternehmen, 1999
	Handbuch für Architekten.,1999
	Firmenbesichtigung, 2001
	Handbuch zum Feuchteschutz im Dach und im Holzbau, 1999
Firma Heraklith	Planungsordner für den Holzbau, 2000, Systembauweise
Firma Hornitex	Masterwood, die diffusionsoffene Dach- und Wandplatte, 2000
	Euro Kollektion, Informationsmaterial, 2000

11.1.3. Internetrecherche

Für die Datensammlung der Berechnungsgrundlage und die Hintergrundinformationen zum allgemeinen Teil der Arbeit wurde zusätzlich zu den herkömmlichen Medien auf die neuen Medien zurückgegriffen. Verschiedene Internetseiten von Herstellern und Institutionen haben zu der Arbeit beigetragen,.

www.argolite.de	www.eternit.de	www.umweltbundesamt.de
www.glunz.de	www.haacke-haus.de	www.ogip.de
www.holzcon.de	www.oekoregio.de	www.gibbeco.org
www.81fuenf.de	www.rockwool.de	www.legoe.de
www.wimmer.com	www.pfleiderer.de	www.holz-zentralblatt.de
www.kronoply.de	www.egger.de	www.enev-online.de
www.argeholz.de	www.bdf-ev.de	www.agoef.de
www.blowerdoor.de	www.baunet.de	www.bauarchiv.de
www.bmbf.de	www.bmu.de	www.baudas.de
www.ctba.fr	www.dgfh.de	www.bauen-inaro.de
www.eurosolar.org	www.holz.de	www.baulexikon.de
www.passivhaus.de	www.solarserver.de	www.bauenmitholz.de
www.treibhauseffekt.com		www.holz.de

11.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ziel des durchgeführten Forschungsvorhabens mit der Bremer Hochschule..... 4
Abbildung 2: Graphische Darstellung des Treibhauseffektes 8
Abbildung 3: Lebensweg eines Gebäudes; von der Wiege (Rohstoffe) bis zur Bahre (thermische Verwertung) oder im Idealfall wieder zur Wiege 22
Abbildung 4: Bestandteile einer Ökobilanz 25
Abbildung 5: Modularer Aufbau einer Ökobilanz 27
Abbildung 6: Wirkungsabschätzung einer Spanplatte V 100 hinsichtlich des Treibhauseffektes 31
Abbildung 7: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebensphasen eines Niedrigstenergiehauses am Gesamtenergiebedarf über einen Zeitraum von 60 Jahren 32
Abbildung 8: Korrelation von Dämmstoffdicke und ganzheitlicher Ökologie/Ökonomie..... 45
Abbildung 9: Korrelation von Heizenergie und Lüftungsenergie..... 47
Abbildung 10: Entwicklung des Heizenergiebedarfs..... 48
Abbildung 11: Querschnitt des Aufbaus einer handelsüblichen Wärmeschutzverglasung mit einem u-Wert von 0,9 W/m²K..... 52
Abbildung 12: Verklebung der Stöße zur Reduzierung der Luftströmung 53
Abbildung 13: Einflüsse auf den Wärmehaushalt eines Einfamilienhauses 56
Abbildung 14: Graphischer Aufbau eines Daches..... 66
Abbildung 15: Aufbau einer Zwischendecke und einer Wand..... 67
Abbildung 16: Graphischer Aufbau einer Wand des 81^{fuenf} Hauses..... 68
Abbildung 17: Graphischer Aufbau einer hochgedämmten Wand 68
Abbildung 18: Wärmebrückenreduzierte Wandkonstruktion..... 69
Abbildung 19: Energiefabrik und Kohlenstoffsenke Wald 71
Abbildung 20: CO_2-Bilanz von Holz (Holz vereinfachend als $C_6H_{12}O_6$ gesehen) 72
Abbildung 21: Negative Kohlendioxidbilanz eines herkömmlichen Hauses 74
Abbildung 22: Kohlendioxidbilanz (bzw. –fluß) eines Positivhauses..... 74
Abbildung 23: Vorgehensweise bei der ökologischen Bewertung von Bauwerken 126
Abbildung 24: Ansicht des Feldes „Eingabe“ für die Betrachtung der verwendeten Energieträger und der Rahmenbedingungen 129
Abbildung 25: Ansicht des Feldes „Eingabe“ für die Betrachtung der Baustoffe..... 130
Abbildung 26: Auszug der Fensterlisten des Feldes „Eingabe“ 131
Abbildung 27: Eingabemöglichkeit eines gewichteten Mittelwertes für die Betrachtung der Transportentfernungen der einzelnen Produktionsschritte..... 131
Abbildung 28: Ansicht des Feldes „Daten“ in einem kleinen Ausschnitt..... 132

Abbildung 29: Ansicht des Feldes „Berechnung“ 134
Abbildung 30: Feld „Berechnung“ mit Erläuterungen 135
Abbildung 31: Ansicht des gesamten Feldes „Ergebnisse“ 136
Abbildung 32: Feld ERGEBNISSE mit Erklärungen 138
Abbildung 33: Darstellung des Feldes ÖKOBILANZ 142
Abbildung 34: Holzrahmenkonstruktion des Würzburger Hauses 152
Abbildung 35: Hausansicht Würzburg 152
Abbildung 36: Wandaufbau Würzburg mit Eckverbindung 153
Abbildung 37: Hausansicht Bremen 154
Abbildung 38: Wandaufbau Bremen mit Eckverbindung 156
Abbildung 39: Darstellung der verbauten Masse in Tonnen, Haus Würzburg 161
Abbildung 40: Darstellung des verbauten Volumens in m³, Haus Würzburg 161
Abbildung 41: Darstellung der verbauten Massen in Tonnen, Haus Bremen 162
Abbildung 42: Darstellung des verbauten Volumens in m³, Haus Bremen 162
Abbildung 43: Detailbetrachtung des Nadelholzeinsatzes des Bremer Hauses 163
Abbildung 44: Feld Ergebnisse „Würzburg“ 169
Abbildung 45: Feld Ergebnisse „Bremen“ 170
Abbildung 46: Darstellung des Gesamtenergiebedarfs der betrachteten Gebäude 174
Abbildung 47: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebenswegmodule an der Gesamtenergie des Würzburger Hauses 178
Abbildung 48: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebenswegmodule an der Gesamtenergie des Würzburger Hauses 179
Abbildung 49: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebenswegmodule an der Gesamtenergie des Bremer Hauses 180
Abbildung 50: Prozentualer Anteil der einzelnen Lebenswegmodule an der Gesamtenergie des Bremer Hauses 180
Abbildung 51: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an der Herstellungsenergie und der Instandhaltungsenergie des Hauses Würzburg (NORMAL) 184
Abbildung 52: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an der Herstellungsenergie und der Instandhaltungsenergie des Bremer Hauses 184
Abbildung 53: Prozentualer Anteil der Lebensabschnitte an den gesamten CO_2-Emissionen des Würzburger Hauses 191
Abbildung 54: Prozentualer Anteil der Lebensabschnitte an den gesamten CO_2-Emissionen des Würzburger Hauses 192
Abbildung 55: Prozentualer Anteil der Lebensabschnitte an den gesamten CO_2-Emissionen des Bremer Hauses 193
Abbildung 56: Prozentualer Anteil der Lebensabschnitte an den gesamten

CO_2-Emissionen des Bremer Hauses 193
Abbildung 57: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an den CO_2-Emissionen der Herstellung und der Instandhaltung des Hauses Würzburg 197
Abbildung 58: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an den CO_2-Emissionen der Herstellung und der Instandhaltung Bremen ohne Energieanlagen 197
Abbildung 59: Ergebnisdarstellung Bremen II (Solar 6 m² und PV 10 m², Erdgas) 202
Abbildung 60: Prozentualer Anteil der einzelnen Module an der Gesamtenergie der Variante Bremen II (Normal) 204
Abbildung 61: Prozentualer Anteil der einzelnen Module an der Gesamtenergie der Variante Bremen II (Optimiert) 205
Abbildung 62: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an der Herstellungsenergie (Normal) 206
Abbildung 63: Prozentualer Anteil der Module an den CO_2-Gesamtemissionen Bremen II Normal 208
Abbildung 64: Prozentualer Anteil der Module an den CO_2-Gesamtemissionen Bremen II Optimiert 209
Abbildung 65: Prozentualer Anteil der einzelnen Baustoffe an den CO_2-Emissionen der Herstellung und der Instandhaltung von Bremen II 210
Abbildung 66: Graphische Darstellung des Treibhauseffektes 212
Abbildung 67: Vergleich der Häuser in der Wirkungskategorie Treibhauseffekt 212
Abbildung 68: Vorgang der Versauerung 213
Abbildung 69: Vergleich der Häuser in der Wirkungskategorie Versauerung 214
Abbildung 70: Vorgang der Überdüngung 215
Abbildung 71: Vergleich der Häuser in der Wirkungskategorie Überdüngung 216
Abbildung 72: Vorgang der Bildung von bodennahem Ozon 217
Abbildung 73: Vergleich der Häuser in der Wirkungskategorie Bildung von bodennahem Ozon 217
Abbildung 74: Gesamtenergiebedarf des Hauses und der Anteil der Herstellungsenergie 229
Abbildung 75: Prozentualer Anteil der Herstellungsenergie an der Gesamtenergie 229
Abbildung 76: Bildschirmansicht der entwickelten Berechnungsgrundlage 234
Abbildung 77: Holzhäuser als langfristige Kohlenstoffsenke mit positiver CO_2-Bilanz 237

11.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitliche Abfolge der internationalen Klimaschutzbemühungen der Weltpolitik ... 10
Tabelle 2: Baugenehmigungszahlen von Ein- und Zweifamilienhäusern in Holzbauweise .. 17
Tabelle 3: Sachbilanzdaten (stofflich) einer Spanplatte V100 ... 28
Tabelle 4: Sachbilanzdaten (energetisch) einer Spanplatte ... 29
Tabelle 5: Stoffeinsatz für 1 m³ Brettschichtholz ... 29
Tabelle 6: Wirkungsbilanzen verschiedener ... 37
Tabelle 7: Bauphysikalische und ökologische Daten von vier verschiedenen Wohnhauswandsystemen ... 38
Tabelle 8: Aufbau der in Tab. 7 bewerteten Wandsysteme ... 38
Tabelle 9: Ökologischer Vergleich verschiedener Trägersysteme aus Holz ... 39
Tabelle 10: Stofflicher und energetischer Vergleich von BSH und KVH ... 40
Tabelle 11: Vergleich unterschiedlicher Wandaufbauten bei gleichem Wärmedurchgangskoeffizienten ... 44
Tabelle 12: Vergleich der herkömmlichen Holzbausysteme hinsichtlich Konstruktionseigenschaften und ökologischen Parametern ... 59
Tabelle 13: Umgerechnete Daten aus dem Bauforschungsbericht ... 82
Tabelle 14: Umgerechnete Daten aus Angaben des Instituts für Kunststoffprüfung ... 84
Tabelle 15: Umgerechnete Daten der Universität Hamburg und der BFH in Hamburg ... 85
Tabelle 16: Berechnungen von Pohlmann ... 86
Tabelle 17: Umgerechnete Daten für Zweischeibenisolierverglasung ... 88
Tabelle 18: Berechnung von Passivhausfenstern (Dreischeibenisolierverglasung) ... 89
Tabelle 19: CO_2-Emissionen verschiedener Energieträger ... 90
Tabelle 20: Herstellungsenergie und daraus resultierende Kohlendioxidemissionen eines Sonnenkollektors von 1 m² ... 94
Tabelle 21: Zusammenfassung der Grunddaten der Solaranlage zur Warmwasserbereitstellung ... 94
Tabelle 22: Berechnung der Herstellungsenergie und der Kohlendioxidemissionen einer Photovoltaikanlage ... 97
Tabelle 23: Berechnung Wechselrichter (Leistung 3 KW) ... 98
Tabelle 24: Berechnung der Kennwerte für 12 bzw. 16 m² Paneele. ... 98
Tabelle 25: Datengrundlage Photovoltaikanlage ... 98
Tabelle 26: Berechnung eines Holzpelletofens ... 100
Tabelle 27: Modul Transport, Datengrundlage für Energiebedarf und Kohlendioxidemissionen ... 103

Tabelle 28: Übersicht über die Herkunft der verwendeten Daten der vorliegenden Studie 105
Tabelle 29: Berechnungsgrundlage für den Energieverbrauch in der Produktion 110
Tabelle 30: Schadstoffemissionen der MVA Stapelfeld 117
Tabelle 31: Darstellung der Umrechnungsfaktoren für die Berechnung einer „energiebedingten Ökobilanz“ 141
Tabelle 32: Verwendete Nadelholzsortimente in einem Haus 147
Tabelle 33: Auszug aus den Materiallisten für den Dämmstoff 148
Tabelle 34: Vergleich der betrachteten Gebäude hinsichtlich ihrer Grundwerte 156
Tabelle 35: Vergleich der Betriebsenergie der Gebäude 158
Tabelle 36: Darstellung der in den Häusern NORMAL verbauten Materialien 159
Tabelle 37: Darstellung der Kennwerte der Wandelemente und Wandaufbau 165
Tabelle 38: Ergebnisse der Berechnungsgrundlage für den Vergleich von 1 m² Wandelement 166
Tabelle 39: Darstellung des Gesamtenergiebedarfs der betrachteten Gebäude bei einer Variation der Energieanlagengröße 173
Tabelle 40: Gesamtenergiebilanz der optimierten Häuser bei Verwendung einer Holzpelletheizung 175
Tabelle 41: Gesamtenergiebilanz der betrachteten Gebäude NORMAL über 60 Jahre 176
Tabelle 42: Gesamtenergiebilanz der betrachteten Gebäude im optimierten Zustand über 60 Jahre 177
Tabelle 43: Energiebedarf zur Herstellung der Baustoffe 181
Tabelle 44: Mengenmäßiger Anteil der einzelnen Baustoffen am Herstellungsenergiebedarf einschließlich des Materialaustausch der Baustoffe über 60 Jahre (NORMAL) 183
Tabelle 45: Prozentualer Anteil von Baustoffgruppen am Herstellungsenergiebedarf der Baustoffe 185
Tabelle 46: CO_2-Emissionen über den Lebensweg eines Hauses (Nutzungszeitraum 60 Jahre) 187
Tabelle 47: Kohlendioxidbilanz der einzelnen Module über 60 Jahre (NORMAL) 189
Tabelle 48: Kohlendioxidbilanz der Häuser OPTIMAL 190
Tabelle 49: CO_2-Emissionen bei der Herstellung und Instandhaltung der Gebäude 194
Tabelle 50: Mengenmäßige Erfassung der CO_2-Emissionen der einzelnen Baustoffen an den Emissionen für die Herstellung und den Instandhaltung der beiden Häuser über 60 Jahre 196
Tabelle 51: Prozentualer Anteil verschiedener Baustoffklassen der CO_2-Emissionen 198
Tabelle 52: Definition der Transportentfernungen für die getroffenen Annahmen 199

Tabelle 53: Auswirkung der Transportentfernungen auf die Gesamtbetrachtung des Bremer Hauses 200
Tabelle 54: Einfluss der Transportentfernungen auf den Gesamtenergiebedarf des Bremer Hauses 200
Tabelle 55: Einfluss der Transportentfernungen auf die CO_2- Gesamtemissionen 201
Tabelle 56: Darstellung der einzelnen Module an dem Gesamtenergiebedarf NORMAL und OPTIMIERT (Bremen II) 203
Tabelle 57: Darstellung der einzelnen Lebensabschnitte an den CO_2-Gesamtemissionen NORMAL und OPTIMIERT 207
Tabelle 58: Darstellung von Literaturwerten im Vergleich zu der vorliegenden Studie 219

Lebenslauf

Vor- und Zuname:	Cevin Marc Pohlmann
Geburtstag:	25.02.1972
Geburtsort:	Hamburg
Wohnanschrift:	Thie 26, 22955 Hoisdorf
Eltern:	Chris Pohlmann (geb. Trilk) und Jürgen Pohlmann
Brüder:	Carsten und Julian Pohlmann
Nationalität:	deutsch
Familienstand:	verheiratet mit Inga Pohlmann (geb. Hansen)

Schulbildung

1978 - 1983 Grundschule Hoisdorf

1983 - 1992 Emil-von-Behring Gymnasium Großhansdorf

- Juni 1992 Abschluss Allgemeine Hochschulreife

Zivildienst

Oktober 1992 - Dezember 1993

Zivildienst beim Malteser Hilfsdienst in Ahrensburg

Studium

April 1994 - Oktober 1999

Studium der Holzwirtschaft an der Universität Hamburg

- November 1999 Abschluss Diplom-Holzwirt

Thema der Diplomarbeit: Ökobilanz für den Rohbau eines Holzhauses

Derzeitige Beschäftigung

Seit November 1999

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität Hamburg,

Ordinariat für Holztechnologie