
BACHELORARBEIT

Frau
Laila-Annalie Böhm

Das Potenzial von Bauen mit naturnahen Wärmedämmstoffen

**Analyse der Ausgangsdaten mit Bezug
auf die Ökobilanz der naturnahen
Dämmstoffe Stroh, Hanf und Holz**

Mittweida, 2022

BACHELORARBEIT

Das Potenzial von Bauen mit naturnahen Wärmedämmstoffen

**Analyse der Ausgangsdaten mit Bezug
auf die Ökobilanz der naturnahen
Dämmstoffe Stroh, Hanf und Holz**

Autor:

Frau Laila-Annalie Böhm

Studiengang:

**Immobilienmanagement und
Facilities Management**

Seminargruppe:

FM19w1-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Annika Möcker

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. (FH) Patrick Zschocke

Einreichung:

Mittweida, 13.11.2022

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2022

Faculty of Industrial Engineering

BACHELOR THESIS

The Potential of Building With Near-Natural Thermal Insula- tion Materials

**Analysis of the Initial Data With Refe-
rence to the Life Cycle Assessment
of the Near-Natural Insulation Materi-
als Straw, Hemp and Wood**

author:

Ms. Laila-Annalie Böhm

course of studies:

Real Estate and Facility Management

seminar group:

FM19w1-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Annika Möcker

second examiner:

Dipl.-Ing. (FH) Patrick Zschocke

submission:

Mittweida, 13.11.2022

defence/ evaluation:

Mittweida, 2022

Bibliografische Beschreibung:

Böhm, Laila-Annalie

Das Potenzial von Bauen mit naturnahen Wärmedämmstoffen
Analyse der Ausgangsdaten mit Bezug auf die Ökobilanz der naturnahen
Dämmstoffe Stroh, Hanf und Holz.

The Potential of Building With Near-Natural Thermal Insulation Materials
Analysis of the Initial Data With Reference to the Life Cycle Assessment of the
Near-Natural Insulation Materials Straw, Hemp and Wood.

67 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen, Bachelorarbeit, 2022

Referat:

Diese Bachelorarbeit soll einen Überblick über das Bauen mit naturnahen Wärmedämmstoffen von Stroh, Hanf und Holz verschaffen. Dabei wird anfänglich auf die Grundlagen der Nachhaltigkeit im Bau eingegangen. Dies beinhaltet u. a. das nachhaltige Bauen, die Ökobilanzierung sowie Grundlagen zu naturnahen Baustoffen und Wärmedämmstoffen im Bauwesen. Nach der Einführung in diese Grundlagen werden die einzelnen Baustoffe genauer untersucht. Es wird Bezug auf die vorhandenen Daten genommen und ein Blick auf Ihre Ökobilanzdaten geworfen. Anschließend werden sie mit Praxisbeispielen untermauert. Zum Schluss folgen eine Zusammenfassung in einer Matrix und Zukunftsaussichten.

Inhalt

Inhalt	.....	I
Abbildungsverzeichnis	.....	III
Tabellenverzeichnis	.....	IV
Abkürzungsverzeichnis	.....	VI
1 Einführung	.....	1
1.1	<i>Einführung in den Themenbereich</i>	1
1.2	<i>Problemstellung</i>	3
1.3	<i>Zielsetzung und Forschungsfrage</i>	3
1.4	<i>Methode</i>	4
2 Nachhaltigkeit im Bau	.....	5
2.1	<i>Grundlagen</i>	5
2.2	<i>Nachhaltiges Bauen</i>	7
2.2.1	Ökologische Nachhaltigkeit	10
2.2.2	Ökonomische Nachhaltigkeit	10
2.2.3	Soziokulturelle und funktionelle Nachhaltigkeit	11
2.2.4	Schutzziele und -güter der Nachhaltigkeit	11
2.3	<i>Ökobilanzierung</i>	13
2.3.1	Definition und Aufbau	13
2.3.2	Gebäudeökobilanz	15
2.3.3	Anforderungen und Ziele	16
2.3.4	Kritik	18
2.4	<i>Naturnahe Baustoffe</i>	18
2.4.1	Grundlagen	18
2.4.2	Biologische und natürliche Baustoffe.....	22
2.5	<i>Wärmedämmstoffe</i>	23
3 Kritische Analyse von ausgewählten naturnahen Dämmstoffen mit Bezug zur Ökobilanz	.....	26
3.1	<i>Stroh</i>	29
3.1.1	Allgemein	29

3.1.2	Strohdämmung	30
3.1.2.1	Ernte und Aufbereitung für Bauprodukte	30
3.1.2.2	Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten	31
3.1.2.3	Kosten	33
3.1.2.4	Ökobilanzierung	33
3.1.2.5	Vor- und Nachteile	38
3.1.3	Beispiel – Strohballenhaus Bad König, Hessen (DE)	38
3.2	<i>Hanf</i>	40
3.2.1	Allgemein	40
3.2.2	Hanffaserdämmung	41
3.2.2.1	Ernte und Aufbereitung für Bauprodukte	41
3.2.2.2	Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten	42
3.2.2.3	Kosten	44
3.2.2.4	Ökobilanzierung	44
3.2.2.5	Vor- und Nachteile	48
3.2.3	Beispiel – Fachwerkhütte, Baden-Württemberg (DE)	48
3.3	<i>Holz</i>	49
3.3.1	Allgemein	49
3.3.2	Holzfaserdämmung	51
3.3.2.1	Ernte und Aufbereitung für Bauprodukte	51
3.3.2.2	Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten	53
3.3.2.3	Kosten	55
3.3.2.4	Ökobilanzierung	55
3.3.2.5	Vor- und Nachteile	58
3.3.3	Beispiel – Einfamilienhaus, Bayern (DE)	58
4	Matrix und Zukunftsaussichten	60
4.1	<i>Matrix</i>	60
4.2	<i>Fazit</i>	63
4.3	<i>Zukunftsaussichten und Forschungsthese</i>	64
5	Literaturverzeichnis	66
Anlagen	.....	72
Anlagen, Teil 1	.....	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Dreidimensionalität von Nachhaltigkeit	9
Abbildung 2 Bewertungsgrundlage von Produkten der Ökobilanz	13
Abbildung 3 Vereinfachte Lebenszyklusdarstellung.....	16
Abbildung 4 Struktur nach DIN EN 15978, umweltbezogene Informationen	26
Abbildung 5 Diagramm der Strohballenherstellung.....	30
Abbildung 6 Lebensphasen eines Baustrohballens	35
Abbildung 7 Strohdämmung, Zweifamilienhaus, Bad König.....	39
Abbildung 8 Diagramm der Hanfdämmungsherstellung.....	41
Abbildung 9 Zusammensetzung von Hanfvlies	45
Abbildung 10 Hanffaserdämmung, Fachwerkhaus, Baden-Württemberg.....	49
Abbildung 11 Diagramm der Holzfaserherstellung.....	51
Abbildung 12 Einfamilienhaus in Tapfheim, Bayern.....	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Schutzgüter der Nachhaltigkeit.....	11
Tabelle 2	Schutzziele der Nachhaltigkeit.....	12
Tabelle 3	Einteilung von Naturrohstoffen mit Produktbeispielen.....	19
Tabelle 4	Naturrohstoffe mit gewonnen Erzeugnissen und Produktbeispielen	19
Tabelle 5	Funktionen der Produkte und Leistungen von Naturstoffen mit Beispielen	21
Tabelle 6	Stroh- und Kornertrag von unterschiedlichem Getreide	29
Tabelle 7	Durchschnittliche Baustrohballenabmessung	31
Tabelle 8	Bauphysikalische Kennwerte.....	32
Tabelle 9	U-Wert-Berechnung Strohballedämmung	36
Tabelle 10	Umwelteigenschaften von Strohballedämmung pro 0,213 m ³	37
Tabelle 11	Erzeugnis von Nutzhanf	40
Tabelle 12	Bauphysikalische Eigenschaften von Einblas-/ Stopfhanf	43
Tabelle 13	Bauphysikalische Eigenschaften von Hanfmatten	43
Tabelle 14	U-Wert-Berechnung Hanfvliesdämmung	46
Tabelle 15	Umwelteigenschaften der Hanfvliesdämmung pro 0,193 m ³	47
Tabelle 16	Bauphysikalische Eigenschaften von Holzfasern.....	54
Tabelle 17	Bauphysikalische Eigenschaften von Holzfaserdämmmatten	54
Tabelle 18	Bauphysikalische Eigenschaften von Holzfaserdämmplatten	54
Tabelle 19	U-Wert-Berechnung Holzfaserdämmung	56
Tabelle 20	Umwelteigenschaften der Holzfaserdämmung pro 0,174 m ³	57

Tabelle 21 Matrix über die Baustoffe Stroh, Hanf und Holz zum direkten Vergleich.....	60
Tabelle 22 Umweltindikatoren im direkten Vergleich	63

Abkürzungsverzeichnis

10, tr	10° Celsius Mitteltemperatur, trockener Zustand
°C	Grad Celsius
λ	Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstand
ρ	Rohdichte
AP	Versauerungspotential
B2	Brennbarkeitsklasse normal entflammbar
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
c	Spezifische Wärmekapazität
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
dt	Dezitonne
E	Euroklasse E 0 – 2 min
ECA	Ökotoxizität in Gewässern
ECT	Ökotoxizität im Boden
EN	Europäische Norm
EnEv	Energieeinsparverordnung
EP	Eutrophierungspotential
ESP	Polystyrol
ETA	Europäische Technische Bewertung
FASBA	Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FSC	Forest Stewardship Council
GEG	Gebäudeenergiegesetz

GWP	Treibhausgaspotential
ha	Hektar
HC	Humantoxität
ISO	Internationale Organisation für Normung
KfW	Effizienzhaus
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life -Cycle -Cost
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
M.-%	Massenprozent
Na₂CO₃	Natriumcarbonat
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGF	Nettogeschossfläche
ODP	Ozonabbauendes Potential
PEI	Primärenergieaufwand
PF	Phenolharz
PKR	Produkt-Kategorie-Regel
POCP	Photooxidationspotential
PUR	Polyurethan
Q“h	Jahresheizwärmebedarf
Rs	Spezifischer Strömungswiderstand
U	Wärmedurchgangskoeffizient
UN	Vereinte Nationen
VOC	Volatile Organic Compounds
WDVS	Wärmedämmverbundsysteme
XPS	Extrudiertes Polystyrol

1 Einführung

1.1 Einführung in den Themenbereich

Eine immer weiterwachsende Bevölkerung und der damit verbundene Zuwachs des Verkehrs, das Streben nach finanzieller Unabhängigkeit und steigender Komfort sind Gründe für eine enorme Belastung unserer Umwelt und jedes Einzelnen in diesem Umfeld.¹ Die Gesundheit der Menschen und ihre Lebensqualität werden durch Umweltbelastungen wie Boden-, Luft- oder Gewässerverschmutzungen eingeschränkt.

Die hauptsächlichen Herausforderungen der Zukunft sind ein guter Umgang mit dem Ökosystem, sauberes Trinkwasser und eine Energieversorgung, die klima-, umwelt- und ressourcenschonend ist.² Auf den aktuellen Komfort für die Menschheit und den gehobenen Lebensstandard sollte dabei so wenig wie möglich verzichtet werden.³ Daher werden neue Technologien entwickelt, die umweltverträglicher sind und sich besser in unser Ökosystem fügen. So soll sich ein neu errichtetes Gebäude in Zukunft bestmöglich in die Natur einfügen.⁴ Bei einem Bauprojekt wird allerdings nicht nur das Ökosystem betrachtet – es ist ein allumfassendes Konzept.⁵ Deshalb entwickelte sich der Begriff des *ökologischen oder naturnahen Bauens*. Dabei wird auf gesundheitsverträgliches Bauen unter Berücksichtigung der Baustoffe, der Haustechnik und der Konstruktion geachtet.⁶ Zukünftige Bauprojekte sollten so wenig wie möglich in die Natur eingreifen oder diese belasten.⁷

Ebenfalls sollten sich Neubauprojekte nicht nur in den elementaren Stoffkreis einfügen, sondern ferner das Ziel haben, zukünftigen Generationen, eine funktionierende und lebenswerte Erde zu hinterlassen.⁸ Jeder Bestandteil eines Neubaus wird dabei bei einem ökologischen Bau identifiziert. Es wird von der Dämmung, über das Mauerwerk, bis hin zur der allgemeinen Energie- oder Wärmeversorgung alles genau berechnet und betrachtet.⁹ Daher wird der Lebenszyklus der Immobilie von Anfang bis Ende kontrolliert, berechnet und ausgewertet. Ein Ziel ist u. a. die weltweite Reduzierung des CO₂-Ausstoßes durch den steigenden Einsatz regenerativer Energien wie z. B. Biomasse, Solarstrom,

¹ Vgl. Bauer 2013, S. 10.

² Vgl. Bauer 2013 (Vorwort: Bauer, Mösle, Schwarz).

³ Ebd.

⁴ Ebd.

⁵ Vgl. Dr. Klein Privatkunden Aktiengesellschaft o. J.

⁶ Vgl. Stahr 2018, S. V (Vorwort: Stahr).

⁷ Vgl. Dr. Klein Privatkunden Aktiengesellschaft o. J.

⁸ Ebd.

⁹ Ebd.

Wasser- und Windkraft und die Nutzung von Pellets und Erdwärme.¹⁰ Um die technologischen und technischen Verfahren dauerhaft zu verbessern und weiterzuentwickeln, werden sie durch Gesetze über erneuerbare Energien, Energieeinsparverordnungen oder die Pflicht zur Nutzung eines Energieausweises unterstützt, z. B. für Windräder, Erdbohrverfahren, Solarthermien und Photovoltaikanlagen.¹¹

Der Einsatz von natürlichen und biologischen Baustoffen spielt auch eine große Rolle. Viele natürliche Baustoffe wie z. B. Kork, Lehm, Stroh, Hanf, Holz oder Stein können in der Baubranche eingesetzt werden. Sie kommen in der Natur in großen Mengen vor oder wachsen schnell nach. Sehr viele natürliche Stoffe werden jedoch im Bau als *natürliche* oder *biologische Baustoffe* bezeichnet. Allerdings sind Baustoffe wie Kork oder Holz nur unbehandelt natürlich oder biologisch.¹² Deshalb wird oft der Gedanke vermittelt, dass der Einsatz von biologischen oder natürlichen Baustoffen keine Belastung für die Umwelt und unseren Mitmenschen darstellt. Grundsätzlich können auch naturnahe Projekte bei einer falschen Bauweise gesundheitsschädigend sein oder die Umwelt belasten.¹³ Wenn z. B. Holz vor der Nutzung mit Holzschutzmittel oder einer anderen Oberflächenbehandlung präpariert wird oder Ziegel vorher gebrannt werden, verändert dies die physikalischen und chemischen Eigenschaften.¹⁴ Demnach sollte das eingesetzte Produkt kritisch untersucht werden. Wichtig ist dabei, welche Schadstoffe in den Baustoffen enthalten sind (lungengängige Stäube, radioaktive Belastungen, toxische Substanzen oder faserförmige Stoffe) und welche gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Bewohner oder Umweltbelastungen (Belastung bei der Rohstoffgewinnung, Emissionen bei der Herstellung und Ablagerungsschadstoffe) sich daraus ergeben.¹⁵

Viele Projekte wie bspw. das Strohballenhaus Bad König in Hessen beweisen, dass ökologisches und umweltbewusstes Bauen in der heutigen Zeit mit einem vertretbaren Gegenwert und einer immer fortschreitenden Technologie durchaus möglich sein können.¹⁶ Durch Artikel in Zeitungen, Berichten, Langzeitstudien oder Nachrichten über globale Klimaveränderungen kommt es sukzessive zu einem Umdenken der Allgemeinheit, umweltbewusster zu leben und sogar zu bauen.¹⁷

¹⁰ Vgl. Stahr 2018, S. V (Vorwort: Stahr).

¹¹ Ebd.

¹² Vgl. Stahr 2018, S. 87.

¹³ Vgl. Stahr 2018, S. 88.

¹⁴ Vgl. Stahr 2018, S. 89–90.

¹⁵ Vgl. Stahr 2018, S. 90.

¹⁶ Ebd.

¹⁷ Vgl. Bauer 2013, S. 10.

1.2 Problemstellung

In den letzten 60 Jahren haben sich die Siedlungs- und Verkehrsflächen allein in Deutschland verdoppelt.¹⁸ 58 Hektar Land wurden im Jahr 2017 täglich neu ausgewiesen, oftmals für die landwirtschaftliche Nutzung.¹⁹ Die ökologischen, raren Flächen im Bauland müssen für unsere Infrastrukturen wie Flugplätze oder Straßen und Bahnlinien angepasst werden.²⁰ Die Art unseres Bauens und Wohnens und die damit verbundenen Mobilitätsgewohnheiten und Siedlungsmuster belasten unsere Umwelt enorm. Die Gefährdung der Existenzgrundlage der Lebewesen auf der Erde ist dabei nur ein Punkt von vielen weiteren.²¹ Wenn die Menschheit die Grenzen der natürlichen Umwelt durch Belastungen weiterhin ignoriert, lässt das den Klimawandel immer stärker werden. Die damit verbundenen Naturkatastrophen werden häufiger und kräftiger.²² Der Bausektor ist der größte Verursacher des hohen Energie- und Rohstoffverbrauchs.²³ Ebenso hat die Baubranche ein sehr großes Abfallaufkommen.²⁴ Es ist eine Aufgabe und Herausforderung für alle Beteiligten am Bau, mit dem auszukommen und zu haushalten, was uns die Natur an regenerativen Ressourcen geben kann. Ebenso sollte die Nutzung der nicht erneuerbaren Naturvorräte auf ein Minimum eingeschränkt werden.²⁵ So ist es sicherlich vom Vorteil, wenn sich das Ziel gesetzt wird, nicht von der „Wiege bis zur Bahre“, sondern zukünftig von der „Wiege bis zur Wiege“ zu sprechen.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage

Das Ziel dieser Arbeit soll sein, die aktuellen Chancen und Herausforderungen von einzelnen Dämmstoffen herauszukristallisieren. Zunächst gibt es allgemeine Grundlagen über die Nachhaltigkeit im Bau. Nach dieser Einführung werden die Baustoffe genauer betrachtet und die einzelnen Dämmstoffe genauer analysiert. Dabei sollen vor allem die umweltbewussten Faktoren mittels einer Ökobilanzierungsanalyse betrachtet werden. Mit allgemeinen Daten, Informationen zur Ernteaufbereitung und verschiedenen Einsatzmöglichkeiten sowie Kostenaufstellungen werden Vor- und Nachteile der einzelnen Dämmstoffe untermauert. Letztlich soll festgestellt werden, welche Zukunftsaussichten das Thema des naturnahen Bauens mit dem Schwerpunkt Wärmedämmstoffe hat. Ebenfalls sollen durch

¹⁸ Vgl. Umweltbundesamt 2022.

¹⁹ Ebd.

²⁰ Ebd.

²¹ Vgl. Umweltbundesamt 2010, S. 3 (Vorwort: Flasbarth).

²² Ebd.

²³ Vgl. Umweltbundesamt 2021b, S. 8.

²⁴ Vgl. Umweltbundesamt 2021b, S. 9.

²⁵ Vgl. Krusche 1982 (Vorwort: Lersner)

bereits gebaute Beispielprojekte Einblicke und Impulse gesetzt werden, wie naturnahes Bauen mit Dämmmaterialien aussehen kann und wie es unser Ökosystem schont. Die Eingriffe in unser Ökosystem wachsen täglich, was eine enorme Belastung für die Umwelt darstellt. Wenn sich zukünftig mehr Bauprojekte besser in unsere Natur durch naturnahes Bauen einfügen lassen, wird das ein großer Schritt in Richtung Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung sein. Es gibt in der heutigen Zeit viele Baustoffe, mit denen ökologisches Bauen möglich ist. Die naturnahen Baustoffe, die in dieser Arbeit näher betrachtet werden, sind Stroh, Hanf und Holz. Aus den vorherigen Aspekten ergibt sich diese Forschungsfrage:

Welche Herausforderungen und Chancen ergeben sich bei dem Einsatz von Wärmedämmstoffen durch die naturnahen Baustoffe Stroh, Hanf und Holz mit Bezug auf die Ökobilanzierung?

1.4 Methode

Zunächst wird mit einer intensiven Literaturrecherche begonnen. Nach einer kurzen Einführung in das Thema werden die Grundlagen des nachhaltigen Bauens erläutert. Diese beinhalten u. a. die Definitionen und den Status quo des ökologischen Bauens. Ebenso wird Bezug auf die Nachhaltigkeitsanforderungen im Bauwesen genommen. Darunter zählen an erster Stelle die ökologische, die ökonomische und die soziokulturelle bzw. funktionelle Qualität. Zum Schluss folgt eine Definition und Erläuterung über die Lebenszyklusanalyse einer Immobilie, welche die Umwelteinwirkungen aller eingesetzten Produkte während des ganzen Lebensweges der Immobilie mit einbezieht. Nach dieser Literaturrecherche wird eine kritische Analyse mit Bezug auf die Ökobilanzdaten der einzelnen Wärmedämmstoffe Stroh, Hanf und Holz durchgeführt. Dabei werden für jeden Baustoff die:

- allgemeinen Daten,
- Ernte und Aufbereitungen für Bauprodukte,
- Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten,
- Kosten,
- Ökobilanzierung,
- Vorteile und
- Nachteile

betrachtet. Ein Ausblick mit Projektbeispielen soll am Ende das Thema des naturnahen Bauens mit Bezug auf die Dämmstoffe abrunden. Es werden folgende Projekte vorgestellt:

- Strohdämmung – Strohballenhaus Bad König, Hessen
- Hanffaserdämmung – Fachwerkhütte, Baden-Württemberg
- Holzfaserdämmung – Einfamilienhaus, Bayern

2 Nachhaltigkeit im Bau

2.1 Grundlagen

Eine anhaltende Ignoranz gegenüber der Belastbarkeit unserer Umwelt schädigt unser Ökosystem immer weiter. Der Klimawandel nimmt zu und die damit verbundenen Naturkatastrophen werden immer kräftiger.²⁶ Die Mitteltemperatur in Bodennähe stieg von 1880-2012 um 0,85 °C an.²⁷ Davon fallen zwei Drittel in den Zeitraum seit Beginn der Mitte der 1970er Jahre. 2001-2020 zählten laut NASA 2021 zu den zwanzig heißesten Jahren, seitdem regelmäßige Messungen von Lufttemperaturen in Bodennähe getätigt wurden.²⁸ Das Jahr 2016 war, dicht gefolgt vom Jahr 2020, mit einer globalen Mitteltemperatur über 1,1 °C, das wärmste Jahr seit systematischer Aufzeichnung der Temperatur.²⁹

Eine Belastung für das Klima ist der dauerhafte Anstieg der Bevölkerung. Mehr Menschen bedeutet mehr Kohlendioxid (CO₂), welches freigesetzt wird. Seit den 1970ern liegt der ökologische Fußabdruck, welcher die Emission von Treibhausgasen und weiteren Schadstoffen und den Verbrauch von natürlichen Ressourcen beinhaltet, über der Bio-Kapazität.³⁰ Der Einsatz von Rohstoffen wird daher an seine Grenzen kommen. In Zukunft wird die Nachfrage an Erdöl immer weiter ansteigen. Dabei wird die förderbare Menge kontinuierlich abnehmen.³¹ Weitere große Belastungspunkte für die Umwelt sind Modernisierungen, Nutzung, Ausbau, Instandhaltung sowie der allgemeine Bau von Immobilien und Infrastrukturen. Sie verbrauchen einen Hauptteil der Flächen, Rohstoffe und Energien. Auch hier gilt: je mehr Menschen es gibt, umso mehr Unterkünfte und Arbeitsflächen werden auch benötigt. Verschwenderische Bauweisen, Verfahrensprozesse, Wohnansprüche und Siedlungsmuster der fossilen Ära müssen verabschiedet werden.³² Für die gewohnten Arbeits- und Lebensweisen, Bauformen und Siedlungsmuster gibt es heutzutage zahlreiche Alternativen, die interessant und lebenswert sind. Zudem hat die Bundesregierung erste wichtige Impulse gesetzt. Mit der Abschaffung der Eigenheimzulage und der Förderung von energetischen Gebäudesanierungen ist daher ein Denken des nachhaltigen Bauens und Wohnens vorhanden.³³

²⁶ Vgl. Umweltbundesamt 2010, S. 3 (Vorwort: Flasbarth).

²⁷ Vgl. Umweltbundesamt 2021a.

²⁸ Ebd.

²⁹ Ebd.

³⁰ Vgl. Loichinger und Swianczyny 2021, S. 12.

³¹ Vgl. Umweltbundesamt 2010, S. 3 (Vorwort: Flasbarth).

³² Ebd.

³³ Ebd.

Die CO₂-Emissionen im Bau und während der Nutzung von Gebäuden machen ca. 30 % der Emissionen in Deutschland aus.³⁴ Somit sind in Deutschland die Gebäude die Hauptverursacher von CO₂-Emissionen. Die Sektoren Bau und Mobilität haben national betrachtet noch hohe Einsparpotenziale, was Treibhausgasemissionen anbelangt.³⁵ Etwa 8 % der deutschen CO₂-Emissionen werden durch die Herstellung von Baustoffen für Modernisierungen und Errichtungen produziert. Die restlichen 22% der deutschen CO₂-Emissionen im Bau bzw. in der Nutzung verursacht die Versorgung von Warmwasser und Gebäudewärme.³⁶

Wegen der spürbaren Auswirkungen der Klimaveränderungen wurde 2007 u. a. die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen DGNB e. V. von 16 Protagonisten aus dem Bereich der Bau- und Immobilienwirtschaft gegründet.³⁷ Das Ziel war es, den Bausektor im Bereich des nachhaltigen Bauens in der Zukunft stärker zu fördern. Mittlerweile repräsentieren 1.600 Mitgliedsorganisationen von Kommunen, Planern, Architekten, Bauherren, Wissenschaftlern und Investoren auf der ganzen Welt die gesamte Wertschöpfungskette im Bereich der Bau- und Immobilienwirtschaft.³⁸ Es haben sich auch weitere Gesellschaften gebildet, die für eine nachhaltige Bauweise plädieren. Die bekanntesten sind neben der DGNB die LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology) und BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen).

Bei der Ökobilanz von Errichtungen fällt die Zeit, bevor das Objekt genutzt wird, besonders ins Gewicht. Etwa die Hälfte der Emissionen und Energieaufwände, die im Normalfall insgesamt bei einem Lebenszyklus von 50 Jahren ausgelöst werden, entstehen bei der Herstellung und Errichtung.³⁹ Ebenso fallen bei der Nutzung und Entsorgung weitere CO₂-Emissionen an. Zusätzlich ist der Bausektor für rund 50 % des deutschen Abfallstroms verantwortlich, was mit Blick auf die Ressourcen ebenfalls ein Problem darstellt. Nur wenn im Bausektor die Einsparpotenziale ausgeschöpft werden, können die deutschen Klimaziele erreicht werden.⁴⁰ Nach der Senkung des Energieverbrauches in den letzten Jahren muss nun der komplette Lebenszyklus von Immobilien betrachtet werden, um eine ökologische Verbesserung zu bewirken, von der Herstellung von Baustoffen, über den Aufbau und Betrieb, bis hin zum Rückbau oder Abbruch.⁴¹ Es ist von hoher Bedeutung für die Ein-

³⁴ Vgl. NABU (Naturschutzbund Deutschland) e. V. o. J.

³⁵ Ebd.

³⁶ Ebd.

³⁷ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. o. J.

³⁸ Ebd.

³⁹ Vgl. NABU (Naturschutzbund Deutschland) e. V. o. J.

⁴⁰ Ebd.

⁴¹ Ebd.

schränkung des Klimawandels, dass Energieverbrauch, CO₂-Emissionen, Abfallaufkommen und Rohstoffverbrauch in Bezug auf Modernisierung, Errichtung und Entsorgung von Objekten thematisiert werden.⁴²

2.2 Nachhaltiges Bauen

„Je länger der sogenannte Volkswohlstand dauert, je häßlicher wird das Land. Die Wälder werden abgeholzt, die Berge aufgeschürft, die Bäche verunreinigt. Die Wiesen werden mit Fabriken besetzt, die Lüfte mit Rauch erfüllt, die Menschen unruhig, unzufrieden und heimatlos gemacht – Peter Rosegger.“⁴³

Nachhaltiges Bauen ist ein bewusster Einsatz und Umgang mit vorhandenen Ressourcen. Ebenso beschreibt es die Minimierung der Energieverbräuche und das Schützen unserer Umwelt. Das Nachhaltigkeitskonzept bezieht sich auf ein Dreisäulenmodell, welches aus der Ökonomie, Ökologie und dem Sozialen/ Funktionellen besteht.⁴⁴ Ebenso beschreibt es alle Phasen des Lebenszyklus einer Immobilie von der Planung, über die Erstellung, die Nutzung und Reparaturen, bis hin zu einem Rückbau. Erreicht wird das nachhaltige Bauen durch:⁴⁵

- das Einsparen des Energiebedarfs,
- das Einsparen verbrauchter Betriebsmittel,
- das Einsparen der Transportkosten von Bauteilen und -stoffen,
- den Einsatz von wiederverwertbaren oder -verwendbaren Baustoffen/ -produkten,
- eine Ausdehnung der Lebensdauer von Baukonstruktionen und Produkten,
- eine hohe Schonung unserer Naturgebiete,
- ein flächensparendes Bauen über den gesamten Prozess und
- durch eine risikoarme Rückführung von Stoffen in den natürlichen Stoffkreislauf.⁴⁶

Nur wenn frühzeitig ein nachhaltiger Planungsansatz geschaffen wird, kann die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Objektes mit Hinsicht auf die Bau-, Umwelt-, Nutzungs- und Gesundheitskosten enorm verbessert werden.⁴⁷

1713 beschäftigte sich Hans Carl von Carlowitz mit der Bezeichnung der Nachhaltigkeit. In seinem Buch „Sylvicultura oeconomica“ erklärte er, dass aufgrund einer möglichen Rohstoffkrise nur so viel Holz gehackt werden darf, wie es in der Natur wieder nachwachsen

⁴² Vgl. NABU (Naturschutzbund Deutschland) e. V. o. J.

⁴³ Zitat Heinz Schachter 2020.

⁴⁴ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. o. J.

⁴⁵ Vgl. Stahr 2018, S. 17.

⁴⁶ Ebd.

⁴⁷ Ebd.

kann.⁴⁸ Im Jahr 1987 wurde im Brundtland-Bericht die heutige Bedeutung einer nachhaltigen Entwicklung durch die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen veröffentlicht.⁴⁹ Laut dem Brundtland-Bericht ist die Grundlage für eine uneingeschränkte Gestaltungs- und Wahlmöglichkeit für spätere Generationen ein nachhaltiges Handeln. Im Jahr 1992 wurde aufbauend auf dem Brundtland-Bericht und der UN-Konferenz in Rio de Janeiro eine weitere Aufteilung der Nachhaltigkeit etabliert.⁵⁰ Sie teilte sich in drei Dimensionen – ökologisch, ökonomisch und soziokulturell. Dabei sollen alle drei Aspekte gleichzeitig und gleichwertig angestrebt werden. 1998 wurde dies von der Enquete-Kommission im deutschen Bundestag weiter fortgeführt.⁵¹ Diese Definition wurde 2001 ebenfalls auf das Bauen übertragen. Mit einem bis heute ständig aktualisierten Leitfaden wurde das Buch für nachhaltiges Bauen veröffentlicht.⁵²

Seit diesem Leitfaden hat der Begriff der Nachhaltigkeit in der Immobilien- und Baubranche mehr an Bedeutung erlangt. Die Baubranche spielt eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, die globalen Klimaziele erreichen zu können.⁵³ Der demographische Wandel, das Wirtschaftswachstum und steigende Komfortanforderungen stellen mit Bezug auf eine nachhaltige Entwicklung große Herausforderungen dar.⁵⁴ Demnach ergeben sich durch Wechselwirkungen in der Nachhaltigkeit zahlreiche Anforderungen an Gebäude. Dabei sollen die Immobilien ganzheitlich betrachtet werden. Gebäude der Zukunft sollen ökologische, ökonomische und soziokulturelle Seiten miteinander vereinen.⁵⁵ Allerdings gestaltet sich diese Kombination häufig mit einem Spannungsfeld – z. B. geringer Kostenaufwand gegen große ökologische Qualität. Der Begriff des nachhaltigen Bauens wird wegen diesem Hauptpunkt häufig eingeschränkt betrachtet und meistens mit energetischen Aspekten assoziiert. In den gesetzlichen Anforderungen spiegelt sich das auch wider.⁵⁶ Somit sollen beim Bau oder beim Betreiben von Immobilien die CO₂-Emissionen mit möglichst humanen Preisen minimiert werden. Daher werden i. d. R. eine Vielzahl von Anforderungen an Objekte nicht im Sinne der drei Aspekte der Nachhaltigkeit gleichmäßig berücksichtigt, sondern unterschiedlich priorisiert.⁵⁷

Das Ökosystem wird in jüngeren und älteren Konzepten bzgl. der Wirtschafts- und Lebensgrundlage als zentraler Stellenwert gewichtet.⁵⁸ Dabei ist die Ökologie die wesentli-

⁴⁸ Vgl. Bartels et al. 2022, S. 3.

⁴⁹ Ebd.

⁵⁰ Ebd.

⁵¹ Ebd.

⁵² Ebd.

⁵³ Vgl. Bartels et al. 2022, S. 4.

⁵⁴ Ebd.

⁵⁵ Ebd.

⁵⁶ Ebd.

⁵⁷ Ebd.

⁵⁸ Vgl. Pufé 2017, S. 99.

che tragende Säule, da es wirtschafts- und sozialverträglich im Sinne des Umweltschutzes gestaltet werden soll. Aus diesem Grund wird der Umweltschutz oftmals mit der Verträglichkeit verbunden.⁵⁹ Die ökonomische Sicht der Nachhaltigkeit bezieht sich hingegen auf die Wahrung der Lebens- und Produktionsbedingungen. Die Umwelt dabei dauerhaft zu erhalten und das Wirtschafts- und Sozialsystem darauf aufzubauen, ist dabei der Anspruch.⁶⁰

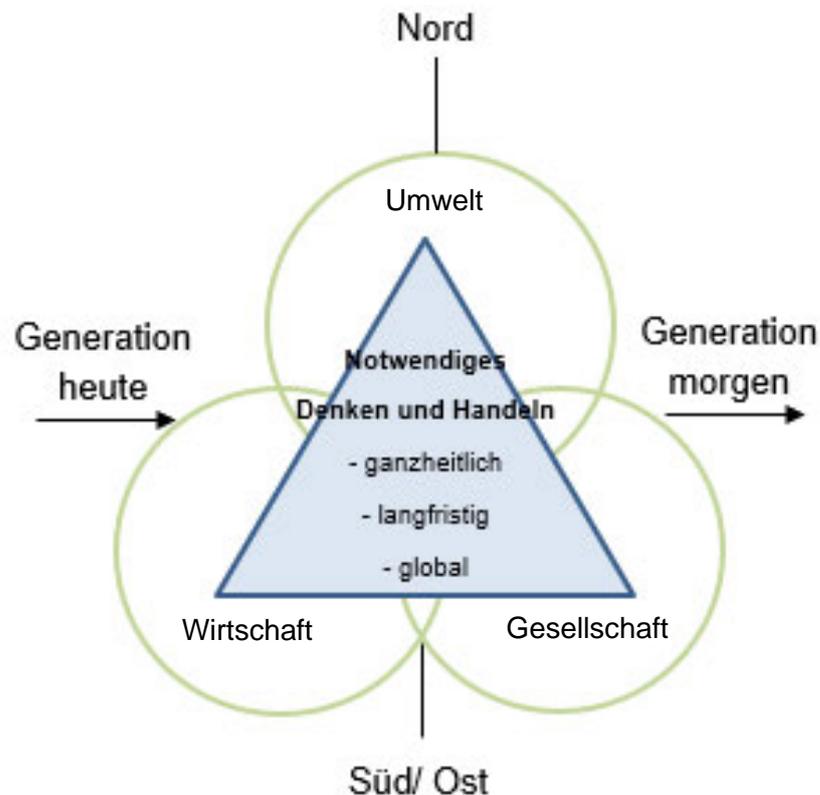


Abbildung 1 Dreidimensionalität von Nachhaltigkeit⁶¹

Heutzutage wird öfter von den Dimensionen geredet anstelle von den Säulen. Die Säulen sind nebeneinander aufgestellt, was eine Reihenfolge suggeriert. Die Nachhaltigkeitsdimensionen, wie in *Abbildung 1* zu sehen, zeigen in den drei Bereichen ein verbundenes Mit- und Ineinander.⁶² Der Kern soll dabei der Nachhaltigkeitsgedanke von allen drei Aspekten sein. Dabei verknüpfen sich die Dimensionen der Nachhaltigkeit mit den drei Säulen der Ökonomie, Ökologie und Soziologie.⁶³ In den nächsten Abschnitten werden die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit im Bau noch einmal genauer dargestellt, sowie die Schutzziele und -güter der Nachhaltigkeit erläutert.

⁵⁹ Vgl. Pufé 2017, S. 99.

⁶⁰ Ebd.

⁶¹ Abb. Pufé 2017, S. 100.

⁶² Ebd.

⁶³ Ebd.

2.2.1 Ökologische Nachhaltigkeit

Die Ökologie nimmt die Themen des Umweltschutzes, den Erhalt der Artenvielfalt und die Ressourcenschonung auf.⁶⁴ So sollen unsere natürlichen Lebensgrundlagen maßvoll genutzt werden, sodass diese immer fortbestehen können. Deshalb soll nicht von dem Naturkapital selbst gelebt werden, sondern von dessen Zinsen.⁶⁵ Das heißt für den Bau, dass der Einsatz von Bauprodukten und Baumaterialien optimiert, die Flächeninanspruchnahme minimiert, Biodiversität gefördert und erhalten und Wasser- und Energieverbrauch minimiert werden müssen.⁶⁶ Neben den lokalen Umwelteinwirkungen durch die Herstellung von Baustoffen, dem Energieverbrauch und den Phasen der Gebäudenutzung, wird ebenfalls die Gewinnung, der Transport, der Einbau und der Rückbau der erforderlichen Stoff- und Energieströme betrachtet. Das Ziel dabei soll eine Reduzierung der Umweltbelastung auf globaler und lokaler Ebene sein.⁶⁷

2.2.2 Ökonomische Nachhaltigkeit

Die Ökonomie erfordert, innerhalb der ökologischen Grenzen, ein Wirtschaftssystem, was langfristig bestehen kann. Ein System, welches in einer endlichen Welt zu einem permanenten und unbegrenzten Wachstum gezwungen wird, kann nicht von Dauer sein.⁶⁸ Von einem nachhaltigen Wirtschaftssystem spricht man, wenn keine Ressourcen ausgebeutet, keine Schulden gehäuft und keine irreparablen Schäden den nachfolgenden Generationen hinterlassen werden.⁶⁹ Das heißt für den Bau, dass die Errichtungs- bzw. Anschaffungskosten und insbesondere die Baufolgekosten kontrolliert werden müssen. Im Fokus stehen dabei die Wirtschaftlichkeit, die gebäudebezogenen Lebenszykluskosten und die Wertstabilität.⁷⁰ Wer falsch kalkuliert, kann schnell die Baufolgekosten um ein Vielfaches der Errichtungskosten steigen lassen. Enorme Einsparpotenziale lassen sich in der Planung durch eine umfassende Lebenszykluskostenanalyse finden. Die Baunutzungskosten und die Errichtungskosten werden bei den Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs (LCC)) insbesondere betrachtet.⁷¹

⁶⁴ Vgl. Kropp 2019, S. 11.

⁶⁵ Ebd.

⁶⁶ Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019, S. 15.

⁶⁷ Ebd.

⁶⁸ Vgl. Kropp 2019, S. 11.

⁶⁹ Vgl. Kropp 2019, S. 11–12.

⁷⁰ Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019, S. 15.

⁷¹ Ebd.

2.2.3 Soziokulturelle und funktionelle Nachhaltigkeit

Die soziale Nachhaltigkeit hat bis heute noch nicht so viel Aufmerksamkeit erlangt, wie die beiden vorangegangenen Dimensionen. Sie betrachtet den weltweiten Wohlstand, die Erreichung von Frieden, Armutsbekämpfung, den demografischen Wandel, Gleichberechtigung, soziale Unterstützung, Freiheit und die Fähigkeit eigene Entscheidungen treffen zu können. Deshalb ist die soziale Nachhaltigkeit genauso wichtig wie die zwei anderen Dimensionen.⁷² Das heißt für den Bau, dass Schutzziele zugeordnet werden müssen, die die kulturelle und soziale Identität sowie die Wertempfindung der Menschen beeinflussen. Wenn der Mensch seine Umwelt wahrnimmt und unbewusst oder bewusst beurteilt, findet ein Identifikationsprozess statt.⁷³ Das Resultat aus negativen oder positiven Empfindungen spiegelt sich dann in der Motivation bzw. im Wohlbefinden eines Menschen wider. Hierbei spielen in einem gesellschaftlichen System die kulturellen Wertvorstellungen und die sozialen Bedürfnisse jedes Einzelnen eine Rolle.⁷⁴ Dazu zählen insbesondere immaterielle Werte wie Mobilität, Chancengleichheit, Bildung, Gesundheit, Lebensqualität, Partizipation und kulturelle Vielfalt. Somit stellt diese Dimension auf der eine Seite die Funktionalität und Nutzerbedürfnisse und auf der anderen Seite die ästhetische und kulturelle Bedeutung eines Gebäudes in den Fokus.⁷⁵

2.2.4 Schutzziele und -güter der Nachhaltigkeit

Nachfolgend sind in *Tabelle 1* und *Tabelle 2* die Schutzgüter und -ziele auf den Baubereich und die Allgemeinheit bezogen.

Tabelle 1 Schutzgüter der Nachhaltigkeit⁷⁶

Schutzgüter	Allgemeine Nachhaltigkeit	Ökologie	Ökonomie	Soziokulturelles
	Bau Nachhaltigkeit	<ul style="list-style-type: none"> •elementare Ressourcen •elementare Umwelt 	<ul style="list-style-type: none"> •ökonomische Leistungsfähigkeit •Werte/ Kapital 	<ul style="list-style-type: none"> •kulturelle und soziale Werte •menschliche Gesundheit
	<ul style="list-style-type: none"> •elementare Ressourcen •lokale und globale Umwelt 	<ul style="list-style-type: none"> •Werte/ Kapital 	<ul style="list-style-type: none"> •Nutzerzufriedenheit •kultureller Wert •Gesundheit •Funktionalität 	

⁷² Vgl. Kropp 2019, S. 11.

⁷³ Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019, S. 15.

⁷⁴ Ebd.

⁷⁵ Ebd.

⁷⁶ Tabelle Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019, S. 16.

Tabelle 2 Schutzziele der Nachhaltigkeit⁷⁷

Schutzziele	Allgemeine Nachhaltigkeit	Ökologie	Ökonomie	Soziokulturelles
		<ul style="list-style-type: none"> • Schutz von bzw. sparsamer und schonender Umgang mit elementaren Ressourcen • Reduzierung von Umwelteinwirkungen und Schadstoffbelastung • Förderung von umweltverträglichen Produktionen • Effizienzsteigerung • Schutz des Grundwassers, des Bodens und der Erdatmosphäre 	<ul style="list-style-type: none"> • Senkung der Lebenszykluskosten • Verringerung der Schulden • Schaffung nachhaltiger Konsumgewohnheiten • Minimierung des Subventionsaufwandes • Unterstützung einer verantwortungsbewussten Unternehmerschaft • Schaffung kooperativer und dynamischer wirtschaftlicher internationaler Rahmenbedingung 	<ul style="list-style-type: none"> • Förderung und Schutz der menschlichen Gesundheit • Erhalt kultureller Werte • Sicherung von Arbeitsplätzen und Erwerbsfähigkeit • Ausbildung/ Bildung • Integration • Stärkung von Solidarität und sozialem Zusammenhalt • Chancengleichheit • Armutsbekämpfung • Gleichberechtigung • lebenswertes Umfeld/ Sicherheit
	Bau Nachhaltigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Schutz von elementaren Ressourcen • Schutz der Umwelt 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimierung der Lebenszykluskosten • Erhalt von Wert/ Kapital • Optimierung der Wirtschaftlichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Bewahrung von Sicherheit, Gesundheit und Behaglichkeit • Sicherung der städtebaulichen und gestalterischen Qualität • Gewährleistung der Funktionalität

Aus den Dimensionen lassen sich allgemeine Schutzziele und -güter ableiten. Im Baubereich werden verschiedene Belange des nachhaltigen Bauens begutachtet und ggf. eine Anpassung der spezifischen Entscheidungs- und Arbeitsabläufe und Bewertungsmethoden vorgenommen.⁷⁸

⁷⁷ Tabelle Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019, S. 16.

⁷⁸ Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019, S. 15.

2.3 Ökobilanzierung

2.3.1 Definition und Aufbau

Die Ökobilanzierung wird auch Umweltbilanz, Lebenszyklusanalyse oder Life Cycle Assessment (LCA) genannt. Die LCA ist eine quantitative und systematische Analyse von potenziellen Umweltauswirkungen von Produkten auf ihrem kompletten Lebensweg.⁷⁹ Die wichtigsten Strukturen und Prinzipien zur Empfehlung und Durchführung über das Verfahren einer LCA-Berechnung beschreiben die international festgelegte ISO 14040:2006 und 14044:2006. Wie in *Abbildung 2* zu sehen, ist die Ökobilanz eine Zusammenstellung von Output- und Inputflüssen im Laufe der Lebenszyklusphasen bzw. -schritte. Dabei werden selektive Umwelteinwirkungen eines Produktes auf bspw. Emissionen oder Abfälle kontrolliert und deren voraussichtlichen Folgen für die Umwelt notiert.⁸⁰

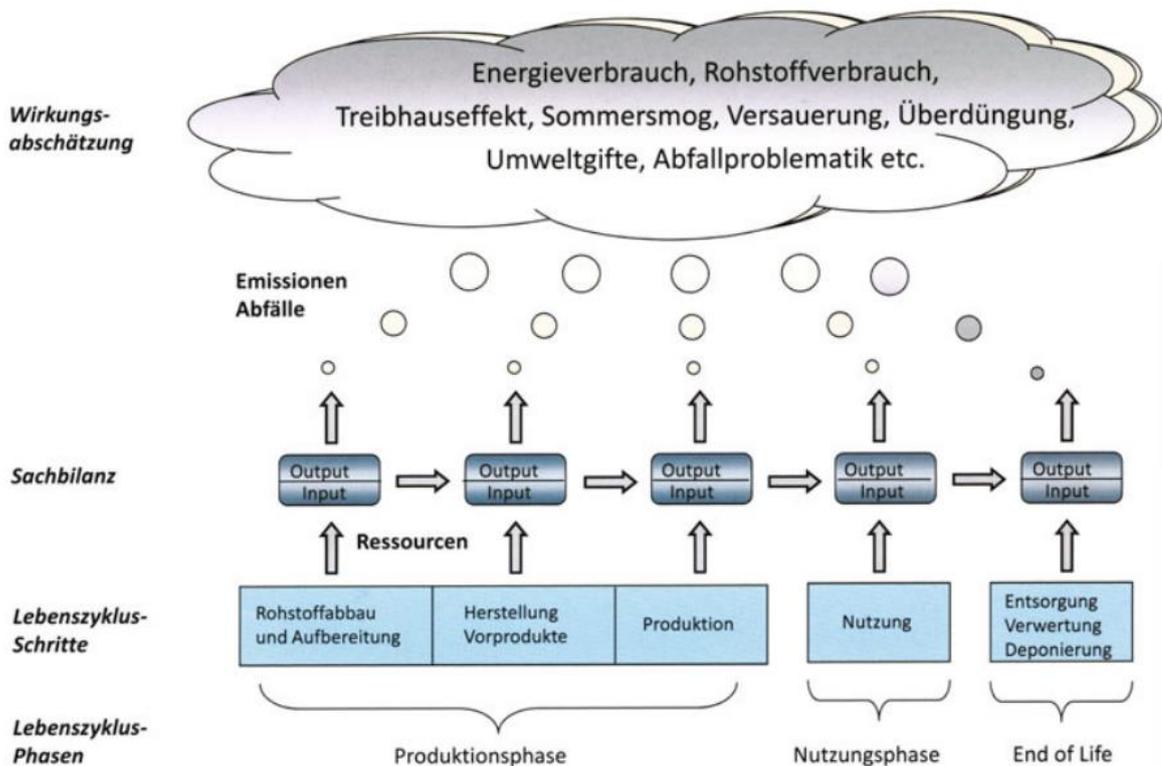


Abbildung 2 Bewertungsgrundlage von Produkten der Ökobilanz⁸¹

Die Ökobilanz umfasst vier Elemente – Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Bilanzauswertung.⁸² Die Sachbilanz ist die produktspezifische Ermittlung von Prozessketten mit der Bestimmung von Out- und Inputs. Im Vordergrund

⁷⁹ Vgl. Schroeder 2019, S. 34.

⁸⁰ Vgl. Stahr 2018, S. 19.

⁸¹ Abb. Stahr 2018, S. 19.

⁸² Vgl. Umweltbundesamt 2018.

steht die Beschreibung und Abschätzung der, in der Sachbilanz hervorgebrachten, Umweltauswirkungen auf das Ökosystem. Vereinzelt Umweltprobleme, wie bspw. Konsequenzen des Treibhauseffekts, werden zu einzelnen Wirkungszusammenhängen zusammengetragen. Letztlich werden die Ergebnisse beurteilt.⁸³ Die Begrifflichkeiten der vier Elemente werden in den nächsten Abschnitten noch einmal genauer erläutert.

Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Leistungen eines Produktes müssen in einer Ökobilanzierung beschrieben und festgelegt werden, sodass ein optimaler Vergleich möglich ist. Bei Dämmstoffen wird als funktionales Äquivalent (functional unit) die Dämmleistung herangezogen. Dadurch ist über die „Wärmedämmung“ ein Produktvergleich untereinander möglich. Des Weiteren muss die Definition eines Bilanzraumes (scope) festgelegt werden. Die bei der Anwendung und Produktion benötigten Neben- und Hilfsgüter werden ebenfalls festgelegt.⁸⁴

Sachbilanz

Alle Transporte und Prozessschritte werden in der Sachbilanz erfasst, die dem im vorherigen Absatz beschriebenen Bilanzraum entspricht. Hierbei werden alle Prozessschritte auf der Input-Seite über Energie- und Stoffeinsätze und auf der Output-Seite hinsichtlich der Reststoffe und Abfälle erfasst. Die einzelnen Prozessschritte wurden in den letzten Jahren für handelsübliche Materialien, Energieformen und Transportarten per Daten veröffentlicht, sodass ein Vergleich der Ökobilanz einfacher funktioniert.⁸⁵

Wirkungsabschätzung

Um die in der Sachbilanz zusammengetragenen Energie- und Stoffströme in Umwelteinwirkungen darzustellen, werden diese bezüglich ihrer Wirkung in Wirkungskategorien eingeteilt. Aussagen können somit erst durch Wirkungsindikatoren getroffen werden wie u. a.:⁸⁶

- PERT = Totale erneuerbare Primärenergie (Total primary energy renewable)
- PENRT = Totale nicht erneuerbare Primärenergie (Total primary energy non-renewable)
- ODP = Ozonabbauendes Potential (ozone depletion potential)
- EP = Eutrophierungspotential (Überdüngung, eutrophication potential)
- POCP = Photooxidationspotential (Sommersmog, photochemical ozone creation potential)
- ECT = Ökotoxizität im Boden (terrestrial ecotoxicity)⁸⁷

⁸³ Vgl. Holzmann 2012, S. 62.

⁸⁴ Ebd.

⁸⁵ Vgl. Holzmann 2012, S. 63.

⁸⁶ Vgl. Holzmann 2012, S. 63–64.

⁸⁷ Vgl. Holzmann 2012, S. 64.

- PEI = Primärenergieaufwand
- GWP = Treibhausgaspotential (global warming potential)
- AP = Versauerungspotential (acidification potential)
- ECA = Ökotoxizität in Gewässern (aquatic ecotoxicity)
- HC = Humantoxizität (human toxicological classification)⁸⁸

Die einzelnen Wirkungsindikatoren werden mit einem jeweiligen Leitsubstanzvergleich gewichtet. Die Leitsubstanz ist beim GWP z. B. das Kohlendioxid.⁸⁹

Bilanzauswertung

Der letzte Bestandteil der Ökobilanz ist die Auswertung. Hier werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, Sachbilanz oder von beidem dem vorher festgelegten Ziel gegenübergestellt und Untersuchungsrahmen zusammenstellt.⁹⁰

2.3.2 Gebäudeökobilanz

Das Baugewerbe wendet ebenfalls beim Bau eines Gebäudes die Methode der Ökobilanz an, um zusätzlich graue bzw. materialgebundene Umwelteinwirkungen von Materialien neben der reinen Betriebsphase zu untersuchen.⁹¹ Die menschliche Gesundheit, das Nutzen von Ressourcen und die ökologischen Auswirkungen stehen dabei im Vordergrund. Jedes Gebäude wird auf seine eigene Art gebaut, sodass jedes Gebäude eine individuelle Analyse der Umweltbilanz benötigt, um Optimierungen zu identifizieren.⁹² Erst eine Lebenszyklusbetrachtung kann Informationen über den tatsächlichen Wert eines Gebäudes liefern, da sie i. d. R. über lange Zeiträume angewendet wird. Wie in *Abbildung 3* zu sehen, setzt sich der Lebenszyklus bei einem Gebäude aus der Planungsphase, Bauphase, Nutzungsphase inkl. der Modernisierungsphasen sowie der Rückbauphase zusammen.⁹³ Jede Lebensphase eines Gebäudes wird auf die unterschiedlichen Faktoren der Nachhaltigkeit analysiert und optimiert. Das Ziel dabei ist, eine quantifizierende und objektivierende Bewertungsmethode unterschiedlicher Gebäudeentwürfe für Variantenvergleiche zu erlangen.⁹⁴ So soll eine hohe Nutzungs- und Gebäudequalität mit wenig Umweltauswirkungen und Aufwendungen geschaffen werden, welche langfristig erhalten bleiben soll. Grundsätzlich sollte immer ein Bestandsgebäude bevorzugt gezogen werden, bevor sich

⁸⁸ Vgl. Holzmann 2012, S. 64.

⁸⁹ Ebd.

⁹⁰ Vgl. Holzmann 2012, S. 68.

⁹¹ Vgl. Bartels et al. 2022, S. 11.

⁹² Vgl. Stahr 2018, S. 19.

⁹³ Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019, S. 18.

⁹⁴ Ebd.

für einen Neubau entschieden wird, da diese Gebäude somit eine erneute Verwendung finden und die Baustoffe eines Bestandsgebäudes wiederverwendet werden können.⁹⁵

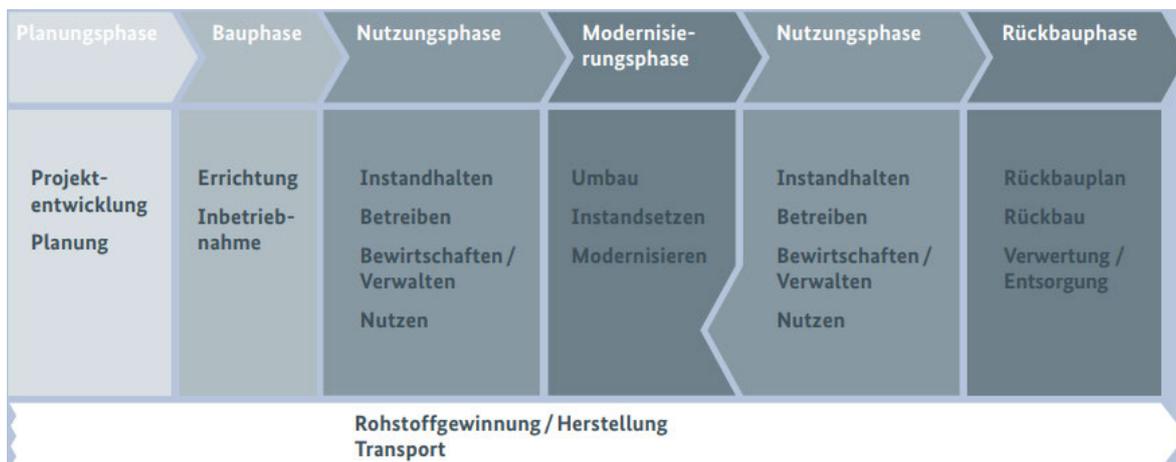


Abbildung 3 Vereinfachte Lebenszyklusdarstellung⁹⁶

Der Vorteil des Weiter- oder Umbaus eines Bestandgebäudes ist, dass im Allgemeinen für die Konstruktion weniger Stoff- und Energieflüsse benötigt werden. Dadurch entsteht ein geringerer Verbrauch an natürlichen Ressourcen und die Umwelt wird geschont.⁹⁷ Die Varianten Neubau, Erweiterung, Rückbau, Umbau und Teilrückbau bzw. Kombinationen daraus können in Einzelfällen miteinander verglichen werden. Der Grund hierfür ist, dass Klarheit über die Vorteile der einzelnen Varianten nur durch eine Gesamtbilanz über einen bestimmten Nutzungszeitraum geschaffen werden kann.⁹⁸ Wenn Anlagen- oder Bauteile bei Modernisierungen oder Instandhaltungen ausgetauscht werden müssen, muss vorher festgelegt werden, welche Umweltauswirkungen und Stoffströme aufgrund der Entsorgung, dem Abriss oder Recycling zu berücksichtigen sind. Das gilt ebenfalls für den Rückbau von Gebäudeteilen oder ganzen Gebäuden.⁹⁹

2.3.3 Anforderungen und Ziele

Es gilt der Grundsatz, dass die Analyse des Stoffkreislaufes oder des Lebenszyklus, der verarbeiteten Baumaterialien das Ziel der Ressourcenschonung, der Verringerung negativer Umwelteinwirkungen und der Vermeidung von Abfallproduktion haben.¹⁰⁰ Der gesamte Lebensweg eines Bauprojektes wird dabei von der Rohstoffbeschaffung und -gewinnung, über die Herstellung der Baustoffe, die Verarbeitung zu Baukonstruktionen und -teilen, die Nutzung der Bauwerke inkl. der Instandhaltung, bis zum Gebäudeabriss und

⁹⁵ Vgl. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019, S. 18.

⁹⁶ Abb. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019, S. 19.

⁹⁷ Ebd., S. 18-19

⁹⁸ Ebd., S. 19

⁹⁹ Ebd.

¹⁰⁰ Vgl. Schroeder 2019, S. 26.

dem Recycling betrachtet. Dazu müssen alle Transportwege mit Berücksichtigung der prozessbezogenen Energie- und Stoffströme, in Form von einer Inventarisierung, betrachtet werden.¹⁰¹

Die Haltbarkeit der Konstruktionen wurde schon zu früheren Zeiten kalkuliert. Teils aus reiner Zweckmäßigkeit heraus wurde jedoch auch mit dem Hintergedanken des möglichen Denkmalstatus geplant.¹⁰² Die Funktionen der Gebäude wurden so konzipiert, dass sie ohne Wartungen betrieben werden können, sodass spätere Generationen auch noch einen langen Nutzen davon haben. Heutzutage werden viele verschiedene Materialien neu entwickelt und so verarbeitet, dass sie witterungsbeständige und langlebige Produkte erzeugen.¹⁰³

„Der Mensch ist als Teil der Schöpfung eingebunden in die ihn umgebende Natur, für deren Schutz und Erhalt er ebenso Verantwortung trägt wie für sich und seine Mitmenschen.“¹⁰⁴ Dieser Leitspruch ist bis heute noch eine aktuelle Aussage, welche schon 1994 vom Bundesumweltministerium formuliert wurde. Besonders gilt diese Anforderung für das ökologische Bauen:¹⁰⁵

- 80-90 % der Menschen halten sich in Innenräumen auf, weshalb sie den gesundheitlichen Auswirkungen von Immobilien ausgesetzt sind.
- Der größte Volumenanteil an Produkten wird in der Bauindustrie verarbeitet, wo neben pflanzlichen und mineralischen Baustoffen immer mehr petrochemische Substanzen verarbeitet werden.¹⁰⁶
- Durch die Nutzung von unserem Inventar wie Wasser, Rohstoffen und Luft oder durch den Landverbrauch ist das Bauen ein Eingriff in unser Ökosystem.
- Die Umwelt hat durch das dicht besiedelte Land einen sehr hohen Stellenwert.¹⁰⁷

Das Denken und Handeln sind die Basis für nachhaltiges Bauen im gesamten Lebenszyklus. Die Wahl der Materialien, die Konstruktion und die Verarbeitung gewinnen an Bedeutung, je weniger Energie ein Gebäude in der Nutzung erzeugt bzw. je energieeffizienter es ist.¹⁰⁸

- Wie hoch ist der CO₂-Ausstoß?
- Wie viel Primärenergie ist vorhanden?
- Wie viele der geplanten und vorhandenen Materialien sind recyclinggerecht?

¹⁰¹ Vgl. Schroeder 2019, S. 26.

¹⁰² Vgl. Stahr 2018, S. 13.

¹⁰³ Vgl. Stahr 2018, S. 15.

¹⁰⁴ Zitat Stahr 2018, S. 15.

¹⁰⁵ Vgl. Ebd.

¹⁰⁶ Vgl. Stahr 2018, S. 18.

¹⁰⁷ Ebd.

¹⁰⁸ Ebd.

- Ist der komplette Lebenszyklus über Umwelteinwirkungen dargestellt und berücksichtigt?
- Wann zahlt sich, für eine ökologische Lösung, die Entscheidung aus?
- Wurden Vergleiche mit anderen Varianten vorgenommen?¹⁰⁹

All diese Fragen ergeben sich an Bauherren, Planer und Architekten, welche mit einem enormen Aufgabenkomplex verbunden sind.¹¹⁰

2.3.4 Kritik

Eine Ökobilanzierung bedeutet einen hohen Planungsaufwand und die Bereitschaft, gewohnte und traditionelle Planungsabläufe im Sinne des nachhaltigen Bauens zu erweitern. Dabei kommen oft die Probleme von fehlenden Datengrundlagen auf. Durch die PKR können ökologische Wirkungskategorien detailliert beschrieben werden.¹¹¹ Allerdings gibt es bekannte Umwelteinwirkungen (z. B. Regionalisierung), die nicht quantitativ aufgeführt werden können. Grundsätzlich stellt sich die Kernfrage nach der Abbildgenauigkeit von Ursachen. Daher sollte die Zuverlässigkeit der hinterlegten Sachbilanzdaten in vorhandene Ökobilanzdaten hinterfragt werden. Diese Instrumente und Grundlagen müssen weiter verbessert werden, da die Ökobilanzierung ein wesentliches Instrument ist, um plausible, ökologisch begründete Aussagen auf die Wirklichkeitsnähe zu kontrollieren.¹¹²

2.4 Naturnahe Baustoffe

2.4.1 Grundlagen

Es gibt verschiedene Produktmöglichkeiten und Einteilungen von pflanzlichen Rohstoffen. Grundsätzlich können Pflanzenrohstoffe in drei Gruppen aufgeteilt werden. Unterschieden wird dabei das rohe bzw. noch unbehandelte, das chemisch behandelte und das physikalisch veränderte Produkt.¹¹³ (Tabelle 3)

¹⁰⁹ Vgl. Stahr 2018, S. 18

¹¹⁰ Ebd.

¹¹¹ Vgl. Schroeder 2019, S. 34.

¹¹² Ebd.

¹¹³ Vgl. Holzmann 2012, S. 1.

Tabelle 3 Einteilung von Naturrohstoffen mit Produktbeispielen¹¹⁴

Erzeugnisse aus rohen Naturrohstoffen	Schilf, Sisal-/ Kokosfasern, Baumrinde, Roggen-/ Weizenmehl, Farbstoffe, Melasse, Stroh, Riedgras, Holz, Schachtelhalm, Zucker, pflanzliche Emulsionen (Pflanzenharze, Kokos- / Feigenmilch)
Erzeugnisse aus physikalisch umgewandelten Naturrohstoffen	Hanf-, Leinen-, Nessel- und Flachsgewebe, Faserdämmplatten, Terpentinöl, Trockenausbauplatten, ölige Bindemittel-/ Balsame, umgewandelte Pflanzenharze (Naturasphalt, Schellack, Gummigut)
Erzeugnisse aus chemisch umgewandelten Naturrohstoffen	Vlies, Papier/ Karton, Holzkohle, Farb- und Pflanzengerbstoffe, Kohlenstoffpigmente, Zellulose für Gewebe, Naturharzlacke und -klebstoffe, Zellulose-/ Stärkekleister (-leim)

Die Produktvielfalt an pflanzlichen Rohstoffen ist in der heutigen Baubranche sehr umfangreich. Die am meisten verwendeten pflanzlichen Rohstoffe geben einen zusammengefassten und pragmatischen Einblick. Diese werden in der nachfolgenden *Tabelle 4* aufgelistet.¹¹⁵

Tabelle 4 Naturrohstoffe mit gewonnen Erzeugnissen und Produktbeispielen¹¹⁶

Naturrohstoffe	Erzeugnis	Anwendungsbereich
Baumharze	Naturasphalt, Lacke	Öllacke, Nitrozellulose- und Spirituslacke, Harzklebstoff, Kautschuklacke, Dach- und Dichtungsanstriche, Bernsteinlacke, Firnis, Temperabindemittel, Latexbindemittel, Asphalthe
Nadelhölzer	Balsame, Weichmacher	Spirituslacke, Balsamterpentinöl, Nitrocelluloselacke, Venezianisches Terpentin
Stroh, Schilf, Holz	Putzbewehrungen, Bauplatten, Putzträger, Dämmstoffe	Rabitzarbeiten, Trockenausbau, unterschiedliche Putzuntergründe für Dämmarbeiten
Schachtelhalm	Schleifmittel	Feinschliffe (z. B. Polimentvergoldungen)

¹¹⁴ Tabelle Vgl. Sommer und Mayer 2001, ohne Seitenangabe.

¹¹⁵ Vgl. Holzmann 2012, S. 1.

¹¹⁶ Tabelle Vgl. Sommer und Mayer 2001, ohne Seitenangabe.

Naturrohstoffe	Erzeugnis	Anwendungsbereich
Hanf, Baumwolle, Jute, Abacá, Seegras, Gras, Leinen, Flachs, Kokos, Sisal, Bambus, Schilf, Stroh, Bäume, Nesseln	Dämmstoffe, Fasern	Dämmstoffe, Faserbewehrungen (-verstärkungen) in Kunststoffen, Wärmedämmplatten, Seile, Garne, Textilien, Trockenausbauplatten, Betone und Putze, Ausbauplatten, Taue
Pappeln, Bäume, Wiesen gras, Weiden, Getreide, Schilf, Miscanthus	Biomasse	Energieerzeugung (Elektrizität und Wärme)
Raps, Soja, Weizen, Hafer, Lupine, Mais, Reis, Roggen, Dinkel	Proteine	Verschiedene Spezialprodukte wie Düngemittel, Klebstoffe u. a. Verpackungsmaterialien
Gehölze, Bäume	Lignozellulose	Watte, Papier, Viscose
Sträucher, Schild, Bambus, Weiden, sämtliche Baumarten	Holz	Papier, Energiegewinnung, Dämmplatten, Konstruktionshölzer, Spanplatten, Möbel, Heizmaterial, Fertigbauteile, Ausbauplatten, Mehrschicht hölzer
Safran, Rote Beete, Rotkraut, Weintrauben, Nusschale, Indigo, Möhre, Waid, Wau, Obstkerne	Farben	Wasserlösliche Farben, Farbpigmente (z. B. Rebschwarz), Lacke, Textilienfärbung
Zuckerrübe	Zucker	Verpackungsmaterial
Raps, Nüsse, Hanf, Leinsamen, Crampe, Disteln, Oliven, Soja, Kakao, Sonnenblumen	Öle/ Fette	Seifen, Ölfarben, Ölkitte, Effektlacke, Schmier-, Brenn- und Treibstoffe, Ölfirnis, Imprägniermittel, Temperamal farbe, Lackweichmacher
Mais, Getreide, Kartoffeln	Stärke	Folien, Tapetenkleister, Putze, Verpackungsmaterialien, Bioplastik, Gipskartonbauplatten

Die Natur erfüllt mit Blick in die Wirtschaft eine vielfältige und ökonomisch förderliche „Dienstleistung“. Diese unterschiedlichen, von der Natur für die Menschen erbrachten,

Produkte und Leistungen können in Produktions-, Regelungs- und Soziokulturfunktionen eingeteilt werden.¹¹⁷ (Tabelle 5)

Tabelle 5 Funktionen der Produkte und Leistungen von Naturstoffen mit Beispielen¹¹⁸

Funktionen	Güter und Leistungen	Beispiele
Produktionsfunktionen (Quelle für nicht erneuerbare und erneuerbare Ressourcen)	Anorganische Stoffe	Salze, Wasser, Erze, Baustoffe
	Organische Stoffe	Futter, nachwachsender Rohstoff, Nahrung, Medikamente
	Energie	Wasser-, Sonne-, Windenergien, Biomasse, fossile Energieträger
Soziokulturfunktionen	Lebensraum	Flächennutzung, bioklimatische Wirkung
	Kultur	Kulturgut, Heimatverbundenheit, Ästhetik, Brauchtum
	Information	Wissenschaft und Bildung, Bioindikation des Umweltzustandes
	Gesundheit	Freizeit, Erholung
Regelfunktionen	Aufnahme	Abfallstoffe und Emissionen
	Transport	Schadstoffdisposition in Luft und Gewässer, Verlagerung der Schadstoffe
	Reinigung	Abbau von Abfall- und Schadstoffen
	Speicherung	Wasserspeicherung, Senkung von Schadstoffen in Erdreich und Gewässer, Wärmepufferung

¹¹⁷ Vgl. Holzmann 2012, S. 2.

¹¹⁸ Tabelle Vgl. Sommer und Mayer 2001, ohne Seitenangabe.

Ökonomie und Ökologie sind voneinander abhängig. Die Natur gibt der Wirtschaft durch nicht erneuerbare Ressourcen (z. B. Mineralien oder Erdöl) ein begrenztes Wachstum.¹¹⁹ Allerdings beeinträchtigt die Wirtschaft durch Abfälle und Schadstoffemissionen den Bestand von Umwelt und Natur. Deshalb sind Konzepte über nachhaltige Entwicklungen umweltpolitische Leitideen geworden.¹²⁰ Die natürlichen Ressourcen und Umweltbedingungen können durch die Verwendung von pflanzlichen Rohstoffen geschont werden. Zudem wird der Wirtschaft ein stärkeres Wachstumspotential ermöglicht. Um dieses Zusammenspiel der Stoffströme zu regulieren, wurden die Managementregeln der Nachhaltigkeitsstrategien entwickelt.¹²¹

1. Grundregel: Vorsorge und Generationengerechtigkeit
2. Substitutions- und Regenerationsregel erneuerbarer Naturgüter
3. Assimilationsregel von freigesetzten Stoffen
4. Regel zu Risiken und Gefahren für die Gesundheit
5. Regel zu Politikfeldintegration und Strukturwandel
6. Regel zur Entkopplung von Verkehrsleistungen, Ressourcen- und Energieverbrauch
7. Schuldregel öffentlicher Haushalte gegenüber zukünftigen Generationen
8. Regel zur Landwirtschaft für eine produktive, wettbewerbsfähige und umweltverträgliche Landwirtschaft
9. Regel zur Stärkung des sozialen Zusammenhalts (Armut, Bevölkerungsschichten, demografischer Wandel)¹²²

Das Ziel der Managementregeln in Bezug auf den Umgang mit Stoffströmen ist jedoch nicht die direkte Reparatur der Umwelt. Stattdessen soll die Vermeidung von Umweltschäden durch eine umweltbewusste Wirtschaftsweise und einer der daraus resultierenden nachhaltigen Entwicklung erzielt werden.¹²³

2.4.2 Biologische und natürliche Baustoffe

Natürliche oder biologische Baustoffe werden in der heutigen Zeit oftmals beworben. Nicht alle Produkte, die als natürlich oder biologisch propagiert werden, sind es auch. Kork oder Holz sind z. B. nur natürliche oder biologische Baustoffe, solange sie nicht behandelt werden.¹²⁴ Natürliche Baustoffe sind unverändert eingesetzte Produkte in Objekten. Biologische Baustoffe bestehen aus organisch gewachsener Materie. Daher geht nie-

¹¹⁹ Vgl. Holzmann 2012, S. 3.

¹²⁰ Ebd.

¹²¹ Ebd.

¹²² Vgl. Kümmerer et al. 2017, S. 20–21.

¹²³ Vgl. Kümmerer et al. 2017, S. 19.

¹²⁴ Vgl. Stahr 2018, S. 87.

mand bei dem Einsatz von als natürlich oder biologisch bezeichneten Baustoffen von einer Belastung für die Umwelt und den Menschen aus. Allerdings kann ebenfalls durch einen falschen Einsatz von natürlichen oder biologischen Baustoffen mit Gesundheitsschäden gerechnet werden, z. B. bei Staubemissionen durch fasrig bzw. spröde werdende Dämmstoffe.¹²⁵ Diese sollten daher dicht von Innenräumen abgeschottet werden, um Staubemissionen zu verhindern. Ebenfalls muss die Dämmung einheitlich sein und Dampfsperren bzw. -bremsen fachgerecht eingebaut werden.¹²⁶ Heutzutage gibt es ein breites Angebot an bspw. Dämmstoffen, die preiswert sind und mäßig bis sehr gute ökologische Werte aufweisen.¹²⁷ Wenn Holz bspw. mit Holzschutzmittel bearbeitet wird, wäre es eine Gefährdung für die Gesundheit der Menschen. Letztlich kann nicht mehr von einem biologischen oder natürlichen Baustoff gesprochen werden.¹²⁸ Der Ziegel wird u. a. gebrannt, was ein physikalischer und chemischer Eingriff ist. Das heißt, dass er auch nicht mehr biologisch oder natürlich ist. Diese zwei Beispiele zeigen auf, dass die Begrifflichkeiten „biologisch“ und „natürlich“ allein nicht viel aussagen. Daher sollten die Baustoffe eher kritisch untersucht werden.¹²⁹

- Welche Schadstoffe sind im Baustoff erhalten? (z. B. Radioaktivität, faserförmige Stoffe, toxische Substanzen oder lungenbeschädigende Stäube)
- Wie hoch ist die Gefährdung der Menschen?
- Wie sehr wird die Umwelt bei der Produktion der Baustoffe belastet? (z. B. Emission, Schadstoffe bei Ablagerung, Belastung bei Rohstoffgewinnung)¹³⁰

Die DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 beinhalten Vorschriften für die Bewertung und Auswahl von umweltschonenden Baustoffen. Die wesentlichen Phasen eines Baustoffes sollen mithilfe dieser Normen analysiert werden. Dabei gibt es die Phasen: Rohstoffgewinnung – Herstellung – Verarbeitung – Benutzung – Verwertung.¹³¹

2.5 Wärmedämmstoffe

Eine effiziente Maßnahme, um Energie einzusparen, ist eine erhöhte Wärmedämmung. Die Rentabilität eines maximalen Wärmeschutzes ist sehr groß und kaum mit anderen Bauinvestitionen vergleichbar. Die energetische Amortisationszeit ist in weniger als zwei Monaten unter günstigen Bedingungen erreicht.¹³² In der europäischen Normreihe DIN EN 13162 – 13171 sind die speziellen Eigenschaften von Dämmstoffen festgelegt. Allerdings

¹²⁵ Vgl. Stahr 2018, S. 88.

¹²⁶ Ebd.

¹²⁷ Ebd.

¹²⁸ Vgl. Stahr 2018, S. 89.

¹²⁹ Vgl. Stahr 2018, S. 90.

¹³⁰ Ebd.

¹³¹ Vgl. Stahr 2018, S. 91.

¹³² Vgl. Krusche 1982, S. 118.

können bei nachgewiesener Eignung auch nicht genormte Dämmstoffe eingesetzt werden.¹³³ Grundsätzlich werden Dämmstoffe in zwei Hauptgruppen aufgeteilt – anorganische Dämmstoffe (mineralische Stoffe) und organische Dämmstoffe (Kohlenstoffverbindungen).¹³⁴ Beide Gruppen können je nach Rohstoffherkunft in synthetische und natürliche Materialien eingeordnet werden. Damit entstehen vier Gruppen - anorganische natürliche Dämmstoffe, anorganische synthetische Dämmstoffe, organische natürliche Dämmstoffe und organische, synthetische Dämmstoffe.¹³⁵

Anorganische natürliche Dämmstoffe

Quarz, Ton und Mineralien sind z. B. anorganische natürliche Rohstoffe. Aus diesen Materialien entstehen Dämmstoffe wie Blähperlit, Naturbims, Blähton oder Blähglimmer durch das Aufblähen der jeweiligen Ausgangsmaterialien. Die aufgeblähten Körner werden oftmals als Schüttung zum Einsatz gebracht.¹³⁶

Anorganische synthetische Dämmstoffe

Dazu gehören Stoffe wie Mineralfaser, Glaswolle oder Steinwolle. Sie sind formbar und weich und werden daher des Öfteren als Platten verwendet. Steinwolle setzt sich häufig aus Gesteinen wie Diabas, Basalt oder Dolomit zusammen und Glaswolle besteht zu 70 % aus Altglas. Zur Staubminderung kommen Bestandteile wie Kalk, Mineralöl, Sand und Bindemittel (Bakelit) hinzu.¹³⁷ Nachdem das Glas oder Gestein geschmolzen ist, wird es durch Düsen geblasen oder in feine Fäden ausgezogen. Ebenfalls gehören Mineralschaum (Kalk, Quarz und Wasser für Platten) und Kalziumsilikat (Quarz, Kalk und Porenbildner werden mithilfe von Druck und Wasser zu feinporigen, offenen Strukturplatten verarbeitet) mit in die anorganische und synthetische Gruppe.¹³⁸

Organische natürliche Dämmstoffe

Flachs, Hanf, Schafwolle, Stroh, Holz, Kork und Schilfrohr gehören zu der Kategorie der nachwachsenden Rohstoffe. Faserdämmstoffe werden u. a. aus Schafwolle, Hanf, Baumwolle, Flachs und Kokos in Form von Filz oder Matten hergestellt.¹³⁹ Korke sind ebenfalls Dämmprodukte und werden aus Korkeichenrinde unter Wasserdampf zu Granulat oder

¹³³ Vgl. Timm 2019, S. 81.

¹³⁴ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.a.

¹³⁵ Ebd.

¹³⁶ Ebd.

¹³⁷ Ebd.

¹³⁸ Ebd.

¹³⁹ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.a.

Platten verarbeitet. Holz wird zu Holzfasern, Holzweichfaserplatte, Holzwolle und Holzspänen gefertigt. Aus Zellulose wird Brandschutzmittel und Altpapier hergestellt, welches jedoch öfter lose angeboten wird.¹⁴⁰

Organische synthetische Dämmstoffe

In diese Kategorie fällt z. B. Polystyrol, welches durch eine Kohlewasserstoffverbindung (Polymerisation) entsteht. Dabei wird expandiertes Polystyrol (ESP) hergestellt. Wenn Wasserdampf aufgeschäumt wird, entsteht Polystyrolgranulat und wenn es mithilfe eines Treibmittels aufgeschäumt wird, wird es zu extrudiertem Polystyrol (XPS).¹⁴¹ Beide werden anschließend weiter zu Platten gepresst. Phenolharz (PF) und Polyurethan (PUR) sind weitere Hartschaumplatten. Polyolefin, Polyethylen und synthetischer Kautschuk sind Weichschaumkunststoffe (thermoplastische Kunststoffe) die durch Polymerisation produziert werden.¹⁴²

¹⁴⁰ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.a.

¹⁴¹ Ebd.

¹⁴² Ebd.

3 Kritische Analyse von ausgewählten naturnahen Dämmstoffen mit Bezug zur Ökobilanz

Der Pflanzenrohstoffeinsatz im Baubereich kann in der Entwicklung der Nachhaltigkeit einen wesentlichen Beitrag leisten. In diesem Absatz werden die naturnahen Dämmstoffe aus Stroh, Hanf und Holz unter Berücksichtigung der Datenbank ÖKOBAUDAT analysiert. Dabei werden jeweils eine Berechnung zu einem Wandaufbau durchgeführt und die Emissionen daraus kalkuliert.

Laut der DIN EN 15804 für Bauteile und der DIN EN 15978 für Gebäude muss sichergestellt werden, dass die Baustoffe eine analoge Funktion erfüllen, wenn die Ökobilanz verglichen wird.¹⁴³ Demnach muss das funktionelle Äquivalent erfüllt sein, indem funktionelle und technische Mindestanforderungen erfüllt werden.¹⁴⁴

In der Analyse werden von den Dämmstoffen die Phasen A-D, was die Herstellungs-, Erstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase und Vorteile/ Belastungen außerhalb der Systemgrenzen umfasst, herausgestellt.

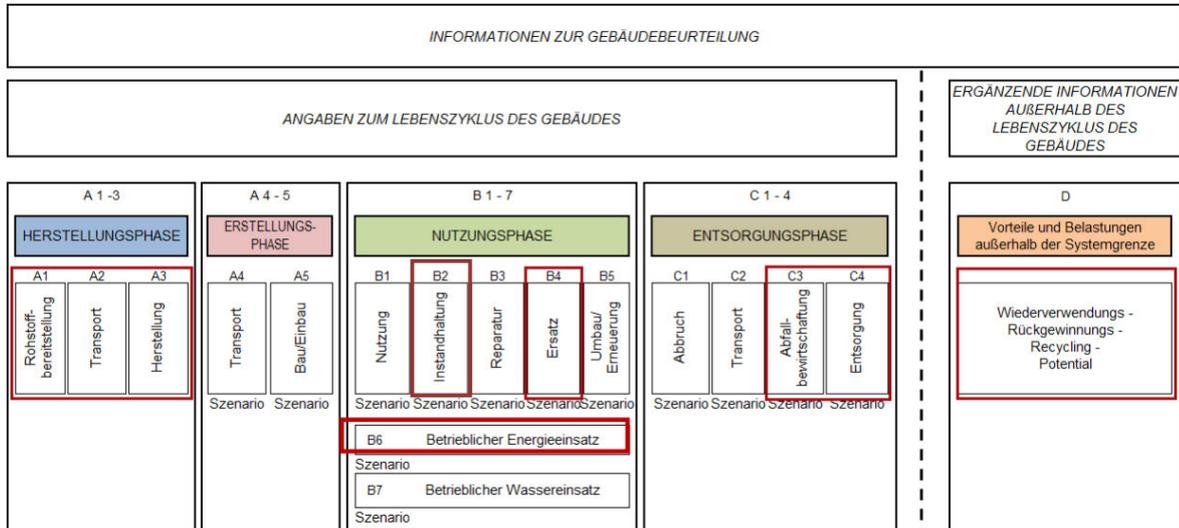


Abbildung 4 Struktur nach DIN EN 15978, umweltbezogene Informationen¹⁴⁵

¹⁴³ Vgl. König, Dipl. Ing. Architekt Holger 2017, S. 6–98.

¹⁴⁴ Ebd.

¹⁴⁵ Abb. König, Dipl. Ing. Architekt Holger 2017, S. 6–105.

Dabei werden:

- die totale Primärenergie erneuerbar (PERT) und
- die totale Primärenergie nicht erneuerbar (PENRT)

für den Ressourcenverbrauch erfasst und aus der Wirkungsbilanz, was Emissionen in Boden, Luft und Wasser sind, folgende Einheiten betrachtet:

- Treibhausgaspotential (GWP),
- Ozonabbau (ODP),
- Sommersmog (POCP),
- Versauerung (AP) und
- Überdüngung (EP).

Die Produkte in der Berechnung haben das Ziel einen U-Wert von $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ zu erreichen. Der U-Wert dient für die Qualitätsvorgabe von Außenbauteilen. Er steht bauphysikalisch für den Wärmestrom der einzelnen Bauteile, der in einer Stunde, zwischen den beiden Oberflächen, bei einer Temperaturdifferenz von 1K und einer Wandfläche von 1 m^2 fließt.¹⁴⁶ Laut dem GEG-Gesetz darf der U-Wert nicht über $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ liegen.¹⁴⁷ Grundsätzlich gilt: Je kleiner der U-Wert, desto besser ist die Wärmedämmfähigkeit.¹⁴⁸ Der Wärmeübergangswiderstand außen $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ und der Wärmeübergang innen $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ sind in den Tabellen DIN EN ISO 6946 „Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient“ vorgegeben und nicht veränderbar.¹⁴⁹

Der U-Wert soll bei der nachstehenden Rechnung einen besseren Wert erreichen als $0,24 \text{ m}^2\text{K/W}$. Aus diesem Grund wird für die Berechnung ein pauschaler U-Wert von $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ verwendet, welches den Äquivalenten Wert abbilden soll, um die Baustoffe miteinander vergleichbar zu machen. Jedes Material benötigt eine andere Wandstärke, um auf den U-Wert pro m^2 Wandfläche von $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ zu kommen.

¹⁴⁶ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.b.

¹⁴⁷ Vgl. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den Bundesminister der Justiz 08.08.2020 §48 Anlage 7, GEG.

¹⁴⁸ Vgl. Greenhouse Media GmbH o. J.b.

¹⁴⁹ Ebd.

Der U-Wert wird wie folgt berechnet:

$$\text{Wärmedurchlasswiderstand } R = \frac{\text{Dicke der Bauteilschicht } d}{\text{Wärmeleitfähigkeit } \lambda} = R = \frac{d}{\lambda}^{150}$$

$$U - \text{Wert} = \frac{1}{R}^{151}$$

Die funktionelle Einheit ist laut ÖKOBAUDAT bei allen drei Baustoffen wie folgt vorgegeben:

$$= 1 * 1 \text{ m}^3 = 1 \text{ m}^3$$

Der Umwelteinfluss x pro m³ wird wie folgt berechnet:

$$= \text{Summe Umwelteinflüsse } (x) \text{ (Phase A + Phase B + Phase C + Phase D)}$$

Das Volumen in m³ der aufzubauenden Wand ergibt sich aus einer Höhe von 1 m, einer Breite von 1 m und der berechneten Dicke bei dem erreichten U-Wert von 0,2 W/m²K

$$= \text{Dämmschichtdicke mit dem erreichten } U - \text{Wert von } 0,2 \frac{W}{m^2K} * 1 \text{ m} * 1 \text{ m}$$

Der Umwelteinfluss x, der bei einem zu erreichenden U-Wert von 0,2 W/m²K entsteht, wird wie folgt berechnet:

$$= \text{Summe Umwelteinflüsse } (x) * \text{m}^3$$

x = Umwelteinflüsse PERT, PENRT, GWP, ODP, POCP, AP, EP

¹⁵⁰ Vgl. RM Handelsmedien GmbH & Co. KG 2019.

¹⁵¹ Ebd.

3.1 Stroh

3.1.1 Allgemein

Stroh sind die trockenen Halme von gedroschenem Getreide. Dabei werden verschiedene heimische Getreidesorten wie Roggen, Triticale, Weizen, Dinkel und Gerste verwendet. Für den Bau eignen sich allerdings Roggen und Weizen besonders gut, wohingegen Hafer nicht optimal ist.¹⁵²

Tabelle 6 Stroh- und Kornertrag von unterschiedlichem Getreide¹⁵³

Getreide	Ertrag Stroh (dt/ha)	Ertrag Korn (dt/ha)
Sommerweizen	35 bis 60	30 bis 45
Sommergerste	35 bis 50	30 bis 50
Sommerroggen	35 bis 50	20 bis 40
Winterweizen	45 bis 75	30 bis 55
Wintergerste	40 bis 70	35 bis 55
Winterroggen	50 bis 80	25 bis 50
Hafer	40 bis 55	30 bis 50

Viele Jahrhunderte lang war Stroh ein kostengünstiger und leicht zugänglicher Baustoff. Mit den Jahren geriet Stroh allerdings in Vergessenheit. Für Bauherren und Architekten, die nachhaltig bauen, wurde der Baustoff Stroh in den letzten Jahren wieder interessanter. Stroh fällt ohnehin als Nebenprodukt in der Landwirtschaft an, weshalb kein zusätzlicher Energieaufwand benötigt wird.¹⁵⁴ Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) hat Baustroh in Form von Baustrohballen seit 2006 als Wärmedämmung im Bereich von Decken, Wänden und Dächern zugelassen. 2017 mündete diese Zulassung in die Europäische Technische Bewertung (ETA-17/0247). Baustroh kann jedoch neben der Nutzung für Wärmedämmung auch als wandbildender und ausfachender Baustoff und Putzträger fungieren. Eine Ausfachung mit Stroh ist bauaufsichtlich geregelt in einer Holzkonstruktion.¹⁵⁵ Die Ballen werden dabei lückenlos, stramm und setzungssicher eingesetzt. Im Anschluss

¹⁵² Vgl. Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., S. 8.

¹⁵³ Tabelle Vgl. Holzmann 2012, S. 228.

¹⁵⁴ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.e.

¹⁵⁵ Vgl. Heinz Schachter 2020.

werden die Ballen z. B. mit Putz oder einer Holzschalung verkleidet. Die Strohbauteile sind bei fachgerechter Ausführung vor Feuchte, Schädlingen und Feuer geschützt.¹⁵⁶

3.1.2 Strohdämmung

3.1.2.1 Ernte und Aufbereitung für Bauprodukte

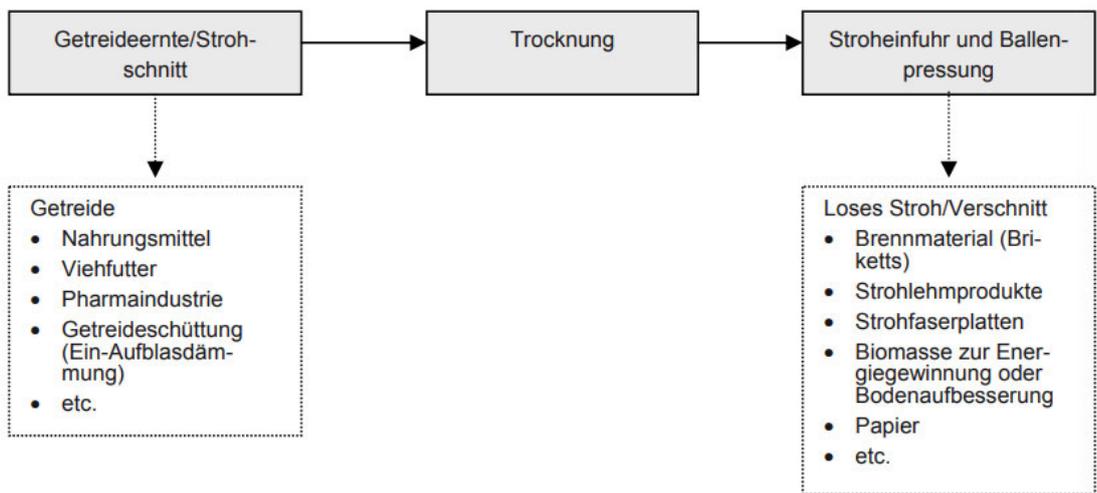


Abbildung 5 Diagramm der Strohballeherstellung¹⁵⁷

Nachdem die Kornernte durchgeführt wurde, kommt es zur Strohernte. Die auf dem Feld verbleibenden Strohrefte werden durch eine Kolbenpresse (Hochdruckpresse, Niederdruckpresse) zu Ballen gepresst. Hierbei muss beim Erntegut besonders auf die Feuchtigkeit bei der Ballenpressung geachtet werden.¹⁵⁸ Die Witterungsbedingungen und der Tageszeitpunkt sind bei einem Erntevorgang unbedingt zu beachten. Der Feuchtegehalt eines Strohballens, welcher für den Bau genutzt wird, darf maximal 15 M.-% betragen.¹⁵⁹ Des Weiteren können keine Strohballen hergestellt werden, wenn der Verkräutungsgrad des Feldes zu hoch ist. Der Grund dafür ist die Beschädigung der Bestandteileigenschaften und Zellstruktur.¹⁶⁰ Ebenso unterscheiden sich die bauphysikalischen Eigenschaften von (Un-)Kräutern und reinem trockenem Stroh erheblich in der Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Festigkeit oder und anderen Bereichen. Aus diesem Grund muss der Unkrautanteil weniger als 0,5 M.-% und der Kornanteil weniger als 0,4 M.-% betragen.¹⁶¹

Die Ballpresse presst, je nach Querschnittsabmessung des Förderkanals, verschiedene Ballen in Höhe und Breite. (Tabelle 7) Je nach Ausstattung der Technik kann die Länge

¹⁵⁶ Ebd.

¹⁵⁷ Abb. Holzmann 2012, S. 231.

¹⁵⁸ Vgl. Holzmann 2012, S. 231.

¹⁵⁹ Ebd.

¹⁶⁰ Ebd.

¹⁶¹ Ebd.

der Ballen variabel eingestellt werden. Es können zudem auch Rundballen gepresst werden.¹⁶² Diese werden mit kolbenlosen Pressen verdichtet und später wieder entrollt und in einsatzfähige Baustrohballen für den Bau gepresst. Dabei dürfen keine Schimmelpilzbildungen oder Verrottungen vorhanden sein. Die Baustrohballen werden i. d. R. mit Polypropylen-Bändern gebunden. Hierzu können aber auch Hanf-, Sisal-, Kokos-, Flachsfaser und andere Faserstoffe als Band genommen werden.¹⁶³

Tabelle 7 Durchschnittliche Baustrohballenabmessung¹⁶⁴

	Große Ballen	Mittlere Ballen	Kleine Ballen
Pressdichte (kg/m ³)	180 – 200	180 – 200	80 – 120
Breite (cm)	120	80	45 – 50
Höhe (cm)	70	50	32 – 35
Länge (cm)	100 – 300	70 – 240	50 – 120

Strohballen bzw. Stroh allgemein muss trocken gelagert und ausreichend belüftet werden. Ballen, die noch feucht sind, dürfen nicht eng gelagert werden, da sonst der Verrottungsprozess durch Mikroorganismen stattfindet.¹⁶⁵

3.1.2.2 Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten

Wärmedämmung und Wärmeleitfähigkeit

Stroh und andere natürliche, traditionelle Baustoffe haben sehr gute CO₂-Bilanzen und ergeben dem Bau oder Denkmalschutz neue Chancen. Stroh ist regional verfügbar und kann die Ökobilanz dadurch positiv beeinflussen. Besonders eignet sich Stroh durch seine bauphysikalischen Eigenschaften als Dämmstoff.¹⁶⁶ Nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (Zulassungsnummer: Z-23.11-1595) eignet sich Stroh bezüglich der Konstruktion zur Wärmedämmung als:

- Verputzte und frei bewitterte Außenwandkonstruktion
- Mit hinterlüftetem und vorgesetzten Wetterschutz in Außenwandkonstruktionen
- Dachstuhl mit belüfteter Dachdeckung¹⁶⁷

Stroh hat eine fast komplett hydrophobe Außenhaut. Der Aufbau des rohrförmigen Halmes schließt eine Menge an Luft ein und hat somit eine enorme wärmedämmende Wirkung.¹⁶⁸ Bauphysikalisch gesehen hat die Legerichtung der Halme einen entscheidenden

¹⁶² Ebd.

¹⁶³ Vgl. Holzmann 2012, S. 231

¹⁶⁴ Ebd.

¹⁶⁵ Ebd.

¹⁶⁶ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.f.

¹⁶⁷ Ebd.

¹⁶⁸ Ebd.

Einfluss auf die Dämmung. (In Halmrichtung = $\lambda = 0,080 \text{ W/(mK)}$; Halmrichtung quer = $\lambda = 0,052 \text{ W/(mK)}$). Bei Reetdächern hat die Querverlegung bauphysikalische Vorteile.¹⁶⁹

Dichte, Setzungsverhalten und Strohwandkonstruktion

Strohballen werden gepresst und können Dichten von bis zu 300 kg/m^3 erreichen. Das Setzverhalten ist mit einer hohen Dichte vorteilhafter, da die nachträgliche Setzung nicht so groß ausfällt.¹⁷⁰ In Bezug auf Wärmeleitfähigkeit ist eine niedrigere Dichte besser geeignet ($110 - 130 \text{ kg/m}^3$). Bei lasttragenden Objekten sollte ein Vorspann die eventuelle Setzung vorwegnehmen. Strohballen müssen zudem laut Bauregelliste C in einem Abstand von 1 m zusätzlich mit Stützen stabilisiert werden.¹⁷¹

Der U-Wert bei einem Gefach von 35 cm Stroh und einer 3,5 cm dicken Lehmputzschicht von beiden Seiten beträgt $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Wandkonstruktion gilt als luftdicht, wenn zusätzlich ein einlagiger Lehmputz mit einer Rohdichte von $>900 \text{ kg/m}^3$ verspachtelt wird. Diese Konstruktion hält raumseitigen Schimmelpilzbefall fern, erreicht den Passivhausstandard und stellt eine Grundlage für hygienischen Wärmeschutz dar. Stroh weist für den Wärmeschutz im Sommer eine fast doppelt so hohe Wärmekapazität wie andere mineralische oder synthetische Dämmstoffe auf.¹⁷² Um der schnellen Aufheizung der Innenräume im Sommer trotz der Strohdämmung entgegenzuwirken, sollten Bodenkonstruktionen und Raumtrennwände mindestens in einer massiven Bauweise ausgeführt werden. Das Wärmespeichervermögen steigt in der Gesamtkonstruktion und verringert die Nachteile des Strohs im Sommer.¹⁷³ Zum Beispiel können dafür Lehmsteine verwendet werden, die eine Rohdichte von $1.800-2.200 \text{ kg/m}^3$ haben. Der sommerliche und der winterliche Wärmeschutz wären somit gewährleistet.¹⁷⁴

Bauphysikalische Kennwerte

Tabelle 8 Bauphysikalische Kennwerte¹⁷⁵

Λ	Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit (quer zum Halm)	$0,052 \text{ W/(mK)}$
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstand	2
P	Rohdichte	$85-115 \text{ kg/m}^3$
C	Spezifische Wärmekapazität	2 kJ/(kgK)
Rs	Spezifischer Strömungswiderstand	181 Pa(s/m)

¹⁶⁹ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.f

¹⁷⁰ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.f

¹⁷¹ Ebd.

¹⁷² Ebd.

¹⁷³ Ebd.

¹⁷⁴ Ebd.

¹⁷⁵ Tabelle Vgl. Fachverband Strohballenbau Deutschland e. V. (FASBA) o. J.

	Brandverhalten	B2 (DIN 4102-1) E (Euro-klasse)
--	----------------	---------------------------------

3.1.2.3 Kosten

Einen direkten Preisvergleich oder Übersichten zu Preisen für Stroh und Dämmstoffe gibt es nicht. Allerdings gibt es grobe Kostenwerte von Strohdämmungen durch bereits errichtete Häuser in Deutschland.¹⁷⁶ Neubauten, die in Deutschland zwischen 2003 und 2010 errichtet wurden, hatten laut der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) Kosten von ca. 1500 Euro/m² NGF (nach DIN 277).¹⁷⁷ Somit liegen Stroh Häuser mit knapp 150-200 Euro/m² über den Kosten für vergleichbare Neubau-Einfamilienhäuser. Allerdings kann der Dämmstandart mit Stroh, bei einem richtigen Einbau, viel besser sein zu fast gleichen Kosten als bei anderen Dämmstoffen. Bei der Einzelbetrachtung der Kosten ist laut FNR mit Gesamtkosten für eine strohgedämmte und verputzte Holzständerwand mit ca. 260 Euro/m² Wandfläche zu rechnen.¹⁷⁸ Auch hier liegt der Preis knapp über dem Preis einer normalen Holzständerwand. Wenn allerdings ein zweischaliges Mauerwerk gedämmt wird, sind die Kosten mit einer Strohdämmung günstiger. Für den Quadratmeter Stroh werden ca. 6-19 Euro je nach Abnahmemenge verlangt.¹⁷⁹

3.1.2.4 Ökobilanzierung

Betrachtet wird hier der Prozess-Datensatz FASBA e.V. GaBi Baustroh; 100 kg/m³ aus ÖKOBAUDAT.

Allgemeine Informationen:

- Name: FASBA e.V. GaBi Baustroh; 100 kg/m³
- Erläuterung Geografie der Datenerhebung: max. 100 km vom Werk zur Baustelle in DE
- Anwendungsgebiet: dämmende Ausfachung einer Holzkonstruktion¹⁸⁰
- Allgemeine Anmerkungen: Durchführung durch FASBA, Herstellung der Baustrohballen durch Baustroh GmbH (Verden), Verwendung von Roggen- und Weizenstroh, keine zusätzlichen Einsatzstoffe, Rohdichte liegt zwischen 85-115 kg/m³, funktionale Einheit: 1 m³.¹⁸¹

Quantitative Referenz:

- Referenzfluss: Volumen: 1 * 1 m³ = 1 m³ Strohballedämmung

¹⁷⁶ Vgl. Greenhouse Media GmbH o. J.c.

¹⁷⁷ Ebd.

¹⁷⁸ Ebd.

¹⁷⁹ Ebd.

¹⁸⁰ Vgl. FASBA e.V. 2019.

¹⁸¹ Ebd.

- Materialeigenschaft Referenzfluss: Rohdichte 100 kg/m³¹⁸²

Technologische Repräsentativität:

Die Strohballenherstellung hat alle landwirtschaftlichen Prozesse inkludiert – Bodenbearbeitung → Aussaat der Körner → Kultivierung der Pflanzen → Ernte des Getreides. Anschließend wird ohne zusätzliche Einsatzstoffe das Stroh auf dem Acker in Ballen gepresst und letztlich mit Polypropylen-Schnüren gebunden.¹⁸³ Die Strohballen haben eine Rohdichte zwischen 85-115 kg/m³. Dabei haben die Ballen eine Abmessung von H x B x L 200-700 mm x 300-900 mm x 500-3000 mm. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei $\lambda_{10, tr} = 0,044$ W/(mK). Quer zur Halmrichtung ist die Wärmeleitfähigkeit mit $\lambda = 0,052$ W/(mK) bemessen.¹⁸⁴

¹⁸² Ebd.

¹⁸³ Vgl. FASBA e.V. 2019

¹⁸⁴ Ebd.

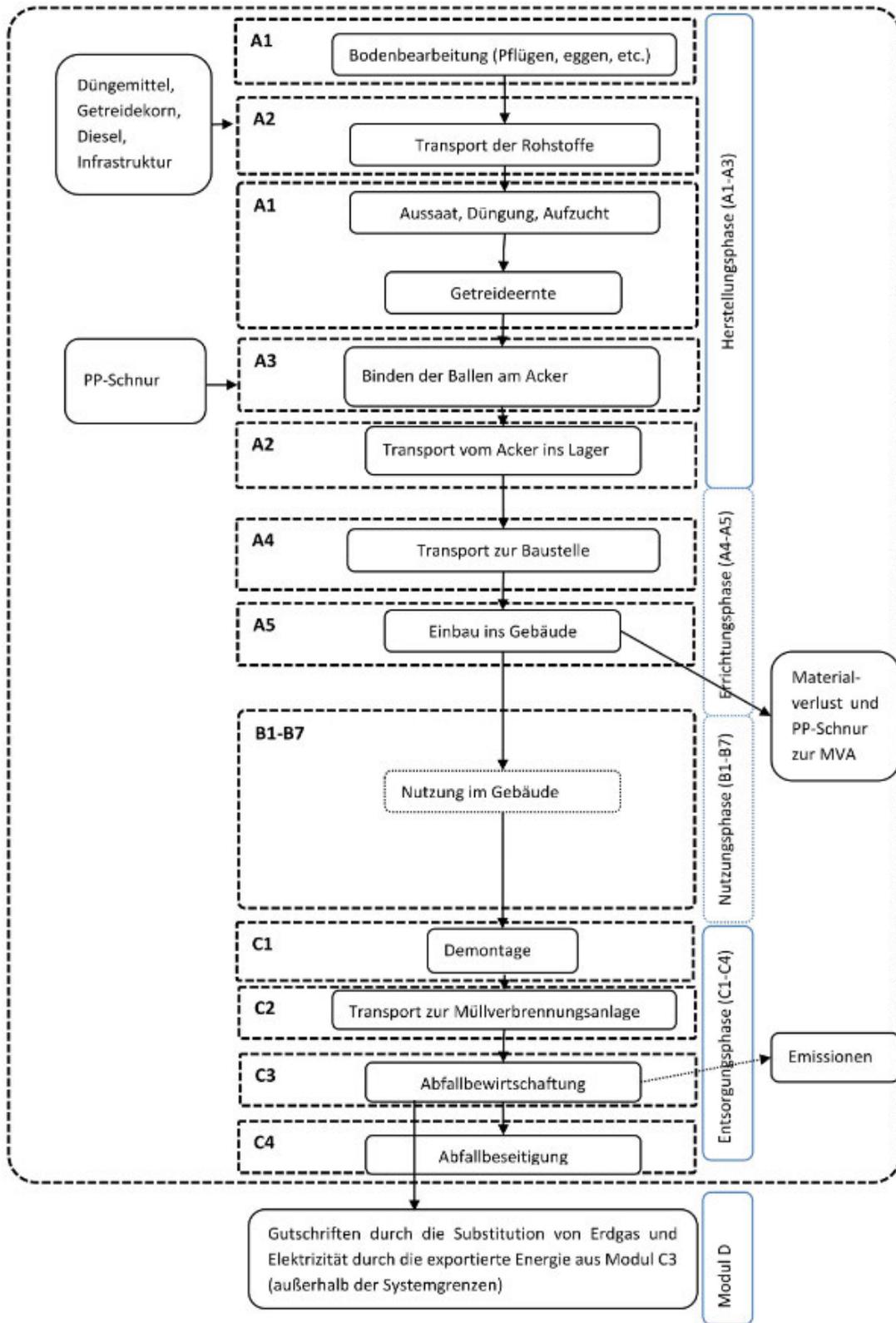


Abbildung 6 Lebensphasen eines Baustrohballens¹⁸⁵

¹⁸⁵ Abb. FASBA e.V. 2019.

Datenerhebung der Umwelteinwirkungen:

Die Berechnung des U-Wertes der Strohballedämmung geschieht ohne die Betrachtung weiterer Außen- oder Innenwandmaterialien.

Tabelle 9 U-Wert-Berechnung Strohballedämmung

Bauteil-schicht	Dicke d (mm)	Dicke d (m)	Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)	Wärmedurchlasswiderstand R (m^2K/W) $= d/\lambda$	Fläche (%)
Wärmeübergang außen R_{se}				0,040	
Strohdämmung	213	0,213	0,044	4,83	100
Wärmeübergang innen R_{si}				0,130	
R-Wert _{ges}				5 Km^2/W	
U-Wert				0,200 W/m^2K	

Der U-Wert einer Strohdämmung mit einer Dicke von 21,3 cm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,044 W/mK beträgt 0,200 W/m²K.

$$R_{ges} = \frac{1}{0,200 \frac{W}{m^2K}} = 5 \frac{Km^2}{W}$$

$$R(\text{Strohdämmung}) = 5 \frac{Km^2}{W} - 0,130 \frac{m^2K}{W} - 0,040 \frac{m^2K}{W} = 4,83 \frac{m^2K}{W}$$

$$\text{Dicke } m = 4,83 \frac{m^2K}{W} * 0,044 \frac{W}{mK} = 0,213 m = 21,3 cm = 213 mm$$

Im nächsten Schritt werden die Umweltindikatoren für die Strohballedämmung berechnet.

Tabelle 10 Umwelteigenschaften von Strohballendämmung pro 0,213 m³

Indikator	Einheit	Umwelteinwirkung Phase A-D
Totale erneuerbare Primärenergie (PERT)	MJ	-370,9413
Totale nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	MJ	-123,0512
Treibhausgaspotential (GWP)	kg CO ₂ -Äquivalent	18,6663
Ozonabbau (ODP)	kg R11-Äquivalent	9,130E-8
Sommersmog (POCP)	kg Ethen-Äquivalent	-0,0031
Versauerung (AP)	kg SO ₂ -Äquivalent	0,0047
Überdüngung (EP)	kg Phosphat-Äquivalent	0,0163

Diese Berechnung wird als Beispiel genommen. Jede weitere Berechnung der Umwelteinwirkungen erfolgt nach dem gleichen Schema.

Beispielrechnung für das Treibhausgaspotential (GWP) der Strohballendämmung:

1 m³ Strohballendämmung stoßen in den Phasen A-D 87,833 kg CO₂ Äquivalent aus.

$$\text{Summe aller Phasen A – D vom GWP} = 87,833 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{m}^3}$$

Die Strohballendämmung muss bei einem U-Wert von 0,2 W/m²K eine Dicke von 21,3 cm = 0,213 m besitzen. Um das in die funktionelle Einheit von m³ (Volumen) zu bringen, nehmen wir die vorher berechnete Dicke von 0,213 m, 1 m Höhe und 1 m Breite.

$$0,213 \text{ m} * 1 \text{ m} * 1 \text{ m} = 0,213 \text{ m}^3$$

Um nun auf das GWP zu kommen, müssen die zwei vorhergehenden Ergebnisse multipliziert werden.

$$87,833 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{m}^3} * 0,213 \text{ m}^3 = 18,67 \text{ kg CO}_2$$

Somit verbraucht die Strohballendämmung bei einem zu erreichenden U-Wert von 0,2 W/m²K mit 0,213 m³ rund 18,67 kg CO₂

In *Tabelle 1* wurden die Ergebnisse der nachstehenden Umwelteinwirkungen niedergeschrieben. Zahlen und Einheiten wurden, wie in der Einleitung des Kapitels beschrieben, auf die jeweiligen Indikatoren in jeder Berechnung angepasst.

3.1.2.5 Vor- und Nachteile

Strohdämmung ist ein landwirtschaftliches Nebenprodukt und somit nicht industriell. Zudem braucht Strohdämmung keine Zusatzstoffe, was es aus ökologischer Sicht vollkommen unschädlich macht.¹⁸⁶ Dabei werden im Gegensatz zu herkömmlichen Häusern 80 - 100 Tonnen CO₂-Ausstoß eingespart ein.¹⁸⁷ Als Energieaufwand kommt lediglich das Pressen der Platten oder Ballen hinzu. Die Entsorgung erfolgt problemlos biologisch oder thermisch.¹⁸⁸ Ein Strohhaus bietet ein sehr gutes Raumklima durch die atmungsaktiven Wände, was optimal für Allergiker ist, und hält Elektrosmog fern. Die Wärmedämmung ist sehr gut. Der Schallschutz ist durch die Lärmdämmung ebenfalls sehr gut.¹⁸⁹ Bezüglich der Tragfähigkeit und des Feuchteverhaltens von Strohdämmung müssen noch weitere Praxis- und Forschungsuntersuchungen stattfinden, bevor es weiterverbreitet wird.¹⁹⁰ Zudem ist der Bau mit Stroh sehr aufwendig in der Planung. Auch der Bauablauf ist sehr witterungsabhängig, da das Stroh beim Einbau trocken sein muss.¹⁹¹

3.1.3 Beispiel – Strohballenhaus Bad König, Hessen (DE)

Im Mai 2008 war Baubeginn des ersten Wohnhauses aus Strohballen in Hessen Bad König. Die Nutzung war für ein Zweifamilienhaus geplant. In der Planung und Bauleitung waren von Shakti Haus Dipl. Ing. T. Schäberle und Dipl. Ing. S. Körner beteiligt. Die statischen Berechnungen führte Herr Schmeer durch, die Holzkonstruktion erfolgte durch die Zimmerei Lösing GmbH und der Strohballeneinbau wurde von Cato Rächle durchgeführt.¹⁹² Am Haus wurden ebenfalls Kalk- und Lehmputzarbeiten durchgeführt, welche in Eigenleistungen erbracht wurden. Das KfW-40-Haus wurde mit Regenwassernutzung, Solarthermie, Stückholzofen und Photovoltaik ausgestattet.¹⁹³ Die Gesamtfläche beläuft sich auf 260 m², worauf sich rund 750 gepresste Strohballen für die Wärmedämmung aus der Region befinden. Ein 1 m langer Strohballen wurde in einer Holzkonstruktion verbaut und letztlich mit Kalk- und Lehmputz verputzt bzw. teilweise mit Fermacellplatten beplankt, die mit Lehmstreichputz bestrichen wurden.¹⁹⁴

¹⁸⁶ Vgl. Greenhouse Media GmbH o. J.c.

¹⁸⁷ Vgl. Markus Pytlik 2020.

¹⁸⁸ Vgl. Greenhouse Media GmbH o. J.c.

¹⁸⁹ Vgl. Markus Pytlik 2020.

¹⁹⁰ Vgl. Greenhouse Media GmbH o. J.c.

¹⁹¹ Vgl. Markus Pytlik 2020.

¹⁹² Vgl. Architektur Shakti Haus o. J.

¹⁹³ Ebd.

¹⁹⁴ Ebd.



Abbildung 7 Strohdämmung, Zweifamilienhaus, Bad König¹⁹⁵

Ökologische Baustoffe:

Der Innenputz, der aus Lehm besteht, wurde aus der Lehmgrube in Reinheim örtlich gewonnen. Es wurden so viele ökologische Baustoffe wie möglich eingesetzt. Die geschwungenen Innenwände wurden mit Lehm verputzt und der Außenputz besteht aus dem Baustoff Kalk.¹⁹⁶ Der Fußboden im Keller wurde mit Glasschaumschotter gedämmt. Die Innenwände wurden mit Hanf befüllt, die Putzträger mit Holzweichfaserplatten versehen und für das Dach wurde eine diffusionsoffene erneuerbare Unterspannbahn verwendet. Decke und Tragkonstruktion bestehen aus Holz.¹⁹⁷

Energiestandard:

Der Primärenergiebedarf pro Jahr beträgt 22 kWh/m²a, was eindeutig weniger ist als das Geforderte in einem KfW-40-Haus. Der Jahresheizwärmebedarf Q_h ist mit 31.9 kWh/m²a ein wenig über dem Wert des Passivhauses (<=15 kWh/m²a). Die Strohballenwand (innen Lehmputz, außen Kalkputz) hat einen U-Wert von 0,13 W/m²K, was ein sehr guter Wert ist.¹⁹⁸ Die Warmwasserversorgung kann von April bis Oktober über die Solarthermie stattfinden, da der Heizbedarf über den Holzvergaserofen inkl. solarthermischer Unterstützung abgedeckt wird. Eine Regenwasserzisterne sammelt 7000 l Wasser für die Gartenbewässerung, Toiletten- und Waschmaschinenbenutzung.¹⁹⁹

¹⁹⁵ Abb. Architektur Shakti Haus o. J.

¹⁹⁶ Vgl. Architektur Shakti Haus o. J.

¹⁹⁷ Ebd.

¹⁹⁸ Ebd.

¹⁹⁹ Ebd.

3.2 Hanf

3.2.1 Allgemein

Auf der Welt gilt Hanf als die älteste Kulturpflanze. Hanf wächst innerhalb von 100 Tagen bis zu 4 m hoch. Zudem hat Hanf keine Ansprüche an Grund und Boden, benötigt keine Pestizide oder Herbizide und bringt am Ende einen lockeren und unkrautfreien Boden mit sich.²⁰⁰ Die drei bekanntesten Hanfarten für den Anbau sind Nutzhanf (*cannabis sativa*), indischer Hanf (*cannabis indica*) und russischer Hanf (*cannabis ruderalis*).²⁰¹ Die Baumaterialien, die daraus gewonnen werden, sind in der Rubrik der pflanzlichen Faserdämmstoffe – der organischen Dämmstoffe – zu finden. Hanf erzeugt durch eingeschlossene Luft in seinen Faserzwischenräumen seine Dämmwirkung. Seit 1996 darf rauschgiftarmer Hanf bzw. Nutzhanf wieder in Deutschland angebaut werden.²⁰²

Tabelle 11 Erzeugnis von Nutzhanf²⁰³

	Reißlänge (km)	Reißgewicht (g)
Äußere Stängelenden Hanffaser	25,2	0,054
Stängelmittelteil Hanffaser	28,6	0,094

Die Dämmplatten können durch Soda und Polyesterstützfasern für Wände, Bodenbereiche und Dächer genutzt werden. Als Schüttdämmung dienen Hanfschäben und als Stopfmateriale werden Hanffasern verwendet. Beide werden ohne Zusätze eingesetzt.²⁰⁴ Lose Hanffasern, die mit Borsalzen zugesetzt sind, sind ähnlich wie Zellulosefasern und können als Einblasmaterial benutzt werden.²⁰⁵ Als selbstverfestigendes Schüttmaterial werden Hanfschäben mit Bitumen genutzt. Zudem müssen Hanffasern trocken gelagert werden, da sie sonst feucht werden und einen Schimmelpilzbefall bekommen oder verrotten.²⁰⁶

²⁰⁰ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.c.

²⁰¹ Vgl. Holzmann 2012, S. 124.

²⁰² Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.c.

²⁰³ Tabelle Vgl. Holzmann 2012, S. 125.

²⁰⁴ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.c.

²⁰⁵ Ebd.

²⁰⁶ Ebd.

3.2.2 Hanffaserdämmung

3.2.2.1 Ernte und Aufbereitung für Bauprodukte

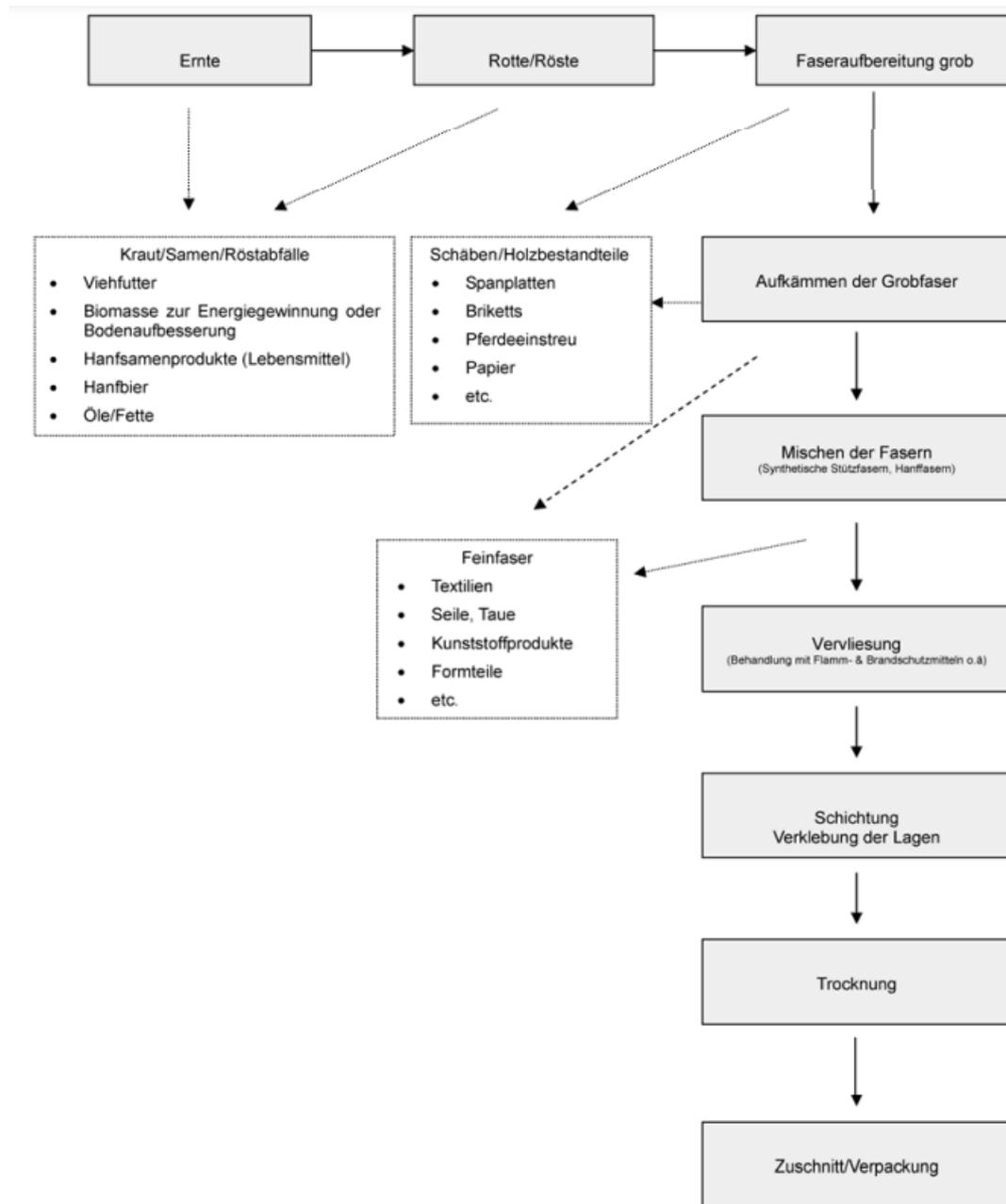


Abbildung 8 Diagramm der Hanfdämmungsherstellung²⁰⁷

Die Ernte von Hanf beginnt ab August und ist witterungsabhängig. Dabei wird in Samen- und Faserreife unterschieden. Wenn Pflanzen für die Faserherstellung benötigt werden, werden sie vor der Samenreife geerntet.²⁰⁸ Die Faserreife braucht ca. 90-110 Tage und die Samenreife 110-120 Tage. Während der Ernte haben die Stämme einen Durchmesser

²⁰⁷ Abb. Holzmann 2012, S. 128.

²⁰⁸ Vgl. Holzmann 2012, S. 129.

von 2 cm. Dabei besteht das Innere aus Holz und das Äußere aus einer Bastschicht, worin sich einzelne Faserbündel befinden.²⁰⁹ Der Fasergehalt in einem Hanfstängel kann bis zu 35 % betragen. Weibliche Pflanzen haben i. d. R. einen niedrigeren Faseranteil als männliche Pflanzen. Durch die einhäusige Züchtung bei technisch genutztem Hanf wurde dies allerdings ausgeglichen. Die Samen haben einen Ölgehalt von 29-35 %.²¹⁰ Früher wurde das geerntete Hanfstroh für die Tauröste auf dem Feld belassen. Mittlerweile wird das Hanfkraut durch neueste Technik direkt gebrochen und in Ballen gepresst. Traditionell wird die Hanffaseraufbereitung in Langfaserverarbeitung, Wergverarbeitung und Kotonisierung aufgeteilt.²¹¹ Bei allen drei Verfahren wird zuerst das Hanfkraut gebrochen und geschwungen. Rinden- und Holzbestandteile werden dabei entfernt und in Lang- und Kurzfasern getrennt.²¹² Weich und geschmeidig werden die Fasern durch eine Hanfweiche gemacht und ebenfalls mit einer Schneidemaschine eingekürzt. Langfasern werden auf einer Hechelmaschine parallelisiert und Kurzfasern letztlich weiter ausgekämmt.²¹³

Bei Hanf-Dämmplatten werden Polyesterfasern, die als Stützfasern dienen, mit Hanffasern vermischt. Weiterhin werden sie je nach Herstellungsrezeptur mit einer Menge von ca. 10 % Kunstfasern bzw. einer oder mehreren Naturfasern homogen miteinander vermischt.²¹⁴ Aus dem Fasergemisch entsteht Endlosvlies, was dämmstoffstärkebildend in mehreren Lagen übereinandergelegt wird. Zwischen diese Lagen wird ca. 5 % Soda für den Pilz- und Brandschutz flächig aufgesprüht.²¹⁵ Es können aber auch Borsalze o. ä. Zusätze, je nach Fabrikat, im Endprodukt sein. Weichfaser-Dämmplatten haben aus diesen Gründen einen Hanffaseranteil von ca. 85 %. Im letzten Schritt werden die auf- und zwischenbeschichteten Matten gepresst, getrocknet, zugeschnitten und verpackt.²¹⁶

3.2.2.2 *Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten*

Eigenschaften

Der sommerliche Hitzeschutz ist sehr gut. Die Hanfdämmung hat ebenfalls gute U-Werte. Hanf müsste demnach ca. 16 cm dick sein, um die aktuell vorgeschriebenen Dämmwerte der geltenden Energieeinsparverordnung EnEV zu erreichen.²¹⁷ Die Dämmung aus Hanf kann aktuell sehr gut mit der Styropordämmung mithalten. Aus ökologischer Sicht übertrumpft Hanf das Styropor. Für die Herstellung wird nur wenig Primärenergie benötigt. Außerdem lässt sich Hanf staubarm verarbeiten und ist hautverträglich.²¹⁸ Hanfdämmung

²⁰⁹ Vgl. Holzmann 2012, S. 129.

²¹⁰ Ebd.

²¹¹ Vgl. Holzmann 2012, S. 130.

²¹² Ebd.

²¹³ Vgl. Holzmann 2012, S. 131.

²¹⁴ Vgl. Holzmann 2012, S. 132.

²¹⁵ Ebd.

²¹⁶ Ebd.

²¹⁷ Vgl. Greenhouse Media GmbH o. J.a.

²¹⁸ Ebd.

kann die Feuchtigkeit aus der Luft entziehen und schadenfrei wieder abgeben, was ein positives Raumklima auslöst. Das Material ist schimmelresistent und frei von Insektenbefall. Die Dämmung aus Hanf lässt sich problemlos recyceln und stößt keinerlei VOC-Schadstoffe aus. Der Schallschutz ist ebenfalls gut.²¹⁹

Bauphysikalische Eigenschaften

Tabelle 12 Bauphysikalische Eigenschaften von Einblas-/ Stopfhanf²²⁰

λ	Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit	0,045 W/(mK)
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstand	1-2
P	Rohdichte	60-80 kg/m ³
C	Spezifische Wärmekapazität	2,2 kJ/(kg*K)
Rs	Spezifischer Strömungswiderstand	1,2 Pa(s/m)
	Brandverhalten	B2 (DIN 4102-1) E (Euro-klasse)

Tabelle 13 Bauphysikalische Eigenschaften von Hanfmatten²²¹

λ	Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit	0,040 W/(mK)
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstand	1-2
P	Rohdichte	30-42 kg/m ³
C	Spezifische Wärmekapazität	2,3 kJ/(kg*K)
Rs	Spezifischer Strömungswiderstand	3 Pa(s/m)
	Brandverhalten	B2 (DIN 4102-1) E (Euro-klasse)

Einsatzmöglichkeiten

Eingesetzt werden Hanfdämmplatten in der Dachdämmung z. B. als Unter- oder Zwischensparrendämmung. Ebenfalls finden sich die Platten in der Innen- und Außenwanddämmung wieder.²²² Die Hanfplatten sind mittlerweile so steif, dass sie sich für eine WDVS-Fassadendämmung eignen. Sie können in hinterlüfteten Fassaden eingesetzt werden und als Geschossdecken- bzw. Fußbodendämmung eingesetzt werden. Ganz dünne Dämmfilze werden u. a. als Trittschalldämmung verwendet.²²³

²¹⁹ Vgl. Greenhouse Media GmbH o. J.a

²²⁰ Tabelle Vgl. Wenzel Naturbaustoffe o. J.

²²¹ Tabelle Vgl. Benz GmbH & Co. KG Baustoffe o. J.

²²² Vgl. RM Handelsmedien GmbH & Co. KG 2018.

²²³ Ebd.

3.2.2.3 Kosten

Pro Quadratmeter belaufen sich die Hanfmaterialkosten auf 33-53 Euro. Hanf kann somit in den durchschnittlichen Kostenbereich für pflanzliche Dämmstoffe eingeordnet werden.²²⁴ Wenn Hanf als Dämmung in den Zwischensparren verwendet wird, kostet dies inkl. Einbau ca. 60 Euro/m². Aufgrund der positiven Eigenschaften, die Hanf aufweist, kann der Preis in Zukunft dank einer höheren Nachfrage weiter sinken.²²⁵

3.2.2.4 Ökobilanzierung

Betrachtet wird hier der Prozess-Datensatz Hanfvlies aus ÖKOBAUDAT.

Allgemeine Informationen:

- Name: Hanfvlies
- Erläuterung Geografie der Datenerhebung: Es wird eine länderspezifische Situation des Datensatzes in Deutschland abgebildet.²²⁶
- Anwendungsgebiet: Anwendung des Produktes im Baubereich.
- Allgemeine Anmerkungen: Diese Gruppe wurde im nachhaltigen Bauen nach dem European Standard (EN) 804 modelliert. Die Ergebnisse werden in Modulen über den gesamten zugelassenen Ergebnissen der LCA modelliert.²²⁷

Quantitative Referenz:

- Referenzfluss: Volumen $1,0 * 1,0 \text{ m}^3 = 1,0 \text{ m}^3$ Hanfvliesdämmung²²⁸

Technologische Repräsentativität:

Das Hanffaser-Vlies umfasst die Cradle-to-gate-Lebenszyklusanalyse was die Herstellung, die Produktion der Landwirtschaft, die Produktion des Vlieses und die Verpackung einschließt.²²⁹ Dabei besteht das Vlies aus 85 % Hanffasern und 15 % Polyesterfasern zum Stützen. Im Anschluss wird das Rohvlies mit 4 % Soda imprägniert. Der Transport vom Werk bis zur Baustelle ist nicht berücksichtigt.²³⁰

²²⁴ Vgl. RENEWA GmbH o. J.

²²⁵ Ebd.

²²⁶ Vgl. thinkstep 2018.

²²⁷ Ebd.

²²⁸ Ebd.

²²⁹ Ebd.

²³⁰ Ebd.

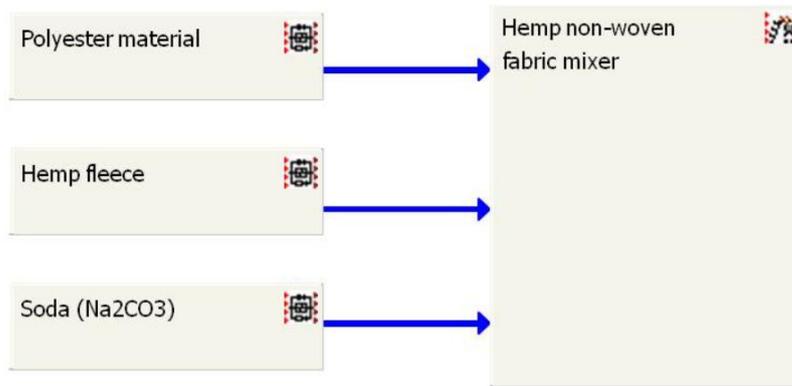


Abbildung 9 Zusammensetzung von Hanfvlies²³¹

Hintergrundsystem:

Strom: Stromproduktion wird nach den länderspezifischen Randbedingungen modelliert und beinhaltet:

1. Spezifische Kraftwerke mit unterschiedlichen fossilen Energieträgern, Verwendung erneuerbarer Energien nach länderspezifischen Energieträgermischen modelliert, Einbeziehung von Transmissions- und Verteilungsverlusten, Stromimport aus Nachbarländern, Kraftwerkeigenverbrauch und Speicherung bzw. Verteilung durch bspw. Pumpspeicherwerke²³²
2. Berücksichtigung von regional-/ landesspezifischen Technologiestandards, Stromerzeugung in Elektrizitätskraftwerken und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in speziellen Kraftwerken²³³
3. Energieträgereigenschaften und länderspezifische Energieträgerbereitstellung²³⁴
4. Förderung, Verarbeitung, Produktion und Transportprozesse werden je nach Situation im Stromerzeugungsland modelliert. Dabei werden die jeweiligen Verarbeitungs- und Produktionsverfahren der unterschiedlichen Energieerzeugungsländer mit einbezogen.²³⁵

Prozessdampf, Thermische Energie: Abhängig von der länderspezifischen Situation wird die Produktion von thermischen Energien und Dampf in Heizkraftwerken modelliert. Der Wirkungsgrad der thermischen Energie beträgt 100 % per Definition. Der Wirkungsgrad für Prozessdampf liegt bei 85-95 %.²³⁶

²³¹ Abb. thinkstep 2018.

²³² Vgl. thinkstep 2018.

²³³ Ebd.

²³⁴ Ebd.

²³⁵ Ebd.

²³⁶ Ebd.

Transport: Alle bekannten und relevanten Transportwege wie Binnenschiff- und Seeverkehr, Lastkraftwagen-, Bahn- und Leitungsverkehr sind berücksichtigt.²³⁷

Raffinerieprodukte: Benzin, Heizöl sowie Rückstände wie Bitum, Diesel, technische Gase und Schmierstoffe sind durch ein parametrisiertes länderspezifisches Raffineriemodell modelliert.²³⁸

Datenerhebung der Umwelteinwirkungen:

Die Berechnung des U-Wertes von Hanfvliesdämmung geschieht ohne die Betrachtung weiterer Außen- oder Innenwandmaterialien.

Tabelle 14 U-Wert-Berechnung Hanfvliesdämmung

Bauteilschicht	Dicke d (mm)	Dicke d (m)	Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)	Wärmedurchlasswiderstand R (m^2K/W) $= d/\lambda$	Fläche (%)
Wärmeübergang außen R_{se}				0,040	
Hanfvliesdämmung	193	0,193	0,04	4,83	100
Wärmeübergang innen R_{si}				0,130	
R-Wert _{ges}				5 Km^2/W	
U-Wert				0,200 W/m^2K	

Der U-Wert einer Hanfvliesdämmung mit einer Dicke von 19,3 cm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/mK beträgt 0,200 W/m²K.

$$R_{ges} = \frac{1}{0,200 \frac{W}{m^2K}} = 5 \frac{Km^2}{W}$$

$$R(\text{Hanfdämmung}) = 5 \frac{Km^2}{W} - 0,130 \frac{m^2K}{W} - 0,040 \frac{m^2K}{W} = 4,83 \frac{m^2K}{W}$$

$$\text{Dicke } m = 4,83 \frac{m^2K}{W} * 0,04 \frac{W}{mK} = 0,193 m = 19,3 cm = 193 mm$$

²³⁷ Vgl. thinkstep 2018

²³⁸ Ebd.

Im nächsten Schritt werden die Umweltindikatoren für die Hanfvliesdämmung berechnet.

Tabelle 15 Umwelteigenschaften der Hanfvliesdämmung pro 0,193 m³

Indikator	Einheit	Umwelteinwirkung Phasen A-D
Totale erneuerbare Primärenergie (PERT)	MJ	138,3413
Totale nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	MJ	1230,9545
Treibhausgaspotential (GWP)	kg CO ₂ -Äquivalent	18,0537
Ozonabbau (ODP)	kg R11-Äquivalent	2,052E-13
Sommersmog (POCP)	kg Ethen-Äquivalent	0,00198
Versauerung (AP)	kg SO ₂ -Äquivalent	0,0263
Überdüngung (EP)	kg Phosphat-Äquivalent	0,0134

Diese Berechnung wird als Beispiel genommen. Jede weitere Berechnung der Umwelteinwirkungen erfolgt nach dem gleichen Schema.

Beispielrechnung für den Versauerungsgrad (AP) der Hanfvliesdämmung:

1 m³ Hanfvliesdämmung stoßen in den Phasen A-D 0,1359 kg SO₂ Äquivalent aus.

$$\text{Summe aller Phasen A – D vom AP} = 0,1359 \frac{\text{kg SO}_2}{\text{m}^3}$$

Die Hanfvliesdämmung muss bei einem U-Wert von 0,2 W/m²K eine Dicke von 19,3 cm = 0,193 m betragen. Um das in die funktionelle Einheit von m³ (Volumen) zu bringen, nehmen wir die vorher berechnete Dicke von 0,193 m, 1 m Höhe und 1 m Breite.

$$0,193 \text{ m} * 1 \text{ m} * 1 \text{ m} = 0,193 \text{ m}^3$$

Um nun auf den AP zu kommen, müssen die zwei vorhergehenden Ergebnisse multipliziert werden.

$$0,1359 \frac{\text{kg SO}_2}{\text{m}^3} * 0,193 \text{ m}^3 = 0,0263 \text{ kg SO}_2$$

Somit verbraucht die Hanfvliesdämmung bei einem zu erreichenden U-Wert von 0,2 W/m²K mit **0,193 m³** rund **0,0263 kg SO₂**

In *Tabelle 15* wurden die Ergebnisse der nachstehenden Umwelteinwirkungen niedergeschrieben. Zahlen und Einheiten wurden, wie in der Einleitung des Kapitels beschrieben, auf die jeweiligen Indikatoren in jeder Berechnung angepasst.

3.2.2.5 Vor- und Nachteile

Hanf hat eine gute CO₂-Bilanz, ist ein nachwachsender Rohstoff und hat bei der Herstellung einen geringen Energiebedarf. Hanf ist zudem schimmelfest, da es die Luftfeuchtigkeit im Raum reguliert.²³⁹ Das Dämmmaterial eignet sich ebenfalls für Altbauten und lässt sich problemlos recyceln. Zudem schluckt der Dämmstoff Schall und lässt sich verschnittfrei einbauen. Für die Raumluft ist die Hanfdämmung unbedenklich. Von Vorteil ist, dass Hanfdämmung sehr robust und schädlingsfrei ist.²⁴⁰ Jedoch ist die Dämmung mit WDVS in Fassaden nicht uneingeschränkt geeignet, da dafür spezielle Dämmplatten benötigt werden. Außerdem müssen die Platten/ Schüttungen der Belüftung wegen fachgerecht verbaut werden.²⁴¹ Der Brandschutz ist ebenfalls eingeschränkt, da sie leicht entflammbar sind. Nur durch Soda, Borsalze oder Ammoniumphosphat erreicht es nach DIN 4102-1 eine Brandschutzklasse B2 und nach EN 13501-1 Kategorie E. Vergleichsweise entspricht das der Einordnung von Styropor.²⁴²

3.2.3 Beispiel – Fachwerkhütte, Baden-Württemberg (DE)

Die Fachwerkhütte oder auch „Wengertshütte“ wurde 2021 geplant und gebaut. Die marode Hütte auf dem Grundstück sollte dabei erhalten bleiben. Zudem sollten nur ökologische Stoffe beim Bau eingesetzt werden. Das Grundstück hatte keinen Stromanschluss oder Wasseranschluss.²⁴³ Ebenfalls war der Bau wegen des unzugänglichen Standortes sehr besonders. Hanf, Kalk und Wasser wurden einzeln den Hang hinauftransportiert und vor Ort angemischt.

²³⁹ Vgl. Heß 2020a.

²⁴⁰ Ebd.

²⁴¹ Ebd.

²⁴² Ebd.

²⁴³ Vgl. Hanfingenieur Henrik Pauly 2021.



Abbildung 10 Hanffaserdämmung, Fachwerkhaus, Baden-Württemberg ²⁴⁴

Das Gebäude wurde mit Hanfkalk in- situ geputzt und mit Hanfwolle gedämmt.²⁴⁵ Die Temperatur hatte dabei einen Einfluss auf den Hanfkalk, weshalb er bei einer höheren Hitze feuchter angemischt werden musste. Die Dämmung wurde in Schalungen bzw. zwischen die Sparren des Holzständerbaus gestopft. Anschließend wurde das Haus mit Hanfkalk verputzt.²⁴⁶

3.3 Holz

3.3.1 Allgemein

Holz, im Umgangssprachlichen, ist das harte, feste Gewebe von Sprossachsen wie Ästen, Stämmen oder Zweigen von Sträuchern und Bäumen.²⁴⁷ Seit Jahrtausenden wird Holz als Baustoff verwendet und ist ein nachwachsender Rohstoff. Für die Umwelt ist es enorm wichtig, dass Pflanzen bzw. Bäume, durch die Hilfe von Sonnenlicht, CO₂ in Sauerstoff umwandeln.²⁴⁸ Wenn im Bauwesen einheimisches Holz verwendet wird, ist der Transportweg und der Energieaufwand hinsichtlich seiner Aufbereitung und Bereitstellung gering. Am Ende der Lebenszeit kann Holz durch eine energetische Verwertung sogar mehr Energie liefern, als zu Beginn bei der Herstellung dafür aufgewendet wurde.²⁴⁹ Die Verwendung von einheimischem Holz, wenn dieses nachhaltig bewirtschaftet, kontinuierlich vermehrt und letztlich genutzt wird, kann den CO₂-Ausstoß verringern und Kohlenstoff binden. Die Verwendung des Tropenholzes aus unseren tropischen Regenwäldern ist nicht

²⁴⁴ Abb. Hanfingenieur Henrik Pauly 2021.

²⁴⁵ Vgl. Hanfingenieur Henrik Pauly 2021.

²⁴⁶ Ebd.

²⁴⁷ Vgl. Holzmann 2012, S. 140.

²⁴⁸ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz 2021.

²⁴⁹ Ebd.

nachhaltig.²⁵⁰ Die Urwaldbestände, in denen fast die Hälfte der bekannten Landlebewesen leben, sind lebensnotwendig für unser Ökosystem, nicht leicht erneuerbar und aktuell gefährdet. Holz ist als Energieträger und Baustoff nur nachhaltig, wenn die Wälder naturnah bewirtschaftet werden und intakt sind. Das FSC-Siegel (Forest Stewardship Council) ist für Holz ein weltweit anerkanntes Gütesiegel.²⁵¹

²⁵⁰ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz 2021

²⁵¹ Ebd.

²⁴⁶ Vgl. Holzmann 2012, S. 144.

3.3.2 Holzfaserdämmung

3.3.2.1 Ernte und Aufbereitung für Bauprodukte

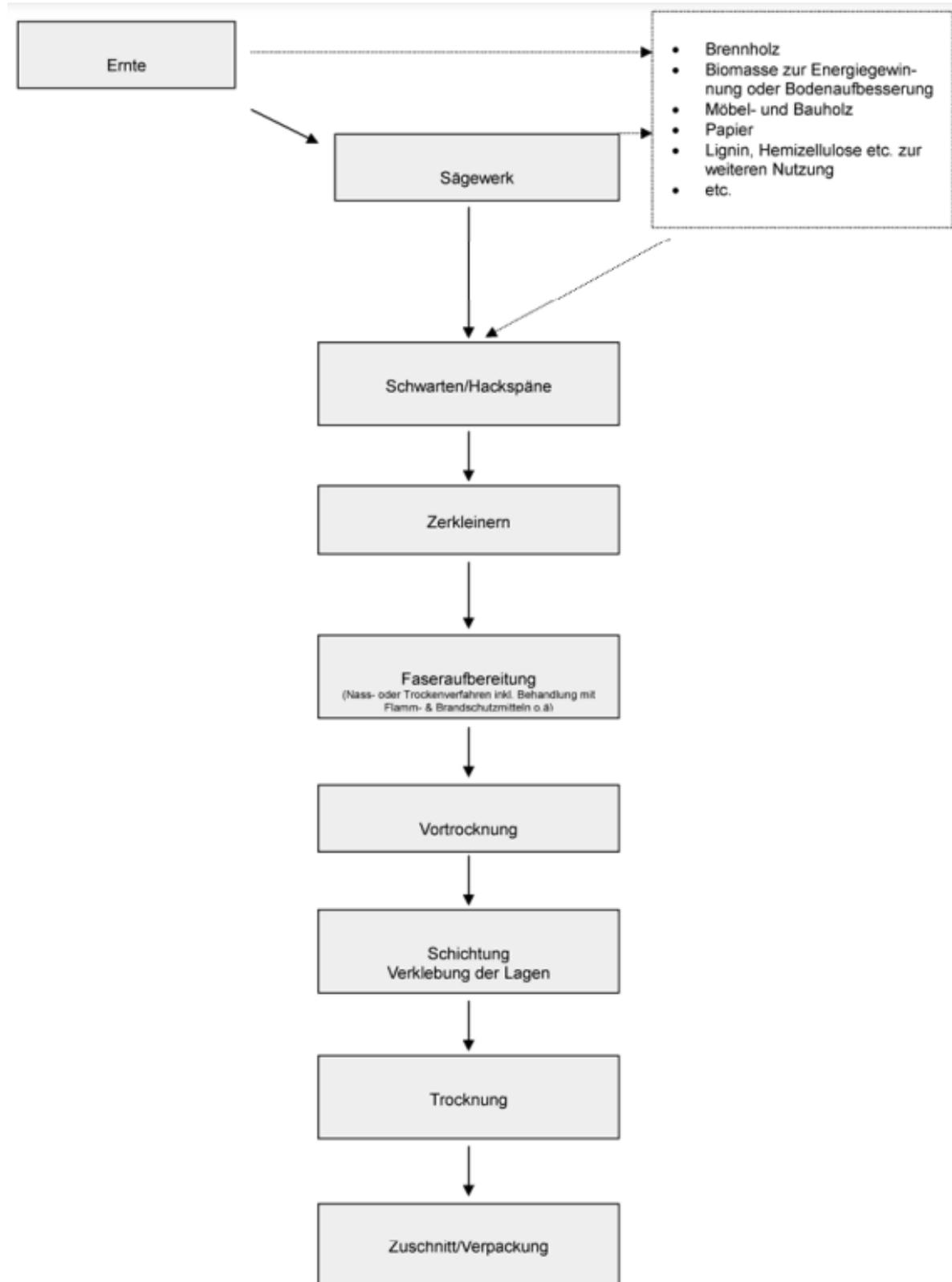


Abbildung 11 Diagramm der Holzfaserherstellung²⁵²

Wenn Holz als dauerhaftes und konstruktives Bauholz eingesetzt werden soll, ist die Wahl der Holzart bezüglich ihrer Härte, Optik, Witterungsabhängigkeit, Langlebigkeit etc. sowie der Zeitpunkt der Ernte wichtig.²⁵³ Die Rodung von Holz sollte am besten in der winterlichen Sanfruhe bzw. Ruhezeit durchgeführt werden. Holz muss allgemein nach der Rodung immer vor der weiteren Verarbeitung zunächst zum Austrocknen gelagert werden. Durch die Holzeigenschaften bezüglich der drei Grundrichtungen axial, radial und tangential kommt es zu einem ungleichmäßigen Schwund beim Trocknen.²⁵⁴ Im Durchschnitt beträgt das Schwindmaß bei mitteleuropäischen Nutzholzarten radial 5 %, tangential 10 % und axial 0,3 %.²⁵⁵ Für die Herstellung von Holzfaserdämmplatten werden von der Fichte Späne, Schwarten und Hackschnitzel aus Sägewerken in der Nähe verarbeitet. Fichte hat eine hohe Verfügbarkeit und eine sehr gut geeignete Faserqualität, was den Dämmplatten eine hohe Festigkeit gibt.²⁵⁶ Durch die Porosität leitet Holz Wärme nur schlecht weiter und eignet sich somit gut als Wärmedämmstoff im Bau. Das gute Wärmedämmvermögen von Holz wird durch das Zerfasern und die damit erreichte Erhöhung der Porigkeit verbessert, wodurch eine sehr wärmedämmende Platte produziert werden kann. Gemäß der europäischen Normung muss der Holzfaserteil der Dämmplatten bei 80 % liegen.²⁵⁷

Nassverfahren

Holzfaserdämmplatten werden meistens im Nassverfahren hergestellt, wobei holzeigene Bindemittel verwendet werden. Holzabfälle vom Sägewerk haben eine restliche Holzfeuchte von 50 %.²⁵⁸ Zunächst wird das Holz in Hackschnitzel verarbeitet, Fremdpartikel entfernt und durch Wasserdampf in einem Dampfdruckzyklon über Rüttelsiebe und Elektromagnete aufgeweicht.²⁵⁹ Die thermomechanische Zerfaserung erfolgt über ein Defibrationsverfahren. Dabei werden zwischen profilierten Mahlscheiben die eingeweichten Hackschnitzel zerfasert. Die ersten gewonnen Fasern nach dem Mahlen können je nach Produktvariante mit einem Raffinator nachgemahlen werden.²⁶⁰ Die Faseroberflächen sind so weit aktiviert, dass sie durch eine spätere Trocknung durch holzeigene Bindemittel wie Lignin oder Hemizellulosen verbunden werden.²⁶¹ Zusätzliche Bindemittel wie Harz oder Bitum sind i. d. R. nicht notwendig, außer es soll die Wasserabweisung oder Festigkeit erhöht werden. In einer Formstraße werden die Faserschlämme, die aus rund 98 % Wasser

²⁵² Vgl. Holzmann 2012, S. 143.

²⁵³ Vgl. Holzmann 2012, S. 144

²⁵⁴ Ebd.

²⁵⁵ Ebd.

²⁵⁶ Vgl. Holzmann 2012, S. 145.

²⁵⁷ Ebd.

²⁵⁸ Vgl. Holzmann 2012, S. 146.

²⁵⁹ Ebd.

²⁶⁰ Ebd.

²⁶¹ Vgl. Holzmann 2012, S. 147.

bestehen, in Bütten gelagert und in Faserkuchen gepresst.²⁶² Anschließend hat das Wasser-Holz-Gemisch nach diesem mechanischem Pressen noch 42 % Wasseranteil. Danach wird es mit einem Wasserstrahl zugeschnitten und in einen Trockenkanal gegeben. Die Platten werden bei 160-220 °C getrocknet und danach konfektioniert. Nach dieser Trocknung beträgt die restliche Feuchte der Platten ca. 7 %.²⁶³

Trockenverfahren

Im Trockenverfahren werden die Holzfasern nach dem Aufschlussprozess direkt auf die genannten 7 % Restfeuchte getrocknet, die für den Beleimungsprozess vorgesehen sind. Nach der Trocknung kommen sie in einen Beleimturm oder -kanal und werden mit Bindemittel bestrichen.²⁶⁴ Die beleimten Holzfasern werden verteilt, in Platten gepresst und letztlich durch eine Hitzezufuhr ausgehärtet. Je nach benötigter Dämmstärke können organische oder synthetische Fasern zugesetzt werden.²⁶⁵

3.3.2.2 Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten

Eigenschaften

Der sommerliche Wärmeschutz von Holzfaserdämmung ist durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit und hohe Rohdichte besonders gut. Die spezifische Wärmekapazität liegt bei 2,1 kJ/(kgK).²⁶⁶ Die Dämmung ist diffusionsoffen und kann somit Feuchtigkeit abgeben und aufnehmen. Das Raumklima ist daher sehr angenehm und es besteht ein vermindertes Risiko des Schimmelpilzbefalls. Die Schallschutzeigenschaften sind durch die poröse Struktur der Dämmung sehr gut.²⁶⁷ Holz hat eine sehr gute Klimabilanz und ist ein nachwachsender Rohstoff. Holzfasern sind Abfallprodukte und bilden somit eine positive Ökobilanz. Wenn Holz verbaut wird, kann es zudem bis zu 100 Jahre CO₂ einspeichern. Holzfaserdämmungen, die ohne Zusätze sind, sind kompostierbar.²⁶⁸

²⁶² Vgl. Holzmann 2012, S. 147

²⁶³ Ebd.

²⁶⁴ Ebd.

²⁶⁵ Ebd.

²⁶⁶ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.d.

²⁶⁷ Ebd.

²⁶⁸ Ebd.

Bauphysikalische Eigenschaften

Tabelle 16 Bauphysikalische Eigenschaften von Holzfasern²⁶⁹

λ	Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit	0,036-0,052 W/(mK)
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstand	1-2
ρ	Rohdichte	30-45 kg/m ³
c	Spezifische Wärmekapazität	2,1 kJ/(kgK)
Rs	Spezifischer Strömungswiderstand	>5 Pa(s/m)
	Brandverhalten	B2 (DIN 4102-1) E (Euro-klasse)

Tabelle 17 Bauphysikalische Eigenschaften von Holzfaserdämmmatten²⁷⁰

λ	Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit	0,036-0,052 W/(mK)
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstand	1-3
ρ	Rohdichte	40-55 kg/m ³
c	Spezifische Wärmekapazität	2,1 kJ/(kg*K)
Rs	Spezifischer Strömungswiderstand	≥5 Pa(s/m)
	Brandverhalten	B2 (DIN 4102-1) E (Euro-klasse)

Tabelle 18 Bauphysikalische Eigenschaften von Holzfaserdämmplatten²⁷¹

λ	Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit	0,036-0,052 W/(mK)
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstand	1-3
ρ	Rohdichte	110-270 kg/m ³
c	Spezifische Wärmekapazität	2,1 kJ/(kgK)
Rs	Spezifischer Strömungswiderstand	≥5 Pa(s/m)
	Brandverhalten	B2 (DIN 4102-1) E (Euro-klasse)

Einsatzmöglichkeiten

Die Dämmstoffe aus Holzfasern können als Schall- oder Wärmeschutz im Alt- und Neubau eingesetzt werden. Wenn Holzfasern in Platten gepresst werden, eignen sie sich für die Aufsparren- und Zwischendämmung im Dach, für die Fußbodendämmung und den

²⁶⁹ Tabelle Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.d.

²⁷⁰ Ebd.

²⁷¹ Ebd.

Einsatz in einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS).²⁷² Wenn Holzfasern als Einblasdämmung genutzt werden, können sie in Wänden, im Dach oder Dachboden verwendet werden. In die Hohlräume werden die Holzfasern mit einem Schlauch eingebracht. Dort verfilzen, verzahnen und setzen die Holzfasern sich. Die Dämmung mit Holzfasern ist ebenfalls für Holztafel- und Holzrahmenbauweisen geeignet.²⁷³

3.3.2.3 Kosten

Die Kosten von Holzfaserdämmungen liegen pro Quadratmeter bei 40-50 Euro. Damit liegen sie deutlich über den Preisen für andere Dämmstoffe. Die Eigenschaften und der Einsatzort spielen dabei eine entscheidende Rolle.²⁷⁴ Eine Aufsparrendämmung am Dach ist deutlich teurer als eine Trittschalldämmung. Die Kosten für eine Einblasdämmung liegen im niedrigeren Bereich.²⁷⁵

3.3.2.4 Ökobilanzierung

Betrachtet wird hier der Prozess-Datensatz Hanffaserdämmplatten aus ÖKOBAUDAT.

Allgemeine Informationen:

- Name: Hanffaserdämmplatten
- Anwendungsgebiet: Die GUTEX Dämmstoffe können im Alt- und Neubau eingesetzt werden. Dabei können sie bei hinterlüfteten Fassaden als Wanddämmung, Unterdeckung bzw. Ausfachdämmung, Geschossdeckendämmung, für Putzfassaden als Wärmeverbundsystem, Innendämmung von Außenwänden, Trittschalldämmung und Dämmung von Installationsebenen genutzt werden.²⁷⁶
- Allgemeine Anmerkungen: Die Holzfaserdämmplatten von GUTEX sind plattenförmig und werden aus Holzfasern nach DIN EN 13171 hergestellt.²⁷⁷ Im Trockenverfahren entstehen (PUR)-Harz Dämmplatten durch eine geringe Zugabe von Polyurethan. Nach der Produktion werden die Platten aufgeteilt, profiliert und konfektioniert. Es können nicht hydrophobierte und hydrophobierte einschichtige Dämmplatten hergestellt werden.²⁷⁸

Quantitative Referenz:

- Referenzfluss: Volumen 1 * 1 m³ = 1 m³ Holzfaserdämmplatte

²⁷² Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.d

²⁷³ Ebd.

²⁷⁴ Vgl. Heß 2020b.

²⁷⁵ Ebd.

²⁷⁶ Vgl. GUTEX Holzfaserplattenwerk H. Henselmann GmbH + Co KG 2020.

²⁷⁷ Ebd.

²⁷⁸ Ebd.

- Materialeigenschaft Referenzfluss: Rohdichte: 167 kg/m³²⁷⁹

Technologische Repräsentativität:

Die Holzfaserdämmung gliedert sich in folgende Prozessschritte:

1. Lieferung Hackschnitzel
2. Mit Hilfe des Defibratorverfahrens die Hackschnitzel zerfasern
3. Mit Paraffin die Fasern hydrophobieren²⁸⁰
4. Im Stromtrockner die Fasern trocknen
5. Mit PUR-Harz die Fasern beleimen
6. Auf einem Formband die Fasern zu einer Matte streuen²⁸¹
7. In der Aushärtungs- und Kalibriereinheit die Matten aushärten
8. Aufteilen, eventuell profilieren und anschließend konfektionieren

Der Standort ist nach ISO 9001 zertifiziert. Die Einheit ist 1 m³ mit einer Rohdichte von 167 kg/m³.²⁸²

Datenerhebung der Umwelteinwirkungen:

Die Berechnung des U-Wertes der Holzfaserdämmung geschieht ohne die Betrachtung weiterer Außen- oder Innenwandmaterialien.

Tabelle 19 U-Wert-Berechnung Holzfaserdämmung

Bauteil-schicht	Dicke d (mm)	Dicke d (m)	Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)	Wärmedurchlasswiderstand R (m ² K/W) $= d/\lambda$	Fläche (%)
Wärmeübergang außen R _{se}				0,040	
Holzfaserdämmung	174	0,174	0,036	4,83	100
Wärmeübergang innen R _{si}				0,130	
R-Wert _{ges}				5 Km ² /W	
U-Wert				0,200 W/m ² K	

²⁷⁹ Vgl. GUTEX Holzfaserplattenwerk H. Henselmann GmbH + Co KG 2020

²⁸⁰ Ebd.

²⁸¹ Ebd.

²⁸² Ebd.

Der U-Wert von einer Holzfaserdämmung mit einer Dicke von 17,4 cm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,036 W/mK beträgt 0,200 W/m²K.

$$R_{ges} = \frac{1}{0,200 \frac{W}{m^2 K}} = 5 \frac{Km^2}{W}$$

$$R_{Holzdämmung} = 5 \frac{Km^2}{W} - 0,130 \frac{m^2 K}{W} - 0,040 \frac{m^2 K}{W} = 4,83 \frac{m^2 K}{W}$$

$$Dicke m = 4,83 \frac{m^2 K}{W} * 0,036 \frac{W}{mK} = 0,174 m = 17,4 cm = 174 mm$$

Im nächsten Schritt werden die Umweltindikatoren für die Holzfaserdämmung berechnet.

Tabelle 20 Umwelteigenschaften der Holzfaserdämmung pro 0,174 m³

Indikator	Einheit	Umwelteinwirkung Phasen A-D
Totale erneuerbare Primärenergie (PERT)	MJ	660,3267
Totale nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	MJ	727,5139
Treibhausgaspotential (GWP)	kg CO ₂ -Äquivalent	-15,8474
Ozonabbau (ODP)	kg R11-Äquivalent	-6,681E-13
Sommersmog (POCP)	kg Ethen-Äquivalent	0,0078
Versauerung (AP)	kg SO ₂ -Äquivalent	0,0649
Überdüngung (EP)	kg Phosphat-Äquivalent	0,0036

Diese Berechnung wird als Beispiel genommen. Jede weitere Berechnung der Umwelteinwirkungen erfolgt nach dem gleichen Schema.

Beispielrechnung für die totale nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT) der Holzfaserdämmung:

1 m³ Holzfaserdämmung stoßen in den Phasen A-D 4184,00 MJ aus.

$$Summe \text{ aller Phasen A - D vom PENRT} = 4184,00 \frac{MJ}{m^3}$$

Die Holzfaserdämmung muss bei einem U-Wert von 0,2 W/m²K eine Dicke von 17,4 cm = 0,174 m betragen. Um das in die funktionelle Einheit von m³ (Volumen) zu bringen, nehmen wir die vorher berechnete Dicke von 0,174 m, 1 m Höhe und 1 m Breite.

$$0,174 m * 1 m * 1 m = 0,174 m^3$$

Um nun auf den PENRT zu kommen, müssen die zwei vorhergehenden Ergebnisse multipliziert werden.

$$4181,00 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} * 0,741 \text{ m}^3 = 727,51 \text{ MJ}$$

Somit verbraucht die Holzfaserdämmung bei einem zu erreichenden U-Wert von $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ mit **0,741 m³** rund **727,51 MJ**

In der Tabelle 20 werden die Ergebnisse der nachstehenden Umwelteinwirkungen niedergeschrieben. Zahlen und Einheiten werden, wie in der Einleitung des Kapitels beschrieben, auf die jeweiligen Indikatoren in jeder Berechnung angepasst.

3.3.2.5 Vor- und Nachteile

Ein Vorteil der Holzfaserdämmung ist ihre gute Dämmeigenschaft sowohl im Winter als auch im Sommer. Des Weiteren ist die Dämmung feuchtigkeitsregulierend und wirkt gegen Schimmelbildung. Zudem haben die Platten auch einen guten Schallschutz.²⁸³ Die Dämmplatten sind sehr flexibel, was den Einbau z. B. in Dachsparren vereinfacht. Die Holzfasern sind klimaregulierend und bilden ein gesundes Raumklima. Letztlich sind die Platten WDVS-geeignet und wirken Algenbildung entgegen.²⁸⁴ Allerdings sind die Platten in der Baustoffklasse B2 eingeordnet, was normal entflammbar bedeutet. Zudem sind sie teurer als andere Dämmstoffe und für dickere Platten wird eine besondere Säge benötigt.²⁸⁵

3.3.3 Beispiel – Einfamilienhaus, Bayern (DE)

Eine nachhaltige Optimierung für das Haus in Bayern wurde durch effektive Dämmung mit Holzfasern erreicht. Für die Fassade wurde eine WDVS mit STEICO Dämmplatten aus Holzfasern verwendet. Alte Häuser aus den 50er Jahren besitzen meist eine einfache und massive Bauweise.²⁸⁶ Die Wärmedämmung war in früheren Zeiten noch nicht der Baustandart. Dadurch war mit Schimmelrisiko und sehr hohen Heizkosten zu rechnen. Jedoch auch mit einer nachträglichen Dämmung am Haus kann das Eigenheim energieeffizient gestaltet werden.²⁸⁷

²⁸³ Vgl. Schneider 2020.

²⁸⁴ Vgl. Heß 2020b.

²⁸⁵ Vgl. Schneider 2020.

²⁸⁶ Vgl. STEICO SE 2021.

²⁸⁷ Ebd.



Abbildung 12 Einfamilienhaus in Tapfheim, Bayern²⁸⁸

Das Haus wurde 1954 errichtet und verfügt über ein 30 cm dickes Bims-Mauerwerk. Der U-Wert lag bei 1,22 W/m²K. Der neue U-Wert liegt bei 0,203 W/m²K. Die Wohnungen können durch die Holzfaserdämmplatten ohne viel Heizaufwand erwärmt werden.²⁸⁹ Die WDVS mit STEICOprotect 037 Holzfaserdämmung bietet zudem ein verbessertes Raumklima und warme Wandinnenflächen im Winter, da keine Luftfeuchtigkeit mehr kondensiert wird. Die Außenwände haben die Funktion, Algenbildung auf natürliche Weise zu reduzieren.²⁹⁰ Die Rohdichte ist sehr gut, die gespeicherte Wärme wird tagsüber gepuffert und in der Nacht wieder abgegeben. Somit kühlt die Fassade langsamer als die Umgebungsluft ab. Auf dem Putz wird die Kondensation von Luftfeuchtigkeit reduziert und die Fassade bleibt trockener.²⁹¹ Dadurch wird Moosen und Algen die Lebensgrundlage Wasser entzogen. Der unansehnliche Bewuchs, welcher bei Dämmstoffen häufig anzutreffen ist, wird minimiert. Die Platten sind außerdem wasserabweisend und der Putz diffusionsoffen.²⁹²

²⁸⁸ Vgl. STEICO SE 2021

²⁸⁹ Ebd.

²⁹⁰ Ebd.

²⁹¹ Ebd.

²⁹² Ebd.

4 Matrix und Zukunftsaussichten

4.1 Matrix

In diesem Abschnitt werden die drei natürlichen Baustoffe Stroh, Hanf und Holz in einer Matrix zusammen aufgeführt, in der die Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln übersichtlich zum Vergleich dargestellt werden.

Tabelle 21 Matrix über die Baustoffe Stroh, Hanf und Holz zum direkten Vergleich

	Stroh	Hanf	Holz
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> •Trockene Halme von gedroschenem Getreide •Heimische Getreidesorten, am besten Roggen und Weizen²⁹³ •Nachwachsender Rohstoff²⁹⁴ 	<ul style="list-style-type: none"> •Nutzhanf wächst innerhalb von 100 Tagen 4 m hoch •Benötigt keine Pestizide oder Herbizide²⁹⁵ 	<ul style="list-style-type: none"> •Hartes, festes Gewebe von Sprossenachsen wie Ästen, Stämmen oder Zweigen²⁹⁶ •Nachwachsender Rohstoff²⁹⁷
Ernte und Aufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> → Getreideernte → Trocknung → Ballenpressung²⁹⁸ 	<ul style="list-style-type: none"> →Hanfernte →Rotte/Röste →grobe Faseraufbereitung →Grobfasern werden ausgekämmt →Mischen der Fasern →Vervliesung →Verklebung und Schichtung der Lagen →Trocknung →Zuschnitt/ Verpackung²⁹⁹ 	<ul style="list-style-type: none"> →Holzernte →Sägewerk →Hackspäne/Schwarte →Zerkleinerung →Faseraufbereitung →Vortrocknung →Schichtung und Verklebung der Lagen →Trocknung →Zuschnitt/Verpackung³⁰⁰

²⁹³ Vgl. Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., S. 8

²⁹⁴ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.e

²⁹⁵ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz o. J.c

²⁹⁶ Vgl. Holzmann 2012, S. 140

²⁹⁷ Vgl. Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz 2021

²⁹⁸ Abb. Holzmann 2012, S. 231

²⁹⁹ Abb. Holzmann 2012, S. 128

³⁰⁰ Vgl. Holzmann 2012, S. 144

	Stroh	Hanf	Holz
Einsatzbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Verputzte und freibewitterte Außenwandkonstruktion • Mit hinterlüftetem und vorgesetzten Wetterschutz in Außenwandkonstruktionen • Dachstuhl mit belüfteter Dachdeckung³⁰¹ 	<ul style="list-style-type: none"> • Dachdämmung (Unter- oder Zwischensparrendämmung) • Innen- und Außenwanddämmung • Trittschalldämmung • Geschossdecken- bzw. Fußbodendämmung • Teilweise für WDVS-Dämmung geeignet³⁰² 	<ul style="list-style-type: none"> • Schall- und Wärmeschutz in Alt- und Neubau • In Platten gepresst für Aufsparren- und Zwischendämmung im Dach, Fußbodendämmung und WDVS • Als Einblasdämmung in Wänden, Dächern oder Dachböden • Als Holzfaser für Holztafel- und Holzrahmenbauweisen³⁰³
Bauphysikalische Werte	<ul style="list-style-type: none"> • $\lambda = 0,052 \text{ W/(mK)}$ • $\mu = 2$ • $\rho = 85-115 \text{ kg/m}^3$ • $c = 2 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$ • $R_s = 181 \text{ Pa(s/m)}$ • Brandv. = B2 bzw. E³⁰⁴ 	<p>Einblas-/ Stopfhanf:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $\lambda = 0,045 \text{ W/(mK)}$ • $\mu = 1-2$ • $\rho = 60-80 \text{ kg/m}^3$ • $c = 2,2 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$ • $R_s = 1,2 \text{ Pa(s/m)}$ • Brandv. = B2 bzw. E³⁰⁵ <p>Hanfmatte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $\lambda = 0,040 \text{ W/(mK)}$ • $\mu = 1-2$ • $\rho = 30-42 \text{ kg/m}^3$ • $c = 2,3 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$ • $R_s = 3 \text{ Pa(s/m)}$ • Brandv. = B2 bzw. E³⁰⁶ 	<p>Holzfaser:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $\lambda = 0,036 - 0,052 \text{ W/(mK)}$ • $\mu = 1-2$ • $\rho = 30-45 \text{ kg/m}^3$ • $c = 2,1 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$ • $R_s = >5 \text{ Pa(s/m)}$ • Brandv. = B2 bzw. E³⁰⁷ <p>Holzfaserdämmmatte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $\lambda = 0,036-0,052 \text{ W/(mK)}$ • $\mu = 1-2$ • $\rho = 40-55 \text{ kg/m}^3$ • $c = 2,1 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$ • $R_s = \geq 5 \text{ Pa(s/m)}$ • Brandv. = B2 bzw. E³⁰⁸ <p>Holzfaserdämmplatte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $\lambda = 0,036-0,052 \text{ W/(mK)}$ • $\mu = 1-3$ • $\rho = 110-270 \text{ kg/m}^3$ • $c = 2,1 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$ • $R_s = \geq 5 \text{ Pa(s/m)}$ • Brandv. = B2 bzw. E³⁰⁹
Kosten	• 6-19 EUR/m ²³¹⁰	• 33-53 EUR/m ²³¹¹	• 40-50 EUR/m ²³¹²

	Stroh	Hanf	Holz
Ökobilanz	• U-Wert bei 21,3 cm Dämmschicht = 0,2 W/m ² K	• U-Wert bei 19,3 cm Dämmschicht = 0,2 W/m ² K	• U-Wert bei 17,4 cm Dämmschicht = 0,2 W/m ² K
PERT (MJ)	• -370,9413	• 138,3413	• 660,32
PENRT (MJ)	• -123,0512	• 1230,9545	• 727,51
GWP (kg CO₂)	• 18,6663	• 18,0537	• -15,8474
ODP (kg R11)	• 9,130E-8	• 2,052E-13	• -6,681E-13
POCP (kg Ethen)	• -0,0031	• 0,00198	• 0,0078
AP (kg SO₂)	• 0,0047	• 0,0263	• 0,0649
EP (kg Phosphat)	• 0,0163	• 0,0134	• 0,0036
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Landwirtschaftliches Nebenprodukt • Benötigt keine Zusatzstoffe • Entsorgung erfolgt biologisch oder thermisch³¹³ • 80-100 T CO₂ werden eingespart • Gutes Raumklima • Sehr gute Wärmedämmung • Sehr guter Schallschutz³¹⁴ 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute CO₂-Bilanz • Nachwachsender Rohstoff • Geringer Energiebedarf • Schimmelfest • Reguliert die Luftfeuchtigkeit • Recyclbar • Guter Schallschutz • Robust und schädlingfrei³¹⁵ 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Dämmeigenschaft im Winter und Sommer • Feuchtigkeitsregulierend • Wirkt gegen Schimmelbildung • Guter Schallschutz³¹⁶ • Flexible Dämmplatten • Klimaregulierend, was ein gesundes Raumklima bildet • WDVS geeignet³¹⁷
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Feuchteverhalten • Lasttragende Strohballe müssen weiter erforscht werden³¹⁸ • Aufwendig in der Planung • Bauablauf stark witterungsabhängig³¹⁹ • Eingeschränkter Brandschutz - Baustoffklasse B2³²⁰ 	<ul style="list-style-type: none"> • WDVS-Dämmung ist nicht uneingeschränkt geeignet – spezielle Dämmplatten werden benötigt • Platten/ Schüttungen müssen fachgerecht verbaut werden³²¹ • Eingeschränkter Brandschutz - Baustoffklasse B2³²² 	<ul style="list-style-type: none"> • Teurer als andere Baustoffe • Für dickere Platten wird eine gesonderte Säge benötigt • Eingeschränkter Brandschutz - Baustoffklasse B2³²³

In dieser Matrix wurden die analysierten Baustoffe für einen direkten Vergleich der einzelnen Kategorien nebeneinander aufgestellt.

³¹³ Vgl. Greenhouse Media GmbH o. J.c

³¹⁴ Vgl. Markus Pytlik 2020

³¹⁵ Vgl. Heß 2020a

³¹⁶ Vgl. Schneider 2020

³¹⁷ Vgl. Heß 2020b

³¹⁸ Vgl. Greenhouse Media GmbH o. J.c

4.2 Fazit

Mit Blick auf die allgemeinen Daten sind alle drei Baustoffe schnell nachwachsende Rohstoffe. Stroh hat dabei einen sehr geringen Aufwand in der Ernte und Aufbereitung, wobei Holz und Hanf aufwendiger sind. In den Einsatzbereichen sind alle drei Baustoffe variabel einsetzbar. Jeder Baustoff hat seine verschiedenen Bereiche, in denen er als Dämmstoff eingesetzt werden kann. Die bauphysikalischen Werte sind im Thema Brandverhalten gleich mit der Brandstoffklasse B2, ebenfalls liegen die Werte von μ bei 1 bis 2. Bei C sind ebenfalls minimale Abweichungen zu sehen. Größere Sprünge gibt es bei Rs. Stroh hat mit 181 Pa(s/m) den höchsten Wert. Holz ≥ 5 Pa(s/m) und Hanf 1,2/ 3 Pa(s/m) liegen beide im tieferen Bereich. Bei den Kosten liegt Holz mit 40-50 EUR/m² vorne. Günstiger ist Stroh mit 6-19 EUR/m². Hanf beginnt bei 33 EUR/m² und kann jedoch auf 53 EUR/m² steigen. Vor- und Nachteile haben alle drei Baustoffe in gleicher Menge. Teilweise sogar dieselben Nachteile wie z. B. das Feuchteverhalten während dem Bau oder das „schlechte“ Brandverhalten mit B2 bzw. E. Stroh ist im Gegensatz zu Hanf und Holz nicht WDVS-geeignet. Vorteilhaft sind bei allen die Umwelteinwirkungen oder das positive Raumklima.

Um abschließend einen direkten Vergleich der Umwelteinwirkungen nachvollziehen zu können, werden die einzelnen Indikatoren in einer Tabelle von *sehr gut* bis *nicht gut* eingeteilt. Hierbei geht es lediglich um ein letztes Fazit, welcher der drei Baustoffe die beste Werte im nachhaltigen Bauen hat.

Tabelle 22 Umweltindikatoren im direkten Vergleich

	Sehr gut	Gut	Nicht gut
PERT	Strohballendämmung	Hanfvliesdämmung	Holzfaserdämmung
PENRT	Strohballendämmung	Holzfaserdämmung	Hanfvliesdämmung
GWP	Holzfaserdämmung	Hanfvliesdämmung	Strohballendämmung
ODP	Holzfaserdämmung	Hanfvliesdämmung	Strohballendämmung
POCP	Strohballendämmung	Hanfvliesdämmung	Holzfaserdämmung
AP	Strohballendämmung	Hanfvliesdämmung	Holzfaserdämmung
EP	Holzfaserdämmung	Hanfvliesdämmung	Strohballendämmung

³¹⁹ Vgl. Markus Pytlik 2020

³²⁰ Vgl. Fachverband Strohballenbau Deutschland e. V. (FASBA) o. J.

³²¹ Vgl. Heß 2020a

³²² Tabelle Vgl. Benz GmbH & Co. KG Baustoffe o. J.

³²³ Vgl. Schneider 2020

Die Werte aus *Tabelle 22* zeigen, dass die Strohballdämmung sehr gute Werte hat und somit der beste Dämmstoff in dieser Untersuchung der Ökobilanz ist. Die schlechtesten Werte weist Holz in der Ökobilanzierung auf. In der Mitte liegt die Hanfvliesdämmung. Die Strohdämmung schneidet im GWP, ODP und EP jedoch am schlechtesten ab, wobei Holz hier wieder vorne liegt.

Letztlich kann gesagt werden, dass alle drei Bauprodukte viele Vorteile aufweisen und gute Werte besitzen, um mit ihnen zu bauen und unser Ökosystem zu schonen. Der vermehrte Einsatz von natürlichen Baustoffen kann der Umwelt und zukünftigen Generationen helfen, indem negative Umwelteinflüsse reduziert werden. Jeder, der mit natürlichen Baustoffen in Zukunft arbeitet, kann beim Bau etwas Positives dazu beitragen. Hierbei gelten auch persönliche Vorlieben zu natürlichen Baustoffen und welcher Einsatz gewünscht ist. Eine Recherche und Informationsbeschaffung über natürliche und biologische Bauprodukte bei einzelnen Firmen kann dabei helfen, herauszufinden, welche Baustoffe am besten zu einem Bauprojekt und eventuell zu einem selbst passen.

4.3 Zukunftsaussichten und Forschungsthese

Die Frage der Bachelorarbeit war, welche Herausforderungen und Chancen sich bei dem Einsatz von Wärmedämmstoffen durch die naturnahen Baustoffe Stroh, Hanf und Holz mit Bezug auf die Ökobilanzierung ergeben. Um diese Frage zu beantworten, wurde ein Vergleich der unterschiedlichen gewählten Baustoffe durchgeführt und die Zahlen in der Ökobilanz analysiert. Daraus erschließen sich folgende Ergebnisse:

Immer mehr Menschen entwickeln das Bewusstsein, nachhaltig zu Bauen. Obwohl das ökologische Bauen noch nicht so weit verbreitet ist, stehen die Chancen in der heutigen Zeit sehr gut, dass der Baubereich immer grüner wird. Viele Personen haben jedoch noch ein falsches Bild, wie das Bauen mit naturnahen Baustoffen aussehen kann. Argumente gegen naturnahe Baustoffe sind u. a. zu hohe Kosten oder nicht dieselben Möglichkeiten in der Architektur wie mit den üblichen Baustoffen. Es gibt noch viele Punkte, die geklärt werden müssen, um zu zeigen, wie vielfältig der Bau mit naturnahen Baustoffen ist und wo Kosten über Jahre eingespart werden können. Die Produkte, die eingesetzt werden, sind schadstofffreie und qualitativ hochwertige Baustoffe, die erneuerbar sind. Die Energiekosten und Umweltschäden werden durch ökologische Baustoffe stark reduziert. Ebenso wird darauf geachtet, dass die Gebäude CO₂-neutral sind und weniger Energie verbrauchen. Der Anspruch dabei ist, dass Häuser selbst ihre Energie generieren und dabei klimafreundlich bleiben, indem Photovoltaikplatten oder Windkraftträder benutzt werden. Wenn die Energie- und Ressourceneffizienz in der Zukunft bei Alt- und Neubauten umgesetzt wird, kann das den Lebenszyklus positiv beeinflussen. Der Schutz unserer Umwelt und die Schonung der Ressourcen sollte eigentlich schon gestern umgesetzt worden sein. Unsere zukünftigen Generationen sollen kein verfallenes Ökosystem übernehmen, weshalb es wichtig ist, schon heute die drei Dimensionen – Ökologie, Ökonomie und

Soziokultur – bei der Planung von Neu- und Altbauten anzuwenden, um Umweltauswirkungen zu minimieren. Die Zahlen der Wirkungsindikatoren von normalen Wärmedämmungen sind utopisch. Naturnahe Wärmedämmstoffe geben uns die Chance, die Emissionen wie z. B. ozonabbauendes Potential, Überdüngung, Sommersmog, Primärenergieaufwand, Treibhausgaspotential oder Versauerungspotential deutlich zu reduzieren.

Die Herausforderung für die Menschheit liegt in der weiteren Erforschung und Anwendung der naturnahen Wärmedämmstoffe. Bauherren, Architekten und Planer müssen an einem Strang ziehen und das schon bestehende Konzept zum nachhaltigen Bauen mit Wärmedämmstoffen und anderen Bauprodukten festigen. Denn wer die Umwelt schonen und langfristig auf der Welt überleben will, muss die Prinzipien des Ökosystems respektieren und nur so viel nutzen, wie die Natur uns geben kann. Bereits heute können viele Bauprojekte, wie es die Beispiele aufzeigen, mit nachhaltigen Baustoffen ohne größeren Aufwand gedämmt werden. Aber auch der Rest, wie Putz, Dach oder die Gebäudehülle, kann nachhaltig gestaltet werden. Je interessanter die nachhaltige Bauweise in der Baubranche wird, umso größer wird die Nachfrage. Dementsprechend werden Lagerbestände weiter aufgefüllt, sodass ein Optimum an Angebot und Nachfrage entsteht und sich die Preise anpassen werden. Es wird sicherlich noch eine Weile andauern, allerdings hat sich die Baubranche und ebenfalls die Politik mit dem Thema Ökologie in der Umwelt in den letzten Jahren enorm auseinandergesetzt. Die Grundlagen, die im Moment gegeben sind, müssen demnach weiter ins Rollen gebracht werden, sodass immer mehr Menschen die Wichtigkeit dahinter sehen und das Bauen zukünftig in unserer Umwelt freundlicher bzw. nachhaltiger gestaltet wird.

5 Literaturverzeichnis

Architektur Shakti Haus (Hg.) (o. J.): Das erste Strohballen-Wohnhaus in Hessen Bad König. Online verfügbar unter https://www.shaktihaus.de/portfolio_page/das-erste-strohballen-wohnhaus-in-hessen-bad-koenig/, zuletzt geprüft am 07.09.2022.

Bartels, Niels; Höper, Jannick; Theißen, Sebastian; Wimmer, Reinhard (2022): Anwendung der BIM-Methode im nachhaltigen Bauen. Status quo von Einsatzmöglichkeiten in der Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg (essentials).

Bauer, Michael (2013): Green Building. Leitfaden Für Nachhaltiges Bauen. Unter Mitarbeit von Peter Mösle und Michael Schwarz. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.

Benz GmbH & Co. KG Baustoffe (Hg.) (o. J.): THERMO HANF Klemmfilz Premium WLS 040 Dämmmatte aus Hanf Dachdämmung. Online verfügbar unter https://benz24.de/thermo-natur-klemmfilz-premium-wls-2.html?option=2982&utm_campaign=google-shopping&utm_medium=shopping&utm_source=google&utm_content=dachd%C3%A4mmung%20%3E%20klemmfilz&mtm_campaign=PMax:%20Topseller&mtm_source=google&mtm_medium=cpc&mtm_cid=18306867528&mtm_content=&mtm_kwd=&mtm_campaign=PMax:%20Topseller&gclid=CjwKCAjwp9qZBhBkEiwAsYFsbyrUdRoHCypFo004jhpEHGQI_0d7ylb9scb3K-vyz3cJqbFzXi_YHRoCUCEQAvD_BwE, zuletzt geprüft am 30.09.2022.

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (Hg.) (2019): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. 3. Aufl.

Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den Bundesminister der Justiz (08.08.2020): Gebäudeenergiegesetz. GEG. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/BJNR172810020.html#BJNR172810020BJNG000200000>, zuletzt geprüft am 07.11.2022.

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (Hg.) (o. J.): Nachhaltiges Bauen: Die Rolle der DGNB. Online verfügbar unter <https://www.dgnb.de/de/themen/nachhaltiges-bauen/index.php#:~:text=Was%20ist%20Nachhaltiges%20Bauen%3F,%3A%20%C3%96konomie%2C%20%C3%96kologie%20und%20Sozialem.,> zuletzt geprüft am 12.08.2022.

Dr. Klein Privatkunden Aktiengesellschaft (Hg.) (o. J.): Ökologisch und nachhaltig bauen: Was es bedeutet, Materialien und Kosten. Online verfügbar unter <https://www.drklein.de/oekologisch-bauen.html>, zuletzt geprüft am 20.04.2022.

Fachverband Strohballenbau Deutschland e. V. (FASBA) (Hg.) (o. J.): Eigenschaften und technische Daten. Online verfügbar unter <https://fasba.de/bauen-mit-stroh/eigenschaften-technische-daten/>, zuletzt geprüft am 30.09.2022.

FASBA e.V. (2019): Prozess-Datensatz: FASBA e.V. GaBi Baustroh; 100 kg/m³. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Online verfügbar unter https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d2d1b29f-8dd7-4373-ab2a-de57acd51e72&version=00.00.039&stock=OBD_2021_II&lang=de, zuletzt geprüft am 26.09.2022.

Greenhouse Media GmbH (Hg.) (o. J.a): Dämmung mit Hanf: Herstellung, Dämmwerte und Verarbeitung im Überblick. Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/daemmung/daemmstoffe/hanfdaemmung>, zuletzt aktualisiert am 08.06.2018, zuletzt geprüft am 26.09.2022.

Greenhouse Media GmbH (Hg.) (o. J.b): Definition, Kennzahlen und Berechnung des U-Wertes. Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/daemmung/waermedaemmung/u-wert>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2022, zuletzt geprüft am 07.11.2022.

Greenhouse Media GmbH (Hg.) (o. J.c): Strohdämmung: Ökologisch Dämmen mit Stroh und Strohballen. Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/daemmung/daemmstoffe/strohaemmung>, zuletzt aktualisiert am 14.01.2022, zuletzt geprüft am 21.09.2022.

GUTEX Holzfaserplattenwerk H. Henselmann GmbH + Co KG (2020): Prozess-Datensatz: Holzfaserdämmplatten. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e. V. Online verfügbar unter https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=70d0f5b5-ab1e-40b3-b414-63978292a959&version=00.01.000&stock=OBD_2021_II&lang=de, zuletzt geprüft am 06.10.2022.

Hanfingenieur Henrik Pauly (Hg.) (2021): FACHWERK MIT HANFKALK ERTÜCHTIGEN UND DÄMMEN. Online verfügbar unter <https://www.hanfingenieur.de/2021/11/06/projekt-fachwerkh%C3%BCtte-mit-hanfkalk-ert%C3%BCchtigt-und-ged%C3%A4mmt/>, zuletzt geprüft am 17.09.2022.

Heinz Schachter (2020): Peter Rosegger zu Besuch in Windischgarsten. Online verfügbar unter <http://stodertalfreunde.blogspot.com/2020/11/peter-rosegger-zu-besuch-in.html>, zuletzt geprüft am 12.08.2022.

Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz (Hg.) (o. J.a): Ausgangsmaterialien für Dämmstoffe. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/ausgangsmaterialien-fuer-daemmstoffe-1466079>, zuletzt geprüft am 15.09.2022.

Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz (Hg.) (o. J.b): Der U-Wert als bauphysikalische Kenngröße. FUNKTION, BAUSTOFFE UND WÄRMEDURCHGANG. Online verfügbar unter

<https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/waermeschutz/der-u-wert-als-bauphysikalische-kenngroesse-4339151>, zuletzt geprüft am 07.11.2022.

Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz (Hg.) (o. J.c): Hanf. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/hanf-152196>, zuletzt geprüft am 25.09.2022.

Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz (Hg.) (o. J.d): Holzfasern - HERSTELLUNG, ANWENDUNG, EIGENSCHAFTEN. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/holzfasern-152200>, zuletzt geprüft am 30.09.2022.

Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz (Hg.) (o. J.e): Stroh. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/stroh-782356>, zuletzt geprüft am 18.09.2022.

Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz (Hg.) (o. J.f): Stroh. EIGENSCHAFTEN UND EINSATZMÖGLICHKEITEN. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/baustoffe--teile/stroh-4712662>, zuletzt geprüft am 21.09.2022.

Heinze GmbH | NL Berlin | BauNetz (Hg.) (2021): Holz. EIGENSCHAFTEN UND ANWENDUNGEN. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/baustoffe--teile/holz-684566>, zuletzt geprüft am 28.09.2022.

Heß, Thomas (2020a): Hanfdämmung: Eine natürliche Dämmalternative. Hg. v. Internet Magazin Verlag GmbH. Online verfügbar unter <https://www.haus.de/bauen/hanfdaemmung-29533>, zuletzt geprüft am 25.09.2022.

Heß, Thomas (2020b): Holzfaserdämmung: Das sind die Vorteile. Hg. v. Internet Magazin Verlag GmbH. Online verfügbar unter <https://www.haus.de/bauen/holzfaserdaemmung-29581#a-12-was-kostet-die-oekologische-waermedaemmung-mit-holzfasern>, zuletzt geprüft am 28.09.2022.

Holzmann, Gerhard (2012): Natürliche und pflanzliche Baustoffe. Rohstoff - Bauphysik - Konstruktion. 2., aktualisierte und erw. Aufl. 2012. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (SpringerLink Bücher).

König, Dipl. Ing. Architekt Holger (2017): Projekt: Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden. Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Online verfügbar unter https://www.lbb-bayern.de/fileadmin/quicklinks/Quick-Link-Nr-98300000-LfU-Gesamtstudie_Lebenszyklusanalyse.pdf, zuletzt geprüft am 06.10.2022.

Kropp, Ariane (2019): Grundlagen der nachhaltigen Entwicklung. Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung. Wiesbaden: Springer Gabler (essentials).

Krusche, Per (1982): *Ökologisches Bauen*. Unter Mitarbeit von Umweltbundesamt, Konrad Otto, Heinrich von Lersner, Dirk Althaus, Ingo Gabriel und Maria Weig-Krusche. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Kümmerer, Klaus; Schuster, Armin; Haiß, Annette; Günther, Anita; Jacobs, Johanna; Mohring, Siegrun et al. (Hg.) (2017): *Umweltrisikobewertung von Zytostatika*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Texte).

Loichinger, Elke; Swianczyn, Frank (2021): *Globale Bevölkerungsentwicklung*. Hg. v. Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung. Online verfügbar unter https://www.bib.bund.de/Publikation/2021/pdf/Globale-Bevoelkerungsentwicklung.pdf?__blob=publicationFile&v=11, zuletzt geprüft am 15.08.2022.

Markus Pytlik (2020): *Nachhaltiges Bauen mit Stroh: Die Vor- und Nachteile*. In: *Gesund Wohnen*, 10.08.2020. Online verfügbar unter <https://gesund-wohnen.com/haus/nachhaltiges-bauen-mit-stroh-die-vor-und-nachteile/>, zuletzt geprüft am 21.09.2020.

NABU (Naturschutzbund Deutschland) e. V. (Hg.) (o. J.): *Klimaschutz beim Bauen. Den gesamten Lebenszyklus in den Blick nehmen*. Online verfügbar unter <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/energieeffizienz-und-gebaeudesanierung/29050.html#:~:text=Die%20CO%2DEmissionen%20aus%20Bau,und%20die%20Umweltwirkungen%20minimiert%20werden.&text=Geb%C3%A4ude%20sind%20einer%20der%20CO%2DHauptverursacher%20in%20Deutschland.>, zuletzt geprüft am 12.08.2022.

Pufé, Iris (2017): *Nachhaltigkeit*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Konstanz, München: UVK Verlagsgesellschaft mbH; UVK Lucius (utb-studi-e-book, 8705).

RENEWA GmbH (Hg.) (o. J.): *Hanf - ökologische Dämmung mit guten Eigenschaften*. Online verfügbar unter <https://www.energieheld.de/daemmung/daemmstoffe/hanf#preise>, zuletzt geprüft am 25.09.2022.

RM Handelsmedien GmbH & Co. KG (Hg.) (2018): *Hanf-Dämmungen und ihre Eigenschaften*. Online verfügbar unter <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoff-knowhow/daemmstoffe/hanf-daemmung-naturdaemmstoff-eigenschaften-anwendungsbe-reiche-matten-platten-filze-stopfwolle-schuettingen/>, zuletzt geprüft am 26.09.2022.

RM Handelsmedien GmbH & Co. KG (Hg.) (2019): *Was ist der U-Wert?* Online verfügbar unter [https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/bauphysik/was-sind-u-wert-und-%CE%BB-wert/#:~:text=Berechnung%20des%20U%2Dwertes&text=Man%20berechnet%20den%20W%C3%A4rmedurchlasswiderstand%20R,%2F%7BW%2F\(mK\)%7D.](https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/bauphysik/was-sind-u-wert-und-%CE%BB-wert/#:~:text=Berechnung%20des%20U%2Dwertes&text=Man%20berechnet%20den%20W%C3%A4rmedurchlasswiderstand%20R,%2F%7BW%2F(mK)%7D.), zuletzt geprüft am 08.11.2022.

Schneider, Katharina (2020): *Holzfaserdämmung: Alles übers Dämmen mit Holzfaser*. Hg. v. Impleco GmbH. Online verfügbar unter <https://wohnglueck.de/artikel/holzfaserdaemmung-31682>, zuletzt geprüft am 28.09.2022.

Schroeder, Horst (2019): Lehm-bau. Mit Lehm ökologisch planen und bauen. 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg.

Sommer, Cornelia; Mayer, Jürgen (2001): Nachwachsende Rohstoffe - eine umweltgerechte Alternative? Kl. 9/10. Köln: Aulis Verl. Deubner (Unterrichtseinheit nachhaltige Nutzung der biologischen Vielfalt / Cornelia Sommer Jürgen Mayer, Modul 3).

Stahr, Michael (2018): Sanierung Von Baulichen Anlagen. Nachhaltig - Ökologisch - Umweltgerecht. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

STEICO SE (Hg.) (2021): Allround-Talent STEICO Holzfaser als Dämm-Mantel fürs Haus. Online verfügbar unter <https://www.steico.com/de/news-events/referenzen/allround-talent-steico-holzfaser-als-daemm-mantel-fuers-haus>, zuletzt geprüft am 23.09.2022.

2019: STROHBAURICHTLINIE SBR-2019.

thinkstep (2018): Prozess-Datensatz: Hanfvlies. Hg. v. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Online verfügbar unter https://oekobaudat.de/OEKO-BAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=5ef0c519-f5b2-4d45-809d-5f417f90e90b&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de, zuletzt geprüft am 06.10.2022.

Timm, Harry (2019): Estriche, Parkett und Bodenbeläge. Arbeitshilfen Für Die Planung, Ausführung und Beurteilung. Unter Mitarbeit von Thomas Allmendinger und Norbert Strehle. 6th ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Umweltbundesamt (Hg.) (2010): Nachhaltiges Bauen und Wohnen. Ein Bedürfnisfeld für die Zukunft gestalten. 2. Aufl.

Umweltbundesamt (Hg.) (2018): Ökobilanz. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz>, zuletzt geprüft am 10.09.2022.

Umweltbundesamt (Hg.) (2021a): Häufige Fragen zum Klimawandel. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#temperaturanstieg>, zuletzt geprüft am 12.08.2022.

Umweltbundesamt (Hg.) (2021b): Stadtplanung und Stadtentwicklung als Hebel für den Ressourcen- und Klimaschutz. Kommunale Instrumente, Fallbeispiele und Potenziale zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme. 2. Aufl.

Umweltbundesamt (Hg.) (2022): Flächensparen – Böden und Landschaften erhalten. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten#flachenverbrauch-in-deutschland-und-strategien-zum-flaechensparen>, zuletzt geprüft am 20.04.2022.

Wenzel Naturbaustoffe (Hg.) (o. J.): 01 – Stopfhanf-Dämmwolle für Dach, Wand und Fassade. Online verfügbar unter <http://www.wenzel-naturbaustoffe.de/shop/stopfhanf-daemmwolle-st/>, zuletzt geprüft am 30.09.2022.

Anlagen

Teil 1 – Excel-Datei der ÖkobilanzkennzahlenA-I

Anlagen, Teil 1

Die Excel-Tabelle über die Berechnungen der Ökobilanzkennzahlen wurde zusätzlich zu der Mail zur Abgabe der Bachelorarbeit angehängt

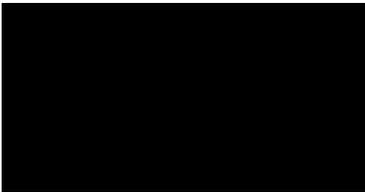
Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 13.11.2022



Laila-Annalie Böhm