Technische Universität München

BAUINDUSTRIE BAYERN

# Projektplattform Energie

# Leitfaden 01
# Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile

SCHNEIDER | PFOH | GRIMM

# Projektplattform Energie

# Leitfaden 01
# Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile



**PRÄAMBEL**

Nachhaltigkeit und Energieeffizienz sind Themenfelder, die den Baualltag zunehmend bestimmen. Kein anderer Industriezweig verbraucht mehr Materialien und Energie oder produziert mehr Abfälle als das Bauwesen.[1] Hier bietet sich daher ein großes Handlungspotenzial für eine nachhaltige Gestaltung der gebauten Umwelt. Zielstellung ist die Optimierung des Bauwerks über den gesamten Lebenszyklus: zur Minimierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs, zur Verringerung der Umweltbelastungen und zur Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit.

Der Ihnen hier vorliegende erste Leitfaden der Projektplattform Energie ist der Beginn einer Serie von Ausgaben, die sich mit energierelevanten Themen beschäftigen. Ziel ist es, aktuelle Themen rund um die Schlagworte Energieeffizienz und Nachhaltigkeit kompakt vorzustellen und somit Einblicke in Bereiche zu gewähren, die im Alltag des Bauens an Bedeutung zunehmen.

Im Mittelpunkt dieser Ausgabe stehen unterschiedliche Baustoffe mit ihren Materialeigenschaften sowie eine Gegenüberstellung und ökologische Bewertung von gängigen Außenwänden.
Die Auswahl des „richtigen“ Baustoffs ist entscheidend für die spätere Qualität und Lebensdauer des Gebäudes. Kriterien sind hierbei nicht nur das individuelle Ästhetikempfinden, sondern auch die höheren Ansprüche an Nachhaltigkeit und Energieeffizienz. Baustoffe sind, was sowohl Rohstoffe als auch Herstellung und Entsorgung betrifft, ein sehr bedeutender Umweltfaktor.[2]

Neben unterschiedlichen Baustoffen werden verschiedene gängige Außenwandsysteme untersucht und hinsichtlich ihres Primärenergieverbrauchs und anhand ökologischer Kriterien verglichen. Die Gegenüberstellung von klassischen Massivbauweisen und Holzrahmenkonstruktionen soll den Blick schärfen, informieren und neue Ideen und Lösungen aufzeigen.

Der Leitfaden wird Ihnen einen kompakten Überblick verschaffen, hilfreiche Informationen liefern und die Auswahl des „passenden“ Produkts erleichtern. Dabei werden die Aspekte „graue Energie“, Ökobilanz und Recycling berücksichtigt.

# Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile

DIPL.-ING. SANDRO PFOH
DIPL.-ING. FRANZISKA GRIMM

1. EINFÜHRUNG 06

2. NACHHALTIGKEIT UND RESSOURCENEFFIZIENZ 06
2.1 Ökologische Bewertung 06
2.2 Rückbaubarkeit und Recycling 08
2.3 Cradle-to-Cradle 09

3. BAUSTOFFEIGENSCHAFTEN 09
3.1 Mauersteine 09
3.1.1 Mauerziegel
3.1.2 Porenbeton
3.1.3 Kalksandstein
3.2 Beton 11
3.3 Holzbaustoffe 12
3.4 Dämmstoffe 12

4. KENNDATEN VON BAUSTOFFEN 13

DIPL.-ING. PATRICIA SCHNEIDER

5. VERGLEICH AUSSENBAUTEILE 20
5.1 Untersuchte Bauteilaufbauten 20
5.2 Systemgrenzen und Betrachtungsrahmen 24
5.3 Ergebnisse Primärenergie 24
5.3.1 Nicht erneuerbare Primärenergie
5.3.2 Erneuerbare Primärenergie
5.3.3 Primärenergie gesamt
5.4 Treibhauspotenzial 27
5.5 Weitere Wirkungskategorien 28

DIPL.-ING. SANDRO PFOH
DIPL.-ING. FRANZISKA GRIMM

6. ZUSAMMENFASSUNG 31

# 1. EINFÜHRUNG

Unter einem Baustoff versteht man einen bestimmten Stoff, dessen Abmessungen für das daraus herzustellende Objekt (Bauhalbzeug, Bauteil, Bauwerksteil, Bauwerk) nicht maßgebend sind.[3]

Bauteile bestehen aus Baustoffen, die zu einer Funktionseinheit zusammengefügt sind.[3]

Lange standen bei der Auswahl der Baustoffe nur die Materialeigenschaften im Vordergrund. Bedenkt man allerdings, dass das Bauwesen den größten Anteil an Rohstoffen und Energie verbraucht und zugleich große Mengen Abfall produziert, so bietet die Bewertung der Baustoffe hinsichtlich Nachhaltigkeit und Energieeffizienz großes Potenzial. Für die Umsetzung nachhaltiger, energieeffizienter und ressourcenschonender Gebäude ist eine umfangreiche Betrachtung der Baustoffe und Bauteile bereits in der Planungsphase notwendig. So gewinnen neben den Materialeigenschaften auch die ökologischen Eigenschaften immer mehr an Bedeutung.

Materialeigenschaften der Baustoffe sind bspw.:

- Wärmeleitfähigkeit λ in [W/mK]
- spezifische Wärmespeicherkapazität c in [J/kgK]
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
- Schallschutzeigenschaften, bspw. Schallabsorptionskoeffizient α
- Baustoffklasse (Brandschutz)

Ökologische Eigenschaften der Baustoffe sind unter anderem:

- Energiebedarf für Herstellung, Transport und Entsorgung
- Schadstoffabgabe bei Herstellung, Verarbeitung, Gebrauch und Entsorgung
- Verwendung von Recyclingmaterial
- Lebensdauer, Reparaturfreundlichkeit bzw. leichte und umweltfreundliche Erneuerbarkeit
- Wiederverwendbarkeit als Bauteil oder Wertstoff (Recyclingfähigkeit)
- Regionalität

# 2. NACHHALTIGKEIT UND RESSOURCENEFFIZIENZ

Zukunftsfähiges Bauen gelingt nur, wenn der Energie- und Ressourcenverbrauch während der Lebensdauer von Gebäuden gesenkt werden kann, nachhaltige Baustoffe zum Einsatz kommen und Baustoffe oder Bauteile am Ende ihrer Lebensdauer wieder dem Stoff- bzw. Materialkreislauf zugeführt werden können.

## 2.1 Ökologische Bewertung

Zielstellung einer ökologischen Betrachtung ist die Schonung bzw. die effiziente Nutzung materieller Ressourcen, die Verringerung der Umweltbelastung durch Emissionen und die Minimierung von Abfällen.[4]
Die **Ökobilanz** erfasst den Stoff- und Energieverbrauch sowie die Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produkts bzw. eines Gebäudes. Der Jahresenergieverbrauch bei Gebäuden spiegelt somit nur einen Teil des Primärenergieverbrauchs wider, der Rest ist die sogenannte **graue Energie,** die oftmals vergessen wird.

Der Begriff „graue Energie“ ist in Deutschland nicht eindeutig definiert und wird unterschiedlich verwendet.

Die Schweizer Definition laut SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein), Merkblatt 2032, bezeichnet als graue Energie „die gesamte Menge nicht erneuerbarer Primärenergie, die für alle vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und für die Entsorgung, inkl. der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel, erforderlich ist.“ Sie wird auch als kumulierter, nicht erneuerbarer Energieaufwand bezeichnet.[3]

Durch die Verwendung heimischer, nachwachsender Materialien und durch die Verringerung der eingesetzten Materialmenge lässt sich die im Gebäude verbaute graue Energie reduzieren.

Der bis zur Erstellung oder Fertigstellung benötigte Energieverbrauch eines Baustoffs bzw. Bauteils wird somit durch den sogenannten **Primärenergieinhalt** (PEI) beschrieben. Es wird zwischen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energien unterschieden.

**Nicht erneuerbare PE** ist die Primärenergie, die aus einer Quelle gewonnen wird, die durch Nutzung erschöpft wird, bspw. Uran, Rohöl, Kohle.[3]

**Erneuerbare PE** ist die Primärenergie, die aus einer Quelle gewonnen wird, die durch Nutzung nicht erschöpft wird, bspw. die Sonnenenergie, Windenergie, hydraulische Energie und Biomasse.[3]

Um die Umweltwirkungen eines Gebäudes über seinen gesamten Lebenszyklus – von der Rohstoffgewinnung über die Erstellung und den Betrieb des Gebäudes bis zum Rückbau – zu quantifizieren, empfiehlt sich das Instrument der Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment = LCA). Ökobilanzen sind Grundlage für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden.

Wichtig für eine Vergleichbarkeit von Ökobilanzdatensätzen ist die Verwendung von gleichen Regeln und Methoden zur Erstellung. Die Aufstellung von Ökobilanzen ist in Deutschland seit 2006 durch die beiden Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 geregelt.[5] Mit der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden beschäftigt sich die DIN EN 15643, Regeln für die Erstellung von Umweltproduktdeklarationen von Baustoffen enthält die DIN EN 15804.

Bereits in der Planung gilt es, problematische Bauprodukte und Verfahren zu erkennen und durch weniger belastende Alternativen zu ersetzen.

Eine Gebäudeökobilanz setzt sich für die Herstellungs- und Entsorgungsphase aus einer Vielzahl von Produktökobilanzen der einzelnen Baustoffe und Bauteile zusammen. Diese Produktökobilanzen können Datenbanken, wie bspw. der Ökobaudat oder Umweltproduktdeklarationen (Enviromental Product Declaration = EPD) entnommen werden. Hinzu kommt, dass die verwendeten Produkte und Bauteile hinsichtlich ihrer Lebensdauer klassifiziert werden, um gegebenenfalls einen notwendigen Austausch während des Betrachtungszeitraumes in die Bilanz miteinzubeziehen.

## 2.2 Rückbaubarkeit und Recycling

Werden die für den Bau und den Betrieb eines Gebäudes eingesetzten Materialien nach ihrer ursprünglichen Nutzung für eine neue Verwendung eingesetzt, so spricht man von Recycling. Aus Abfallprodukten bzw. Ausgangsmaterialien werden Sekundärrohstoffe.[5]
Bereits in der Planung von Baumaßnahmen ist darauf zu achten, dass recycelfähige Materialien oder Materialien, die bereits aus recycelten Komponenten bestehen, zum Einsatz kommen.
Je einfacher sich ein Gebäude wieder in seine Bestandteile zerlegen lässt, desto besser ist seine „Rückbaubarkeit“ zu bewerten. Letztere sollte bereits in der Planungsphase (bspw. durch die Wahl geeigneter Materialien und der Konstruktionsart) berücksichtigt werden und im Interesse des verantwortlichen Bauunternehmers sein.
Folgende Faktoren sind bei der Materialauswahl hinsichtlich der Recyclingfähigkeit zu beachten:

- Homogenität
  Die verwendeten Baustoffe sollen möglichst homogen sein. Je weniger unterschiedliche Materialien verwendet werden, desto weniger unterschiedliche Entsorgungswege müssen Berücksichtigung finden.[5]
- Trennbarkeit
  Ökologisch günstig sind Materialien und Materialverbindungen, die stofflich leicht trennbar sind. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit einer sortenreinen Trennung sowie einer Rückführung in den Stoffkreislauf.[5]
- Schadstofffreiheit
  Eine sorgfältige Auswahl und Verwendung von schadstofffreien recycelbaren Baustoffen kann den Materialkreislauf verlängern und wirtschaftlich optimieren. Der Einsatz von Baustoffen, die schädliche Effekte auf die Umwelt und den Menschen haben, wird im nachhaltigen Bauen vermieden bzw. stark reduziert.[5]

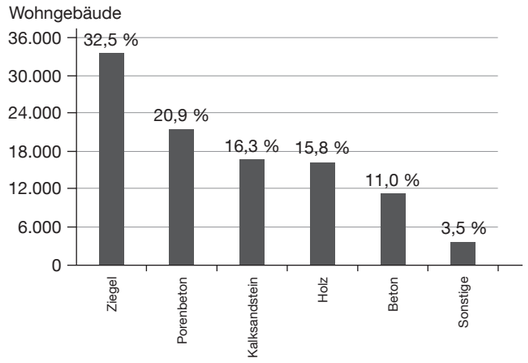



Abb. 1: Errichtete Wohngebäude im Jahr 2013

## 2.3 Cradle-to-Cradle

Nach Schätzungen der Vereinten Nationen entfällt auf das Bauwesen fast die Hälfte des Rohstoffverbrauchs in Europa.[6] Daher birgt das Recycling von Baustoffen und Bauteilen nicht nur das Potenzial, Abfall zu vermeiden, sondern auch, den Verbrauch neuer Ressourcen erheblich zu senken. Man spricht hier als Ziel von der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, in der Baustoffe oder -elemente am Ende ihrer Lebensdauer möglichst wieder vollständig dem Stoffkreislauf zur Verfügung stehen. Ein tiefgreifender, allumfassender Ansatz ist das Cradle-to-Cradle-Prinzip (englisch: „von der Wiege zur Wiege“) – dahinter steht die Idee, von Anfang an in kompletten Produktkreisläufen zu denken und somit Müll erst gar nicht entstehen zu lassen, sondern immer wieder hochwertige Ausgangsstoffe zu Verfügung zu haben.
Die Bauindustrie könnte aufgrund ihres hohen Ressourcenumsatzes von der Idee der zurückkehrenden Materialien in besonderem Maß profitieren.
Ziel ist es, verbaute Rohstoffe eines Bauwerks nach ihrer Nutzungszeit wieder vollständig zurückzugewinnen.

# 3. BAUSTOFFEIGENSCHAFTEN

Die Auswahl an Baustoffen und Baumaterialien ist groß und vielfältig. Die hier vorgestellten Materialien gehören zu den gängigen Produkten des aktuellen Bauwesens. Neben den Materialeigenschaften werden auch ökologische Eigenschaften betrachtet. Konkrete Kennwerte sind in Kapitel 4 aufgelistet.

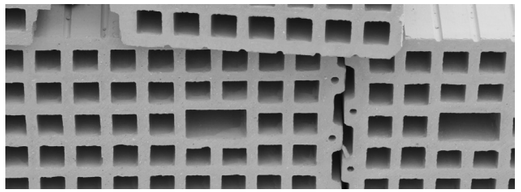
Knapp ein Drittel der im Jahr 2013 in Deutschland errichteten Wohngebäude besteht aus Ziegeln. Das Verhältnis zwischen Massivbau und Leichtbau liegt bei ca. 80 % zu 20 %.[7] (Abb. 1) Somit wird weiterhin vorwiegend mit Mauersteinen massiv gebaut.

## 3.1. Mauersteine

Die Mauersteinsorten unterscheiden sich grundsätzlich in natürlich und künstlich hergestellte Mauersteine.
Natursteine sind alle in der Natur vorkommenden Gesteinsarten, die über eine ausreichende Mindestdruckfestigkeit verfügen und keine Struktur- und Verwitterungsschäden aufweisen. Sie werden hauptsächlich für Instandsetzungen von Natursteinmauerwerk eingesetzt.

Künstlich hergestellte Mauersteine werden aufgrund ihrer Ausgangsstoffe unterteilt in:

- Mauerziegel
- Kalksandsteine
- Porenbetonsteine



### 3.1.1 Mauerziegel

Ziegel sind die ältesten und bekanntesten künstlichen Mauersteine. Sie bestehen aus Ton, Lehm oder tonischen Massen und ggf. weiteren Zuschlagstoffen. Als Zuschlagstoffe werden bspw. Sägemehl oder Polystyrolkügelchen eingemischt, die während des Brennvorgangs rückstandslos verglühen und unzählige kleine Poren zurücklassen. Dieser Vorgang setzt die Rohdichte und damit das Gewicht der Ziegel herab.

Inzwischen bietet der Markt eine große Auswahl an unterschiedlichen Ziegelprodukten. Aus dem ehemaligen Vollziegel entwickelten sich Loch- oder Hohlziegel. Der Lochanteil führt zu einer Reduzierung des Gewichts und der Wärmeleitfähigkeit und damit zu einer verbesserten Wärmedämmwirkung. Seit einigen Jahren gibt es Wärmedämmziegel, deren Hohlräume mit Dämmstoff gefüllt sind. Diese Steine ermöglichen auch ohne zusätzliche Dämmung die Errichtung energieeffizienter Ziegelhäuser bis hin zum Passivhausstandard.

⊕ Vorteile Ziegel:

- Verwendung natürlicher Rohstoffe
- Weite Verfügbarkeit, kurze Transportwege
- Gute Formbarkeit vor dem Brennen
- Hohe Druck- und Abriebfestigkeit
- Gutes Raumklima
- Gute Wärme- und Schalldämmung
- Feuchteregulierende Eigenschaften
- Guter Brandschutz
- Lange Lebensdauer

⊖ Nachteile Ziegel:

- Hoher Primärenergiebedarf
- Bedingte Recyclefähigkeit durch Mörtel- und Putzreste

### 3.1.2 Porenbeton

Porenbeton wird aus Sand, Kalk, Zement, Wasser und Aluminiumpulver hergestellt. Das Aluminiumpulver bewirkt, dass sich die Masse stark aufbläht und dabei sehr viele kleine Poren entstehen.

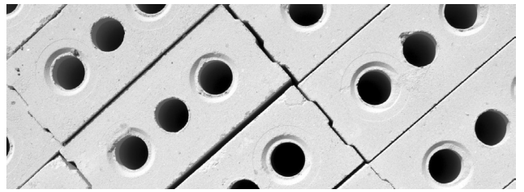
⊕ Vorteile Porenbeton:

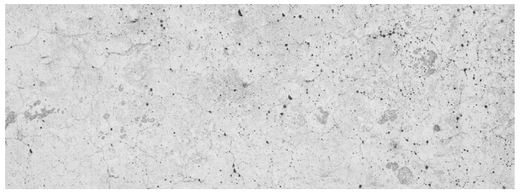
- Natürliche Rohstoffe
- Niedrige Transport- und Montagekosten
- Energiearmer Herstellungsprozess
- Gute Wärmedämmung
- Guter Brandschutz
- Leichte Verarbeitbarkeit
- Lange Lebensdauer
- Gut recyclingfähig bei geringem Mörtelanteil; Rückführung zum Porenbetonwerk möglich

⊖ Nachteile Porenbeton:

- Nicht frost- und witterungsbeständig
- Geringer Schallschutz
- Feuchtigkeitsaufnahme







### 3.1.3 Kalksandstein

Kalksandstein ist ein künstlich hergestellter Mauerstein aus Sand, Branntkalk und Wasser.

⊕ Vorteile Kalksandstein:

- Natürliche Rohstoffe
- Gute Tragfähigkeit
- Guter Schall- und Brandschutz
- Frost- und witterungsbeständig
- Platzsparende Bauweisen möglich
- Angenehmes Raumklima
- Lange Lebensdauer
- Gut recyclingfähig; Herstellung von KS-Recyclingsteinen

⊖ Nachteile Kalksandstein:

- Schlechter Wärmeschutz
- Massiver, schwerer Stein
- Schwer zu bearbeiten

## 3.2 Beton

Beton ist ein künstliches Gemisch aus Zement, Sand bzw. Kies und Wasser. Ggf. kommen weitere Zuschlagstoffe zum Einsatz.

Der erforderliche Energieaufwand zur Herstellung von Beton hängt im Wesentlichen von der Zusammensetzung des Betons ab. Der Bestandteil mit dem höchsten Energiegehalt ist der Zement.[8]
Des Weiteren wird in bewehrten und unbewehrten Beton unterschieden. Der Armierungsgrad hat einen bedeutenden Einfluss auf die Herstellungsenergie PEI.

⊕ Vorteile Beton:

- Hohe Druckfestigkeit
- Guter Schallschutz
- Guter Brandschutz
- Guter Feuchteschutz
- Hohe Speichermasse
- Beliebig formbar
- Recyclingmaterial im Straßenbau

⊖ Nachteile Beton:

- Schlechte Wärmedämmung
- Alterungsprozess
- „Verbundbaustoff“

## 3.3 Holzbaustoffe

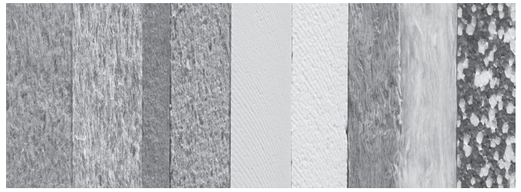
Holz ist ein nachwachsender und $CO_2$-bindender Rohstoff. Er kann mit einfachen Mitteln bearbeitet werden und wird schon seit Beginn der Zivilisation als Baustoff eingesetzt. Die Anzahl von neuen Gebäuden aus Holz hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen und zeigt, dass das Bauen mit Holz auch den gegenwärtigen Anforderungen hinsichtlich Wohnen und Arbeiten gerecht wird.

⊕ Vorteile Holz:

- Nachwachsender Rohstoff
- $CO_2$-bindend
- Gute Wärmedämmung und -speicherung
- Geringes Eigengewicht
- Behaglichkeit
- Hohe Zug- und Druckfestigkeit
- Kurze Bauzeiten
- Lange Lebensdauer
- Gute Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit

⊖ Nachteile Holz:

- Erhöhter Aufwand Brandschutz
- Erhöhter Aufwand Schädlingsbekämpfung
- „arbeitet“
- Erhöhter Aufwand Schallschutz
- Behandlung im Außenbereich nötig (UV-Strahlung, Feuchtigkeit)



## 3.4 Dämmstoffe

Bedingt durch die klimatischen Verhältnisse in den nördlichen und südlichen Breitengraden beschäftigt sich die Menschheit schon seit Jahrtausenden mit dem Thema Wärmeschutz. Steigende Energiepreise, gesetzliche Vorschriften und ein gestiegenes Bewusstsein für energetische Themen haben dazu beigetragen, dass die Wärmedämmung von Gebäuden zur Einsparung von Energie einen hohen Stellenwert in Politik und Gesellschaft erhalten hat.
Dämmstoffe sind alle Materialien, die bei fachgerechter Verarbeitung den Wärme- und/oder Schall- und/oder Brandschutz der Konstruktion verbessern und selbst keine tragenden Funktionen übernehmen. Aufgrund ihrer ursprünglichen Materialien unterscheidet man organische und anorganische Dämmstoffe. Zusätzlich können diese beiden Hauptgruppen je nach Herkunft ihrer Rohstoffe in natürliche und synthetische Materialien eingeordnet werden.

Dämmstoffe finden Anwendung in und an Wänden, Decken, Fußböden und Dächern.
Grundsätzlich gilt: Einen idealen Dämmstoff, der für jeden Einsatzbereich (gesundheitsverträglich, preisgünstig, ressourcenschonend, nachwachsend, feuerbeständig u.v.m.) geeignet ist, gibt es nicht. Berücksichtigt werden sollte die bauphysikalische Eignung von Dämmstoffen für den jeweiligen Einsatzzweck.

Die wichtigsten bauphysikalischen Kennwerte für Dämmstoffe sind die Wärmeleitfähigkeit, die Baustoffklasse, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, die Rohdichte und die spezifische Wärmekapazität sowie die Ausgleichsfeuchte, die dynamische Steifigkeit und der längenbezogene Strömungswiderstand (beides wichtige Schallschutzeigenschaften).

Neben diesen bauphysikalischen Eigenschaften sollte ökologischen und gesundheitlichen Aspekten bei der Auswahl von Dämmstoffen eine hohe Aufmerksamkeit geschenkt werden.

## 4. KENNDATEN VON BAUSTOFFEN

Die folgenden Tabellen (Tab. 1 bis 5) geben einen Überblick zu verschiedenen Baustoffen und ihren Kennwerten:

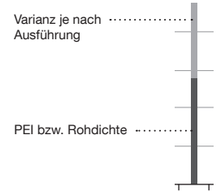
- Die Rohdichte ρ bezeichnet die Masse bezogen auf das Volumen. Eine steigende Rohdichte wirkt sich in der Regel positiv auf den Schallschutz und negativ auf den Wärmeschutz aus. Bei sehr geringen Rohdichten (< 50 kg/m³) kann es jedoch ebenso zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch erhöhten Wärmetransport durch Konvektion und Strahlung im Porenraum kommen. Die Rohdichte bietet bei massiven Baustoffen eine ausreichende Orientierung für die Wärmespeicherfähigkeit.

- Der aufgezeigte Primärenergieinhalt (PEI) beschreibt ausschließlich den bis zur Erstellung/Fertigstellung (cradle-to-gate) benötigten Energieverbrauch eines Baustoffs bzw. Bauteils (siehe Kapitel 2.1). Die Nutzungsdauer sowie das End-of-Life-Szenario (bspw. cradle-to-cradle,) ist nicht berücksichtigt.

- Die Wärmeleitfähigkeit Lambda (λ) bezeichnet eine Stoffeigenschaft. Angegeben wird der Wärmestrom, der bei einem Temperaturunterschied von 1 Kelvin [K] durch eine 1 m² große und 1 m dicke Schicht eines Stoffes geht. Je kleiner die Wärmeleitfähigkeit ist, umso besser ist das Dämmvermögen.
Der Lambda-Wert bezieht sich als Laborwert auf trockene Bauteile. Da Wasser ein guter Wärmeleiter ist, ist die Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt abhängig. Die Wärmeleitfähigkeit wird als Grundlage für die Einteilung der Dämmstoffe in Wärmeleitfähigkeitsgruppe (WLG) und Wärmeleitfähigkeitsstufe (WLS) herangezogen.

- Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl gibt an, wieviel mal länger es dauert, bis eine bestimmte Menge Wasser aus dem betreffenden Baustoff diffundiert, im Vergleich zum Ausdiffundieren aus Luft.

Zudem werden die Baustoffe hinsichtlich ihres Primärenergieinhalts nicht erneuerbar und ihrer Rohdichte genauer untersucht und die einzelnen Werte in den folgenden Abbildungen (Abb. 2 bis 7) graphisch gegenübergestellt.




**Kennzahl in der Baustoffmatrix**

**ρ**: Rohdichte in [kg/m³]
**PEI**: Primärenergieinhalt für die Erstellung eines Materials in [MJ/m³] oder [kWh/m³]
**$\lambda_R$**: Wärmeleitfähigkeit, bei üblichen Dämmstoffen 0,04 W/(mK), bei Holz 0,13 W/(mK) und Beton 2,1 W/(mK)
**μ**: Diffusionswiderstandszahl

Leg. 1: Legende zu Abb. 2 – Abb. 7

## Mineralische Baustoffe

Tab. 1: Kenndaten von mineralischen Baustoffen

Quelle: ÖKOBAUDAT 2011, DIN 4108-4, DIN EN ISO 10456

| | | Rohdichte | Primärenergieinhalt nicht erneuerbar | | Wärmeleitfähigkeit | Diffusionswiderstandszahl |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **ρ** | **PEI** | **PEI** | **$\lambda_R$** | **μ** |
| | | kg/m³ | MJ/m³ | kWh/m³ | W/(mK) | |
| **Ziegel** | Mauerziegel Durchschnitt, Poroton | 740 | 1.181 | 328 | 0,14 | 5/10 |
| | Perlitegefüllte Ziegel S, Poroton | 800 | 1.743 | 484 | 0,09 – 0,11 | 5/10 |
| **Porenbeton** | Porenbeton P2 04 unbewehrt | 380 | 1.387 | 385 | 0,11 | 5/10 |
| | Porenbeton P4 05 unbewehrt | 472 | 2.308 | 641 | 0,15 | 5/10 |
| **Kalksandstein** | Kalksandstein Mix | 2.000 | 2.483 | 690 | 1,1 | 15/25 |
| **Lehm** | Lehmstein | 1.200 | 1.440 | 400 | 0,47 | 5/10 |
| | Stampflehmwand | 2.000 | 106 | 30 | 1,1 | 5/10 |
| **Beton** | Transportbeton C20/25 | 2.365 | 1.133 | 315 | 2,00 | 80/130 |
| | Beton-Mauersteine | 2.000 | 1.365 | 379 | 1,35 | 70/150 |
| | Bims Leichtbeton Planstein Außenwand | 500 | 744 | 207 | 0,15 | 5/15 |
| | Blähton Leichtbeton Planstein Außenwand | 500 | 1.882 | 523 | 0,16 | 5/15 |
| | Betonfertigteil Decke | 2.520 | 5.173 | 1.437 | 2,5 | 80/130 |
| | Betonfertigteil Wand | 2.427 | 2.588 | 719 | 2,5 | 80/130 |
| **Glas** | Glasbausteine | 1.800 | 34.522 | 9.589 | 0,58 | ∞ |
| | Isolierglas 2-Scheiben | 2.500 | 53.709 | 14.919 | 0,8 – 1,1 | ∞ |
| **Gips** | Gipskartonplatte | 800 | 2.987 | 830 | 0,25 | 4/10 |
| | Gipsfaserplatte | 1.000 | 5.505 | 1.529 | 0,37 | 5/10 |



## Holz und Holzwerkstoffe

Tab. 2: Kenndaten von Holz und Holzwerkstoffen

Quelle: ÖKOBAUDAT 2011, DIN 4108-4, DIN EN ISO 10456

| | Rohdichte | Primärenergieinhalt nicht erneuerbar | | Wärmeleitfähigkeit | Diffusionswiderstandszahl |
|---|---|---|---|---|---|
| | **ρ** | **PEI** | **PEI** | **$\lambda_R$** | **μ** |
| | kg/m³ | MJ/m³ | kWh/m³ | W/(mK) | |
| Konstruktionsvollholz 15 % Feuchte | 529 | 4.271 | 1.186 | 0,13 | 50 |
| Schnittholz Fichte (12 % Feuchte / 10,7 % $H_2O$) | 482 | 2.741 | 762 | 0,12 | 50 |
| Brettschichtholz Nadelholz | 515 | 4.966 | 1.379 | 0,13 | 50 |
| Sperrholzplatte | 490 | 3.293 | 915 | 0,14 | 70/200 |
| Spanplatte | 681,5 | 6.465 | 1.796 | 0,15 | 15/50 |
| OSB (Durchschnitt) 5 % Feuchte | 650 | 5.084 | 1.412 | 0,13 | 50 |

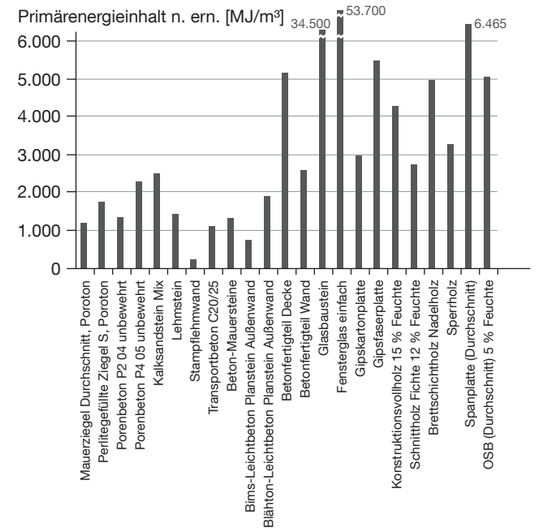



Abb. 2: Primärenergieinhalt nicht ern. [MJ/m³] von mineralischen Baustoffen sowie Holz und Holzwerkstoffen

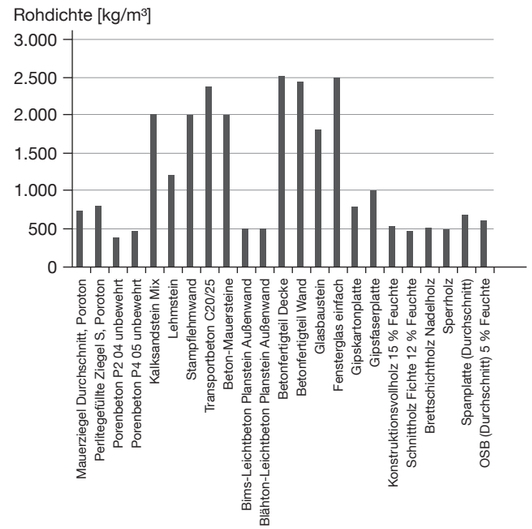



Abb. 3: Rohdichte [kg/m³] von mineralischen Baustoffen sowie Holz und Holzwerkstoffen

## Dämmstoffe

Tab. 3: Kenndaten von Dämmstoffen

Quelle: ÖKOBAUDAT 2011, DIN 4108-4, DIN EN ISO 10456

| | | Rohdichte | Primärenergieinhalt nicht erneuerbar | | Wärmeleitfähigkeit | Diffusionswiderstandszahl |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **ρ** | **PEI** | **PEI** | **$\lambda_R$** | **μ** |
| | | kg/m³ | MJ/m³ | kWh/m³ | W/(mK) | |
| **anorganisch/ mineralisch** | Blähton Körnung | 360 | 1.974 | 548 | 0,16 | 3 |
| | Perlite 0 – 3 | 90 | 672 | 187 | 0,06 | 3 |
| | Blähglas Körnung | 150 | 807 | 224 | 0,035 – 0,7 | 5 |
| | Mineralwolle (Fassaden-Dämmung) | 46 | 865 | 239 | 0,03 – 0,05 | 1 |
| | Glaswolle | 20 – 153 | 594 – 4.544 | 165 – 1.262 | 0,035 – 0,045 | 1/2 |
| | Foamglas W+F | 100 | 1.525 | 424 | 0,04 – 0,06 | ∞ |
| | Steinwolle | 22 – 200 | 717 – 5.616 | 199 – 1.560 | 0,035 – 0,045 | 1/2 |
| **organisch/ synthetisch** | XPS-Dämmstoff | 32 | 3.059 | 850 | 0,025 – 0,054 | 80/250 |
| | PU-Dämmplatte, Blockschaum | 40 | 2.758 | 766 | 0,02 – 0,04 | 30/100 |
| | EPS W/D 035 – IVH | 35 | 1.837 | 510 | 0,029 – 0,050 | 20/100 |
| | EPS PS 25 | 25 | 2.386 | 663 | 0,029 – 0,050 | 20/100 |
| **organisch/ nachwachsend** | Holzfaserdämmplatte Mix (Trockenverfahren) | 60 | 1.922 | 534 | 0,04 – 0,055 | 3/5 |
| | Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren) | 200 | 2.026 | 563 | 0,04 – 0,055 | 3/5 |
| | Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff | 45 | 148 | 41 | 0,04 – 0,045 | 2/2 |
| | Zellulosefaserplatten | 80 | 2.121 | 589 | 0,04 | 2/2 |
| | Expandierter Kork | 100 | 999 | 277 | 0,04 – 0,055 | 5/10 |

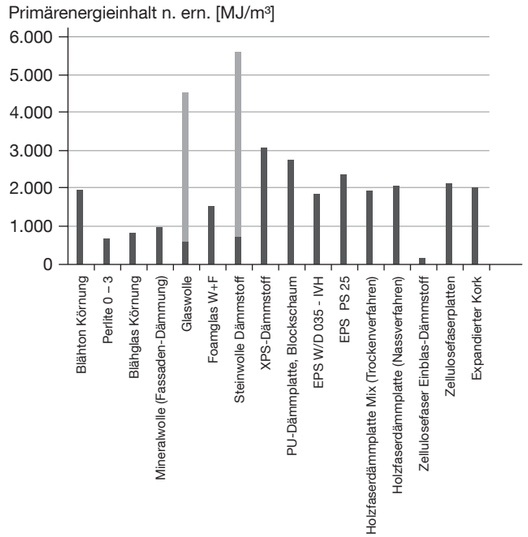



Abb. 4: Primärenergieinhalt nicht ern. [MJ/m³] von Dämmstoffen

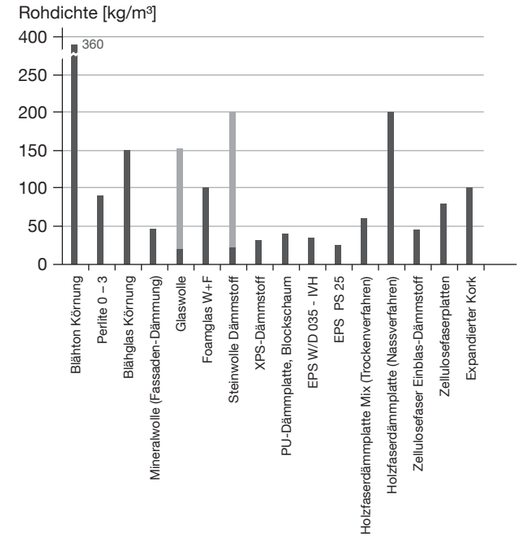



Abb. 5: Rodichte [kg/m³] von Dämmstoffen

## Metalle

Tab. 4: Kenndaten von Metallen

Quelle: ÖKOBAUDAT 2011, DIN 4108-4, DIN EN ISO 10456

| | Rohdichte | Primärenergieinhalt nicht erneuerbar | | Wärmeleitfähigkeit | Diffusionswiderstandszahl |
|---|---|---|---|---|---|
| | **ρ** | **PEI** | **PEI** | **$\lambda_R$** | **μ** |
| | kg/m³ | MJ/m³ | kWh/m³ | W/(mK) | |
| Bewehrungsstahl | 7.800 | 79.892 | 22.192 | 50 | ∞ |
| Stahlprofil | 7.800 | 231.561 | 64.323 | 50 | ∞ |
| Stahl Feinblech | 7.800 | 233.808 | 64.947 | 50 | ∞ |
| Edelstahlblech | 7.900 | 382.918 | 106.366 | 17/30 | ∞ |
| Aluminiumblech | 2.800 | 396.062 | 110.017 | 160 | ∞ |
| Kupferblech blank (Durchschnitt) | 8.900 | 92.715 | 25.754 | 380 | ∞ |
| Zinkblech blank Umicore | 7.100 | 336.879 | 93.577 | 110 | ∞ |
| Messing-Bauteil | 8.400 | 177.447 | 49.291 | 120 | ∞ |

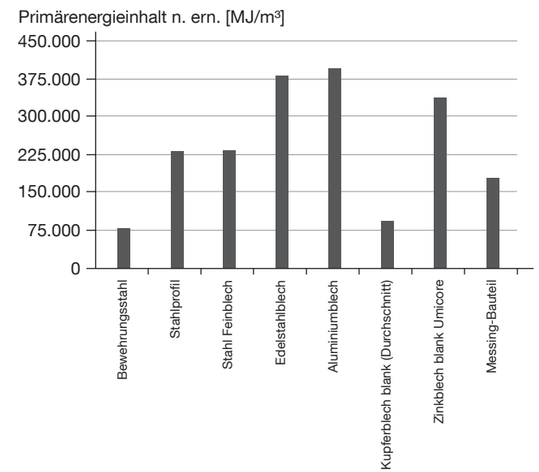



Abb. 6: Primärenergieinhalt nicht ern. [MJ/m³] von Metallen

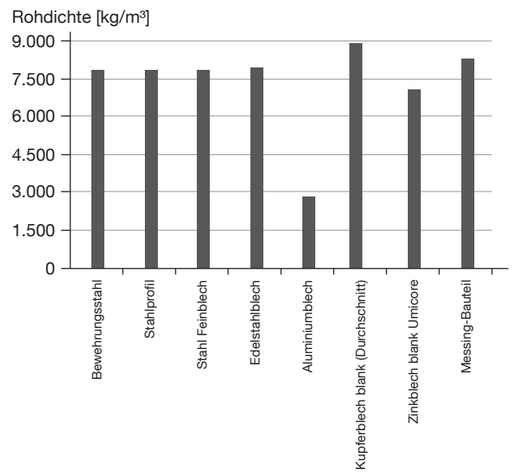



Abb. 7: Rodichte [kg/m³] von Metallen



## Gegenüberstellung Baustoffe

Tab. 5: Übersicht Eigenschaften unterschiedlicher Baustoffe

| | Ziegel | Porenbeton | Kalksandstein | Beton | Holz und Holzbaustoffe | Lehm | Glas | Metalle |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Natürliche Rohstoffe | + | + | + | - | + | + | + | + |
| Primärenergieinhalt | - | - | - | - | + | + | - | - |
| Transportweg | + | + | + | + | + | + | - | - |
| $CO_2$-Ausstoß | - | - | - | - | + | + | - | - |
| Recyclingfähigkeit | - | + | + | - | + | + | + | + |
| Druckfestigkeit/ Tragfähigkeit | + | + | + | + | + | - | - | + |
| Verarbeitung | + | + | - | - | + | + | - | - |
| Raumklima | + | + | + | + | + | + | - | - |
| Wärmedämmung | + | + | - | - | + | + | - | - |
| Schallschutz | + | - | + | + | - | + | - | - |
| Brandschutz | + | + | + | + | - | + | + | - |
| Feuchteschutz | + | - | + | + | - | + | - | - |

# 5. VERGLEICH AUSSENBAUTEILE

Die Kenndaten einzelner Baustoffe geben Auskunft über den Baustoff in Abhängigkeit von seiner Masse. Diese Baustoffe werden aber jeweils zu sehr unterschiedlichen Mengen im Gebäude verbaut, sodass ein ökologischer Vergleich anhand von Gesamtbauteilen besser zur Beurteilung der Umweltwirkungen des Gesamtgebäudes geeignet ist. Daher werden im Folgenden unterschiedliche Außenbauteile auf ihren Primärenergieinhalt und ihre Umweltwirkungen untersucht.

Bei der Wahl eines Außenwandsystems beeinflusst der u-Wert des Systems in erster Linie den Energiebedarf während der Betriebsphase des Gebäudes: Je besser (niedriger) der u-Wert, desto weniger Energie geht durch das Bauteil während der Nutzung verloren. Daher werden mit Verbesserung des u-Werts im Vergleich die Umweltwirkungen und der Energiebedarf relevanter, die im Gebäude „verbaut“ sind, d.h. die bei Erstellung, Instandhaltung und Entsorgung anfallen. Abb. 8 zeigt, dass bei einem Plusenergiehaus die Energie für Herstellung, Sanierung und Entsorgung die einzige nicht erneuerbare Energie ist, die im Lebenszyklus eingesetzt wird. Daher verschiebt sich mit zunehmender energetischer Qualität der Gebäude der Fokus: weg vom Betriebsenergiebedarf hin zur Bausubstanz selbst.

## 5.1 Untersuchte Bauteilaufbauten

Für die vorliegende Gegenüberstellung wurden unterschiedliche Außenwandaufbauten entwickelt, die für Wohngebäude in Frage kommen. Sie werden anhand der Indikatoren Primärenergiebedarf (erneuerbar/nicht erneuerbar) und Treibhauspotenzial verglichen. Im Anschluss (Kap. 5.5) werden weitere Umweltwirkungen betrachtet. Letztere werden derzeit bei ökologischen Betrachtungen oft noch außen vor gelassen, in Nachhaltigkeits-Zertifizierungssystemen, wie bspw. dem der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), werden sie aber bereits berücksichtigt, ebenso in Umweltproduktdeklarationen (EPD= Environmental Product Declaration).

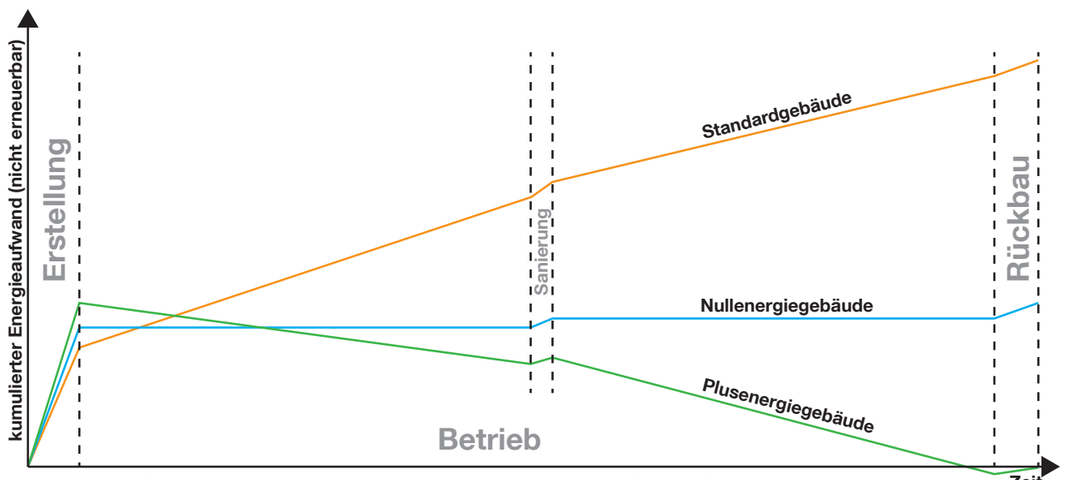



Abb. 8: Kumulierter Energieaufwand von Gebäuden mit unterschiedlichem energetischen Standard (Quelle: eigene Darstellung)

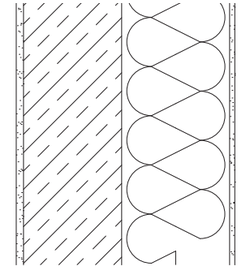
Verglichen werden fünf unterschiedliche Außenwandaufbauten, die sich in den verwendeten Materialien und hinsichtlich ihres u-Werts unterscheiden: Der Standard-u-Wert entspricht ungefähr dem EnEV-Standard 2016, der energetisch bessere u-Wert ist der maximale u-Wert für ein Passivhaus. Es wurden Bauteile aus Beton, Ziegel und Holzrahmen betrachtet. Es ist außerdem anzumerken, dass die Holzrahmenbauteile mit dem schlechteren u-Wert nicht in dieser Form für alle Wohnbauten verwendet werden können, da sie ggf. Schall- und Brandschutz nicht erfüllen.

Zum Vergleich werden außerdem zwei unterschiedliche Fenstertypen (PVC- und Holzrahmen, 3-fach Verglasung) hinzugezogen. Für die Fenstergröße wurde nach DIN EN 14351-1:2010-08 Anhang D ein Rahmenaußenmaß von 1,23 m x 1,48 m angenommen. Je nach Fensterformat wird der Rahmenanteil an einem konkreten Projekt hiervon abweichen:

F_Holz
3-fach verglastes öffenbares Fenster mit Holzfensterrahmen

F_PVC
3-fach verglastes öffenbares Fenster mit PVC-Fensterrahmen

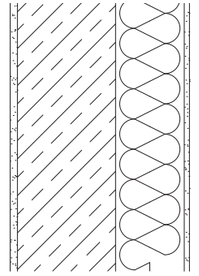
Die folgende Tab. 6 zeigt die untersuchten Wandaufbauten (jeweils von innen nach außen):



B015

Massivwand Beton
mit WDVS
u-Wert 0,152 W/m²K

| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Gipsputz | 1,5 cm |
| Stahlbeton C20/25 mit 2 % Bewehrungsanteil | 20 cm |
| Wärmedämmverbundsystem EPS, Dekorputz mineralisch | 23 cm |
| Fassadenfarbe | |
| Wandstärke | 44,5 cm |

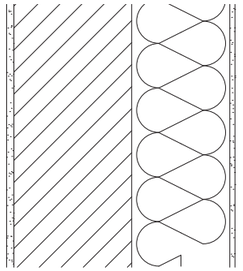


B024

Massivwand Beton
mit WDVS
u-Wert 0,233 W/m²K

| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Gipsputz | 1,5 cm |
| Stahlbeton C20/25 mit 2 % Bewehrungsanteil | 20 cm |
| Wärmedämmverbundsystem EPS, Dekorputz mineralisch | 15 cm |
| Fassadenfarbe | |
| Wandstärke | 36,5 cm |

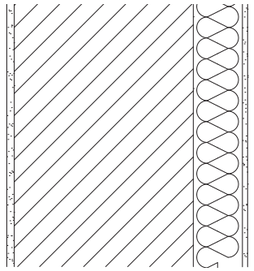
Tab. 6: Untersuchte Wandaufbauten



Z015_240

Massivwand
Mauerwerk
u-Wert 0,152 W/m²K

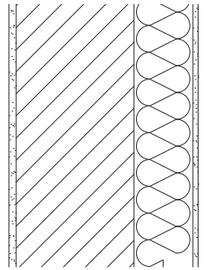
| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Gipsputz | 1,5 cm |
| Ziegel Durchschnitt | 24 cm |
| Wärmedämm-verbundsystem MW, Dekorputz mineralisch | 21 cm |
| Fassadenfarbe | |
| Wandstärke | 46,5 cm |



Z015_365

Massivwand
Mauerwerk
u-Wert 0,149 W/m²K

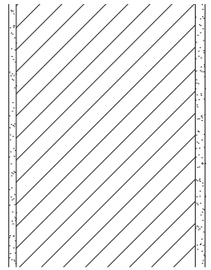
| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Gipsputz | 1,5 cm |
| Ziegel Poroton S | 36,5 cm |
| Wärmedämm-verbundsystem EPS, Dekorputz mineralisch | 11 cm |
| Fassadenfarbe | |
| Wandstärke | 49 cm |



Z024_240

Massivwand
Mauerwerk
u-Wert 0,233 W/m²K

| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Gipsputz | 1,5 cm |
| Ziegel Durchschnitt | 24 cm |
| Wärmedämm-verbundsystem MW, Dekorputz mineralisch | 13 cm |
| Fassadenfarbe | |
| Wandstärke | 38,5 cm |

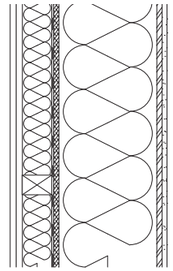


Z024_365

Massivwand
Mauerwerk
u-Wert 0,238 W/m²K

| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Gipsputz | 1,5 cm |
| Ziegel Poroton S | 36,5 cm |
| Dämmputz | 2 cm |
| Fassadenfarbe | |
| Wandstärke | 40 cm |

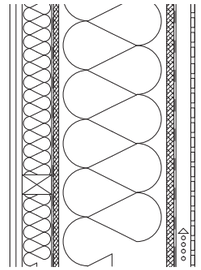




H015_MW

Holzrahmenwand mit
Mineralwolle
u-Wert 0,152 W/m²K

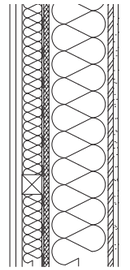
| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Beplankung Gips-karton, 2-fach | 2,5 cm |
| Installations-schicht: Holz-lattung 40 x 60 (Achsabstand 62,5 cm); Dämmung MW | 6 cm |
| OSB-Platte (Stöße verklebt) | 1 cm |
| Kernelement: Holz-ständer 60 x 200 (Achsabstand 62,5 cm); Dämmung MW | 20 cm |
| Putzträgerplatte Faserzement | 1 cm |
| Putzsystem | 1 cm |
| Wandstärke | 31,5 cm |



H015_Z

Holzrahmenwand mit
Zellulose
u-Wert 0,153 W/m²K

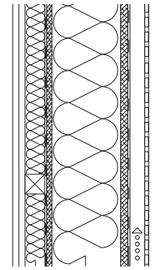
| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Beplankung Gips-karton, 2-fach | 2,5 cm |
| Installations-schicht: Holz-lattung 40 x 60 (Achsabstand 62,5 cm); Dämmung Zellulose-Platten | 6 cm |
| OSB-Platten (Stöße verklebt) | 1 cm |
| Kernelement: Holz-ständer 60 x 220 (Achsabstand 62,5 cm); Dämmung Zellulose Einblas-Dämmstoff | 22 cm |
| MDF | 1,5 cm |
| Hinterlüftung: Lattung 40 x 30 | 3 cm |
| Verkleidung: Aluminium, eloxiert | 0,2 cm |
| Wandstärke | 36,2 cm |



H024_MW

Holzrahmenwand mit
Mineralwolle
u-Wert 0,237 W/m²K

| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Beplankung Gips-karton, 2-fach | 2,5 cm |
| Installations-schicht: Holz-lattung 40 x 40 (Achsabstand 62,5 cm); Dämmung MW | 4 cm |
| OSB-Platten (Stöße verklebt) | 1 cm |
| Kernelement: Holz-ständer 60 x 120 (Achsabstand 62,5 cm); Dämmung MW | 12 cm |
| Putzträgerplatte Faserzement | 1 cm |
| Putzsystem | 1 cm |
| Wandstärke | 21,5 cm |



H024_Z

Holzrahmenwand mit
Zellulose
u-Wert 0,226 W/m²K

| | |
|---|---|
| Dispersionsfarbe | |
| Beplankung Gips-karton, 2-fach | 2,5 cm |
| Installations-schicht: Holz-lattung 40 x 40 (Achsabstand 62,5 cm); Dämmung Zellulose-Platten | 4 cm |
| OSB-Platten (Stöße verklebt) | 1 cm |
| Kernelement: Holz-ständer 60 x 140 (Achsabstand 62,5 cm); Dämmung Zellulose Einblas-Dämmstoff | 14 cm |
| MDF | 1,5 cm |
| Hinterlüftung: Lattung 40 x 30 | 3 cm |
| Verkleidung: Aluminium, eloxiert | 0,2 cm |
| Wandstärke | 26,2 cm |

## 5.2 Systemgrenzen und Betrachtungsrahmen

Die Berechnungen wurden mit Hilfe des vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) entwickelten eLCA-Tools[9] auf der Grundlage der ökobaudat 2011[10] erstellt. Betrachtet wird jeweils 1 m² Außenbauteil über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Nicht in die Bilanz einbezogen sind alle Prozesse, die von Projekt zu Projekt unterschiedlich sind, bspw. der Transport vom Hersteller zur Baustelle, der Einbau auf der Baustelle oder die Reinigung während der Betriebsphase. Zur Bilanz hinzugezogen werden Erneuerungsprozesse, wie bspw. Fassadenanstriche (alle 20 Jahre) oder die Erneuerung von Fenster und Rahmen (nach 40 Jahren).

## 5.3 Ergebnisse Primärenergie (PE)

### 5.3.1 Nicht erneuerbare Primärenergie

Die Holzfassaden weisen den geringsten Gehalt an nicht erneuerbarer Primärenergie auf (27 bis 433 MJ pro m² Fassadenfläche für alle Lebenszyklusphasen). Dies rührt unter anderen daher, dass Holz bei der Entsorgung so bilanziert wird, dass seine Verbrennung eine Gutschrift für nicht erneuerbare Primärenergie verursacht, da Energien aus fossilen Quellen durch eine nachwachsende Quelle ersetzt werden. Zudem trägt die Aluminium-Fassadenverkleidung zur Gutschrift bei der Entsorgung bei, da ihr ein hohes Recyclingpotenzial zugewiesen wird.

Die opaken Fassaden mit dem höchsten nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt dagegen sind jene Fassaden mit hohem Anteil an mineralischen Baustoffen: perlitegefüllten Ziegelwände und Betonwände. Im Mittelfeld liegen Ziegelwände aus schwererem Ziegel mit stärkerer Dämmung.

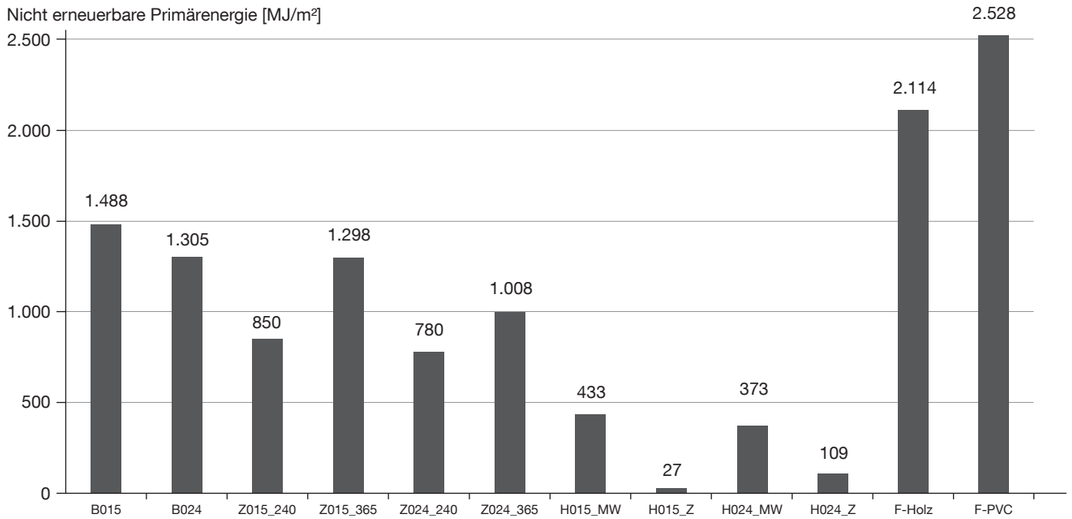



Abb. 9: Gehalt an nicht erneuerbarer Primärenergie der Fassadentypen in MJ/m² (Erstellung, Erneuerung und Entsorgung, Betrachtungszeitraum 50 Jahre)

Klar zu erkennen ist die energieintensive Erstellung von Fenstern bzw. Glas: Beide Fenstertypen (Holz und PVC) benötigen eine wesentlich größere Menge an nicht erneuerbarer Energie als die opaken Wandtypen. Allerdings darf hier nicht außer Acht gelassen werden, dass für Fenster mit einem Austausch nach 40 Jahren gerechnet wird, d.h. im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren werden die Fenster einmal ausgetauscht. Dieser Austausch hat in der Bilanz eine Verdopplung der Umweltbelastung zur Folge.

### 5.3.2 Erneuerbare Primärenergie

Die Holzfassaden weisen dagegen den höchsten Gehalt an erneuerbarer Primärenergie auf (324 bis 867 MJ/m² Fassade für alle Lebenszyklusphasen). Dies kommt im Wesentlichen daher, dass dem Rohstoff Holz die Sonnenenergie als erneuerbare Primärenergie zugeschrieben wird, die er zum Wachsen benötigt. Um dies zu relativieren, ist in der Abb. 10 der Heizwert des Holzes als Teil der enthaltenen erneuerbaren Primärenergie dargestellt. Grundsätzlich ist bei allen anderen Außenwandtypen der Gehalt an erneuerbarer Primärenergie vergleichsweise gering, d.h. die verwendeten Baustoffe werden zum Großteil mit Hilfe von Energie aus fossilen Quellen hergestellt. Der Anteil der erneuerbaren Primärenergie am Gesamt-Primärenergieinhalt reicht von 2 % (Fenster mit PVC-Rahmen) bis 12 % (Ziegelwand Z024_365). Für die Holzfassaden beträgt dieser Anteil zwischen 46 % (H024_MW) und 96 % (H015_Z).

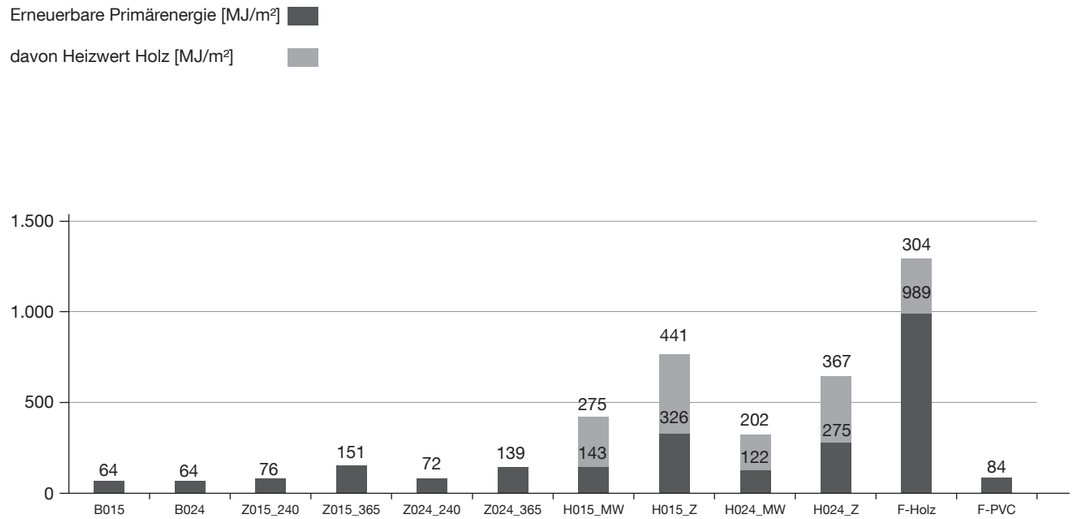



Abb. 10: Gehalt an erneuerbarer Primärenergie der Fassadentypen in MJ/m² (Erstellung, Erneuerung und Entsorgung, Betrachtungszeitraum 50 Jahre)

### 5.3.3 Primärenergie gesamt

Abb. 11 zeigt den Primärenergieinhalt aller Außenwandtypen im Vergleich, aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen und nach erneuerbarem und nicht erneuerbarem Anteil.

Hier ist deutlich zu erkennen, dass der große Vorteil der Holzfassaden in Bezug auf die nicht erneuerbare Primärenergie der Entsorgungsphase mit den Gutschriften für die Verbrennung und den Recyclinggutschriften für die Aluminiumfassade zuzuschreiben ist. Auch die Fenster weisen geringe Gutschriften aus der Entsorgungsphase auf, da sowohl die Holz- als auch die PVC-Rahmen mit dem End-of-Life-Szenario Verbrennung berechnet werden. Wo bei der Entsorgung von Ziegel und Beton weitere Primärenergie verbraucht werden muss, kann bei den Holzfassaden Primärenergie gewonnen bzw. gegengerechnet werden.

Zwar haben in der Herstellung Betonfassaden und Ziegelfassaden mit perlitegefüllten Ziegeln den höchsten Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie, allerdings ist der Abstand zur reinen Herstellung einer Holzfassade geringer, als würde lediglich der Gesamtwert betrachtet. Die Ziegelfassaden mit schwererem, aber weniger Ziegelanteil sind rein in der Herstellung weniger energieintensiv als die Holzfassaden mit hinterlüfteter Aluminiumfassade, haben aber bei der Entsorgung den Nachteil, dass sie weder energetisch noch hochwertig wiederverwendbar sind. Außerdem wird ein Austausch des Wärmedämmverbundsystems bzw. des Dämmputzes mit eingerechnet, während für eine hinterlüftete Fassade von einer höheren Lebensdauer ausgegangen wird, sodass kein Austausch innerhalb des Betrachtungszeitraumes erforderlich ist.

Darüber hinaus sieht man, dass der Austausch der Fenster einen hohen Primärenergiebedarf verursacht. Trotz der Verwendung von Holzrahmen sind die Fenster somit das Bauteil mit dem höchsten Energieinhalt.

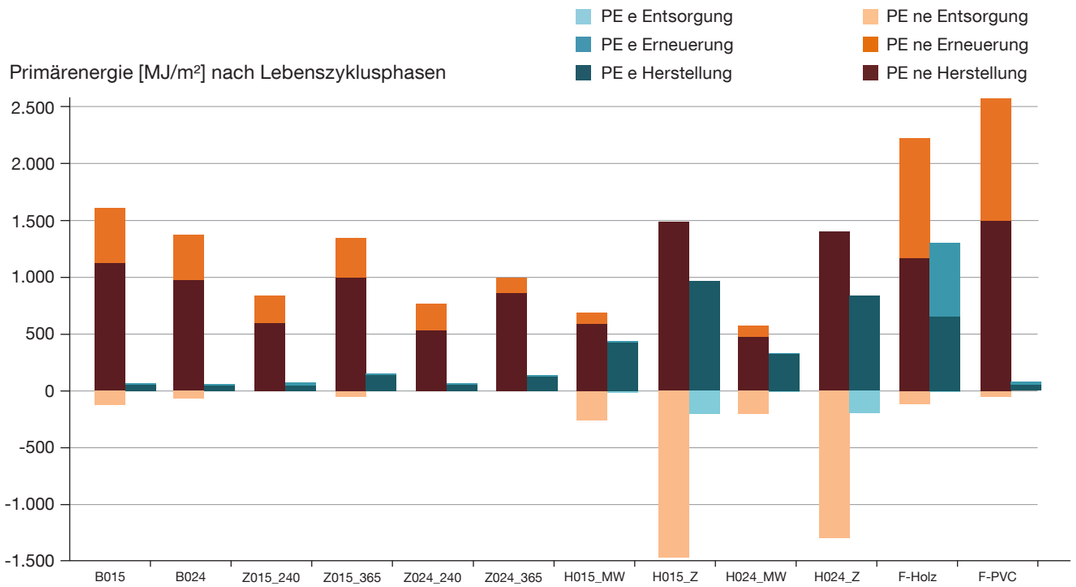



Abb. 11: Gehalt an Primärenergie der Fassadentypen in MJ /m² nach Erstellung, Erneuerung und Entsorgung (Betrachtungszeitraum 50 Jahre)

## 5.4 Treibhauspotenzial

Abb. 12 zeigt die Vorteile der Verwendung nachwachsender Rohstoffe über den Lebenszyklus: Da Pflanzen im Wachstum $CO_2$ binden, wird Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen dieses $CO_2$ gutgeschrieben, d.h. sie haben ein negatives Treibhauspotenzial, das das positive Treibhauspotenzial der nicht nachwachsenden Materialien teilwiese kompensiert. Dadurch ist der Gesamtwert des Treibhauspotenzials der Außenwandtypen mit den höchsten Anteilen an nachwachsenden Rohstoffen (Holzfassaden mit Zellulosedämmung) bis zu 32 mal geringer als das Treibhauspotenzial einer Betonaußenwand mit Wärmedämmverbundsystem.

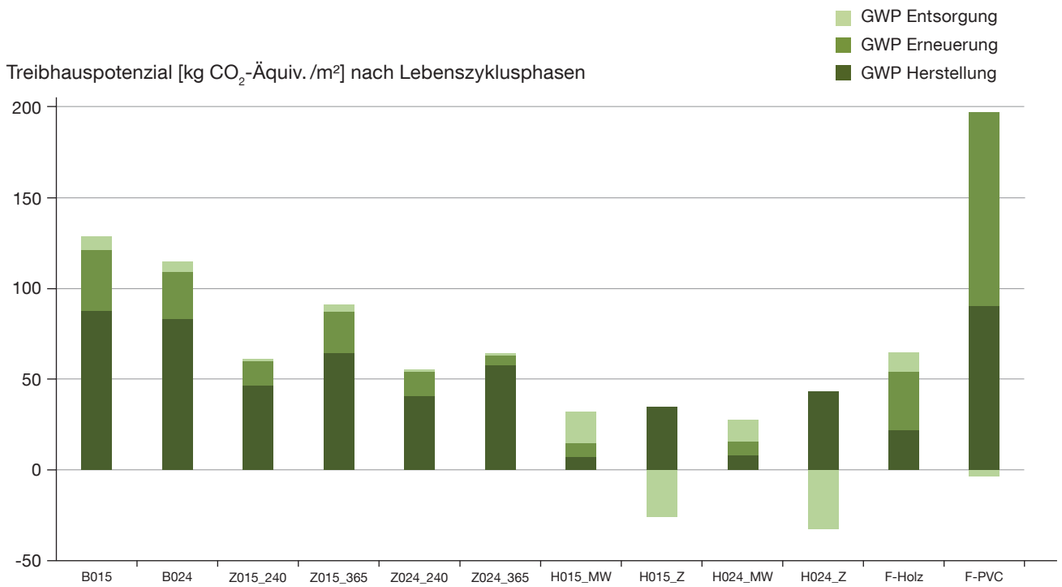



Abb. 12: Treibhauspotenzial der Fassadentypen in kg $CO_2$-Äquiv. /m² nach Erstellung, Erneuerung und Entsorgung (Betrachtungszeitraum 50 Jahre)

Da bei der Zementherstellung relativ viel $CO_2$ anfällt, verursachen Wände mit einem Tragsystem aus Beton ein deutlich höheres Treibhauspotenzial als Ziegelwände.

Das PVC-Fenster schneidet auch hinsichtlich des Treibhauspotenzials am schlechtesten ab, da sowohl bei der Herstellung als auch bei der Entsorgung von PVC $CO_2$ anfällt. Das Holzfenster erhält zwar in keiner Lebenszyklusphase eine $CO_2$-Gutschrift, ein Teil des durch die Glasherstellung verursachten $CO_2$ wird aber durch den Holzrahmen kompensiert, sodass es insgesamt ein geringeres Treibhauspotenzial besitzt als die Betonwände und als die besser gedämmte Ziegelwand mit hohem Ziegelanteil.

## 5.5 Weitere Wirkungskategorien

Abb. 13 zeigt die Bewertung der Bauteile nach den Umweltwirkungskategorien:

- Treibhauspotenzial [kg $CO_2$-Äqv.] (Global Warming Potential = GWP)
- Ozonabbaupotenzial [kg R11-Äqv.] (Ozone Depletion Potential = ODP)
- Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial [kg Ethen-Äqv.] (Sommersmogpotenzial; Photochemical ozone creation potential = POCP)
- Versauerungspotenzial [kg $SO_2$-Äqv.] (Acidification Potential = AP)
- Überdüngungspotenzial [kg $PO_4$-Äqv.] (Eutrophication Potential = EP)
- Abiotischer Ressourcenverbrauch [kg Sb-Äqv.] (Abiotic resource Depletion Potential = ADP)

Hierbei werden jeweils die Umweltwirkungen bzw. der Schaden, der durch Emissionen entsteht (Versauerung, Ozonloch, Sommersmog etc.) beziffert und auf eine Einheit normiert. Bspw. setzt sich das $CO_2$-Äquivalent des Treibhauspotenzials aus dem Treibhauspotenzial verschiedener Treibhausgase wie Methan oder Distickstoffoxid (Lachgas) zusammen.
Diese Kategorien finden sich derzeit in der Ökobaudat und in Umweltproduktdeklarationen. Zukünftig werden sie mehr und mehr Beachtung finden, da die Betrachtungsweise sich über das Treibhauspotenzial hinaus ausweitet, um ein gesamtheitliches Bild zu erhalten.

Zusätzliche Bewertungsmöglichkeiten wären außerdem die Human- oder Ökotoxizität. Für diese Umweltwirkungen liegen derzeit allerdings noch keine gesammelten einheitlichen Daten vor.

Abb. 13 zeigt die Umweltwirkungen jeweils prozentual in Abhängigkeit vom höchsten Wert, da die Wirkungskategorien in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden und damit sehr unterschiedliche Größenordnungen besitzen.

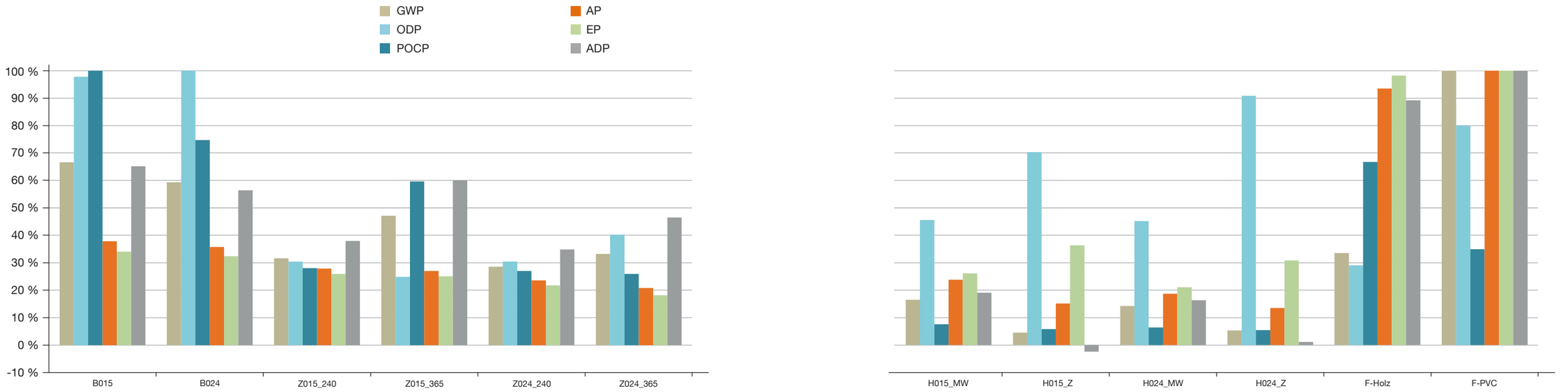



Abb. 13: Umwelt-Wirkungskategorien der Fassadentypen in % vom höchsten Wert der jeweiligen Kategorie (Erstellung, Erneuerung und Entsorgung, Betrachtungszeitraum 50 Jahre)

Hier ist zu erkennen, dass das Fenster mit PVC-Rahmen in vier der sechs Kategorien am schlechtesten abschneidet. Dies ist zum Teil auf den Austausch der Fenster während des 50-jährigen Betrachtungszeitraums zurückzuführen, zum Teil auf hohe Umweltwirkungen bei der Glasherstellung. Die beiden Betonwände haben das höchste Sommersmogpotenzial (POCP) bzw. das höchste Ozonabbaupotenzial (ODP). Allein beim ODP weisen auch die Holzfassaden mit Aluminium-Verkleidung signifikante Werte auf. Dies liegt hauptsächlich an der Verkleidung mit eloxiertem Aluminium, das ein hohes Ozonabbaupotenzial hat. Der Anteil am gesamten ODP der besser gedämmten Fassade (H015_Z) beträgt sogar mehr als 100 % des ODP der Außenwandkonstruktion und wird durch das Kernelement aus Holz nur teilweise kompensiert.

Lässt man die transparenten Bauteile außer Acht und vergleicht nur die opaken Fassaden, so zeigt sich, dass die Betonaußenwände in fast allen Kategorien die höchsten Werte aufweisen. Nur beim Überdüngungspotenzial liegt die Holzfassade mit Aluminium-Verkleidung (H015_Z) knapp höher, da nachwachsende organische Rohstoffe generell ein höheres Überdüngungspotenzial aufweisen als mineralische oder synthetisch hergestellte Materialien.

Insgesamt zeigt sich, dass von einer Bewertung nach allen Wirkungskategorien kein komplett einheitliches Bild zu erwarten ist. Allerdings lässt sich im vorliegenden Fall feststellen, dass in den betrachteten Umweltwirkungen die Holzfassaden klare Vorteile aufweisen.
Diese Uneindeutigkeit ist ein typisches Ergebnis einer Gebäude-Ökobilanz. Es gibt derzeit verschiedene Bewertungsysteme, die die einzelnen Wirkungskategorien gegeneinander abwägen bzw. priorisieren, um eindeutige Entscheidungen treffen zu können. Hier wären die (Schweizer) Umweltbelastungspunkte (UBP)[11], der in Österreich verwendete OI3 Indikator[12] zu erwähnen oder die ReCiPe Points[13], die in den Niederlanden entwickelt wurden. Für Deutschland liegt derzeit kein einheitliches System vor.



## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Berücksichtigt man alle ökonomischen und ökologischen Kriterien, wird schnell klar: Kein Baustoff ist uneingeschränkt zu empfehlen oder zu verwerfen. Aber durch die Auswahl von angemessenen umweltgerechten Baustoffen und Fügungsweisen ist ressourcenschonendes und nachhaltiges Bauen realisierbar.

Es ist angesichts der Komplexität und des notwendigen Aufwands weder möglich noch sinnvoll, allen Auswahlkriterien die gleiche Beachtung zu schenken. Der ideale Baustoff steht in einem ausgewogenen Verhältnis hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und bautechnischer Aspekte und wird auch weiteren individuellen Anforderungen gerecht.

Der vorliegende Leitfaden dient als Informationsgrundlage. Eine geeignete Baustoffauswahl kann auf dieser Grundlage mit mehr Sorgfalt und Umsicht erfolgen.

Die Begriffe Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit von Baumaterialien sind bei der Auswahl der Baustoffe nicht mehr wegzudenken und finden somit immer mehr Berücksichtigung im Bauwesen.

Steigende Deklarationsanforderungen, Zertifizierungssysteme und Bereitstellungen von Datensätzen zur Ökobilanzierung der Baustoffe führen dazu, dass Bewertungsverfahren ohne wesentlichen Aufwand bei der Planung und Ausführung von Bauvorhaben berücksichtigt werden können.[14]

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass Baustoffe letztendlich in einem funktionalen Zusammenhang betrachtet werden müssen. In vielen Fällen werden sie gefügt oder kraftschlüssig zu Bauteilen verbunden. Dies wirkt sich wiederum auf die Lebenszyklusbetrachtung eines gesamten Gebäudes aus. Da Bauteile unterschiedlich lange Nutzungsdauern und somit unterschiedliche Erneuerungszyklen besitzen, hat die Auswahl und Fügungsart der verbauten Materialien direkten Einfluss auf den zukünftigen Energieaufwand der Erneuerung.

Im Zuge der zunehmenden Bedeutung von ökologischen und nachhaltigen Kriterien von Gebäuden ist die Gegenüberstellung und Untersuchung hinsichtlich Primärenergie und Umweltwirkung der verschiedenen Baustoffe und Wandaufbauten zunehmend relevant.

Mit dem Aufzeigen von Materialeigenschaften und deren Kennwerten sowie dem Vergleich von Außenbauteilen soll ein Nachdenken angeregt werden, klassische Bauweisen kritisch zu betrachten und ggf. Neues auszuprobieren.

Die Vorteile einer Holzrahmenaußenwand im direkten Vergleich mit einer Massivbauwand sind bspw. der niedrige u-Wert, das negative Treibhauspotenzial sowie die geringe Wandstärke. Damit lässt sich neben den energetischen und ökologischen Vorteilen auch ein besseres Verhältnis von Nutzfläche zu Grundfläche erzielen, was sich wiederum wirtschaftlich positiv auswirken kann.

# Sie haben eine Idee, eine Vision?

## Oder bereits ein Konzept für ein neues Bauvorhaben?

Wenden Sie sich an die Projektplattform Energie.
Je früher Sie die Schaltstelle zur TU München einbinden, desto positiver wirken sich die Leistungen der Projektplattform Energie auf das Endergebnis aus.

**Lassen Sie uns auf der ersten Projektskizze aufbauen!**

**Die Technische Universität München**

Die TU München forscht, entwirft Konzepte und führt Normungs- und Prüfaufgaben durch. Sie begleitet Projekte, darf aber aus rechtlichen Gründen nicht die Arbeit eines Ingenieurbüros übernehmen.
Projektplattform Energie-Nutzern bietet die TU München Hilfestellung bei der Ausarbeitung von Konzepten.



## WIE KANN ICH DIE PROJEKTPLATTFORM ENERGIE NUTZEN?

Die Projektplattform Energie begleitet Sie und Ihr Unternehmen idealerweise während der gesamten Konzeptentwicklung: von der ersten Idee bis zum Start des Bauprojekts. Die ersten beiden Schritte sind kostenfrei.

### SCHRITT I – VORGESPRÄCH UND ERSTBERATUNG

- Unverbindliche Besprechung Ihrer Konzeptidee
- Erstberatung durch Projektplattform Energie

### SCHRITT II – TREFFEN MIT PROJEKTPLATTFORM ENERGIE UND TU MÜNCHEN

- Treffen mit Projektplattform Energie und Vertretern projektrelevanter TUM-Lehrstühle
- Diskussion von Konzepten und Projektideen
- Beratung zu bauenergetischen bzw. energietechnischen Aspekten
- Überblick über Kooperationsmöglichkeiten
- Hilfestellung bei Themenfindung durch Projektplattform Energie (auf Wunsch)

### SCHRITT III – START DES KOOPERATIONSPROJEKTS

- Start eines gemeinsamen Kooperationsprojekts zwischen Bauunternehmen und TU München
- Koordination der Zusammenarbeit durch Projektplattform Energie

Die Schrittfolge ist als flexibles Angebot zu verstehen. Die Leistungen können individuell kombiniert und auch einzeln in Anspruch genommen werden. Alle Inhalte und Anliegen der Unternehmen werden streng vertraulich behandelt.

**Quellen:**
[1] Hegger; Fuchs; Stark; Zeumer: Energie Atlas Nachhaltige Architektur, Erste Auflage, 2007

[2] www.velle.de aufgerufen im April 2015

[3] sia – schweizerischer ingenieur- und architektenverein: Merkblatt 2032 Graue Energie von Gebäuden, Erste Auflage, 2010

[4] www.tu-braunschweig.de aufgerufen im April 2015

[5] www.baunetzwissen.de aufgerufen im April 2015

[6] www.dreso.com aufgerufen im April 2015

[7] www.baulinks.de aufgerufen im April 2015

[8] www.ecobine.de aufgerufen im April 2015

[9] eLCA www.bauteileditor.de aufgerufen im April 2015

[10] Ökobaudat Deutsche Baustoffdatenbank des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) www.oekobaudat.de; Ökobaudat 2011: www.oekobaudat.de aufgerufen im April 2015

[11] www.bafu.admin.ch aufgerufen im April 2015

[12] OI3 Indikator: www.ibo.at aufgerufen im April 2015

[13] www.lcia-recipe.net aufgerufen im April 2015

[14] Hegger; Auch-Schwelk; Fuchs; Rosenkranz: Baustoff Atlas, Erste Auflage, 2005

Kolb: Nachhaltiges Bauen in der Praxis, 2004

Peter; Muntwyler; Ladner: Baustofflehre Bau und Energie, Leitfaden für Planung und Praxis Bd. 3, Zweite Auflage, 2005

Weber; Schäffler; Bruy; Schelling: Baustoffkunde, Zehnte Auflage, 2012

www.abw-recycling.de aufgerufen im April 2015
www.baumarkt.de aufgerufen im April 2015
www.bau-umwelt.de aufgerufen im April 2015
www.bauwesen.de aufgerufen im April 2015
www.bauwesen.htwk-leipzig.de aufgerufen im April 2015
www.beton.org aufgerufen im April 2015
www.bv-porenbeton.de aufgerufen im April 2015
www.chemie.de aufgerufen im April 2015
www.db-bauzeitung.de aufgerufen im April 2015
www.deutschmann-bau.de aufgerufen im April 2015
www.htai.de aufgerufen im April 2015
www.ib-rauch.de aufgerufen im April 2015
www.ibw-web.de aufgerufen im April 2015
www.massivbau.de aufgerufen im April 2015
www.massivhaus-massivbau.de aufgerufen im April 2015
www.nabu.de aufgerufen im April 2015
www.old.cipra.org aufgerufen im April 2015
www.springerprofessional.de aufgerufen im April 2015
www.vandersandengroup.de aufgerufen im April 2015
www.wikipedia.org aufgerufen im April 2015

DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen
DIN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen

DIN EN 15643: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden
DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltdeklaration für Produkte – Regeln für Produktkategorien

**Abbildungsnachweis:**
**S.8** Abb. 1 Wohngebäude[4]; Sandro Pfoh. **S.14** Abb. 2 PEI n. ern. mineralische Baustoffe[5] und Abb. 3 Rohdichte mineralische Baustoffe; Sandro Pfoh. **S.17** Abb. 4 PEI n. ern. Dämmstoffe[5]; Sandro Pfoh. Abb. 5 Rohdichte Dämmstoffe; Sandro Pfoh. **S.18** Abb 6 PEI n. ern. Metalle[5]; Sandro Pfoh. Abb. 7 Rohdichte Metalle; Sandro Pfoh. **S.20** Abb. 8 Kumulierter Energieaufwand; Patricia Schneider, Sandro Pfoh. **S.24** Abb. 9 n. ern. PE Fassadentypen; Patricia Schneider, Sandro Pfoh. **S.25** Abb. 10 ern. PE Fassadentypen; Patricia Schneider, Sandro Pfoh. **S.26** Abb. 11 PE Fassadentypen; Patricia Schneider, Sandro Pfoh. **S.27** Abb. 12 Treibhauspotenzial Fassadentypen; Patricia Schneider, Sandro Pfoh. **S.28 – 29** Abb. 13 Umwelt-Wirkungskategorien Fassadentypen; Patricia Schneider, Sandro Pfoh.

**Bildnachweis:**
**S.8** Rückbaubarkeit und Recycling; Fotolia © peuceta. **S.9** Cradle to Cradle; http://www.epea-hamburg.org/sites/default/files/images/c2c_logo.gif. **S.10** Mauerziegel; Fotolia © Dieter Pregizer. Porenbeton; Fotolia © markuso. **S.11** Kalksandstein; Fotolia © odluap. Beton; Fotolia © torsakarin. **S.12** Holzbaustoffe; Fotolia © mahey. Dämmstoffe; Fotolia © Ingo Bartussek. **S.33** TU München; Schwaiger Design © Daniel Schwaiger.

**Tabellennachweis:**
**S.15** Tab. 1 Kenndaten Mineralische Baustoffe; Sandro Pfoh. **S.16** Tab. 2 Kenndaten Holz und Holzwerkstoffe; Sandro Pfoh. **S.17** Tab. 3 Kenndaten Dämmstoffe; Sandro Pfoh. **S.18** Tab. 4 Kenndaten Metalle; Sandro Pfoh. **S.19** Tab. 5 Übersicht Eigenschaften Baustoffe; Patricia Schneider, Sandro Pfoh. **S.21 – 23** Tab. 6 Wandaufbauten; Patricia Schneider, Sandro Pfoh.

**Gestaltung:**
Sandro Pfoh

**Redaktion:**
Sandro Pfoh, Patricia Schneider, Franziska Grimm

Eine Kooperation des Bayerischen Bauindustrieverbandes e.V. und der Technischen Universität München

## SIE HABEN INTERESSE AM ANGEBOT DER PROJEKTPLATTFORM ENERGIE?

Nehmen Sie mit uns Kontakt auf. Wir stehen Ihnen vom ersten Geistesblitz bis zur Realisierung Ihrer nachhaltigen Projektidee zur Seite.

PARTNER
**Bayerischer Bauindustrieverband e.V.**
www.bauindustrie-bayern.de

**Zentrum für Nachhaltiges Bauen**
(TU München)
www.znb.mse.tum.de

PROJEKTPLATTFORM ENERGIE
des Bayerischen Bauindustrieverbandes e.V.
in Kooperation mit der
Technischen Universität München

**Dipl.-Ing. Sandro Pfoh**
Wissenschaftlicher Leiter
Projektplattform Energie

Arcisstraße 21
80333 München
Telefon +49 89 289-28153
Fax +49 89 289-23991
info@ppe.tum.de
www.ppe.tum.de

PROJEKTPLATTFORM ENERGIE
www.ppe.tum.de

**Bayerischer Bauindustrieverband e.V.**
www.bauindustrie-bayern.de

**Zentrum für Nachhaltiges Bauen (TU München)**
www.znb.mse.tum.de