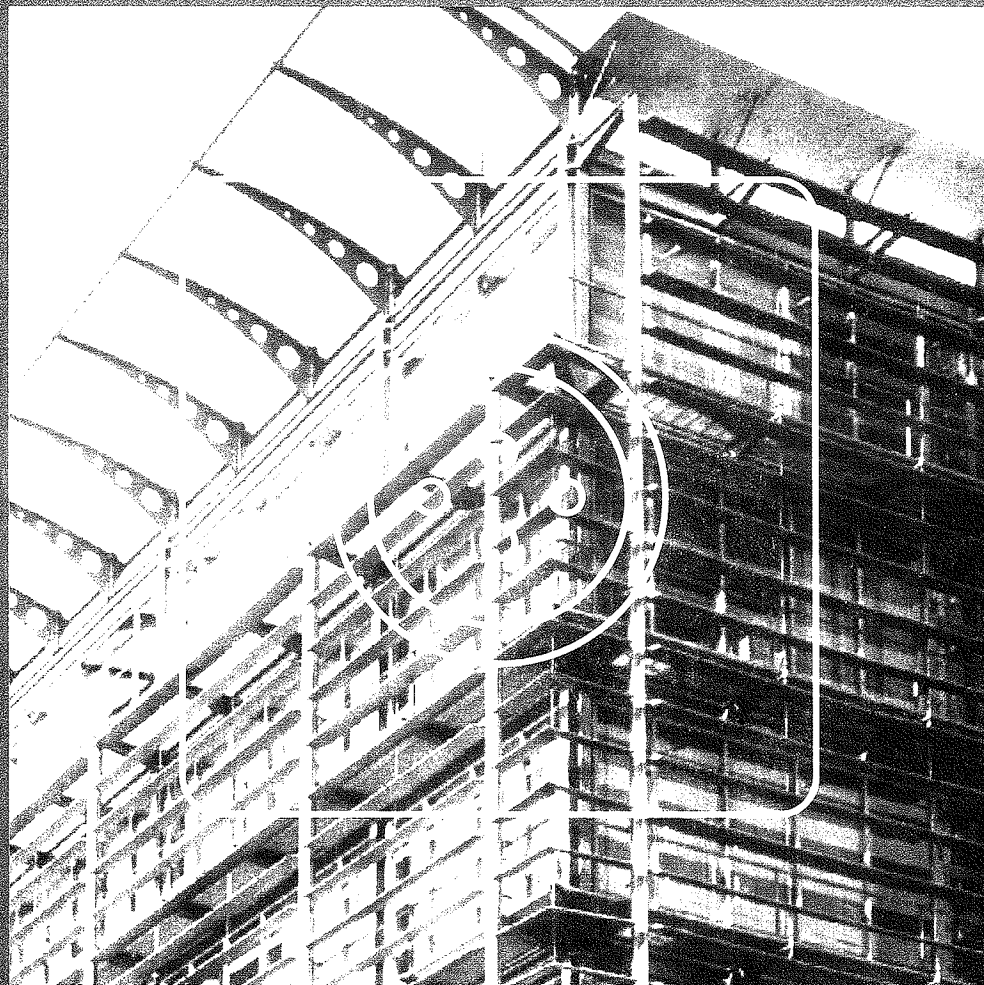


Graue Energie von Baustoffen

Daten zu Baustoffen, Bauchemikalien, Verarbeitungs-
und Transportprozessen mit Erläuterungen und Empfehlungen
für die Baupraxis

2

2. vollständig neu
überarbeitete Auflage



Diese zweite, vollständig neu
überarbeitete Auflage
wurde finanziell unterstützt durch:

Bundesamt für Energie
Amt für Bundesbauten
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Bundesamt für Strassen

Bearbeitung:
Ueli Kasser, Dipl. Chem. Ökologe SVU
Michael Pöll, Dipl. Masch. Ing. ETH

Herausgeber:
Büro für Umweltchemie
Hottingerstrasse 32
CH-8032 Zürich
Tel.: (0041) 01 262 25 62
Fax: (0041) 01 262 25 70
bfuzh@access.ch

Gestaltung:
Katharina Gassmann, Zürich

Preis:
Fr. 38.-, inkl. Versand und MWSt.

© Büro für Umweltchemie
2. Auflage November 1998, 500 Exemplare

Inhalt

Vorwort zur 2. Auflage	4
------------------------	---

Grundlagen

1. Einleitung	5
2. Definition	6
3. Bedeutung und Grenzen	8
4. Stand der Technik	11
5. Systemgrenzen	12
6. Energiebereitstellung	14
7. Transporte	16

Anwendungshinweise

8. Grundsätze	19
9. Verarbeitung auf der Baustelle	20
10. Nutzungsphase	22
11. Entsorgung	23
12. Vergleich von Konstruktionen	24
13. Vergleich von vier Gebäuden	26
14. Orientierungswerte für Gebäude	34

Daten

15. Harmonisierung und Vergleichbarkeit der Daten	36
16. Harmonisierte Daten	37
Beton und Betonwaren	37
Mauersteine	40
Mineralische Bindemittel	42
Zuschlags- und Füllstoffe	45
Mörtel und Putze	46
Mineralische Abdeckungen und Verkleidungen	48
Holzwerkstoffe	50
Metalle	52
Wärmedämmstoffe	55
Abdichtungen und Folien	57
Bodenbeläge	61
Rohrleitungen	65
Fenster	67
Türen und Türzargen	73
Farben und Lacke	74
Energiebereitstellung	76
Energienutzung	80
Transportleistungen	84
Baumaschinenleistungen	87

1994 hat das Büro für Umweltchemie die für die eigene Beratertätigkeit verwendeten Daten über Stoff- und Energiebilanzen von Baustoffen aufgearbeitet und als Tabellenwerk für interessierte Bau fachleute herausgegeben. Aus verschiedenen Gründen hatte man sich damals auf den Primärenergieinhalt von Stoffen, Prozessen oder Leistungen im Baubereich beschränkt (Graue Energie). Das im Eigenverlag und mit eigenen Mitteln produzierte Buch «Graue Energie von Baustoffen» wurde im Mai 1995 herausgegeben. Das Tabellenwerk war eine Art Briefmarkensammlung. Grauenenergiewerte von Baustoffen aus allen verfügbaren Publikationen wurden mit Quellenangaben nebeneinander dargestellt, beschrieben und die Unterschiede soweit wie möglich interpretiert. Es war die Meinung und Absicht, dass die Anwenderin und der Anwender, die für die jeweilige Fragestellung richtigen und sinnvollen Daten auswählen kann.

Die Erfahrungen mit der Publikation in den letzten drei Jahren waren vorwiegend positiv. Das Bedürfnis nach einer einfach handhabbaren Grösse zur Beurteilung von Funktionen und Leistungen im Baubereich ist vorhanden. Die Bedeutung der Grauen Energie als Indikator für eine vereinfachte, quantitative Beurteilung verschiedener Arten von Umweltbelastungen eines Systems wird erkannt. Die Energieeinheit ist eine vertraute Grösse, die dazu anregt, verschiedenste Überlegungen und Vergleiche von Investitions- und Betriebsenergien anzustellen. Die Graue Energie trägt innerhalb der Bauökologie ganz wesentlich dazu bei, relevante Bereiche und Entscheide erkennen zu können.

Architektinnen und Architekten tun sich allgemein mit der Baustoffkunde schwer. Die ihnen vom praktischen Bau her bekannten Produkte lassen sich nur schwer den in den Publikationen beschriebenen Materialien zuordnen. Die Zusammensetzung von Baustoffen ist dem Architekten in der Regel nicht bekannt. Viele Benutzerinnen und Benutzer der Publikation konnten unterschiedliche Grauenenergiewerte zum selben Baustoff nicht interpretieren und waren mit der Auswahl überfordert. Die überwiegende Mehrheit wünscht sich eindeutige Werte, die möglichst vergleichbar sind.

Für die Bearbeitung der vorliegenden zweiten Auflage wurden diese Erfahrungen berücksichtigt. Es ist ein homogener und vergleichbarer Datensatz entstanden, der pro Baustoff oder Bauteil nur einen Grauenenergiewert ausweist. Den Fragen der praktischen Anwendung und der Baustoffkunde wurde vermehrt Rechnung getragen. Über die Methodik und das Auswahlverfahren ist für die speziell interessierten Fachleute ein begleitender Bericht verfasst worden. Er kann beim Herausgeber bestellt werden.

Schon in den frühen Achtzigerjahren hat man sich bei der Umsetzung energiepolitischer Zielsetzungen die Frage gestellt, ob die massive Reduktion der Betriebsenergie von Gebäuden nicht durch den Mehraufwand an Grauer Energie in Form von Wärmedämmstoffen, zusätzlicher Bausubstanz und technischen Systemen aufgewogen wird. Das hat zu einer Vielzahl von Studien zur Berechnung der Grauen Energie von Baustoffen geführt. Daraus ist schliesslich die Erkenntnis gewachsen, dass die Umweltbelastungen während der Herstellung der Produkte vom Rohstoffabbau bis zum verkaufsfertigen Produkt relevant ist. Dies gilt insbesondere für stark veredelte Baustoffe sowie für komplexe technische Systeme.

Die Baustoffökologie hat sich in der Vergangenheit auf die Vermeidung von besonders umweltgefährdenden Stoffen konzentriert. Bauprodukte mit Schwermetallen, Lösemitteln, Asbest, ozonschichtabbauenden oder anderen umweltgefährdenden Stoffen sind dadurch zunehmend vom Markt verschwunden oder wurden im Rahmen gesetzlicher Regelungen verboten. In den letzten Jahren ist mit der Diskussion über die Klimaveränderungen und Nachhaltigkeit das Problembewusstsein für die grossen Stoffflüsse (Rohstoffverbrauch, CO₂-Problematik) gewachsen. Bei der Senkung der Betriebsenergie von Gebäuden wurden erhebliche Fortschritte erzielt. Minergie-Standard und SIA-Absenkpfad sind Ziele, an denen die Betriebsenergie von Gebäuden in Zukunft zu messen sind. Weltklimakonventionen und die Nachhaltigkeitsdiskussion haben zu einer Sensibilisierung geführt und die Notwendigkeit nach gesamtheitlichen Betrachtungen unterstrichen. Die Erkenntnis, dass die Herstellung aller Baustoffe – auch derjenigen ohne besonders umweltgefährdende Stoffe – mit einem Aufwand an Energie und den entsprechenden Umweltbelastungen verbunden ist, setzt sich immer mehr durch und verlangt nach entsprechenden Beurteilungsinstrumenten.

Die Graue Energie ist eine Bewertungsgrösse, die für verhältnismässig viele Umweltauswirkungen aussagekräftig ist. Sie bewertet direkt alle fossilen Rohstoffe mit dem Heizwert sowie die begrenzt verfügbaren Primärenergieformen der Elektrizitätsproduktion. Indirekt werden durch diesen Indikator pauschal die Umweltauswirkungen der Treibhausgase und aller anderen, durch die Energienutzung bedingten Luftschadstoffe erfasst. Auch die Risiken der Kerntechnologie und die Umweltauswirkungen der Wasserkraftnutzung sind in gewissem Masse pauschal bewertet. Die Graue Energie ist eine Möglichkeit, wie man die Stoffe und Leistungen im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung relativ einfach bewerten kann.

2. Definition

Die Graue Energie berechnet sich aus der Summe aller nichterneuerbaren Primärenergieträger und energetisch nutzbaren fossilen Rohstoffe sowie der Wasserkraft eines bestimmten Systems. Das System umfasst in der Regel alle wichtigen Prozesse, vom Rohstoffabbau beginnend bis zum Ort der Bereitstellung des Produktes oder der Leistung. Entscheidend für die Aussagekraft der Grauen Energie sind einerseits die Art der Bewertung der Energieträger und andererseits die Grenzen des betrachteten Systems.

Die in der Grauen Energie dieser Publikation enthaltenen resp. nicht berücksichtigten Energieformen sind in Abb.1 aufgelistet. Es handelt sich mit Ausnahme der Sekundärrohstoffe (Recyclate) um die Primärenergieformen, wie sie in der Natur vorliegen, aus denen Brennstoffe, Treibstoffe und Rohstoffe sowie der elektrische Strom produziert werden. Die Kriterien für die Abgrenzung der Grauen Energie sind Erneuerbarkeit, Verfügbarkeit und Umweltauswirkung beim Abbau der Rohstoffe und bei der energetischen Nutzung.

Die fossilen Rohstoffe sind begrenzt verfügbar, nicht erneuerbar und mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden. Dasselbe gilt für Natururan, wobei die Umweltauswirkungen der Kerntechnologie völlig andersartig sind. Sie entstehen vor allem bei der Gewinnung und Aufbereitung, durch Störfälle und die langfristigen Risiken der Abfallbewirtschaftung. Die Wasserkraft ist zwar erneuerbar, jedoch zumindest im süd- und mitteleuropäischen Raum, begrenzt verfügbar. Zusätzliche Kapazitäten würden erhebliche Umweltauswirkungen im Bereich Natur-, Landschafts- und Gewässerschutz verursachen.

Die erneuerbaren Energieträger sind im Allgemeinen und insbesondere im Baustoffbereich gut verfügbar. Die Umweltauswirkungen durch die energetische Nutzung sind in Bezug auf das Kohlendioxid und die Verbrennungsrückstände geringer als bei den fossilen Rohstoffen. Unbestritten ist das Potential der Sonnen- und Umgebungsenergien, deren direkte Nutzung praktisch ohne Umweltauswirkungen ist. Die sekundären Rohstoffe (recycelte Abfälle) sind zwar nicht erneuerbar, jedoch gut verfügbar. Ihre stoffliche und energetische Nutzung ist zu fördern, weil damit primäre Rohstoffe und deren Umweltauswirkungen bei Abbau und Aufbereitung gespart und Entsorgungsanlagen entlastet werden können.

Abb. 1
Abgrenzung der
Grauen Energie
bezüglich Energie-
trägern

Folgende Energieträger sind in der Grauen Energie

enthalten:

- Erdöl, Erdgas, Kohle und alle daraus gewonnenen Energieträger und Rohstoffe mit dem Energiewert aus deren Verbrennung
- Natururan mit der in Leichtwasserreaktoren nutzbaren Wärmeenergie
- Wasserkraft mit der auf der Turbinenschaufel nutzbaren mechanischen Energie

nicht enthalten:

- Holz, Kork und andere pflanzliche und tierische Rohstoffe, sowie daraus gewonnene Energieträger, soweit sie aus nachhaltiger Bewirtschaftung stammen
- Sonnenenergie, Erdwärme, Windenergie, Umgebungswärme und alle daraus gewonnenen Sekundärenergieformen
- Altkunststoff, Altpapier, Altpneus, Klärschlamm und andere Abfälle, die stofflich oder energetisch wiederverwertet werden

Stellenwert Graue Energie

Die Graue Energie ist gemäss der Definition im vorliegenden Bericht eine vereinfachende Bewertungsgrösse der Umweltauswirkungen während der Herstellung eines Baustoffes vom Rohstoffabbau bis zum Fabrikat des letzten Verarbeitungsschrittes. Mit ihr werden relativ pauschal alle, mit der Energienutzung verbundenen Umweltauswirkungen bewertet. Dazu gehören insbesondere die Wirkungen der Treibhausgase und der wichtigsten Luftschadstoffe sowie die Umweltprobleme, die mit der Stromproduktion verbunden sind. Die Bewertungsgrösse deckt sich somit mit den wichtigsten energie- und umweltpolitischen Zielsetzungen. Die Graue Energie ist nicht geeignet, Emissionen von speziellen Schadstoffen wie beispielsweise den Schwermetallen, den ozonschichtabbauenden Stoffen oder den Lösemitteln zu bewerten. Dazu sind entweder ergänzende Beurteilungen (vgl. Kap. 9–11) oder andere Bewertungsgrössen und -methoden von Stoff- und Energiebilanzen nötig¹.

Die Grenzen des betrachteten Systems, auf das sich die Graue Energie bezieht, lassen sich in allgemeiner Form nicht oder nur unscharf definieren. Normalerweise umfasst das System für die Bilanzierung der Grauen Energie von materiellen Gütern alle wichtigen Prozesse und Hilfsmittel vom Rohstoffabbau bis zu der definierten Form und dem Ort ihrer Bereitstellung. Bei Prozessen und Dienstleistungen sind die örtlichen und zeitlichen Systemgrenzen situativ zu definieren. Damit ist aber noch nicht festgelegt, ob beispielsweise für die Herstellung eines Stahlprofils der Bau des Kraftwerkes, aus dem der Strom bezogen wird, auch mitbilanziert wird (vgl. Abb. 2). Oder sollen für die Graue Energie eines Gebäudes die Heizenergie für das Architekturbüro oder die Personentransporte auf die Baustelle auch berücksichtigt werden? Solche Systemabgrenzungsprobleme sind immer Ermessensfragen, die u.a. auch von den konkreten Zielsetzungen abhängig sind. Einige generelle Aussagen zu den Systemabgrenzungen der ausgewiesenen Grauennergiedaten sind im Kap. 5 zusammengestellt.

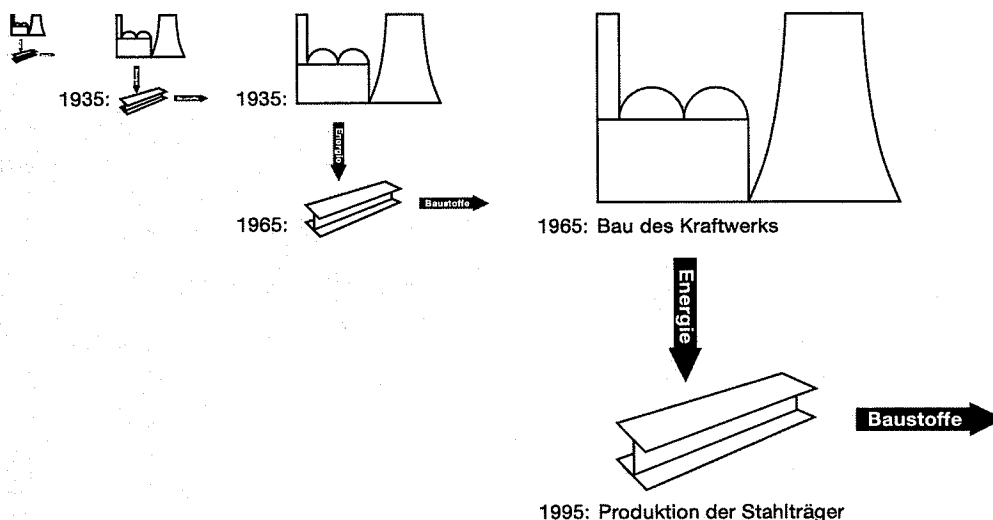


Abb. 2
Notwendigkeit der Systemabgrenzung am Beispiel Stahlprofil und Kraftwerk: In der praktischen Durchführung ist immer eine Systemabgrenzung notwendig, da sich Systeme zeitlich und örtlich beliebig erweitern lassen. Stoff- und Energiebilanzen können nie alles berücksichtigen.

¹ vgl. z.B. SIA-Dokumentation D 0152; Instrumente für ökologisches Bauen im Vergleich; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA, Zürich 1998.

3. Bedeutung und Grenzen

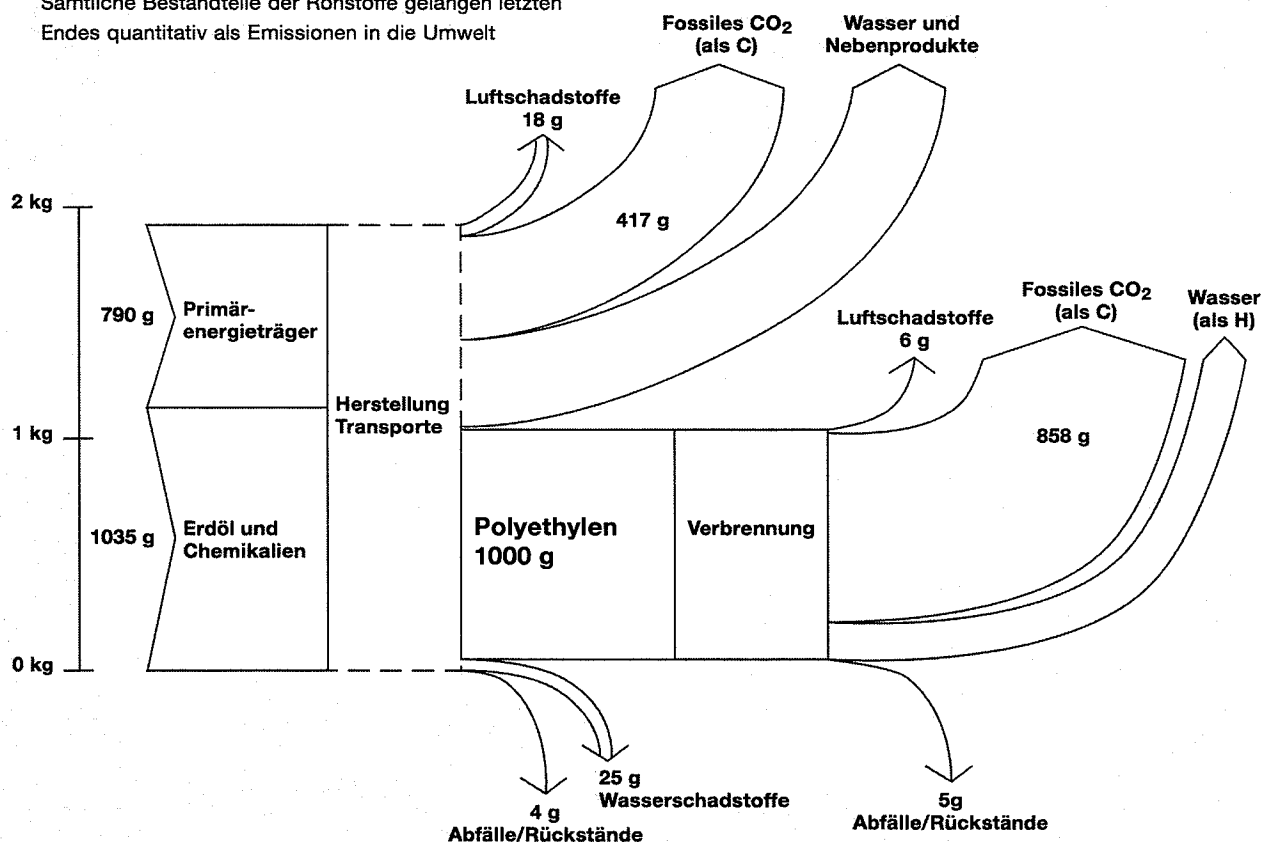
Die Bedeutung der Grauen Energie lässt sich letzten Endes nur umschreiben und in den Kontext der Nachhaltigkeit stellen. Bei der Grauen Energie handelt es sich um eine ökologische Bewertungsgrösse. Es gibt verschiedene Bewertungsgrößen zu Stoff- und Energiebilanzen. Ökologische Bewertungsmethoden laufen letzten Endes immer auf die Frage hinaus, von welchen Umweltauswirkungen der Mensch in welchem Masse bedroht ist.

Die Graue Energie ist primär eine Bewertungsmethode auf der Ressourcenseite. Direkt erfasst werden die nicht erneuerbaren Rohstoffe und die Primärenergieformen des elektrischen Stroms, die begrenzt verfügbar sind. Damit deckt die Graue Energie ein wichtiges Ziel für eine nachhaltige Entwicklung direkt ab: Der schonungsvolle Umgang mit nicht erneuerbaren und begrenzt verfügbaren Rohstoffen. Indirekt werden jedoch auch die Umweltauswirkungen aus der Nutzung dieser Ressourcen pauschal abgedeckt. Dazu gehören die fossilen Kohlendioxidemissionen, die wichtigsten heute bekannten Luftschadstoffe, die Auswirkungen der Kerntechnologie und der Wasserkraft.

Abb. 3

Vereinfachte Stoffbilanz von Polyethylen

Sämtliche Bestandteile der Rohstoffe gelangen letzten Endes quantitativ als Emissionen in die Umwelt



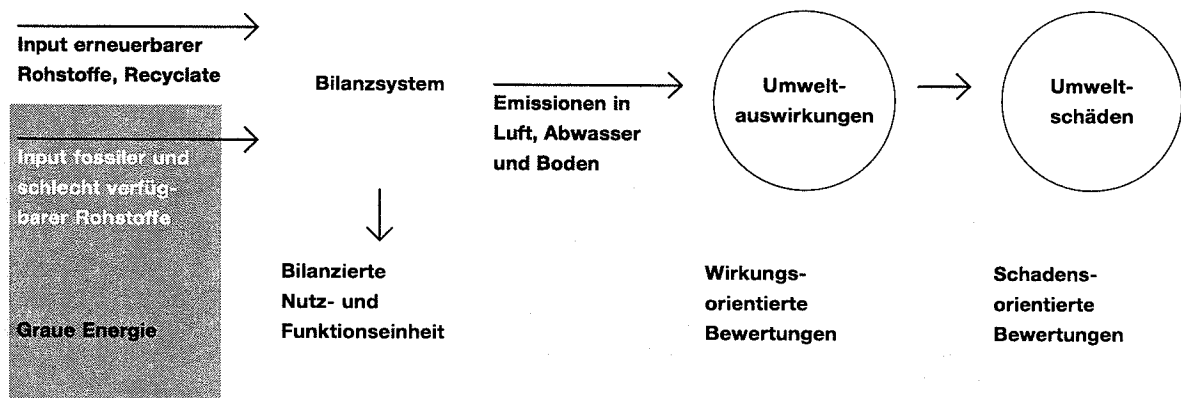
Auf einfache Weise lassen sich diese Zusammenhänge am Beispiel des Polyethylen-Stoffflusses illustrieren (Abb. 3). Für die Herstellung von 1 kg Polyethylen werden nahezu 2 kg nicht erneuerbare und begrenzt verfügbare Rohstoffe benötigt. Sie werden in Energieeinheiten direkt mit der Grauen Energie erfasst. Diesem Input steht ein gleich grosser Output an Emissionen vorwiegend in die Luft, in geringem Masse ins Abwasser und in Form von Rückständen gegenüber. Etwa die Hälfte des Outputs geschieht während der Herstellung, die andere durch die Verbrennung von Polyethylen.

Umstritten ist die Nichtberücksichtigung des Heizwertes von nachwachsenden Rohstoffen, im Baubereich v.a. des Holzes bei der Bilanzierung der Grauen Energie. Auf der einen Seite gehört die Nutzung des Holzes unter Erhaltung der Erneuerbarkeit zu den bedeutenden Zielen einer nachhaltigen Entwicklung. Andererseits wird Holz in Westkanada, in tropischen Regionen und in Russland nicht immer nachhaltig genutzt. Auch in Bezug auf die Verbrennung von Holz ist die Nichtberücksichtigung umstritten. Die Kohlendioxidemissionen werden in der Regel als treibhausneutral angesehen, jedoch können die Staubemissionen je nach Verbrennungstechnologie zu einer signifikanten Luftbelastung beitragen.

Alle anderen bekannten Bewertungsmethoden von Stoff- und Energiebilanzen bewerten anstelle der Inputseite (Rohstoffe) die Outputseite. In Abb. 4 sind wirkungs- und schadensorientierte Bewertungsmethoden schematisch dargestellt. Sie sind im naturwissenschaftlichen Sinne präziser. Sie setzen jedoch voraus, dass man sämtliche Emissionen eines Systems bilanzieren kann sowie deren Ausbreitung, Wirkungen und Schäden in der Umwelt kennt, quantifizieren und gewichten kann. Diese Voraussetzungen sind für eine praktische Anwendung insbesondere im Bausektor mit der Vielfalt von verschiedenen Materialien noch nicht gegeben.

Der Aufwand für wirkungsorientierte Ökobilanzen ist enorm gross. Repräsentative Daten vor allem im Bereich Abfälle oder nichtenergetisch bedingter Prozessemissionen (z. B. Abwasser) sind häufig nicht verfügbar oder streuen sehr breit. Schliesslich sind die Bewertungsfragen noch nicht zufriedenstellend gelöst. Die vielfältigen Ausbreitungs- und Wirkungsmechanismen einzelner Schadstoffe sind noch wenig bekannt und deren Bedeutung als Teile des gesamten Umweltbedrohungspotentials kaum abzuschätzen.

Abb. 4
Vereinfachte
Darstellung von
Bewertungs-
methoden für
Energie- und
Stoffbilanzen



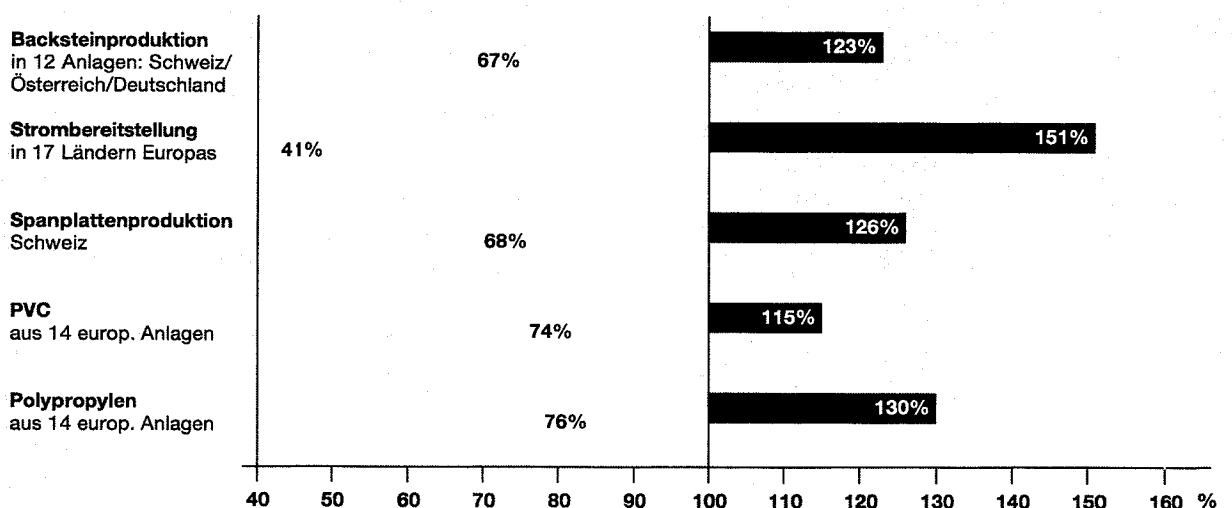
Bei der Grauen Energie entfallen diese spezifischen Bewertungsprobleme. Zuverlässige und repräsentative Daten über den Verbrauch an Energieträgern für Prozesse sind in weit grösserem Masse vorhanden, und das Verhältnis zwischen Berechnungsaufwand und Aussagekraft ist vergleichsweise günstig. Das ist vor dem Hintergrund der Vielzahl von Baustoffen nicht unbedeutend. Die Graue Energie bietet in der Baupraxis den Vorteil, dass sie sich in einer physikalischen Masseinheit angeben lässt, unter der sich der Praktiker etwas vorstellen kann. Sie lässt sich einfach und direkt in Beziehung zur Betriebsenergie von Gebäuden oder zum Energieverbrauch von Transportleistungen setzen. Mit etwas Übung und Kenntnis in Baustoffkunde kann die Graue Energie von Produkten verhältnismässig einfach auf Plausibilität überprüft werden.

Wie alle Bewertungsmethoden hat auch die Graue Energie ihre Grenzen. Die Umweltbelastung ausgesprochener Problemstoffe wie Schwermetalle, ozonschichtabbauende Stoffe oder Biozide wird mit der Grauen Energie nur unzureichend erfasst. Auch die Umweltauswirkungen der Lösemittel aus Bau-chemikalien, Lacken und Farben lassen sich durch die Graue Energie nicht direkt bewerten. Solche Systeme erfordern neben der Grauen Energie eine ergänzende Beurteilung nach den Vermeidungs- oder Minimierungsprinzipien. In wenigen Fällen braucht es eine individuelle Risikoabschätzung. Diese ergänzenden Beurteilungen sind im Abschnitt Anwendungshinweise (Kap. 9–11) näher beschrieben.

4. Stand der Technik

Der Stand der Technik ist ein massgebender Faktor für die Graue Energie. Ältere Anlagen brauchen für dasselbe Produkt oft mehr Energie als neuere Anlagen. Aber auch die Grösse der Anlage kann für den Energieverbrauch massgebend sein. In der Regel haben grössere Anlagen mehr ökonomischen Spielraum, um in rationellere Energietechniken zu investieren. Die Art und Weise, wie eine Produktionsanlage betrieben werden kann oder die Breite der Produktpalette, kann den Energieverbrauch ebenfalls beeinflussen. Schliesslich gibt es auch grosse geografische Unterschiede und unterschiedliche Produktionsmethoden, um dasselbe Endprodukt herzustellen oder dieselbe Leistung zu erbringen.

Abb. 5
Mittel- und
Extremwerte der
Grauen Energie
aus verschiedenen
Systemen



In Abb. 5 sind diese Unterschiede für einige Systeme exemplarisch dargestellt. Bei der Stromproduktion sind es vor allem die unterschiedlichen Produktionsmethoden (Kernkraft, Wasserkraft, konventionell thermische Herstellung), bei den Baustoffen sind es vorwiegend anlagebedingte Unterschiede. Bei der Anwendung von Grauenergiewerten muss man sich dieser Unterschiede bewusst sein.

Der Baupraktiker erwartet Durchschnittswerte von auf dem Schweizer Markt erhältlichen Baustoffen. Bei den im Datenteil aufgeführten Werten ist der Stand der Technik wenn immer möglich mit gewichteten Mittelwerten für den Baustoffmarkt Schweiz berücksichtigt. Das ist jedoch in vielen Fällen nicht möglich, weil die Daten dazu fehlen. Vor allem bei Produktionen die dezentral in vielen kleineren Anlagen stattfinden, wie beispielsweise Holzverarbeitungen oder der Kiesabbau, sind gewichtete Mittelwerte kaum verfügbar. Dasselbe gilt für Kunststoffverarbeitungen und Metalloberflächenbehandlungen. Beim Spritzgiessen beispielsweise können die Grauenergiewerte im selben Betrieb, je nach Grösse der Teile, Art des Kunststoffes oder Betrieb der Maschine zwischen 25 und 360 MJ/pro kg schwanken. Bei Produkten aus ost- oder südeuropäischen Anlagen sind wenig Daten verfügbar. Man muss davon ausgehen, dass die entsprechenden Baustoffe aus diesen Gebieten nicht nur wegen des Transports signifikant energieintensiver sind, als Produkte aus Mitteleuropa.

5. Systemgrenzen

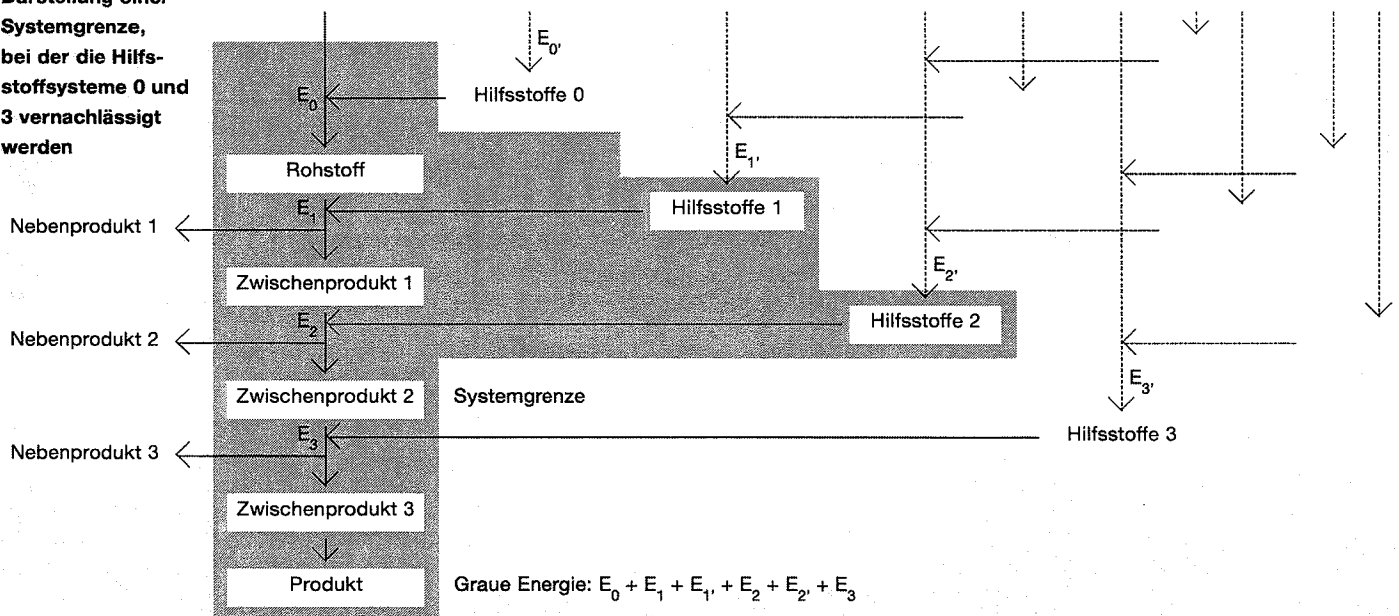
Es gibt keine richtigen oder falschen Werte für die Graue Energie oder für andere Parameter von Stoff- und Energiebilanzen. Es handelt sich immer um berechnete Werte aus einer mehr oder weniger grossen Anzahl von Prozessen in einem an sich offenen System. Jeder Wert ist ausgesprochen von der gewählten Systemgrenze abhängig. Die weit verbreitete Meinung, man könne bei einer Stoff- und Energiebilanz alles berücksichtigen, ist nicht korrekt.

Die meisten Werkstoffe lassen sich anhand einer Hauptprozesskette bis zum Rohstoffvorkommen in der Natur zurückverfolgen (vgl. auch Abb. 6). Bei diesen Prozessen werden immer eine mehr oder weniger grosse Anzahl Hilfsstoffe, Produktionsmittel, bauliche Anlagen bis hin zu administrativen Dienstleistungen und Arbeitskräften benötigt. Diese Hilfs- oder Subsysteme lassen sich natürlich wiederum anhand von Hauptprozessketten bis zum Rohstoffvorkommen in der Natur zurückverfolgen, wobei auch diese wiederum einer Anzahl von Subsystemen bedürfen. Irgendwo müssen die Systeme abgegrenzt werden. Damit sich der Aufwand für die Bilanzierung und die Datenbeschaffung in Grenzen hält, ist man im Allgemeinen bestrebt, die Systemgrenzen relativ eng zu ziehen.

Es gibt keine Normen, wie Systemgrenzen festzulegen sind. Auch die Internationale Normierungsorganisation ISO beschränkt sich auf Empfehlungen für die Systemabgrenzungen von Stoff- und Energiebilanzen. Die Autoren von Ökobilanzstudien müssen von Fall zu Fall entscheiden, welche Subsysteme relevant sind, und welche vernachlässigt werden können.

Abb. 6
Schematische Darstellung einer Systemgrenze, bei der die Hilfsstoffsysteme 0 und 3 vernachlässigt werden

Rohstoff-Abbau/-Anbau



Zu den im Datenteil aufgeführten Werten sind nur ein paar generelle Aussagen möglich. Alle Hauptprozessketten werden bis zum Rohstoffabbau zurückverfolgt. Die Hilfsstoffe sind nur soweit bilanziert, wie sie im Vergleich zur Masse des Hauptproduktes relevant sind. Normalerweise geht man von einer Relevanzgrenze von 1 Massen-% in Bezug auf das bilanzierte Produkt aus. Die baulichen Anlagen und die Produktionsmittel sind bei keinen Baustoffproduktionen berücksichtigt. Weder die Herstellung der Spanplattenpresse noch diejenige des Zementdrehrohrofens ist in der Grauen Energie der Spanplatten resp. des Zementes enthalten.

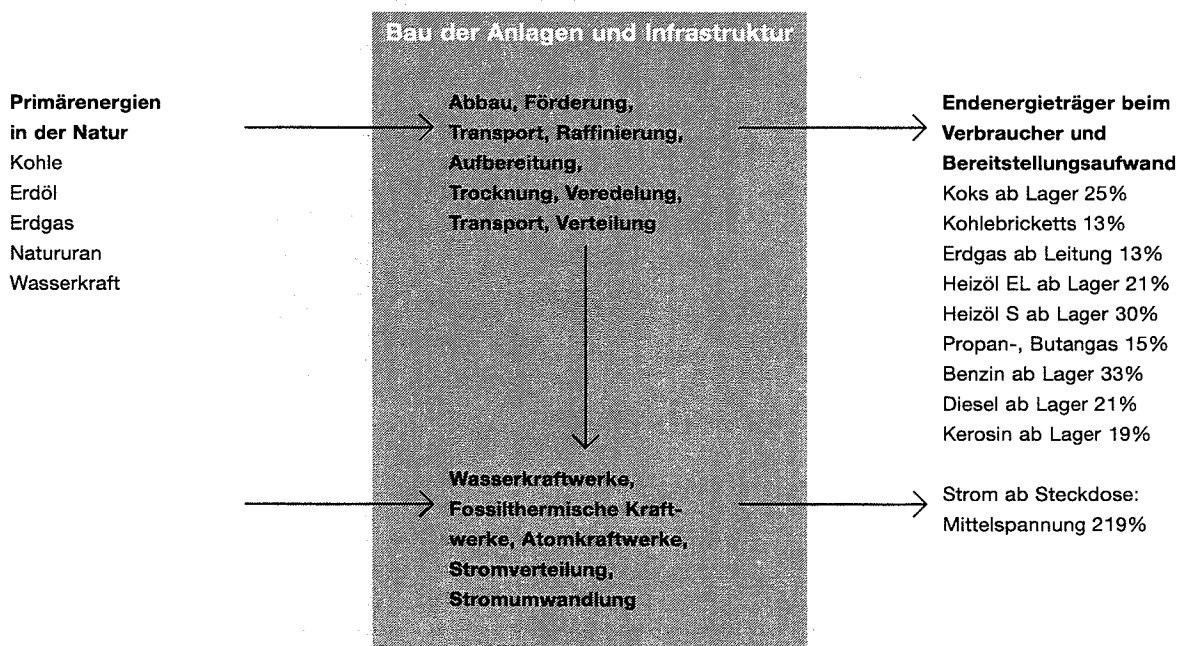
Anders ist es bei der Bereitstellung von Benzin, Heizöl, Strom und anderen Energieträgern. Für diese Systeme wurden der Bau der Staumauer, des Kraftwerkes, des Schaufelradbaggers oder des regionalen Tanklagers ebenfalls bilanziert. Auch in den berücksichtigten Transportleistungen, sind der Bau von Strassen, Tunnels, Brücken und die Herstellung der Fahrzeuge enthalten. Bei den Energiebereitstellungssystemen machen Produktionsmittel und Infrastruktur etwa 10% der Grauen Energie, bei den Transportleistungen je nach Transportmittel bis zu 50% aus. Damit werden diese beiden Bereiche gegenüber den Baubranchen leicht überbewertet. Angesichts der Bedeutung dieser Branchen in Bezug auf Umweltauswirkungen, ist diese Systemgrenze mehr oder weniger gerechtfertigt. Abweichungen zu diesen generellen Systembegrenzungen sind im Datenteil vermerkt.

6. Energiebereitstellung

Unter Energiebereitstellung versteht man sämtliche Prozesse vom Abbau der energetischen Rohstoffe bis zu den für den Verbraucher nutzbaren Endenergien an einem bestimmten Bereitstellungsort. Der Energiebereitstellung kommt im Rahmen von Stoff- und Energiebilanzen eine besondere Stellung zu. Die chemischen und elektrischen Energieformen sind die Antriebskräfte der Wirtschaft. Ohne sie läuft kein Prozess, kann kein Material hergestellt und transportiert und keine Dienstleistung erbracht werden.

In Abb. 7 ist das für die Graue Energie von Baustoffen im Datenteil verwendete Energiebereitstellungsmodell schematisch dargestellt. Es stammt aus einer umfassenden Studie über die «Ökoinventare von Energiesystemen», die an der ETH in Zürich ausgearbeitet wurde². Sie umfasst nicht nur die durchschnittlichen Transport- und Aufbereitungsprozesse der z. T. weltweit geförderten Energieträger. Sie berücksichtigt zudem den Bau von Anlagen wie Staudämme, Kraftwerke und Raffinerien, und die Verteilinfrastruktur wie Pipelines und Hochspannungsleitungen.

Abb. 7
Schematische Darstellung des Energiebereitstellungssystems für die Baustoffproduktion: Die Prozentzahlen beziehen sich auf den energetischen Aufwand für die Bereitstellung im Verhältnis zur nutzbaren Endenergie



² Ökoinventare für Energiesysteme; Gruppe Energie – Stoffe – und Umwelt
ETH Zürich und Sektion ganzheitliche Energiesysteme PSI Würenlingen;
Hrsg. Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW); 3. Auflage Juli 1996.

Die in Abb. 7 dargestellten Prozentzahlen für die Endenergieformen bezeichnen die zur Bereitstellung notwendigen Primärenergie im Verhältnis zu der in der entsprechenden Form nutzbaren Endenergie (100%). Die Zahlen beziehen sich alle auf die unteren Heizwerte bei den fossilen Energieträgern. Natururan ist mit der effektiv in Leichtwasserreaktoren nutzbaren Energie bewertet (theoretisch wäre eine bedeutend höhere Nutzung möglich). Die Primärenergie der Wasserkraft ist mit der, auf die Schaufelräder der Turbinen auftreffenden mechanischen Energie eingesetzt. Der Bereitstellungsort für die Endenergieformen bezieht sich auf eine durchschnittliche Distanz zum Endverbraucher (resp. Verteillager für den Endverbraucher) in Europa. Auch die Stromproduktion ist aus dem gewichteten Durchschnitt der Verhältnisse in 17 europäischen Ländern berechnet. Das entspricht dem Strom im europäischen Verbundnetz (UCPTE). Damit wird der Produktionsstandort Europa hervorgehoben und der Tatsache Rechnung getragen, dass die Schweiz ebenfalls am europäischen Verbundnetz angeschlossen ist. Für alle Baustoffdaten wurden diese europäischen Durchschnittswerte verwendet. Auf die Anwendung länderspezifischer Energiebereitstellungssysteme wurde verzichtet.

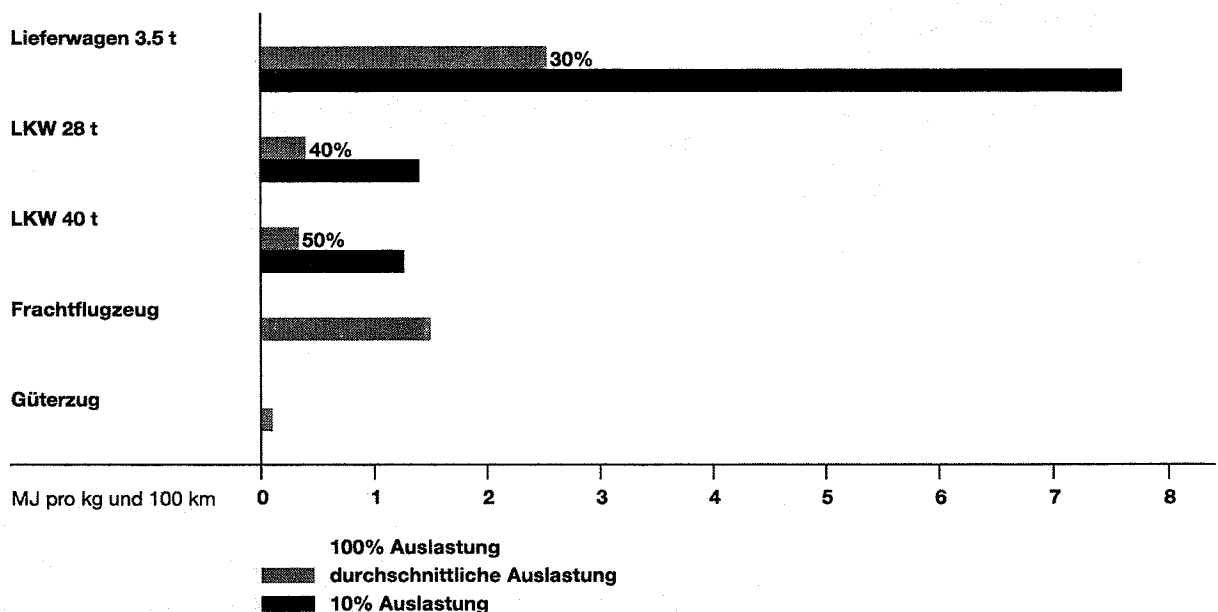
Der grösste Aufwand der Energiebereitstellung erfolgt in der Aufbereitung und Umwandlung (Raffinerien, Kraftwerke). Der Abbau, die Herstellung der Produktionsmittel sowie der Transport und Übertragungsverluste machen je nur wenige Prozent des Energiebereitstellungsaufwandes aus. Differenziertere Zahlen sind im Datenteil unter Energiebereitstellung dargestellt und kommentiert.

7. Transporte

Die Transporte sind von wenigen Ausnahmen abgesehen in der Grauen Energie enthalten. Sie berechnen sich aus allen Rohstoff-, Hilfsstoff- und Energieträgertransporten vom Abbaustandort bis zum letzten Verarbeitungsstandort. Der Energieverbrauch durch Transporte ist in erster Linie von der Distanz, der Art des Transportmittels und der Auslastung abhängig. Die Leistungen von Gütertransporten werden in der Regel auf eine Nutzlasteinheit und eine Distanzeinheit bezogen angegeben (z. B. tkm).

Je grösser ein Transportmittel desto geringer ist die auf die Nutzlasteinheit bezogene Graue Energie. Ein Lastwagen mit einem Leergewicht von 11 t und einer Nutzlast von 17 t kann energieeffizienter transportieren als ein Lieferwagen mit dem Leergewicht-Nutzlast-Verhältnis von 2.5 t zu 1 t. Die Abhängigkeit von der Distanz ist für ein bestimmtes Fahrzeug linear proportional. Die nutzlastergänzliche Transportenergie steigt überproportional zur gewichtsbezogenen Auslastung (vgl. Abb. 8). Da der Energieverbrauch zwischen Leerfahrt und Vollast eines 28-Tonnen-LKWs verhältnismässig gering ist, beträgt der nutzlasterbezogene Energieverbrauch bei 10% Auslastung etwa 10 Mal so viel wie bei 100% Auslastung. Bei Baustoffen mit geringer Dichte oder bei sehr sperrigen Bauteilen ist die gewichtsbezogene Auslastung gering.

Abb. 8
Graue Energie von Transportleistungen inklusive Herstellung und Unterhalt von Transportmitteln und Verkehrsinfrastruktur für europäische Verhältnisse in Abhängigkeit der Auslastung



Die Transporte der Energieträger sind in den Energiebereitstellungswerten berücksichtigt. Die Rohstoffe von Metallen, Kunststoffen, Papier und Karton werden im Durchschnitt über sehr grosse Distanzen transportiert. Für Holz und Holzwerkstoffe, für viele mineralische Massivbaustoffe sowie für sekundäre Rohstoffe (Recyclate) sind die Distanzen kürzer.

Der Transportanteil an der Grauen Energie von Baustoffen wird im Allgemeinen überschätzt. Die Anteile betragen selten über 10% an der gesamten Grauen Energie. Beim Aluminium beispielsweise stammen die Rohstoffe zur Hauptsache aus Australien, verschiedene Hilfsstoffe werden aus Japan, den USA und Schweden bezogen. Dennoch beträgt der Transportanteil weniger als 10%. Das hängt vor allem damit zusammen, dass die grossen Distanzen mit grossen und gut ausgelasteten Transportmitteln zurückgelegt werden. Wenn jedoch die Graue Energie für die Prozesse sehr gering ist, nimmt der Transportanteil zu. Beispielsweise kann die Transportenergie bei wenig verarbeiteten Holzwerkstoffen oder mineralischen Baustoffen aus Übersee die Prozessenergie bei Weitem übersteigen.

Auch die Transporte zwischen Produzent (Endverarbeiter) und Endverbraucher erfordern in der Regel weniger als 1 MJ/kg Produkt. Mit einem MJ Primärenergie lässt sich beispielsweise 1 kg Produkt mit einem 28 t LKW bei durchschnittlicher Auslastung knapp 300 km transportieren (vgl. Abb. 8). Wiederum eine Ausnahme bilden Baustoffe mit geringer Rohdichte oder sehr sperrige Produkte. Bei diesen Produkten kann der Transport zwischen Produzent und Baustelle einen beträchtlichen Anteil ausmachen. Im Allgemeinen sind die baustoffspezifischen Transporte in der Güterfeinverteilung noch wenig untersucht. Werte aus einer objektbezogenen Untersuchung finden sich im Datenteil.

Bei den Grauenenergiewerten im Datenteil dieser Publikation sind alle Transporte bis zur Auslieferung durch den schweizerischen Produzenten oder den Importeur in der Schweiz berücksichtigt. Für an verschiedenen Orten in Europa produzierte Baustoffe wird generell eine Transportleistung von 500 km Bahn und 100 km LKW 28 t angenommen (0.89 MJ/kg). Baustoffe, die aus bestimmten Ländern bezogen werden, sind individuell mit den entsprechenden Distanzen berechnet worden. Für Transporte von Zwischenprodukten in der Schweiz sind die Distanzschätzungen aufgrund der Anzahl Produzenten vorgenommen worden. In der Regel wurde mit einem Durchschnittswert von 0.18 MJ/kg (50 km LKW 28 t) gerechnet. Für Zement und Sand, Kies, Splitt, Schotter sowie Bruchstein wurden materialspezifische Transportdistanzen berücksichtigt (0.16 resp. 0.07 MJ/kg). Sämtliche Transporte beziehen sich auf europäische Durchschnittswerte und Durchschnittsauslastungen, die nicht baustoffspezifisch sind. Die Werte stammen aus einer umfangreichen Forschungsarbeit, bei der neben dem direkten Energieverbrauch der Transportmittel auch Herstellung und Unterhalt der Fahrzeuge und Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt sind³. Weitere Zahlen und Differenzierungen sind im Datenteil unter 17 Transporte aufgeführt.

3 SSP Umwelt; Ökoinventare Transporte; INFRAS Zürich, 1. Auflage, Dezember 1995.

Die meisten Werte zur Grauen Energie von Baustoffen sind auf eine Masseneinheit bezogen. Der Energieverbrauch für die Produktionsprozesse ist in erster Näherung linear zur Masse des produzierten Produktes. In der praktischen Anwendung ist die Masse jedoch wenig aussagekräftig. Bei der Planung von Gebäuden werden bauspezifische Funktionen miteinander verglichen. Man vergleicht beispielsweise verschiedene Rohrisolationsmaterialien pro Längeneinheit oder Konstruktionen pro Flächeneinheit. Die auf kg bezogenen Angaben im Datenteil sind demnach auf die zu vergleichen-den Funktionseinheiten umzurechnen.

Um die Gesamtbeurteilung zu vereinfachen empfiehlt es sich, möglichst gleichwertige Funktionen zu vergleichen. Als gleichwertig im Sinne einer gesamtheitlichen Betrachtung nach ökologischen Kriterien gelten folgende Faktoren:

- Es ist zweckmässig, möglichst nur Funktionen miteinander zu vergleichen, die eine gleichwertige Nutzungsdauer oder Gebrauchsdauer aufweisen. Ist dies nicht möglich, so muss die Graue Energie mit den entsprechenden Korrekturfaktoren auf eine gleiche Nutzungsdauer umgerechnet werden. Ein umfassendes Verzeichnis der Nutzungszeiten von Konstruktionen und Bauteilen in Abhängigkeit von der Beanspruchung wurde vom Amt für Bundesbauten anhand von Erfahrungswerten zusammengestellt⁴.
- Zu vergleichende Konstruktionen müssen dieselbe Wärmedämmleistung aufweisen. Bei unterschiedlichen k-Werten von Konstruktionen werden die Vorteile der Grauen Energie u. U. durch einen Mehraufwand an zukünftiger Betriebsenergie aufgehoben. Ein minimaler Wärmebedarf, resp. optimale Wärmedämmleistung hat in jedem Falle Priorität (vgl. auch Kap. 13. Vergleich von 4 Gebäuden).
- Auch beim Unterhaltsaufwand ist es zweckmässig, Bauteile mit etwa vergleichbarem, möglichst minimalem Unterhaltsaufwand zu wählen. Ein deutlich unterschiedlicher Unterhalt von verschiedenen Systemen ist bei der Berechnung der Grauen Energie mit zu berücksichtigen. In diesen Fällen müssen Annahmen über die Häufigkeit und Art des Aufwandes getroffen werden, die u. U. mit Unsicherheiten verbunden sind.
- Die Konstruktionsvarianten sind vorzugsweise so zu wählen, dass auch die Anforderungen an den Brandschutz, den Schallschutz, die Dampfdiffusion und andere bauphysikalische Grössen erfüllt sind.

19

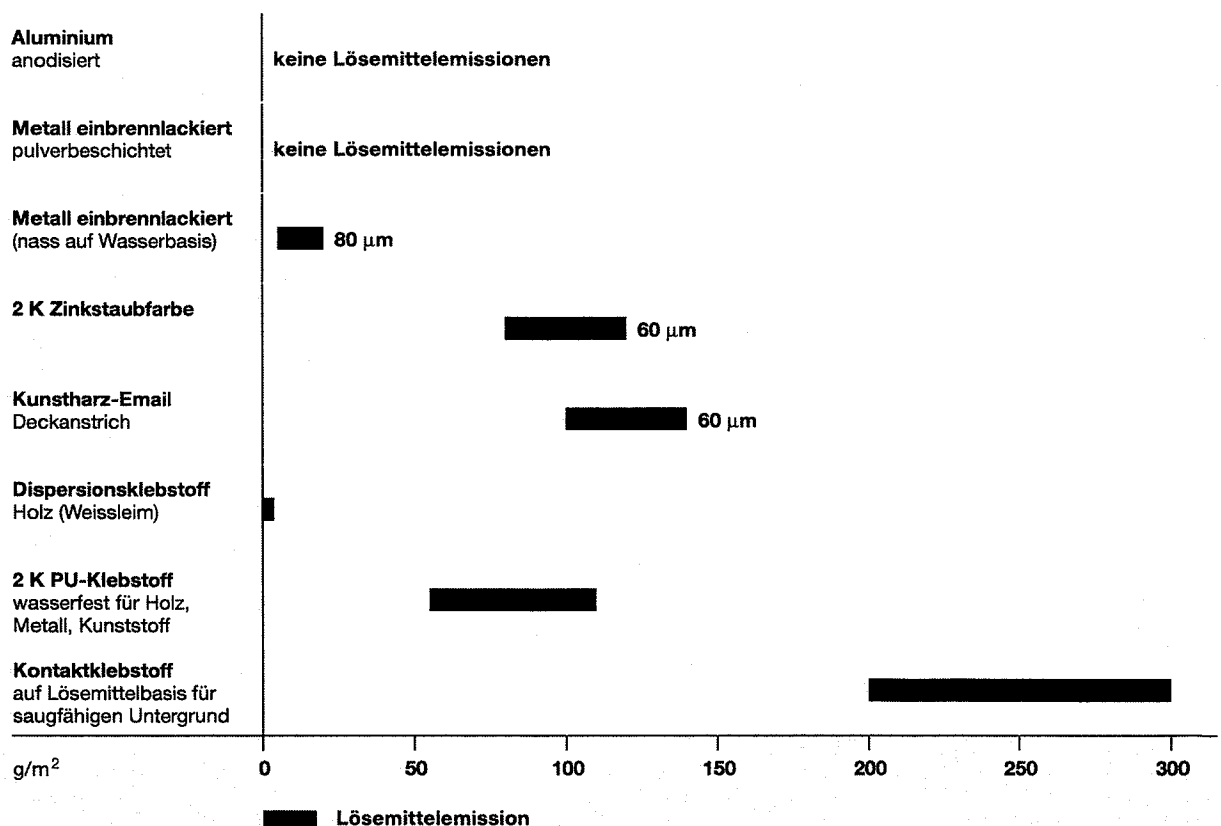
4 Amt für Bundesbauten; Nutzungszeiten von Gebäuden und Bauteilen; Bern 1994.

9. Verarbeitung auf der Baustelle

Diese Phase im Lebenszyklus von Baustoffen spielt bei Gesamtenergiebetrachtungen von Gebäuden eine untergeordnete Rolle. Aus den wenigen bisher durchgeführten Analysen ist der Beitrag von Baustofftransporten und Energiebedarf auf der Baustelle kleiner als 1 MJ/m² Gebäudenutzfläche und Jahr. Zu berücksichtigen sind die Verarbeitungsabfälle, die bei gewissen Konstruktionen in grösseren Mengen anfallen können, und somit den Materialbedarf deutlich erhöhen. Lufthygienisch relevant sind vor allem Lösemittlemissionen aus Lacken, Farben und Bauchemikalien. Diese Umweltauswirkungen sind mit der Bewertung anhand der Grauen Energie nur unvollständig abgedeckt.

Die Lösemittlemissionen bedürfen neben der Grauen Energie einer ergänzenden Beurteilung. Grundsätzlich gilt das Vermeidungsprinzip, das auch in den meisten Anwendungsbereichen des Hochbaus umgesetzt werden kann. Vor allem bei bituminösen Produkten, bei Metalloberflächenbehandlung oder bei anspruchsvollen Befestigungen mit Klebstoffen ist jedoch die Anwendung lösemittelhaltiger Produkte manchmal unvermeidbar. In Abb. 9 sind typische Lösemittlemissionen pro Flächeneinheit dargestellt.

Abb. 9
Typische Löse-
mittelemissionen
aus verschiedenen
Oberflächen-
behandlungen pro
Flächeneinheit



Bei gewissen Systemvergleichen können Lösemittel-emissionen und Graue Energie zu Beurteilungsschwierigkeiten führen. Wie soll ein System mit Lösemittelemissionen aber niedriger Grauer Energie im Vergleich zu einem mit erhöhter Graue Energie aber ohne Lösemittelemissionen beurteilt werden? Lösemittel sind flüchtige organische Kohlenwasserstoffe, die auch als nicht vollständig verbrannte Treib- und Brennstoffe aus Auspuffrohren und Kaminen entweichen. Mit Hilfe eines Bewertungsmodelles aus der Ökobilanzmethodik, kann die durch die Graue Energie durchschnittlich verursachte Luftbelastung mit den Lösemittelemissionen verglichen werden. Dabei gilt die grobe Faustregel, dass 1 MJ Graue Energie etwa 2 g Lösemittel-emissionen entspricht (vgl. Abb. 10). Im Datenteil sind unter den Metalloberflächenbehandlungen und bei den Anstrichsystemen Standardrezepturen mit Lösemittelgehalten angegeben.

21

Luftbelastungsäquivalente

1 Megajoule Energieträgermix

=

ca. 1–3 g Lösemittel

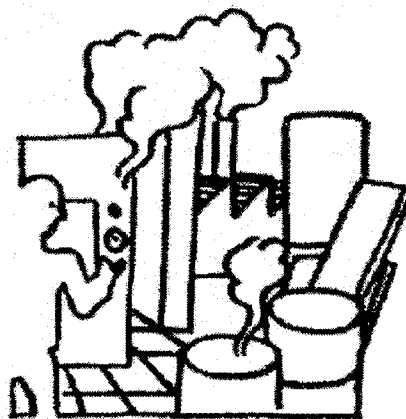
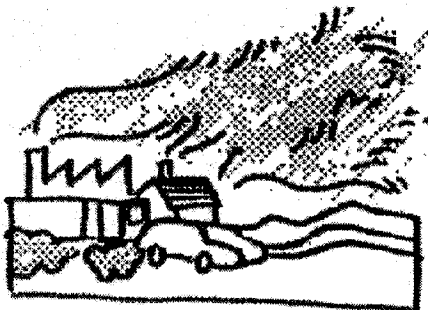


Abb. 10

Die durchschnittliche Luftbelastung aus 1 MJ Grauer Energie entspricht etwa der Belastung von 2 g Lösemittelemissionen. Eine grobe Faustregel für das einfache und schnelle Beurteilen von Funktionen, die bei der Verarbeitung mit Lösemittelemissionen verbunden sind

Die Luftbelastung aus einem Mix verschiedener, gebräuchlicher Brenn- und Treibstoffe, die in den verschiedensten Transportmitteln und Anlagen verbrannt werden, lässt sich anhand eines Bewertungsmodells mit Lösemitteln vergleichen.

Der entscheidende Faktor in der Beurteilung der Umweltbelastung (Graue Energie) während der Nutzung ist die Nutzungsdauer. Sie muss berücksichtigt werden, sofern sich Vergleichssysteme unterscheiden und sich diese Unterschiede quantifizieren lassen (vgl. Kap. 8).

Der Unterhaltsaufwand von Baumaterialien, insbesondere von Oberflächenbehandlungen ist mit geeigneten konstruktiven Massnahmen wie Witterungsschutz und Wahl des Anstrichsystems zu minimieren. Die Erneuerung der Anstriche und Verschleiss-schichten ist mit der zu erwartenden Häufigkeit bei der Berechnung der Grauen Energie zu berücksichtigen. Solche normalen und periodisch anfallenden Unterhaltsarbeiten fallen im Allgemeinen im Rahmen der Gesamtenergiebetrachtung eines Gebäudes nicht sehr ins Gewicht. Von grösserer Bedeutung sind Fassaden- und Dachrenovationen, sowie das Ersetzen von Bodenbelägen. Diese lassen sich während der Planungsarbeiten kaum mit der notwendigen Präzision voraussehen. Für diese grauenenergetischen Aufwendungen sind allenfalls Standard-nutzungszeiten für die einzelnen Bauteile einzusetzen (vgl. Kap. 8). Das ist in der Regel jedoch nur notwendig, wenn man Gebäude oder Gebäudevarianten miteinander vergleicht (vgl. Kap. 13).

Daneben können Baustoffe oder Bestandteile von Baustoffen während der Nutzungsphase durch Reinigung, Abnutzung oder passive physikalische Prozesse (Diffusion) in die Umwelt gelangen. Es geht dabei um ökologisch oder toxikologisch relevante Bestandteile, wie sie als Hilfsstoffe in Farben, Fugendichtungen und Spachtelmassen, als Formaldehyd in Holzwerkstoffen, als Weichmacher in gewissen Kunststoffprodukten oder als Additive in Teppichen und Bodenbelägen vorkommen können. Solche Problemstoffe erfordern neben der Grauen Energie eine ergänzende Beurteilung.

Über die An- oder Abwesenheit solcher Bestandteile in einem bestimmten Produkt gibt die SIA-Deklaration über die ökologischen Merkmale von Baustoffen Auskunft. Die Deklaration ist beim Hersteller des Produktes direkt zu verlangen. Die Interpretationshilfe zu den Deklarationen wird vom Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA) herausgegeben⁵. Umweltgefährdende Bestandteile und ihre möglichen Risiken in den verschiedenen Anwendungsbereichen sind darin ausführlich beschrieben und im Vergleich zur Grauen Energie bewertet.

5 sia Dokumentation D 093 – Deklaration ökologischer Merkmale von Bauprodukten, Zürich 1997. Bezug: sia, Postfach, 8039 Zürich, Tel. 01/283 15 60, Fax 01/201 63 35.

Der Planer und die Planerinnen können durch geeignete Konstruktionen gute Voraussetzungen schaffen, dass ein Rückbau und eine umweltgerechte Entsorgung möglich ist. Die Prioritäten einer umweltgerechten Entsorgung sind im Leitbild zur schweizerischen Abfallpolitik festgelegt:

- Baustoffe sind in erster Priorität wiederzuverwenden oder stofflich zu verwerten. Dadurch entfällt eine Umweltbelastung und primäre Rohstoffe sowie deren Abbau können eingespart werden.
- Nicht wiederverwertbare brennbare Abfälle unterstehen der Verbrennungspflicht, wobei möglichst wenig problematische Rückstände entstehen sollen.
- Nicht wiederverwertbare mineralische Bauabfälle sind zu deponieren. Diese Baustoffe sollten gemäss abfallrechtlichen Vorgaben möglichst endlagerfähige, erdkrustenähnliche Inertstoffqualität erreichen, so dass eine Auswaschung problematischer Stoffe ins Grundwasser ausgeschlossen werden kann.

Wichtigste Voraussetzung für eine umweltgerechte Entsorgung im Sinne dieser Leitlinien sind einfache und gut in sortenreine Materialien trennbare Konstruktionen. Diese erleichtern nicht nur den Unterhalt und die Renovation, sondern ermöglichen erst eine rationelle, qualitativ hinreichende Trennung der unterschiedlichen Materialien. Der Energieaufwand für den Rückbau eines Gebäudes und für den Abtransport des Bauschuttes in die Entsorgungs- oder Wiederaufbereitungsanlagen ist im Rahmen der gesamten Grauen Energie nicht relevant. Es wäre nicht sinnvoll, diesen Aufwand bereits während der Planung zu berücksichtigen, da er praktisch materialunabhängig ist. Ein geringer Unterhalt und eine lange Nutzungsdauer sind entscheidendere Faktoren.

Beton, Mauersteine, keramische Erzeugnisse, mineralische Putze und andere, vorwiegend mineralische Produkte sind als reiner Betonabbruch oder als Mischabbruch wiederverwertbar. Je nach Verunreinigung mit Fremdstoffen ist jedoch die Verwendung eingeschränkt. Gips und Gipswerkstoffe sind grundsätzlich auch als Ausgangsprodukte für die Gipsherstellung wiederverwertbar. Allerdings sind die Anforderungen an einen minimalen Fremdstoffanteil hoch und die Kosten des Recyclings wesentlich teurer als das Deponieren. Das Recycling der Metalle über den Altmetallhandel ist problemlos. Bei gewissen Produkten wie Mineralwolle, PVC-Bodenbeläge und andere Kunststoffe führt das Recycling über die Hersteller. Solche Lösungen sind heute in der Regel noch teurer als Verbrennen oder Deponieren.

Bei nicht wiederverwertbaren, brennbaren Baustoffen ist der Schadstoffgehalt ein wichtiges Merkmal zur vorsorglichen Vermeidung von Umweltbelastungen bei der Verbrennung (Rückstände in Schlacke und Filterasche). Produkte, die gemäss SIA-Deklaration bestimmte Grenzwerte unterschreiten, können problemlos eingesetzt werden. Die Umweltbelastungen durch Verbrennung von Baustoffen aus nicht erneuerbaren, brennbaren Rohstoffen ist pauschal mit der Grauen Energie abgedeckt.

Mineralische Stoffe, die nicht wiederverwertbar und nicht brennbar sind, sollten auf der Deponie innerhalb von zivilisatorischen Zeiträumen keine Emissionen ergeben. Inertstoffe im Sinne der SIA-Deklaration erfüllen diese Bedingung. Dazu gehören die meisten mineralischen Baustoffe ausser Gips und einige Verbundbaustoffe auf organisch-mineralischer Basis.

Die Begriffe, ihre Bedeutung und Gewichtung gegenüber der Grauen Energie sind in der SIA-Dokumentation D 093 beschrieben. In der SIA-Deklaration, die beim Hersteller angefordert werden kann, sind diese Entsorgungsmerkmale für ein bestimmtes Produkt angegeben.

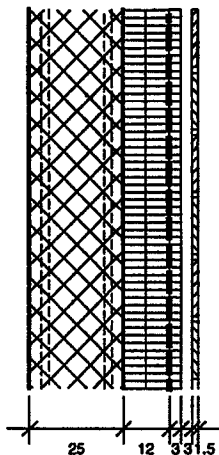
Die häufigste Anwendung der Methode der Grauen Energie sind Konstruktionsvergleiche in der Planungsphase. Sie lassen sich für die gängigsten Materialien mit Hilfe der Werte im Datenteil relativ einfach und effizient durchführen und bieten in der Regel eine Vielzahl von Optimierungsmöglichkeiten mit u. U. relativ grossem Einfluss auf den Ressourcenaufwand und die Umweltbelastung.

Als Beispiel stehen drei Wandkonstruktionen für eine Mehrzweckhalle zur Wahl. Variante A besteht aus einer innengedämmten Sichtbetonwand von 25 cm Stahlbeton. Als Variante B können sich die Planer auch einer vorgehängte Fassade aus Profilbauglas vorstellen, deren Tragstruktur ebenfalls durch Stahlbeton übernommen wird. Auch eine Doppelschale aus Sichtbackstein und Stahlbeton kommt in Frage (Variante C). Alle drei Varianten sind innen mit einer lasierten Holzschalung über einer Schalldämmschicht verkleidet.

Als erster Schritt sind sämtliche Materialstärken zu bestimmen und auf Massen pro Flächeneinheit umzurechnen. Dazu sind die entsprechenden Baumaterialien zu definieren. Bewehrungsgrad von Beton, Art der Mauersteine oder Rohdichten von Dämmstoffen können dabei von entscheidender Bedeutung sein. Selbst Details wie die Stahlqualität der Aufhängung können dabei eine Rolle spielen. Die Massenauszüge für die drei Varianten sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

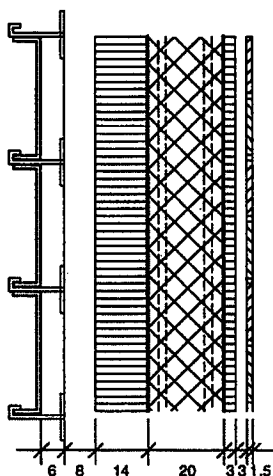
Als nächster Schritt gilt es die Vergleichbarkeit der drei Varianten aus ökologischer Sicht zu beurteilen. Wärmedämmtechnisch haben die vorgehängte Fassade und die Doppelschale die besseren k-Werte als die innengedämmte Variante A. Diese bietet für die vorgesehene Nutzung wiederum Vorteile, weil sich der Innenraum in kürzerer Zeit aufheizen lässt, so dass die drei Varianten in dieser Hinsicht als gleichwertig angesehen werden können. Bei der innengedämmten Variante ergeben sich bei den Deckenanschlüssen konstruktive Probleme, wenn diese Details wärmedämmtechnisch einwandfrei gelöst werden sollen. Schall- und Brandschutztechnisch sind alle drei Varianten gleichwertig. In Bezug auf Unterhalt der Fassaden könnte die Variante B mit dem Profilbauglas mehr Schmutzablagerungen aufnehmen. Der Fassadenunterhalt fällt jedoch ökologisch kaum ins Gewicht. Innenseitig ist der Unterhaltsaufwand identisch.

Mit Hilfe der Massenauszüge und den im Datenteil angegebenen Grauen Energiewerten für die vorgesehenen Materialien lässt sich die Graue Energie pro Flächeneinheit ohne Probleme berechnen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle dargestellt. Massgebend sind bei allen drei Varianten die Fassadenmaterialien und die Betonwände. Wärmedämmschichten und Innenverkleidungen fallen kaum ins Gewicht. Die innengedämmte Variante und die vorgehängte Profilitfassade sind rund 500 resp. 400 MJ pro m² weniger energieintensiv als die Doppelschalenkonstruktion. Das entspricht einer Energiemenge und den entsprechenden Umweltbelastungen von ca. 15 resp. 12 Liter Erdöl pro Quadratmeter, was auf das ganze Gebäude bezogen relevant ist. Bei der Optimierung hätte bei diesen Beispielen jedoch ein besserer k-Wert durch erhöhte Dämmung ökologisch absolute Priorität. Eine starke Wärmedämmung würde von der Grauen Energie her relativ wenig ausmachen und bei der Betriebsenergie erhebliche Einsparungen bringen. Eine ergänzende Beurteilung von Lösemittelemissionen beim Bau dieser drei Konstruktionen ist nicht erforderlich, wenn man davon ausgeht, dass alle Dämmstoffe und Verkleidungen mechanisch befestigt werden. Die Holzlasuren verursachen in der Regel keine Lösemittelemissionen.



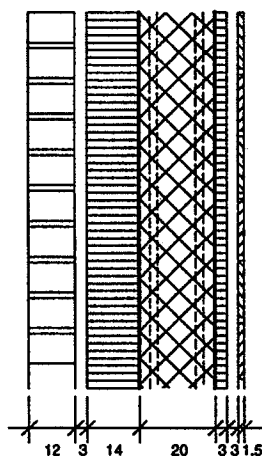
Variante A Sichtbeton innengedämmt

	kg/m ²	MJ/kg	MJ/m ²
Sichtbeton 0.8% Stahl CEM I 350 kg/m ³ 25 cm	585.00	1.14	667
Steinwolle 32 kg/m ³ 12 cm	3.84	15.70	60
Dampfsperre Polyethylen flammgeschützt	0.19	–	20
Steinwolleplatte 60 kg/m ³ 3 cm	1.80	15.70	28
Lattung 6/3 cm unbehandelt	1.00	1.60	2
Innere Verkleidung Holzlattung 1.5/15	6.50	2.10	14
Lasur	0.10	15.00	2
Total			793



Variante B Profilitglas vorgehängt

	kg/m ²	MJ/kg	MJ/m ²
Profilbauglas sekurisiert	19.00	12.80	243
Halterung CNS	0.20	105.00	21
Brettschichtholzträger 8/8	2.90	7.20	21
Steinwolle 32 kg/m ³ 14 cm	4.48	15.70	70
Beton 0.8% Stahl CEM I 350 kg/m ³ 20 cm	468.00	1.14	534
Steinwolleplatte 32 kg/m ³ 3 cm	0.96	15.70	15
Lattung 8/3 cm unbehandelt	1.00	1.60	2
Innere Verkleidung Holzlattung 1.5/15	6.50	2.10	14
Lasur	0.10	15.00	2
Total			922



Variante C Sichtbackstein-Vormauer

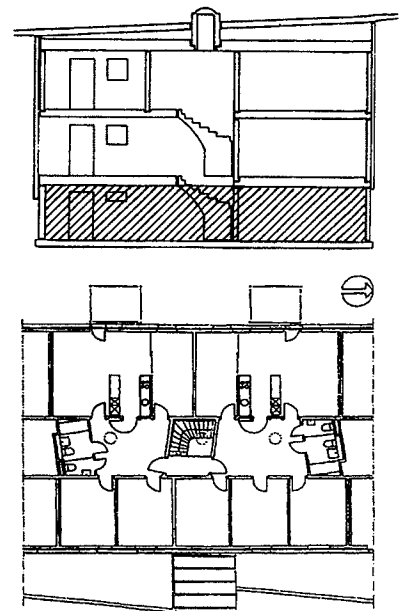
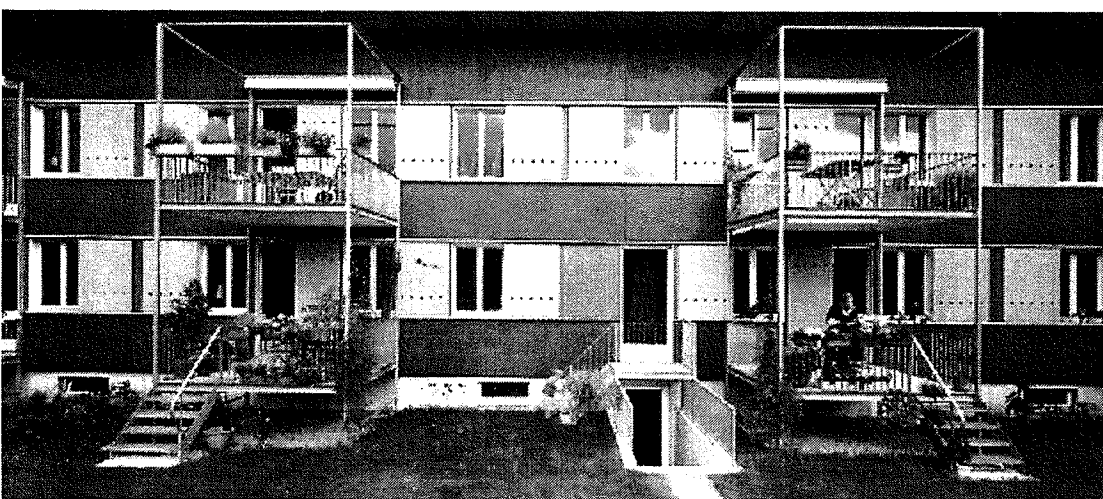
	kg/m ²	MJ/kg	MJ/m ²
Sichtbackstein 12 cm	216.00	3.08	665
Steinwolle 32 kg/m ³ 14 cm	4.48	15.70	70
Beton 0.8% Stahl CEM I 350 kg/m ³ 20 cm	469.00	1.14	535
Steinwolleplatte 32 kg/m ³ 3 cm	0.96	15.70	15
Lattung 8/3 cm unbehandelt	1.00	1.60	2
Innere Verkleidung Holzlattung 1.5/15	6.50	2.10	14
Lasur	0.10	15.00	2
Total			1303

13. Vergleich von vier Gebäuden

Die Graue Energie lässt sich ohne Weiteres auch auf ganze Gebäude anwenden. Dies gibt insbesondere für die frühe Planungsphase wichtige Hinweise auf bauökologisch relevante Entscheide. Anhand von vier bestehenden, relativ willkürlich ausgewählten Wohnsiedlungen, die sich bezüglich Architektur, Konstruktion und Materialkonzept erheblich unterscheiden, wurden sämtliche Baustoffe identifiziert und nach Massen bilanziert. Aus solchen Arbeiten

lassen sich einige Erkenntnisse über die Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Materialbilanz, Gebäudekennzahlen und Betriebsenergie ableiten. Die in Bezug auf die Fragestellungen wichtigsten Merkmale und Kennzahlen der vier Gebäude sind zusammen mit Ansicht, Schnitt und Grundriss in den Abb. 11–14 dargestellt und im Folgenden kurz beschrieben.

Abb. 11
Siedlung
Niederholzboden
in Riehen



Das Niedrigenergiehaus

Die Wohnsiedlung Niederholzboden in Riehen bei Basel (Abb. 11) ist von der Metron AG als Niedrigenergiehaus in ökologischer Bauweise konzipiert worden. Wärmedämmung, Pufferzonen und eine kontrollierte mechanische Bedarfslüftung ergeben einen Heizenergiebedarf von nur etwa zwei Litern Heizöl pro Quadratmeter Energiebezugsfläche und Jahr. Die 200 Meter lange, zweigeschossige Gebäudezeile ist relativ kompakt, das Verhältnis von Aussenfläche zu Gebäudevolumen relativ klein. Der Anteil des unbeheizten Untergeschosses am gesamten Gebäudevolumen ist im Vergleich zu den anderen Objekten gross. Mit 24% ist der Anteil der Fensterflächen an den Aussenwandflächen für ein Niedrigenergiehaus gering. Besonderes Merkmal ist die bunt gestrichene Fassade aus einer vorgehängten Dreischichtplatte. Fenster und Kaltdach sind ebenfalls Holzkonstruktionen. Untergeschoss und Decken sind aus Beton, Aussen- und Innenwände vorwiegend aus Kalksandstein.

Kennzahlen

Gebäudehüllenfläche pro Gebäudevolumen	0.35 m ² /m ³
Fensterflächen/Aussenflächen	24%
Gebäudevolumen pro Energiebezugsfläche	4.7 m ³ /m ²
Heizenergiebedarf Q _h	114 MJ/m ² a
Primärenergiebedarf Heizung	145 MJ/m ² a
Baustoffe pro Energiebezugsfläche	1883 kg/m ²
Graue Energie pro Energiebezugsfläche	78 MJ/m ² a

Materialkonzept

UG und Decken aus Beton, Aussenwände aus KS mit Glaswolle isoliert und gestrichenen Dreischichtplatten vorgehängt, Holzfenster, Kaltdach, Innenwände KS mit Weissputz/ Gipskarton, einfacher Innenausbau

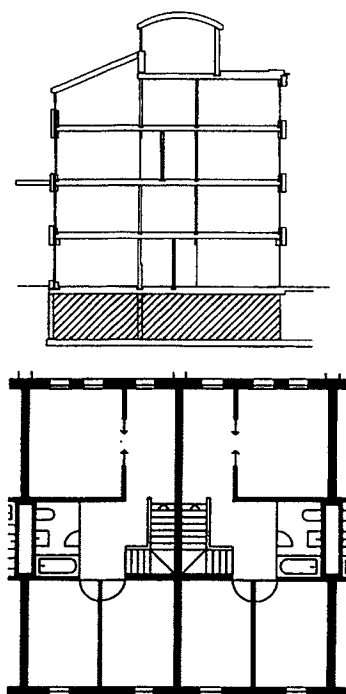
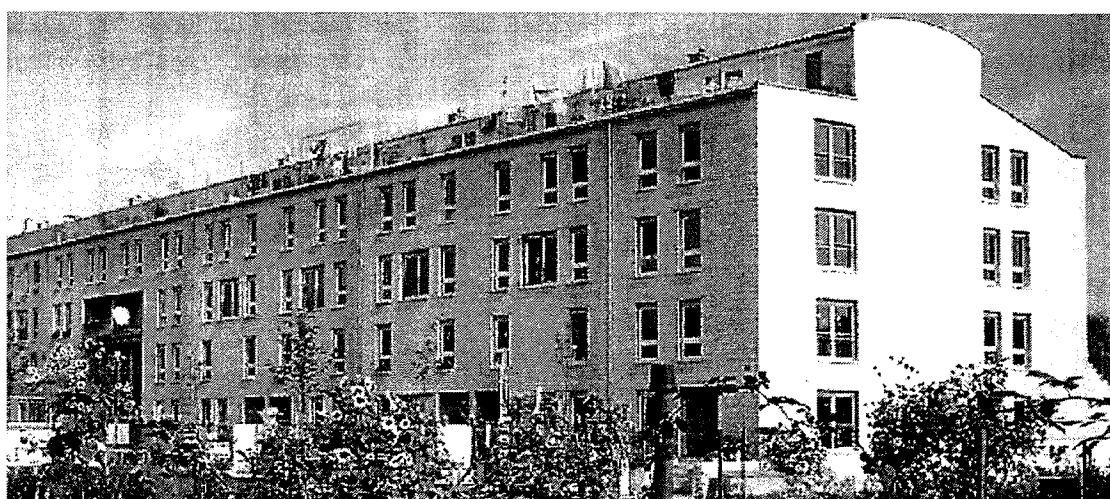


Abb. 12
Wohnüberbauung
Sagi-Hegi in
Winterthur



Kennzahlen

Gebäudehüllenfläche pro Gebäudevolumen	0.42 m ² /m ³
Fensterflächen/Aussenfläche	26%
Gebäudevolumen pro Energiebezugfläche	3.5 m ³ /m ²
Heizenergiebedarf Q _h	175 MJ/m ² a
Primärenergiebedarf Heizung	220 MJ/m ² a
Baustoffe pro Energiebezugfläche	1425 kg/m ²
Graue Energie pro Energiebezugfläche	60 MJ/m ² a

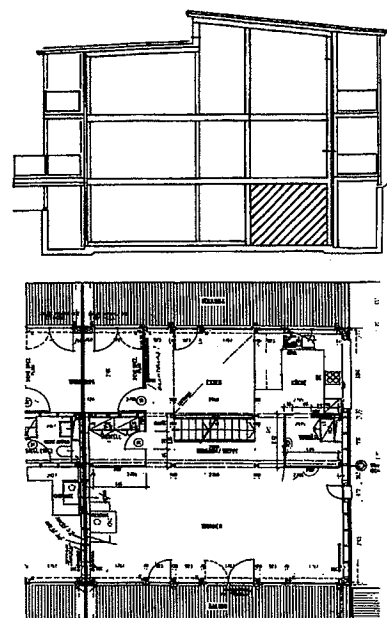
Materialkonzept

UG und Decken aus Beton, Aussenwände doppelschalig KS mit Glaswolle isoliert, Holzkonstruktion Dach gewölbt/schräg, Holzfenster, Innenwände KS, einfacher Innenausbau

Kalksandsteindoppelschale über vier Geschosse

Die Wohnsiedlung Sagi-Hegi in Winterthur (Abb. 12) vom Architekten Fritz Schmocker wird äusserlich durch das Sichtkalksandsteinmauerwerk geprägt und gilt als günstiger Wohnungsbau. Der Heizenergiebedarf liegt unter dem Sia-Grenzwert und wird hauptsächlich durch gute Dämmleistungen der Konstruktionen erreicht, ist jedoch deutlich höher als in Niedrigenergiehäusern. Das Gebäude mit dem Dachaufbau für die Attikawohnungen ist relativ kompakt. Der Anteil des unbeheizten Kellers ist in diesem viergeschossigen Gebäude relativ gering. Der Fensteranteil an der zweischaligen, mit Mineralwolle gedämmten Aussenfassade ist mit 26% nicht besonders gross. Untergeschoss, Treppen und Decken bestehen aus Beton, die Innenwände vorwiegend aus Kalksandstein. Die Fensterrahmen sowie die schrägen und gewölbten Dachkonstruktionen sind aus Holz. Der Innenausbau ist einfach.

Abb. 13
Reiheneinfamilien-
häuser in Illnau/
Effretikon



Holz auch im Untergeschoss

Konsequenter Holzbau prägt die Reiheneinfamilienhäuser von S. Saladin in Illnau-Effretikon (Abb. 13). Decken, Aussen- und Innenwände sind vom Untergeschoss bis zum Dach aus vorfabrizierten, mit Zellulosefasern gedämmten Holzelementen. Die Reihen zu drei Einheiten stehen in einer Betonwanne. Die südorientierten Räume im Untergeschoss werden als beheizte Wohnräume genutzt. Dadurch ist der unbeheizte Kelleranteil verhältnismässig gering. Als Reiheneinfamilienhäuser sind die Baukörper naturgemäss wenig kompakt, das Verhältnis von Gebäudehüllenfläche zu Gebäudevolumen ist im Vergleich zu den Mehrfamilienwohnungsbauten gross. Mit 165 MJ Heizenergiebedarf pro Quadratmeter und Jahr kann die Siedlung nicht als Niedrigenergiehaus bezeichnet werden. Der Fensterflächenanteil von 47% an der Aussenwandfläche ist hoch. Durch die grosszügigen Grundrisse ist der Innenausbau teil wenig aufwendig und einfach.

Kennzahlen

Gebäudehüllenfläche pro Gebäudevolumen	0.53 m ² /m ³
Fensterflächen/Aussenfläche	47%
Gebäudevolumen pro Energiebezugfläche	3.3 m ³ /m ²
Heizenergiebedarf Q _h	168 MJ/m ² a
Primärenergiebedarf Heizung	210 MJ/m ² a
Baustoffe pro Energiebezugfläche	938 kg/m ²
Graue Energie pro Energiebezugfläche	90 MJ/m ² a

Materialkonzept

Holzelementkonstruktion mit Zellulosefasern inkl. UG, in Betonwanne, Kaldach in Holzkonstruktion schräg, Holzfenster, Innenwände Holzelemente/Gipsfaserplatten, einfacher Innenausbau

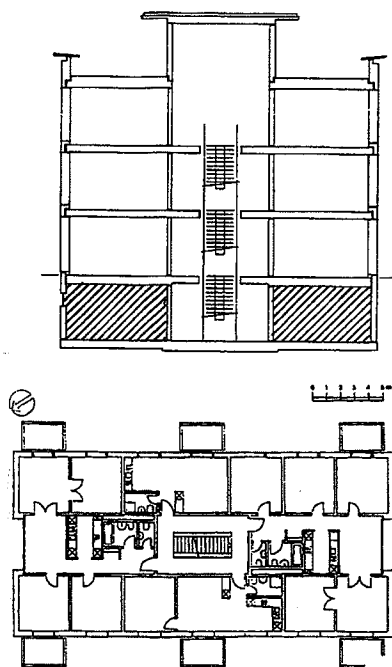


Abb. 14
Wohnüberbauung
Hausäcker in
Winterthur



Kennzahlen

Gebäudehüllenfläche pro Gebäudevolumen	0.42 m ² /m ³
Fensterflächen/Aussenfläche	31%
Gebäudevolumen pro Energiebezugsfläche	3.7 m ³ /m ²
Heizenergiebedarf Q _h	130 MJ/m ² a
Primärenergiebedarf Heizung	165 MJ/m ² a
Baustoffe pro Energiebezugsfläche	1790 kg/m ²
Graue Energie pro Energiebezugsfläche	107 MJ/m ²

Materialkonzept

Decken und UG aus Beton, Aussenwände in Porenbeton verputzt, Konventionelles Flachdach, Holz/Aluminiumfenster, Innenwände vorwiegend Beton verputzt, einfacher Innenausbau

Poren und Lüftung

Die Wohnüberbauung Hausäcker in Winterthur (Abb. 14) des Teams des Architekten J. Mantel ist ein dreigeschossiger Massivbau aus Porenbeton mit mineralischem Putz. Durch die mechanische Bedarfs-
lüftung wird ein relativ niedriger Heizenergiebedarf berechnet. Das Objekt kann als Niedrigenergiehaus bezeichnet werden. Trotz des Dachaufbaus über der zentralen inneren Erschliessung ist das Gebäudehüllenfläche-Volumen-Verhältnis relativ hoch. Der unbeheizte Kelleranteil ist für ein dreigeschossiges Gebäude normal. Die Holz/Metallfenster machen 31% der Aussenwandfläche aus. Die Decken und das Untergeschoss sowie ein grosser Teil der Innenwände sind aus Beton.

Bezugsgrösse

Da die vier Illustrationsbeispiele völlig unterschiedliche Volumina und Nutzungsflächen aufweisen, haben die absoluten Grauenenergiewerte keine Aussagekraft. Die Ergebnisse müssen auf eine einheitliche physikalische Bezugsgrösse umgerechnet werden. Als Einheiten kommen Volumina oder Flächen in Frage. In den vorliegenden Fällen wurde die Energiebezugsfläche als Bezugsgrösse gewählt. Damit schreibt man den unbeheizten Kellerräumen keinen Nutzen zu. Gebäude mit hohen Anteilen an unbeheizten Nebenräumen weisen dadurch materialunabhängig grössere Grauenenergiewerte auf. Auch hohe Geschosse vergrössern die auf die Energiebezugsfläche bezogene Graue Energie. Damit die Graue Energie mit der Betriebsenergie verglichen werden kann, muss auch der Zeitfaktor normiert werden. Die beim Bau des Gebäudes investierte Graue Energie wird über bestimmte Zeiträume abgeschrieben. Jedem Bauteil wurde je nach Material eine definierte Lebensdauer zugewiesen. Die massiven Tragkonstruktionen werden beispielsweise über 60 Jahre amortisiert, Parkettversiegelungen und andere Anstrichstoffe werden rechnerisch nach 8 bis 15 Jahren erneuert. Die Holzfenster haben kalkulatorisch eine Lebensdauer von 25, Holz/Metallfenster eine solche von 40 Jahren. Damit trägt man der unterschiedlichen Lebensdauer bzw. dem Unterhalt in grossem Masse Rechnung. Die Leichtbauweise hat keine methodisch bedingten Vorteile gegenüber massiven Konstruktionen. Für die vier Gebäude wurden die vom Amt für Bundesbauten erarbeiteten Nutzungszeiten von Gebäudeteilen verwendet (vgl. Kap. 8).

Systemgrenzen

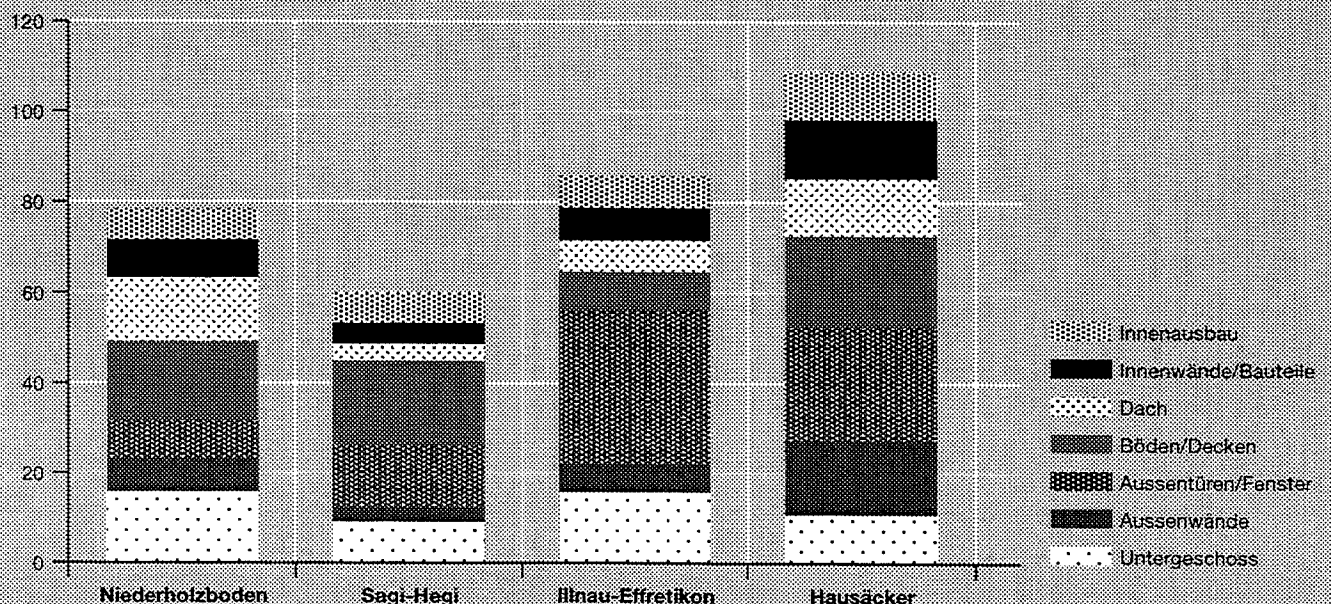
Aus pragmatischen Gründen und um die Interpretierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, mussten diverse Vernachlässigungen und Vereinfachungen vorgenommen werden. Nicht inbegriffen sind die Materialtransporte vom Hersteller zur Baustelle, der Energiebedarf für den Aushub und andere Baustellenarbeiten. Dieser energetische Aufwand wird im Allgemeinen überschätzt. Aufgrund von anderen Untersuchungen darf man davon ausgehen, dass dieser Energieaufwand weniger als 1% der Gesamtenergie beträgt (vgl. Kap. 14). Auch die Materialien für die Haustechnik (Elektro, Sanitär, Heizung) sowie die Kücheneinbauten wurden nicht berücksichtigt, da zuverlässige Grauenenergiewerte bislang nicht verfügbar sind. Die Haustechnikinstallationen würden vermutlich in allen Gebäuden ca. 5–10% der Grauen Energie ausmachen, bei mechanischer Bedarfs-
lüftung mit Erdregistern kann der Anteil auch etwas höher liegen. Ein durchschnittlicher Kücheneinbau ohne elektrische Apparate erfordert etwa 20'000 MJ in der Herstellung. Auf 20 Jahre amortisiert und auf eine Energiebezugsfläche von 100 m² bezogen ergibt diese einen Beitrag von 10 MJ pro m² und Jahr, bei kleineren Wohnungen entsprechend mehr. Relativ energieintensiv sind gemäss ausländischen Untersuchungen Garagen, Balkone und andere Aussenanlagen, die je nach Objekt bis zu einem Viertel zur Grauen Energie beitragen. Um den Einfluss von Material und Gebäudeform besser interpretieren zu können, wurden sämtliche Aussenanlagen inklusive Balkone bei den vier Illustrationsbeispielen nicht berücksichtigt. Würden alle erwähnten Vernachlässigungen bei diesen vier Gebäuden berücksichtigt, ergäbe sich eine Erhöhung der Grauen Energie um ca. 50 bis 70%.

Die Materialfrage ist relevant

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit sind in Abb. 15 (Graue Energie) und als Summe der Primärenergie von Heizung und Materialherstellung in Abb. 16 dargestellt. Der Heizenergiebedarf wurde für alle Gebäude anhand einer konventionellen Feuerung auf Primärenergie mit denselben Bereitstellungsanteilen und Verteilungsverlusten berechnet. Die Resultate lassen sich als Überlagerung zweier Hauptfaktoren interpretieren. Grösse und Gebäudeform ist der eine, Material und Konstruktion der andere massgebende Faktor. Das grosse, viergeschossige, relativ kompakte Gebäude der Wohnüberbauung Sagi-Hegi weist die geringste Graue Energie pro Quadratmeter Energiebezugsfläche auf. Insbesondere die Anteile von Untergeschoss und Dach sind um so geringer je mehr Geschosse ein Gebäude aufweist. Das Reiheneinfamilienhaus in Illnau-Effretikon weist gegenüber Sagi-Hegi ein deutlich grösseres Oberflächen-Volumen-Verhältnis auf. Die an sich grauenenergetisch günstige Leichtbauweise vermag in diesem Falle die ungünstige Gebäudegrösse und Kompaktheit nicht aufzuwiegen. Bei der Wohnüberbauung Hausacker

ist wiederum der Faktor Material dominanter als die relativ günstige Gebäudegrösse und Kompaktheit. Die relativ energieintensiven Porenbetonsteine, die Holz/Metallfenster, sowie die Innenwände und -bauteile aus Beton erhöhen die Graue Energie signifikant. Interessant ist auch der Fensteranteil. Die grossen Fensterflächen bei den Reiheneinfamilienhäusern in Illnau machen mehr als ein Drittel der Grauen Energie aus. Einen relativ bescheidenen Einfluss hat der Innenausbau, der trotz wesentlich kürzerer Lebensdauer höchstens 10% der Grauen Energie ausmacht. Eine Mittelstellung nimmt die Siedlung Niederholzboden in Riehen ein. Der grosse Untergeschossanteil wird durch eine grauenergie-tisch günstige Materialwahl teilweise aufgehoben.

Abb. 15
Graue Energie pro Quadratmeter
Energiebezugsfläche und Jahr nach
Gebäudeteilen ohne Aussenanlagen,
Balkone, Haustechnik und Baustellen-
energie unter Berücksichtigung ver-
schiedener Nutzungszeiten

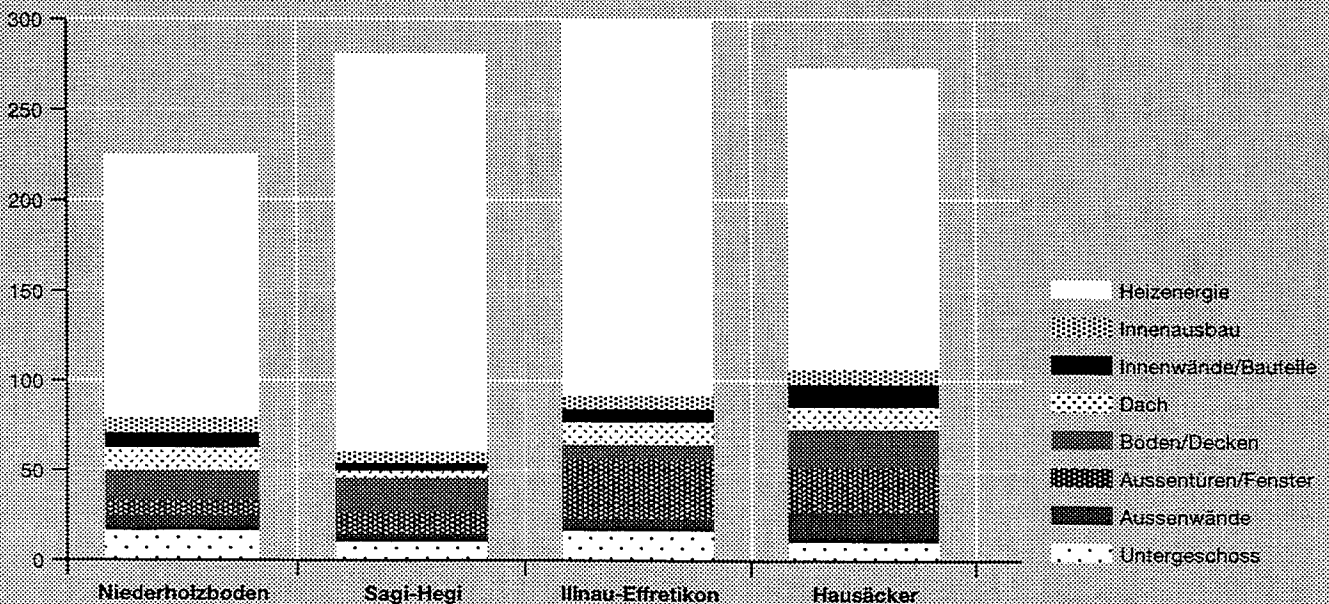


Fazit

Es ist nicht möglich, aufgrund der vier Beispiele allgemein gültige Schlussfolgerungen zu ziehen. Dennoch lassen sich erste interessante, und insbesondere für die Planungsphase wichtige Erkenntnisse ableiten. Der Heizenergiebedarf ist nach wie vor auch bei Niedrigenergiebauten ein wichtiger Faktor für die ökologische Gebäudeplanung (vgl. Abb. 16). Allerdings kommt der Grauen Energie mit ca. 100 bis 150 MJ pro Quadratmeter und Jahr, wenn man die, in diesen Beispielen vernachlässigten Anteile mitberücksichtigt, eine praktisch gleichwertige Bedeutung zu. Gebäudegrösse, Kompaktheit und die Anteile der nicht beheizten Räume sowie der Aufwand für die Aussenanlagen sind massgebende Faktoren, die bereits in einer frühen Planungsphase vor der Materialisierung durch den Planer beeinflusst werden können. Die wichtigsten Kennzahlen sind die Verhältnisse von Aussenhüllenflächen zu Gebäudevolumen und von Gebäudevolumen zu Energiebezugsflächen. Mit der Material- und Konstruktionswahl lässt sich die Gesamtenergie zusätzlich beeinflussen. Das gilt grundsätzlich sowohl für kurzlebige wie auch für die Bauteile mit längeren Nutzungszeiten.

Ein wichtiger Unterschied zwischen Grauer Energie und Betriebsenergie wird oft übersehen. Über die Graue Energie eines Gebäudes entscheidet der Architekt während Planung und Bau definitiv und endgültig, während die Betriebsenergie durch die Nutzung oder durch spätere Sanierungen noch beeinflusst werden kann. Mit der Grauen Energie hat der Planer, Architekt und Bauherr die alleinige Verantwortung für eine Energiemenge, die je nach Gebäude derjenigen von 40 bis 60 Jahren Betriebsenergie entspricht.

Abb. 16
Primärenergie aus konventioneller Heizung (Heizenergie) und Materialherstellung (Graue Energie) pro Quadratmeter Energiebezugsfläche und Jahr nach Gebäudeteilen



Es sind erst wenige Daten zur Grauen Energie von Gebäuden verfügbar und die wenigen Daten, die in der Literatur beschrieben sind, können nur sehr beschränkt miteinander verglichen werden. In Tab. 1 ist die Gesamtenergie von drei Berliner Wohnhäusern pro Quadratmeter Energiebezugsfläche dargestellt. Die Betriebsenergie (Heizenergie und elektrischer Strom) machen bei allen Gebäuden über 80% der Gesamtenergie aus. Allerdings wurde in dieser Studie eine Nutzungsdauer der Tragkonstruktion und der Gebäudehülle von 80 bis 100 Jahren angenommen, was verglichen mit ökonomischen Amortisationsraten oder den kalkulatorischen Nutzungszeiten, wie sie das Amt für Bundesbauten benutzt, ausserordentlich hoch ist. Die zweite Erkenntnis aus diesen Studien ist die Tatsache, dass Bau und Transport sowie Rückbau und Entsorgung relativ unbedeutend sind. Der Trinkwasserbedarf als mengenmässig weitaus grösster Stofffluss, hat in Form von Grauer Energie (Förderung, Aufbereitung und Verteilung) keine Bedeutung.

Tab. 1
Gesamtenergie am
Beispiel von drei
verschiedenen
Berliner Wohn-
häusern in MJ pro
m² und Jahr ⁶

	Gebäude A		Gebäude B		Gebäude C	
	[MJ/m² a]	[%]	[MJ/m² a]	[%]	[MJ/m² a]	[%]
Graue Energie	71	6.23	43	6.93	49	12.54
Bau und Transport	3	0.22	3	0.42	6	1.63
Heizenergie	876	77.28	397	64.48	183	46.40
Elektrische Energie	180	15.85	170	27.59	152	38.51
Wasserversorgung	3	0.26	2	0.38	2	0.59
Demontage und Recycling	2	0.15	1	0.19	1	0.32
Total	1133	100	615	100	394	100

⁶ Geiger, B., Fleissner, Th.; Stoffliche und energetische Lebenszyklusanalysen von Wohngebäuden ; VDI Berichte 1328; Düsseldorf, 1997.

In Tab. 2 sind die Anteile verschiedener Gebäudeteile an der gesamten Grauen Energie von 4 verschiedenen Gebäudetypen dargestellt. Bei den Konstruktionen ist jeweils der ganze Wand- resp. Decken/Bodenaufbau berücksichtigt. Die Prozentangaben beziehen sich auf absolute Werte ohne Abschreibungen anhand unterschiedlicher Nutzungszeiten. Sie dürfen nur als grobe Schätzwerte betrachtet werden. Die Tragkonstruktionen und die Aussenhülle machen in der Regel über 80% der Grauen Energie aus. Im Vergleich zu Volumen resp. Fläche haben Fundament und Keller sowie die Flachdächer bei den Gebäudetypen II, III, IV grosse Anteile. Diese reduzieren sich mit zunehmender Anzahl Geschosse und zunehmender Kompaktheit. Am Beispiel des Einfamilienhauses (Gebäudetyp I) zeigt sich, dass offensichtlich auch Aussengaragen und andere Aussenanlagen einen verhältnismässig grossen Anteil an der Grauen Energie ausmachen können. Der Beitrag der Haustechnik wird im Allgemeinen überschätzt. Beim Gebäudetyp I macht die Haustechnik nur gerade 7% der gesamten Grauen Energie aus. Bei Berücksichtigung verschiedener Nutzungszeiten, werden die Haustechnik- und Innenausbauanteile grösser.

34

Tab. 2
Grobe Richtwerte
für die relativen
Anteile der Grauen
Energie verschie-
dener Gebäude-
typen ohne Berück-
sichtigung der
verschiedenen
Nutzungszeiten

	Gebäudetyp I	Gebäudetyp II	Gebäudetyp III	Gebäudetyp IV
Fundament und Keller	32%	33 – 42%	23 – 31%	21 – 27%
Böden, Decken und Treppen	15%	13 – 19%	15 – 22%	20 – 34%
Aussen- und Innenwände	19%	23 – 26%	20 – 23%	27 – 30%
Dach	9%	21%	23%	15 – 16%
Elektroinstallationen	1%	*	*	*
Sanitärinstallationen	4%	*	*	*
Wärmeversorgung	2%	*	*	*
Garage	10%	*	*	*
Aussenanlagen	3%	*	*	*
Regenwasserbecken	5%	*	*	*

* nicht berücksichtigt

- I Niedrigenergiehaus 1½ Geschosse, unterkellert 120 m² Grundriss
- II Einfamilienhaus 1 Geschoss, unterkellert 100 m² Grundriss, Bandbreiten von Standardkonstruktionen
- III Reiheneinfamilienhaus 1 Geschoss, unterkellert 400 m² Grundriss, Bandbreiten von Standardkonstruktionen
- IV Mehrfamilienhaus 2 Geschosse, 400 m² Grundriss, Bandbreiten von Standardkonstruktionen

Um eine möglichst weitgehende Vergleichbarkeit sicherzustellen, mussten die Daten von Energie- und Stoffbilanzen aus den verschiedensten Untersuchungen im In- und Ausland harmonisiert werden.

Es handelt sich um etwa 60 analysierte und ausgewertete Publikationen und Datenbanken, die Stoff- und Energiebilanzen zu Baustoffen und Prozessen enthalten. Dazu gehören alle wichtigen Untersuchungen, die in der Schweiz durchgeführt wurden sowie eine grössere Zahl ausländischer Studien, die für den schweizerischen Baustoffmarkt relevant sind. Zu den wichtigsten gehören die an der ETH erarbeiteten «Ökoinventare für Energiesysteme», die an der EMPA durchgeführten Ökobilanzen über Holzwerkstoffe, Fensterrahmen, Türcargen und Parkettböden, sowie die im Rahmen der SIA Dokumentation D 0123 «Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten» erarbeiteten Bilanzen zu Baustoffen. Im Bereich Kunststoffe und Metalle sind einige ausländische Studien von Bedeutung. Daten zu Baustoffproduktionen im ost- und südeuropäischen Raum sind kaum vorhanden.

Die Datenharmonisierung erfolgte durch ein methodisch konsequentes Vorgehen:

- Für einen bestimmten Baustoff wurden alle verfügbaren Daten aus den unterschiedlichen Quellen herangezogen und in die energetisch wichtigsten Prozesse aufgeteilt. Die Sachbilanzen der Prozesse, d.h. die physikalisch messbaren Endenergieverbräuche sowie der Verbrauch an Ausgangs- und Hilfsstoffen wurden verglichen und interpretiert.
- Wenn möglich wurden diejenigen Daten verwendet, die den Durchschnitt der auf dem schweizerischen Markt erhältlichen Produkte am besten repräsentieren. Die Abweichungen zu Produkten aus bestimmten Produktionsbetrieben können selbstverständlich aus verschiedenen Gründen erheblich sein (vgl. Kap. 4 Stand der Technik).

- Alle Sachbilanzdaten der wichtigsten Prozesse für die Herstellung der Baustoffe wurden mit dem gleichen Energiebereitstellungssystem auf Primärenergien umgerechnet. Das Energiebereitstellungssystem berücksichtigt europäische Durchschnittsverhältnisse. Es werden keine länderspezifischen Stromproduktionsverhältnisse oder Energiebereitstellungssysteme berücksichtigt. Auch für die in der Schweiz produzierten und endverarbeiteten Baustoffe werden generell europäische Durchschnittswerte verwendet. Die Energiebereitstellungssysteme sind im Kap. 6 näher beschrieben.

- Die Transportleistungen sind nach einem einheitlichen Konzept berücksichtigt. Für die Art der Transportmittel, den Energieverbrauch und Auslastungen im Gütertransport wurden europäische Durchschnittswerte verwendet. Sie enthalten sowohl Herstellung der Transportmittel wie auch Bau der Verkehrsinfrastruktur inkl. Unterhalt. Alle Werte, auch die importierten Produkte, beziehen sich auf die Auslieferung in der Schweiz. Für Produkte, die aus verschiedenen europäischen Ländern stammen, wurde eine Einheitsdistanz verwendet. Rohstofftransporte in der Schweiz wurde je nach Anzahl der Produktionsanlagen mit längeren oder kürzeren Standarddistanzen berücksichtigt. Die Transportleistungssysteme sind in Kap. 7 beschrieben.

Die wichtigste Zielvorgabe für die Erarbeitung aller in den nachfolgenden Tabellen aufgeführten Zahlen zur Grauen Energie war eine möglichst weitgehende Vergleichbarkeit. Die Planerin und der Planer sollen anhand dieser Werte die Graue Energie als ökologischen Indikator benutzen können, ohne sich um die Qualität der Daten kümmern zu müssen. Dort wo die Zuverlässigkeit der Werte nicht gewährleistet ist, wird im Text oder in der Tabelle darauf hingewiesen. Die Vergleichbarkeit ist selbstverständlich nicht absolut. Die harmonisierten Grauenenergiewerte sind vor allem für importierte Produkte weniger repräsentativ, als beispielsweise für einheimische Holzwerkstoffe, Zemente, Mauersteine oder andere mineralische Produkte. Wer sich für die Datenqualität und Vergleichbarkeit im speziellen interessiert, findet im Grundlagenteil weitere Informationen und im separaten Begleitbericht **Harmonisierung von Grauennergiedaten im Baustoffbereich** detaillierte Analysen⁷.

Beton und Betonwaren

Alle Werte beziehen sich mit Ausnahme der Leichtzuschläge auf schweizerischen Zement, schweizerische Zuschlagstoffe und Bewehrungsstahl aus 100% Stahlschrott. Die Werte verstehen sich ab Betonwerk. Die Transportart und -distanzen für die Rohstoffe sind von der Branche erhoben worden. Die Rohdichten beziehen sich auf das ausgehärtete Produkt und wurden über Stoffraumrechnungen mit durchschnittlichen physikalischen Eigenschaften der Zuschläge und des Zementes ermittelt. In der Praxis sind signifikante Abweichungen möglich.

Schalungen und Hilfsmittel für die Verarbeitung auf der Baustelle sind in den Werten nicht enthalten. Die Unterschiede der Grauen Energie von Zementen verschiedener Festigkeiten sind gering. Alle Grauenenergiewerte gelten als Durchschnittswerte für CEM I (Portlandzement) verschiedener Festigkeitsklassen (CEM I 32.5, 42.5, 52.5) für schweizerische Produktionsverhältnisse. Kompositzemente müssen aus ihrer Zusammensetzung berechnet werden, sofern für die entsprechenden Bestandteile Daten vorliegen. Mit dem Einsatz von Flugasche oder Hütten sand anstelle von Zement kann die Graue Energie erheblich reduziert werden.

37

Bei **Sickerbeton**, **Magerbeton** und **Normalbeton** ohne Bewehrung hat der Bindemittelanteil einen entscheidenden Einfluss, da die Zuschlagstoffe und das Wasser eine Graue Energie aufweisen, die auf die Masse bezogen gegen 50 Mal geringer ist.

Auch **Betonzusatzmittel** haben wegen ihrer geringen Gewichtsanteile im Endprodukt praktisch keinen Einfluss. Geht man von der Annahme aus, dass zum Beispiel ein Luftporenbildner mit einer Grauen Energie von 50 MJ/kg und einer Einsatzmenge von 0.5 Massen-% des CEM I-Gehaltes (z.B. 300 kg/m³) eingesetzt wird, dann erhöht sich die Graue Energie um ca. 4% (0.03 MJ/kg).

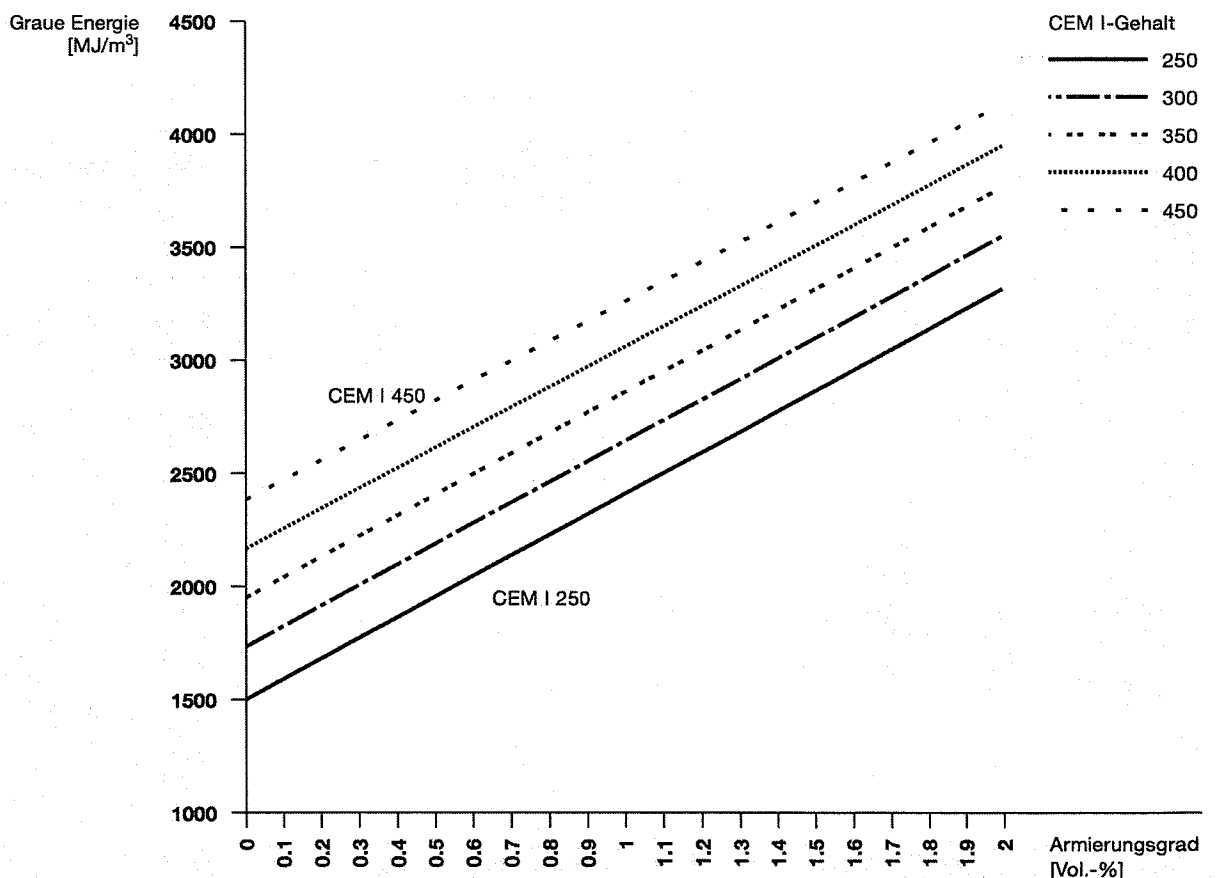
Bei den beiden aufgeführten **Leichtbeton**qualitäten sind die Graue Energiewerte durch die eingesetzten, in der Herstellung verhältnismässig energieintensiven Leichtzuschläge EPS und Blähton erhöht.

Die Graue Energie von **Recyclingbeton** unterscheidet sich kaum vom normalen Beton. Die Aufbereitung von Betongranulat, Mischabbruchgranulat und Recyclingkiessand erfordert einen geringeren Energieaufwand wie die Gewinnung und Aufbereitung von Primärzuschlag. Recyclingzuschlagstoffe werden allenfalls über etwas grössere Distanzen transportiert, was sich kaum auf die Graue Energie auswirkt. Der Vorteil von Recyclingbeton besteht vor allem in der Schonung der begrenzten Kiesressourcen. Für Recyclingbeton reduzieren sich die Graue Energiewerte gegenüber normalem Beton mit entsprechendem Zementgehalt um durchschnittlich 0.05 MJ/kg.

Der Unterschied zwischen **Transportbeton** und **Ortbeton** dürfte sehr gering sein, hängt jedoch immer von der örtlichen Situation der Baustelle ab. Zement und Zuschlag lassen sich allenfalls etwas effizienter (höhere Auslastung) zur Baustelle transportieren. Bei Ortbeton muss das Anmachwasser nicht transportiert werden. Geht man von einer Distanz von 15 km zwischen Baustelle und Betonwerk aus, so erhöht sich die Graue Energie von Transportbeton um 0.05 MJ/kg.

Bei **Stahlbeton** und **Betonfertigteilen** hat der Bewehrungsgrad einen grossen Einfluss auf die Graue Energie. Bei einem Bewehrungsgrad von 0.8 Vol.-% erhöht sich die Graue Energie gegenüber dem nicht bewehrten Beton mit demselben PC-Gehalt um rund 0.3 MJ/kg, bei einem Armierungsgrad von 2% um ca. 0.8 MJ/kg. In den Abb. 17 und 18 ist der Zusammenhang zwischen Grauer Energie, Bewehrungsgrad und PC-Gehalt von Stahlbeton und Betonfertigteilen dargestellt. Abhängig von der Form und dem Volumen können Betonfertigteile nur mit schlechter Auslastung transportiert werden. In diesen Fällen spielt der Transportaufwand eine gewisse Rolle und muss bei situativen Berechnungen entsprechend der Auslastung und der Transportdistanz zwischen Betonfertigteilwerk und Baustelle berechnet werden.

Abb. 17
Graue Energie von
Stahlbeton in
Abhängigkeit vom
Bewehrungsgrad
und dem PC-Gehalt



Material	Spezifikation, Normbezeichnung	Roh- dichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]	Graue Energie [MJ/m³]
Sickerbeton	Transportbeton ab Betonwerk, CEM I 100 kg/m³	2300	0.38	880
Magerbeton	Transportbeton ab Betonwerk, CEM I 150 kg/m³	2300	0.47	1080
Magerbeton	Transportbeton ab Betonwerk, CEM I 250 kg/m³	2300	0.66	1520
Normalbeton	Transportbeton ab Betonwerk, CEM II/A-D 300 kg/m³ (Kompositzement mit 29% Flugasche)	2300	0.68	1560
Normalbeton	Transportbeton ab Betonwerk, CEM I 300 kg/m³	2300	0.75	1750
Normalbeton	Transportbeton ab Betonwerk, CEM I 330 kg/m³	2300	0.81	1860
Normalbeton	Transportbeton ab Betonwerk, CEM I 350 kg/m³	2300	0.85	1960
Leichtbeton	Transportbeton ab Betonwerk, Mit Blähton, CEM I 350 kg/m³	1600	2.74	4380
Leichtbeton	Transportbeton ab Betonwerk, Mit EPS, CEM I 390 kg/m³	800	3.74	2990
Stahlbeton	CEM I 350 kg/m³, 0.8 Vol.-% Stahl	2340	1.14	2670
Stahlbeton	CEM I 350 kg/m³, 1.5 Vol.-% Stahl	2380	1.38	3280
Stahlbeton	CEM I 350 kg/m³, 2 Vol.-% Stahl	2410	1.55	3740
Betonfertigteile	CEM I 350 kg/m³, nicht bewehrt, Betonplatten und Steine	2300	1.15	2650
Betonfertigteile	CEM I 350 kg/m³, 0.8 Vol.-% Stahl	2340	1.43	3350
Betonfertigteile	CEM I 350 kg/m³, 1.5 Vol.-% Stahl	2380	1.68	4000
Betonfertigteile	CEM I 350 kg/m³, 2 Vol.-% Stahl	2410	1.85	4460

39

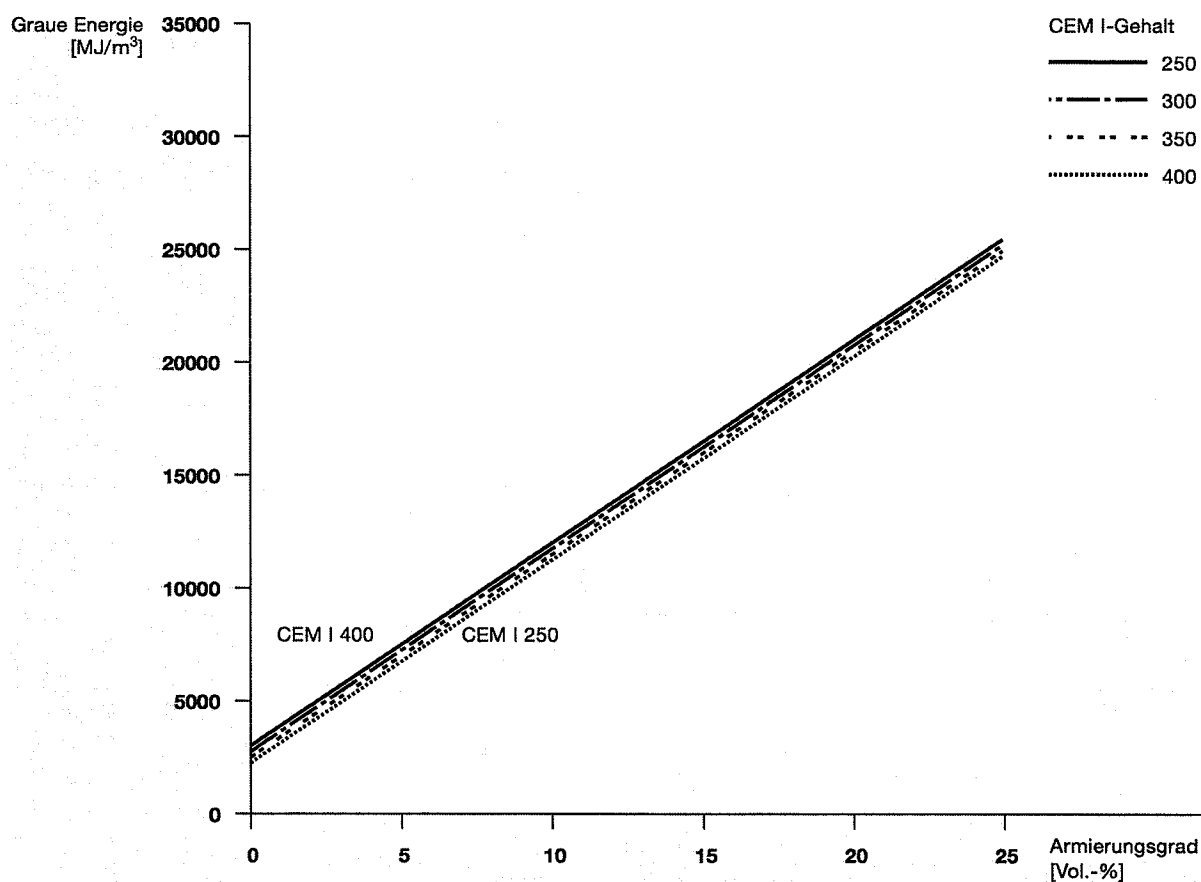


Abb. 18
Graue Energie von
Betonfertigteilen in
Abhängigkeit vom
Bewehrungsgrad
und dem PC-Gehalt

Mauersteine

Bei den Grauennergiewerten zu Backsteinen, Kalksandsteinen und Porenbetonsteinen handelt es sich um repräsentative Grauennergiewerte, die von Herstellern oder Verbänden für grössere Versorgungsgebiete erhoben wurden. Sie dürften schweizerische Verhältnisse gut wiedergeben. Bei den Zement- und Lehmsteinen handelt es sich um Werte, einzelner Hersteller. Die betriebsspezifischen Abweichungen sind bei diesem Steintyp jedoch geringer. Bimsbetonsteine und Porenbetonsteine werden in der Schweiz nicht produziert. Die Grauennergiewerte beziehen sich auf die importierten Produkte. Die angegebenen Steinrohdichten streuen je nach Hersteller und Steintyp. Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf Steinrohdichten von typischen Produkten.

Als **Backsteine** werden alle gebrannten Steine aus Ton und Lehm bezeichnet. Massgebender Einflussfaktor auf die Graue Energie ist die Brenntemperatur. Während frostbeständige Mauer- und Vormauersteine (Klinkersteine) oberhalb der Sintergrenze gebrannt werden ($> 1100\text{ °C}$) und deshalb eine höhere Graue Energie aufweisen, erfolgt bei den übrigen Steintypen das Brennen unterhalb der Sintergrenze ($800\text{--}1100\text{ °C}$).

Kalksandsteine weisen vor allem wegen der niedrigen Prozesstemperatur (Dampfdruckhärtung bei ca. 200 °C) geringere Werte auf als Backsteine. Rund die Hälfte der Grauen Energie wird durch das Bindemittel (gebrannter Kalk) verursacht.

Für die Herstellung von **Marosteinen**, einem Recyclingstein, wird gegenüber normalen Kalksandsteinen mehr Bindemittel benötigt, weshalb die Graue Energie leicht erhöht ist. Die Herstellung erfolgt analog zu normalen Kalksandsteinen. Als Zuschlag wird Mauerwerksabbruch aus Rück- und Umbau verwendet.

Die Grauennergiewerte für **Porenbetonsteine** werden durch die hohen Bindemittelgehalte, die Hilfsstoffe und die Dampfdruckhärtung bei 190 °C verursacht. Sie liegen deutlich über den Werten der anderen Steintypen. Der Import in die Schweiz verursacht dabei rund 0.9 MJ/kg an Grauer Energie.

Die Graue Energie von **Betonsteinen** besteht fast ausschliesslich aus der Grauen Energie der einzelnen Komponenten. Der Zement macht in der Regel den grössten Teil der Grauen Energie aus. Ohne eine Wärmebehandlung liegen die Grauennergiewerte von Betonsteinen in der Grössenordnung von Kalksandsteinen. Die höheren Werte für Beton-Leichtsteine werden durch die zum Teil sehr energieintensiven Leichtzuschläge verursacht. Beim Bimsbetonstein verursacht der Transport in die Schweiz zusätzlich 0.9 MJ/kg .

Der grösste Teil der Grauen Energie von **Lehmsteinen** stammt aus dem Trocknungsprozess. Dementsprechend tiefer liegen die Werte für natürlich getrocknete Steine. Produkte aus industrieller Produktion sind in der Regel technisch getrocknet.

Steintyp	Spezifikation	Steinroh- dichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]
Backstein	Normalstein, Sichtstein	900–1200	2.39
Backstein	Backstein für schalldämmendes Mauerwerk	1400	2.39
Backstein	Vollstein	1700–1800	2.39
Backstein	Leicht-Backstein	800	2.39
Backstein	Klinkerstein frostbeständig	1800–2200	3.08
Kalksandstein	Normalstein, Sichtstein	1450–1600	0.96
Kalksandstein	Kalksandstein für schalldämmendes Mauerwerk	1850–1950	0.96
Kalksandstein	Vollstein	2000	0.96
Kalksandstein	Marostein, Zuschlag aus Mischabbruch	1450	1.02
Porenbetonstein	Normalstein	580–700	4.72
Porenbetonstein	Leicht-Porenbetonstein	400	4.72
Betonstein	Normalstein, Sichtstein	1750–1850	0.90
Betonstein	Vollstein, Betonstein für schalldämmendes Mauerwerk	2100–2300	0.90
Betonstein	Hohlstein (Rapide)	1100–1600	0.90
Betonstein	Leicht-Betonstein Blähton (Lecca)	800–1100	3.53
Betonstein	Leicht-Betonstein Bims	500–800	2.83
Lehmstein	Leichtstein technisch getrocknet, Lehm mit Stroh abgemagert	800–900	2.38
Lehmstein	Normalstein technisch getrocknet	1600	1.72
Lehmstein	Vollstein technisch getrocknet	2000	1.72
Lehmstein	Lehmleichtstein natürlich getrocknet, Lehm mit Stroh abgemagert	800–900	0.14
Lehmstein	Normalstein natürlich getrocknet	2000	0.26
Lehmstein	Vollstein natürlich getrocknet	1600	0.26

Mineralische Bindemittel

Für die drei wichtigsten mineralischen Bindemittel Gips, Kalk und Zement ist die Qualität der Grauenergiewerte gut. Sie repräsentieren in der Regel schweizerische Produktionsverhältnisse. Zusätzlich sind für REA-Gips und Zement Grauenergiewerte für ausländische Produktionsanlagen sowie für Gips und Kalk ein Mischwert aus inländischer und ausländischer Produktion angegeben. Die Grauenergiewerte für die weniger häufig verwendeten Bindemittel Anhydrit, Flugasche, Hüttensand, Magnesia (Sorelzement), Ton und Wasserglas sind weniger zuverlässig und repräsentativ. Ausser Ton stammen alle aus ausländischer Produktion mit den entsprechenden Transportaufwendungen für den Import. Wichtigste Einflussgrößen auf die Graue Energie sind die Prozesstemperatur, Mahlprozesse sowie die angewandten Brenn- oder Entwässerungstechnologien. Die Grauenergiewerte beziehen sich auf die trockenen Produkte ab Werk oder Auslieferung in der Schweiz.

Die Rohstoffe für **Baugips**erzeugnisse sind Naturgipsstein oder REA-Gipsstein (Rückstand aus Rauchgasentschwefelungsanlagen). Die Gips-Halhydrate entstehen durch Entwässerung von Gipsstein. REA-Gips ist in der Herstellung geringfügig energieintensiver als Gips aus Naturgips. Da REA-Gips ausschliesslich importiert wird, erhöht sich die Graue Energie um rund 0.9 MJ/kg. Die Entwässerungstemperaturen liegen je nach Anwendungsbereich des Endproduktes zwischen 100 und 300 °C. Putzgips wird als Weissputz im Innenbereich verwendet, Stuckgips vor allem für Gipsbauelemente.

Bei natürlichem, ungebranntem **Anhydrit** ist die Graue Energie ausschliesslich durch die mechanische Aufbereitung bedingt. Deutlich höher ist die Graue Energie von synthetischem oder technischem Anhydrit (Estrichgips). Synthetischer Anhydrit entsteht bei der Flusssäureherstellung im Drehrohrföfen bei 200 °C, technischer Anhydrit wird bei Temperaturen um 1000 °C entwässert, was die Graue Energie entsprechend erhöht.

Bei den verschiedenen **Baukalk**arten Luftkalk, Wasserkalk, hydraulischer und hochhydraulischer Kalk ist die Brenntemperatur (900–1200 °C) und die Brenntechnologie für die Höhe der Grauen Energie verantwortlich. Die Zusammensetzung der Rohstoffe, die die Erhärtungseigenschaften bestimmen, haben nur einen untergeordneten Einfluss. Gewinnen, Aufbereiten und Mahlen machen ca. 10% der

Grauen Energie aus. **Kalkhydrat** ist mit Wasser gelöschter Branntkalk mit einem Kalkgehalt von ca. 75%. Im Baubereich kommt Kalk fast ausschliesslich als Kalkhydrat zur Anwendung.

Bei den verschiedenen **Zement**arten gelten ähnliche Zusammenhänge wie bei Kalk und Gips. Die Werte für schweizerischen Portlandzement (CEM I) stammen aus Trockendrehrohrföfen mit Brenntemperaturen bis ca. 1500 °C, vorgeschalteten Wärmetauschern und einer effizienten Energienutzung. Die Graue Energie von CEM I verschiedener Festigkeitsklassen unterscheidet sich nur durch den Klinker-Mahlprozess. Zwischen CEM I 32.5 und CEM I 52.5 besteht ein Unterschied von 0.15 MJ/kg. Der Grauenergiewert versteht sich als Mittelwert der drei häufigsten Festigkeitsklassen. Die Verwendung von Abfällen wie Altöl, getrocknetem Klärschlamm oder Altreifen als Brennstoffersatz reduziert die Graue Energie um ca. 0.4 MJ/kg, da Abfallstoffe energetisch nicht bewertet werden. Die deutlich höhere Graue Energie von ausländischem Zement hängt mit dem Transport in die Schweiz (ca. 0.1 MJ/kg) und der Produktion ohne Sekundärbrennstoffe zusammen. Eine Reduktion der Grauen Energie von Zementqualitäten bewirkt das Zumischen von Flugasche oder Hüttensand (Kompositzemente), die beide als Abfallstoffe aus anderen thermischen Prozessen anfallen. Die Graue Energie besteht vor allem aus dem Transport in die Schweiz, beim Hüttensand zusätzlich aus einem Trocknungs- und Mahlprozess.

Magnesia (Sorelzement) wird vor allem als Bindemittel von organischen Zuschlägen (Sägespäne, Korkmehl) verwendet. Es wird durch Brennen von Magnesit bei Temperaturen von maximal 800–900 °C hergestellt.

Sehr niedrig ist die Graue Energie von **Ton**. Er wird vor Ort abgebaut und durchläuft nur einen sehr einfachen Aufbereitungsprozess.

Die Graue Energie von **Wasserglas** wird hauptsächlich durch die Schmelztechnologie bestimmt.

Bindemittel	Spezifikation	Anwendungsbereich	Graue Energie [MJ/kg]
Gips	Halbhydrat aus Naturgips, Produktion CH	Putzgips (Innenputze), Stuckgips (Gipsbauelemente)	1.56
Gips	Halbhydrat aus Natur-/ REA-Gips, Mittelwert aus Produktion CH/Import	Putzgips (Innenputze), Stuckgips (Gipsbauelemente)	2.1
Gips	Halbhydrat aus REA-Gips, 100% Import	Putzgips (Innenputze), Stuckgips (Gipsbauelemente)	2.6
Anhydrit	Naturanhydrit, 100% Import	Unterlagsböden (Estriche), Innenputze, Innenbauteile	1.63
Anhydrit	Synthetischer Anhydrit aus Flusssäureherstellung, 100% Import	Unterlagsböden (Estriche), Innenputze, Innenbauteile	5.6
Anhydrit	Technischer Anhydrit, Produktion CH	Unterlagsböden (Estriche), Innenputze, Innenbauteile	5.4
Kalk	Feinkalk gemahlen, Produktion CH	Mörtel, Putze	5.4
Kalk	Feinkalk gemahlen, 60% Produktion CH, 40% Import	Mörtel, Putze	5.8
Kalkhydrat	Feinkalk gelöscht (75% Branntkalk, 25% Wasser), Produktion CH	Mörtel, Putze	4.3
Kalkhydrat	Feinkalk gelöscht (75% Branntkalk, 25% Wasser), 60% Produktion CH, 40% Import	Mörtel, Putze	4.6
Zement	Durchschnittswert CH	Mörtel, Putze, Beton	4.4
Zement	Ausländischer Zement, 100% Import	Mörtel, Putze, Beton	5.7
Flugasche (FA)	Aus Kohlekraftwerken, 100% Import	Zementersatz (Kompositzemente)	0.97
Hüttensand (HS)	Trockene, fein gemahlene Hochofenschlacke, 100% Import	Zementersatz (Kompositzemente)	2.8
Magnesit (MgO)	Magnesiumoxid (Sorelzement), 100% Import	Steinholzböden, Leichtbauplatten	5.7
Ton	Ab Grube (Abbau und Aufbereitung)	Mörtel, Putze	0.02
Wasserglas	Kaliwasserglas, 100% Import	Farben, Putze	10.3

Die Grauenergiewerte mineralisch gebundener Baustoffe lassen sich anhand der Zusammensetzung berechnen (vgl. Tab. 3). Dabei spielt das durch die Bindemittel gebundene Wasser, das eine sehr niedrige Graue Energie aufweist (0.01 MJ/kg) eine Rolle. Der Wasser-Bindemittelfaktor ist ein Mass dafür, wieviel Wasser von einem Teil Bindemittel im verfestigten Zustand gebunden werden kann. Für die wichtigsten mineralischen Bindemittel kann mit den folgenden Wasser-Bindemittelfaktoren gerechnet werden:

Bindemittel	Wasser-Bindemittelfaktor
Gips (Halbhydrat)	0.15
Anhydrit	0.25
Kalkhydrat	0.35
Zement	0.4

Berechnungsbeispiel:

Ein anhydritgebundener Unterlagsboden benötigt gemäss Rezeptur 35 % Anhydrit technisch und 2 % Kalkhydrat. Dazu kommen 0.2 % Zusatzmittel und 62.8 % getrockneter Sand. Damit ergibt sich ein Wasserbedarf von $35 \% \cdot 0.25 + 2 \% \cdot 0.35 = 9.45 \%$ bezogen auf die Trockenmischung, bzw. 8.6 % bezogen auf das ausgehärtete Produkt (vgl. Tab. 3). Damit lässt sich die Graue Energie pro kg ausgehärtetem Unterlagsboden anhand der Bestandteile berechnen.

Tab. 3
Berechnungs-
beispiel für
Anhydrit-
Unterlagsboden

Komponente	Massenanteil trocken [%]	Massenanteil mit Wasser [%]	Massenanteil mit Wasser normiert [%]	Graue Energie der Komponenten inkl. Transporte [MJ/kg]	Graue Energie verfestigt [MJ/kg]
Anhydrit technisch	35	35	32	5.58	1.78
Kalkhydrat	2	2	1.8	4.78	0.09
Chemikalien	0.2	0.2	ca. 0.2	80.00	0.15
Sand getrocknet	62.8	62.8	57.4	0.36	0.21
Wasser	–	9.45	8.6	0.01	0.00
Formulierung	–	–	–	0.10	0.10
Total	100	109.45	100		2.33

Zuschlags- und Füllstoffe

Die Grauennergiewerte für Sand, Kies, Splitt, Schotter, Bruchstein, Recyclingzuschlag und Kalksteinmehl sind repräsentativ für schweizerische Verhältnisse. Alle anderen Zuschlags- und Füllstoffe werden importiert. Die Datenqualität für die importierten Materialien ist in den meisten Fällen ungenügend.

Bei den rein mechanisch verarbeiteten Baustoffen **Sand, Kies, Splitt, Schotter** und **Bruchstein** sind Transport und Bearbeitungsaufwand massgebende Grössen. Je nach Transportmittel und Distanz kann der Transport den grössten Anteil an der Grauen Energie ausmachen. Eine Trocknung erhöht die Graue Energie um rund 0.2 MJ/kg und übersteigt damit den Verarbeitungsaufwand deutlich. **Mischabbruch, Betongranulat** und **Recyclingkiessand** sind in der Verarbeitung weniger energieintensiv wie primäre Rohstoffe.

Grössere Unterschiede bestehen zwischen den verschiedenen Leichtzuschlägen. Beim **Bimsstein**, der lediglich eine mechanische Verarbeitung durchläuft, ist der Unterschied zwischen Hüttenbims und Naturbims gering. Die Graue Energie besteht fast aus-

schliesslich aus dem Transport in die Schweiz.

Anders verhält es sich mit **Blähton (Lecca)**, **Blähperlit** und **Blähvermiculit**. Alle drei Materialien durchlaufen einen thermischen Prozess (1000–1200 °C), was den grössten Teil der Grauen Energie verursacht.

Die Graue Energie von **Kalksteinmehl, Feldspat, Kaolin, Kreide** und **Quarzsand** ist von der Mahlfineinheit, vom Trocknungsprozess und von dem Reinheitsgrad abhängig. Gemahlenes, ungetrocknetes Kalksteinmehl hat eine Graue Energie von lediglich 0.39 MJ/kg, ein Trocknungsprozess erhöht diese Energie um weitere 0.2 MJ/kg. Sobald an die Füllstoffe höhere Anforderungen bezüglich Reinheit und Mahlfineinheit gestellt werden, steigt die Graue Energie mit dem Verarbeitungsaufwand. Kreide, die auch für kosmetische Produkte verwendet wird (z.B. Zahnpastapigment), durchläuft mehrere Verarbeitungsstufen bis zum fertigen, hochreinen Produkt, was die verhältnismässig hohe Graue Energie von 7 MJ/kg erklärt.

45

Zuschlag	Anwendungsbereich, Spezifikation	Graue Energie [MJ/kg]
Sand, Kies, Splitt, Schotter, Bruchstein	Zuschlag für Beton und Auffüllungen nicht getrocknet	0.09
Sand, Kies, Splitt, Schotter, Bruchstein	Zuschlag für diverse Anwendungen, getrocknet	0.29
Mischabbruch, Betongranulat, Recyclingkiessand	Zuschlag für Recyclingbeton, Kiesersatz	0.03
Bimsstein	Natur-/Hüttenbims aus Deutschland, als Zuschlag für Leichtbeton, 100% Import	0.92
Bimsstein	Naturbims aus Griechenland, als Zuschlag für Leichtbeton, 100% Import	1.46
Blähton (Lecca)	Leichtzuschlag für Beton und Betonwaren, Schüttdämmstoff, 100% Import	5.0
Blähperlit	Leichtzuschlag für Beton und Betonwaren, Schüttdämmstoff, Wärmedämmputze, 100% Import	9.3
Blähvermiculit	Dämmstoff für Putze, Plattenwerkstoffe, 100% Import	5.7
Kalksteinmehl	Füllstoff für verschiedene Anwendungen, nicht getrocknet	0.39
Kalksteinmehl	Füllstoff für verschiedene Anwendungen, getrocknet	0.59
Feldspat	Füllstoff für Farben, getrocknet und gemahlen, 100% Import	2.4
Kaolin	Porzellanrohstoff, Füllstoff in Papier, Kunststoffen und versch. Chemikalien, 100% Import	2.0
Kreide	Rohstoff und Füllstoff für verschiedene Anwendungen 100% Import	7.0
Quarzsand	Rohstoff und Füllstoff u.a. für Glasherstellung, 100% Import	1.38

Mörtel und Putze

Die Chemie der Mörtel und Putze bereitet allein von der Terminologie her Schwierigkeiten. Zudem gibt es produktespezifische Schwankungen in den Rezepturen. Die Graue Energie setzt sich bei Mörtel und Putzen aus der Grauen Energie der Bestandteile zusammen. Das Zusammenfügen und Mischen der Bestandteile erfordert praktisch keine Energie. Die Graue Energiewerte für Mörtel und Putze beziehen sich auf Produktzusammensetzungen aus den einschlägigen SIA-Normen, auf Literaturangaben und auf Angaben der Hersteller. Die aufgeführten Graue Energiewerte dürfen als repräsentativ bezeichnet werden. Alle Angaben in den Tabellen beziehen sich auf die ausgehärteten Produkte. Die Rohdichten sind zum Teil grösseren Schwankungen unterworfen und dürfen nur als Richtgrössen angesehen werden.

Massgebende Faktoren für die Graue Energie von **Mörteln** sind Menge und Art der Bindemittel, bei Leichtmörteln zusätzlich die Leichtzuschläge. Organische Zusatzmittel im Bereich einiger Promille haben nur einen geringen Einfluss (< 5% der Grauen Energie). Bei Spezialprodukten wird ihr Einfluss relevant (z. B. Klebemörtel, 17-60%). Das Sandtrocknen (0.2 MJ/kg) und Mischen (0.1 MJ/kg) spielt, ausser bei Lehm Mörtel, nur eine untergeordnete Rolle.

Mörteltyp	Anwendungsbereich, Spezifikation	Zusammensetzung	Roh- dichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]
Kleb Mörtel (Dünnbettmörtel)	Planblockmörtel für Porenbeton auf Zementbasis	31% CEM I 32.5, 0.4% Zusatzmittel	1900	2.1
Kleb Mörtel (Dünnbettmörtel)	Für Wand- und Bodenbeläge universell anwendbar, auf Zementbasis	36.3% CEM I 32.5, 3.5% Zusatzmittel	1900	4.8
Zementmörtel	Normalmauermörtel CEM I 300 kg/m³	15% CEM I 32.5, 0.06% Zusatzmittel	1900	1.11
Zementmörtel	Normalmauermörtel CEM I 450 kg/m³	22% CEM I 32.5, 0.05% Zusatzmittel	1900	1.39
Verlängerter Mörtel	Mauermörtel verlängert CEM I 100 HK 250	5.6 CEM I 32.5, 13% hydr. Kalk, 0.06% Zusatzmittel	1800	1.28
Leichtmörtel	Für Mauerwerk mit Leichtsteinen, mit Bimszuschlag	34.2% CEM I 32.5, 2.6% Kalkhydrat, 44.4% Bims, 0.08% Zusatzmittel	ca. 530	2.3
Leichtmörtel	Für Mauerwerk mit Leichtsteinen, mit Blähtonzuschlag (Lecca)	34.2% CEM I 32.5, 2.6% Kalkhydrat, 44.4% Blähton, 0.08% Zusatzmittel	ca. 460	4.2
Leichtmörtel	Für Mauerwerk mit Leichtsteinen, mit Perlitzuschlag	52.4% CEM I 32.5, 3.9% Kalkhydrat, 15.5% Perlit, 0.08% Zusatzmittel	ca. 930	4.2
Lehmmörtel	Fertigmörtel	21.8% Lehm	1600	0.41

Putze weisen in der Regel höhere Bindemittel- und Zusatzmittelgehalte auf. Organische Bindemittel (Polymere) und Wasserglas sind wesentlich energieintensiver als mineralische Bindemittel. Deshalb sind die Kunstharz- und Silikatputze 5 bis 6 Mal energieintensiver als die rein mineralischen Erzeugnisse. Bei Kunstharz-, Silikat- und Silikonharzputzen können auch Lösemittel zu einer gewissen Umweltbelastung führen (vgl. Kap. 9). Die hohe Graue Energie von Wärmedämmputzen ist durch den hohen Zementgehalt (Wärmedämmputz EPS) und den Anteil an Leichtzuschlag (Wärmedämmputz Perlit) bedingt.

Putztyp	Anwendungsbereich	Zusammensetzung	Roh- dichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]
Kalkzementputz	Grund-, Deckputz Innen und Aussen	5.6% CEM I 32.5, 10.5% Kalk hydr., 4.3% Kalkhydrat, 0.23% Zusatzmittel	1800	1.50
Zementkalkputz	Grund-, Deckputz Innen und Aussen	5.6% CEM I 32.5, 10.5% Kalk hydr., 4.3% Kalkhydrat, 0.23% Zusatzmittel	1800	1.50
Zementputz	Grund- und Deckputz, Sockelbereich Innen und Aussen	20.5% CEM I 32.5, 2.3% Kalkhydrat, 0.02% Zusatzmittel	1900	1.40
Gipskalkputz	Grundputz innen	39.1% Putzgips, 6% Kalkhydrat, 0.16% Zusatzmittel	1450	1.56
Gipskalkputz	Einschichtputz innen	67.5% Putzgips, 1.3% Kalkhydrat, 0.38% Zusatzmittel	1250	2.1
Weissputz (Gipsputz)	Deckputz innen	74.3% Putzgips, 1.3% Kalkhydrat, 0.08% Zusatzmittel	1100	1.94
Kunstharzputz	Deckputz	11% organ. Bindemittel, 0.6 % Löse- mittel, 2.45% Zusatzmittel	1500	11.4
Silikatputz	Deckputz auf Wasserglasbasis	8% Wasserglas, 4.8% organ. Bindemittel, 0.9% Lösemittel, 2.6% Zusatzmittel	1500	7.5
Silikonharzputz	Deckputz	5% organ. Bindemittel, 1.6% Lösemittel, 3.5% Zusatzmittel	1500	8.4
Wärmedämmputz EPS	Aussen	52.3% CEM I, 10.7% Kalk hydr., 3.3% Kalkhydrat, 4.8% EPS, 0.37% Zusatzmittel	220	8.6
Wärmedämmputz Perlit	Aussen	11.2% CEM I, 5.2% Kalkhydrat, 73.6% Perlit, 0.52% Zusatzmittel	510	8.3

Mineralische Abdeckungen und Verkleidungen

Die Datenlage ist für diese Baustoffgruppe im Allgemeinen ungenügend. Vor allem bei den Gipsbaustoffen handelt es sich um grobe Abschätzungen. Die Grauenergiewerte für Dachziegel, Faserzement, Steinzeug und Keramik stammen aus einzelnen Produktionsbetrieben in der Schweiz. Den grössten Einfluss auf den Energieverbrauch haben die Prozesstemperaturen bei der Endfertigung (Dachziegel, Steinzeug, Keramik, Flachglas, Gussglas) und die Herstellung der Ausgangsprodukte (Zement, Kunststofffasern, Gips, Karton) für Faserzement und Gipsbaustoffe.

Die Graue Energie von **Dachziegeln** wird hauptsächlich durch den Brennprozess verursacht. Die Brenntemperatur ist ähnlich wie bei der Herstellung von Klinker-Mauerziegeln ($> 1100\text{ °C}$). **Steinzeug (Keramik)** wird bei höheren Temperaturen (1200 °C) und während längerer Zeit gebrannt als Dachziegel. Das Material wird dadurch dichter, die Wasseraufnahme beträgt nur 2–3% (Klinker $< 7\%$). Teilweise werden die Produkte mit einer keramischen Glasur überzogen, die nicht berücksichtigt ist.

Beim **Faserzement** machen die Ausgangsstoffe 50 bis 70% der Grauen Energie aus. Der Unterschied zwischen Wellplatten, Fassadenschindeln, Dachschindeln und Fassadenplatten kommt durch den aufwendigeren Produktionsprozess der Fassadenplatten zustande.

Beim Glas muss vom Verfahren und von der Rohstoffbasis her zwischen **Flachglas** und **Gussglas** unterschieden werden. Bei Flachglas wird kein Recyclat eingesetzt, beim Gussglas beträgt der Anteil an Produktionsabfällen und Altglas bis zu 50%, was die Graue Energie reduziert. Auch aus verfahrenstechnischen Gründen hat Flachglas einen höheren Energiebedarf als Gussglas. Das **Sekurisieren** von Flachglas erhöht die Graue Energie pro Quadratmeter um rund 22 MJ/m^2 , was bei einer Glasdicke von 4 mm ca. 15% entspricht.

Bei **Gipsfaser-, Gipskarton- und Vollgipsplatten** setzt sich die Graue Energie zu einem grossen Teil aus derjenigen der Ausgangsstoffe zusammen. Es sind allerdings produktebedingte Unterschiede denkbar (Zusammensetzung). Neben den Inhaltsstoffen macht die Wärme zur Verfestigung der Platten etwa 35–55% der Grauen Energie aus. Alle Werte sind als Grobabschätzungen zu verstehen und beziehen sich auf deutsche Produkte aus 50% REA-Gips- und 50% Naturgipsstein. Beim Anteil Gipskarton der Gipskartonplatten handelt es sich um einen Durchschnittswert für eine Plattendicke von 12.5 mm, der Kartonanteil beträgt 3.7 Massen-%. Eine Verdoppelung der Plattendicke senkt den Kartonanteil auf 1.9%, wodurch die Graue Energie auf ca. 4.6 MJ/kg reduziert wird.

Die Graue Energie von **Naturstein** ist nur eine Grobabschätzung. Je nach Verarbeitungsgrad (Polieren, Schleifen) und Herkunftsort dürfte die Graue Energie erheblich abweichen. Bei so niedrigen Werten spielt zudem der Transport eine Rolle. Beispielsweise erhöht der LKW-Transport von Castione-Marmor aus dem Tessin nach Zürich die Graue Energie um ca. 0.7 MJ/kg . Bei importierten Gesteinen sind die Werte entsprechend höher und bei Konstruktionsvergleichen zu berücksichtigen.

Material	Spezifikation	Roh- dichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]
Dachziegel	–	1800–2000	3.1
Steinzeug	Grobkeramik	2000	6.6
Faserzement	Wellplatte gross, Produktion CH	1800	6.1
Faserzement	Fassadenplatte gross, Produktion CH	1800	8.3
Faserzement	Fassadenschindel klein, Produktion CH	1800	6.3
Faserzement	Dachschindel klein, Produktion CH	1800	6.8
Flachglas	Floatglas unbeschichtet, 100% Import	2400–2600	15.0
Gussglas	Profilbauglas für Fassadenelemente, Mauersteine aus Glas, 100% Import	2400–2600	12.8
Gipsfaserplatte	82% Gips gebunden, 18% Altpapierfasern, 100% Import	1100–1250	5.5
Gipskartonplatte	96.3% Gips gebunden, 3.7% Graukarton, 100% Import, entspricht ca. 12.5 mm Plattendicke	900–950	4.7
Gipsplatte	Vollgipsplatte, Produktion CH	1000	5.8
Naturstein	z.B. Granit, Gneis, Marmor, Sandstein, Serpentin, etc., Produktion CH	2500–3300	0.1

Alle ausgewiesenen Grauennergiewerte für Holzwerkstoffe ausser MDF-Platten, die nicht in der Schweiz hergestellt werden, gelten für schweizerische Produktionsverhältnisse. Die Daten beziehen sich auf durchschnittliche Bindemittelanteile und die am häufigsten verwendeten Bindemittelarten. Die Daten sind für die meisten Materialien repräsentativ, für Holzwoleleichtbauplatten, bitumierte Weichfaserplatten, zementgebundene Spanplatten, Sperrholz und MDF-Platten wurde die Graue Energie mit Hilfe von Analogieüberlegungen abgeschätzt. Die niedrigen Rohdichten für Schnittholz und Schichthölzer gelten für Fichtenholz als Ausgangsmaterial, die höheren für schwerere Hölzer (z. B. Eiche). Alle Grauennergiewerte beziehen sich auf einheimische Hölzer mit entsprechend geringen Transportdistanzen. Werden ausländische Materialien verwendet (z. B. Okume aus Gabun, Ahorn aus Kanada, Fichte aus Finnland) erhöht sich die Graue Energie um bis zu 5 MJ/kg. Die Graue Energie solcher Importprodukte muss mit den entsprechenden Transportleistungen ergänzt werden.

Bei **Schnittholz** (Kant-, Brettschnittholz) wird zwischen natürlich und technisch getrocknetem Holz unterschieden. Mit der Holz Trocknung wird die Holzfeuchtigkeit von ca. 30–80% im sägefrischen Zustand auf 15–20% (natürliche Holz Trocknung) bis 12% (technische Holz Trocknung) gesenkt. Für die technische Trocknung von Holz wird ein durchschnittlicher Energieverbrauch von 4.6–6.4 MJ/kg ausgewiesen. Der grössere Teil der Trocknungswärme wird durch das Verbrennen von Produktionsabfällen gewonnen (3.8–4.4 MJ/kg) und ist in der Grauen Energie nicht enthalten. Die Trocknung von Kantschnittholz benötigt aufgrund des ungünstigeren Querschnittes mehr Energie. Natürlich getrocknetes Holz wird vor allem in nicht beheizten Innenräumen und für den Aussenbau unter Dach angewendet, technisch getrocknetes Holz in beheizten Innenräumen.

Bei Schichthölzern weisen die verschiedenen Lagen eine parallele, bei Sperrhölzern eine unterschiedliche Faserrichtung auf. Zur Produktion von **Dreischichtplatten** werden drei, bei Brettschichtholz und **Sperrholz** mehr als drei Lagen miteinander verleimt. Dreischichtplatten werden mit 2.3% (PMDI) bis 5% (UF) Bindemittel verleimt, was rund 30% der Grauen Energie verursacht, der Rest geht zulasten der Produktion. Anders verhält es sich mit Sperrholz, wo die Bindemittel (z.B. 8% PF-Harz) knapp 38% der Grauen Energie ausmachen. Der Grauennergiewert für

Sperrholz basiert auf Analogieüberlegungen zur Brettschichtholzproduktion. Der Bindemittelverbrauch (Beleimungsfaktor) von Sperrholz hängt von der Anzahl und der Dicke der Lagen ab. Der in der Tabelle angegebene Wert für Sperrholz entspricht einem Furniersperrholz (Furnierdicke ca. 3 mm) mit 25 Lagen. Dreischichtplatten und Sperrholz kommen hauptsächlich als Plattenwerkstoffe, Sperrholz auch als Konstruktionsholz zur Anwendung. Beim **Brettschichtholz** verursacht die Produktion über 80% der Grauen Energie, die Bindemittel (3.1% UF) spielen mit ca. 17% eine relativ untergeordnete Rolle. Brettschichtholz wird vor allem als Konstruktionsholz (z.B. Brettschichtholzträger) verwendet.

Die Graue Energie der **Hart- und Weichfaserplatten** bezieht sich auf das Nassverfahren (schweizerische Produktion). Die Platten werden durch ihre eigenen Harze gebunden. Bei mehrschichtigen Weichfaserplatten ist die Graue Energie durch den Klebstoff (1.5% PVAc) leicht erhöht. Bitumenvergütete Weichfaserplatten enthalten rund 12% Bitumen (28% Energieanteil). Die Graue Energie wurde in Anlehnung an die Weichfaserplattenproduktion abgeschätzt.

Bei den **Spanplatten** spielt die Bindemittelart eine Rolle. Um den Verhältnissen auf dem Bau Rechnung zu tragen, wurden die verschiedenen Bindemittel separat aufgeschlüsselt. Je nach Bindemittelart verursachen diese einen Anteil von ca. 36% (UF-Bindemittel) bis 40% (PMDI-Bindemittel, mineralische Bindemittel) an der Grauen Energie.

Die verhältnismässig hohe Graue Energie von **MDF-Platten** ist auf den hohen Bindemittelgehalt und das energieintensive Trockenproduktionsverfahren zurückzuführen. Der Wert ist als Grobabschätzung zu verstehen und basiert auf technologischen Analogieüberlegungen zur Holzschliffproduktion. Da MDF-Platten in der Schweiz nicht hergestellt werden, erhöht sich die Graue Energie um den durchschnittlichen Importzuschlag von 0.9 MJ/kg.

Auch die Graue Energie von **Holzwoleleichtbauplatten** ist als Grobabschätzung zu verstehen. Die Herstellung dürfte mit derjenigen von Spanplatten vergleichbar sein. Das Bindemittel Zement macht rund 36% der Grauen Energie aus. Mit Magnesit als Bindemittel reduziert sich die Graue Energie um ca. 0.5 MJ/kg.

Material	Bindemittelgehalt und Spezifikationen	Roh- dichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]
Schnittholz	Kant-/Brettholz natürlich getrocknet, Holzfeuchte 15–20%	500–750	1.6
Schnittholz	Brettholz technisch getrocknet, Holzfeuchte ca. 12%	400–700	2.1
Schnittholz	Kantholz technisch getrocknet, Holzfeuchte ca. 12%	400–700	3.1
Dreischichtplatten	5% Polyvinylacetat (PVAc) – Bindemittel	450–750	7.2
Dreischichtplatten	2.3% Isocyanat (PMDI) – Bindemittel	450–750	7.4
Brettschichtholz	3.1% Harnstoff – Formaldehyd (UF) – Bindemittel	450–750	7.2
Sperrholz	8% Phenol – Formaldehyd (PF) – Bindemittel, entspricht 25 Lagen bei 75 cm Plattendicke	500–800	8.7
Hartfaserplatten	Ohne Bindemittel im Nassverfahren	850–1000	15.4
Weichfaserplatten einschichtig	Ohne Bindemittel im Nassverfahren	150–300	15.4
Weichfaserplatten mehrschichtig	Ohne Bindemittel im Nassverfahren, 1.5% PVAc	150–300	16.7
Weichfaserplatten bitumiert	12% Bitumen	180–400	21
Spanplatten	8% Harnstoff – Formaldehyd (UF) – Bindemittel	550–700	8.6
Spanplatten	8% Phenol – Formaldehyd (PF) – Bindemittel, wasserfest	550–700	8.7
Spanplatten	3.5% Isocyanat (PMDI) – Bindemittel, wasserfest	550–700	9.2
Spanplatten	8% Melamin – Harnstoff – Phenol – Formaldehyd (MUPF) – Bindemittel, wasserfest	550–700	9.2
Spanplatten	64% Bindemittel (Zement)	1000–1250	5.3
Holzwoleleicht- bauplatten	67% Bindemittel (Zement)	360–570	6.0
MDF-Platten	12% Harnstoff – Formaldehyd (UF) – Bindemittel, 100% Import	680–900	25

Metalle

Die Datenqualität der Grauen Energie von Metallbaustoffen im Baubereich (Stahl, Aluminium, Kupfer, Zink, etc.) ist in Bezug auf Repräsentativität ungenügend. Sie wird der Bedeutung der metallischen Werkstoffe im Bausektor nicht gerecht. Es sind keine für den europäischen Baustahlmarkt repräsentativen Werte verfügbar. Armierungsstahl wird in der Schweiz hergestellt, alle anderen Metalle werden importiert (ca. 0.9 MJ/kg Transportanteil). Der Anteil an im Produkt verarbeiteten Altmetallen (Recyclatanteil) und beim Stahl der Legierungsgrad sind die wichtigsten Einflussgrößen auf die Graue Energie. Die Verwendung von Altmetallen ermöglicht erhebliche Energieeinsparungen, da dadurch der Rohstoffabbau, grosse Transportdistanzen und der Umwandlungsprozess vom Metallerz zum reinen Metall eingespart werden kann. Auch der Bearbeitungsprozess vom Rohmetall zu Profilen, Blechen und anderen Formteilen spielt in gewissen Fällen eine Rolle. Oberflächenbehandlungsprozesse sind separat aufgeführt. Die Graue Energie berechnet sich aus dem verarbeiteten Rohmetall und dem Energieverbrauch für die Oberflächenbehandlung.

Die Graue Energie von **Stahl** schwankt zwischen 11.5 MJ/kg für schweizerischen Armierungsstahl aus 100 % Recyclat und rund 105 MJ/kg für hochlegierten Edelstahl ohne Recyclat. Die Verarbeitung von Rohstahl zu schweren Profilen (z.B. Stahlträger) oder Grobblechen (Dicke > 3 mm) benötigt ca. 3 MJ/kg an Grauer Energie, das Walzen zu Feinblechen (Dicke < 3 mm) und Feinprofilen zusätzliche 4.5 MJ/kg. In den meisten Fällen dürfte es nicht möglich sein, für ein konkretes Bauprodukt den genauen Recyclatanteil und Legierungsgrad vom Hersteller zu ermitteln. Die ausgewiesenen Grauennergiewerte beziehen sich darum auf typische, durchschnittliche Recyclatanteile für Baustahl (St37), nichtrostenden Stahl und Chrom-Nickel-Edelstahl. Profile und Stahlbleche aus 100% Schrottmateriale dürften heute auf dem Baustoffmarkt eher noch selten sein, die Tendenz ist jedoch steigend.

Stahlprodukte	Spezifikation	Recyclatanteil [%]	Rohdichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]
Armierungsstahl	Produktion CH	100	7850	11.5
Profile, Grobblech > 3 mm	Unlegiert	100	7850	12.4
Feinblech < 3 mm	Unlegiert	100	7850	16.8
Profile, Grobblech > 3 mm	Unlegiert, St37	20	7850	34
Feinblech < 3 mm	Unlegiert, St37	20	7850	39
Profile, Grobblech > 3 mm	Niedriglegiert, nichtrostend, 42CrNiMo 4 / 16MnCr5 (1% Chrom, 1.25% Mangan)	5	7850	41
Feinblech < 3 mm	Niedriglegiert, nichtrostend, 42CrNiMo 4 / 16MnCr5 (1% Chrom, 1.25% Mangan)	5	7850	46
Profile, Grobblech > 3 mm	Hochlegiert, X8CrNiNb16 13 (16% Chrom, 13% Nickel)	0	7900	100
Feinblech < 3 mm	Hochlegiert, X8CrNiNb16 13 (16% Chrom, 13% Nickel)	0	7900	105

Beim **Aluminium** hat der Recyclatanteil den grössten Einfluss auf die Graue Energie. Allerdings gibt es im Bausektor kaum Aluminium aus Recyclat (Sekundäraluminium). Im Gussaluminium (v.a. Automobilproduktion) ist der Recyclinganteil sehr hoch, bei Profilen und Blechen, die im Baubereich angewendet werden, kommt wegen Korrosionseigenschaften hauptsächlich Primäraluminium zum Einsatz. Die Verarbeitung von Rohaluminiumbarren zu Blechen und Profilen erhöht die Graue Energie um ca. 5 MJ/kg, die Folienherstellung um 10 MJ/kg. Auch bei **Kupfer** spielt der Recyclatanteil eine zentrale Rolle. Der Grauenenergiewert bezieht sich auf verarbeitetes Kupfer mit einer durchschnittlichen Recyclingrate von 40%. Das Umformen von Rohkupferbarren zu Profilen, Blechen, Rohren und Draht benötigt durchschnittlich ca. 15 MJ/kg an Grauer Energie. Beim Kupfer darf – im Gegensatz zum Aluminium – mit einem durchschnittlichen Recyclatanteil gerechnet werden. Recycliertes Kupfer ist dem primären Kupfer qualitativ gleichwertig, bezüglich Einsatzgebieten gibt es keine Unterschiede.

Bei den Grauenenergiewerten für **Gusseisen, Baubronze, Messing, Titan-Zink und Zink** handelt es sich um Grobabschätzungen für Rohmetalle und einen pauschalen Verarbeitungszuschlag von 10 MJ/kg. Die Graue Energie von Baubronze und von den beiden Messingqualitäten wurde aus der Zusammensetzung und einem Legierungszuschlag berechnet. Titan-Zink besteht fast ausschliesslich aus Zink mit einem geringen Anteil an Titan (ca. 0.1%). Die Angabe von zuverlässigen Recyclatanteilen ist in den meisten Fällen nicht möglich. Diese können in der Regel für ein Bauprodukt auch nicht ermittelt werden. Die Grauenenergiewerte sind unter diesen Gesichtspunkten mit der notwendigen Vorsicht zu interpretieren.

Metall	Spezifikation	Roh-dichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]
Aluminium	Bleche, Profile, 0% Recyclatanteil	2690	210
Aluminium	Bleche, Profile, 100% Recyclatanteil	2690	24
Aluminium	Folie, 0% Recyclatanteil	2690	215
Aluminium	Folie, 100% Recyclatanteil	2690	29
Kupfer	Bleche, Profile, Rohre, Draht, 40% Recyclatanteil	8900	113
Gusseisen	Gussteil, 0% Recyclatanteil	7200	65
Baubronze	Bleche, Profile, Cu Zn42 Mn2 (57% Kupfer, 41% Zink, 2% Eisen, Mangan)	8300	101
Messing MS85	Bleche, Profile, Cu Zn15 (85% Kupfer, 15% Zink)	8800	105
Messing MS 59 Pb	Bleche, Profile, Cu Zn39 Pb3/S (58.5% Kupfer, 3% Blei, 38.5% Zink)	8400	99
Titan-Zink	Bleche, Profile (99.9% Zink)	7140	92
Zink	Bleche, Profile	7200	91

Die Grauennergiewerte für **Oberflächenbehandlungsprozesse** von Metallen sind unsicher. Sie basieren in den meisten Fällen auf Einzelwerten von Herstellern und dürfen nicht als repräsentative Durchschnittswerte angesehen werden. Als Bezugsgrösse wird ein Quadratmeter behandelter Werkstoff angegeben. Alle Grauennergiewerte ausser dem Wert für Schwarzchromen beinhalten den Behandlungsprozess inklusive die Beschichtungsmaterialien für typische Schichtdicken. Je nach Behandlungsart kommen zudem Lösemittel als Vorbehandlung zum Einsatz, die einer ergänzenden Beurteilung bedürfen (vgl. Kap. 9).

Oberflächenbehandlung	Bemerkungen	Graue Energie [MJ/m²]
Anodisieren von Aluminium	Herstellerangaben, inkl. Metallvorbehandlung und Beschichtungsmaterial	22
Chromatieren von Aluminium	Herstellerangaben, inkl. Metallvorbehandlung und Beschichtungsmaterial	5
Einbrennlackieren	Durchschnitt Pulver-/Nasslackierung inkl. Beschichtungsmaterial (Schichtdicke 20–50 µm, 100 g/m², ca. 8 MJ/m²), energieoptimierte Anlage	59
Einbrennlackieren	Durchschnitt Pulver-/Nasslackierung inkl. Beschichtungsmaterial (Schichtdicke 20–50 µm, 100 g/m², ca. 8 MJ/m²), konventionelle Anlage gemäss Herstellerangaben	96
Glanzchromen	Herstellerangaben, inkl. Metallvorbehandlung und Beschichtungsmaterial (Schichtdicke 1 µm, 7.2 g/m², ca. 2 MJ/m²)	10
Schwarzchromen	Herstellerangaben, mit Metallvorbehandlung, ohne Beschichtungsmaterial	8
Verzinken	Stückverzinken pro Quadratmeter, inkl. Metallvorbehandlung und Beschichtungsmaterial (Schichtdicke 28 µm, 200 g/m², ca. 16 MJ/m²)	46

Wärmedämmstoffe

Für die am häufigsten verwendeten Wärmedämmstoffe (Steinwolle, Glaswolle, expandierter Polystyrol EPS) sind die Daten repräsentativ. Bei den meisten Werten handelt es sich um herstellereigene oder von Herstellern in Auftrag gegebene Arbeiten, die jedoch die Verhältnisse auf dem Schweizer Markt gut repräsentieren. Für weniger oft gebrauchte Materialien wie Perlitplatten, Korkplatten, Schafwolle und Baumwolle musste die Graue Energie abgeschätzt werden. Bei Steinwolle, Glaswolle, Holzfaserplatten und neu auch bei Zellulosefasern findet die Produktion vorwiegend in der Schweiz statt, bei Perlit, Vermiculit, EPS, Polyurethan und UF-Schaum nur die Endfertigung. Die Rohstoffe werden importiert. Schaumglas, Perlitplatten, extrudierter Polystyrol XPS, Schafschurwolle und Baumwolle gelangen als gebrauchsfertige Produkte in die Schweiz. Für alle in der Schweiz produzierten Dämmstoffe sind jedoch auch Importprodukte auf dem Markt, für die keine repräsentativen Werte verfügbar sind. Es muss davon ausgegangen werden, dass diese wesentlich weniger energieoptimiert sind.

Grössere Unterschiede bestehen zwischen den am häufigsten verwendeten anorganischen Dämmplatten aus **Steinwolle**, **Glaswolle** und **Schaumglas**. Alle drei werden aus einer Gesteinsschmelze hergestellt. Die Unterschiede sind auf die verschiedenen Energieträger und unterschiedlichen Produktionsprozesse zurückzuführen. Der Schmelzprozess für Glaswolle wird in der Schweiz mit Strom durchgeführt. Aufgrund des geringen Wirkungsgrades des elektrischen Stroms führt dies zusammen mit anderen Faktoren zu einem vergleichsweise hohen Primärenergiebedarf. Ähnlich verhält es sich mit Schaumglas, bei dem der zweistufige Produktionsprozess die Graue Energie zusätzlich erhöht.

Die beiden mineralischen Schüttdämmstoffe **Perlit** und **Vermiculit** sind vom Prozesstemperaturniveau her (ca. 1000 °C) sehr ähnlich. Der Unterschied in der Grauen Energie ist auf die verschiedenen Produktionsverfahren zurückzuführen. Für **Perlitplatten** wurde die Graue Energie anhand der Zusammensetzung (73% Perlit, 15% Altpapier, 5% Glasfasern, 3.5% Bitumen, 3.5% Stärke) und einem Verarbeitungszuschlag von 5 MJ/kg abgeschätzt.

Die Graue Energie von **Polystyrol expandiert EPS**, **Polystyrol extrudiert XPS**, **Polyurethan PUR**, **Polyisocyanurat PIR** und **Harnstoff-Formaldehyd UF** setzt sich aus der Grauen Energie der Rohkunststoffe und dem Verarbeitungsprozess (Expandieren, Extrudieren, Schäumen) zusammen. Dabei verursachen die Rohstoffe den grössten Teil der Grauen Energie (ca. 90%), Flammenschutzmittel, Treibgase und andere Zusatzstoffe sowie der Herstellungsprozess spielen nur eine untergeordnete Rolle. Am besten ist die Datenqualität für EPS. Die Grauenenergiewerte für unterschiedliche Dichten unterscheiden sich nur um wenige Prozent. Die Werte für XPS, PUR und UF-Schaum müssen als Grobabschätzungen verstanden werden. Der Wert für PIR wird demjenigen von PUR gleichgesetzt, weil Ausgangsstoffe und Herstellung sehr ähnlich sind.

Deutlich niedriger als die Graue Energie der organischen Kunststoffschäume auf Erdölbasis liegen die Werte für Dämmmaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe oder aus Recyclingmaterial. Bei **Zellulosedämmstoffen** wird der Heizwert von Altpapier als Rohstoff nicht berücksichtigt. Die Brandschutzmittel Borax/Borsäure verursachen zwischen 40 und 50% der Grauen Energie. Bei den **Holzfaserplatten** ist die Graue Energie mit derjenigen aus dem Kapitel Holzwerkstoffe vergleichbar. Die stoffgebundene Energie von Holz (Heizwert) ist nicht berücksichtigt.

Für **Korkplatten**, **Baumwolle** und **Schafschurwolle** existieren nur Schätzwerte. Am besten ist die Datenqualität beim Kork. Die Verarbeitung (Schroten, Expandieren) verursacht rund 3/4 der Grauen Energie. Korkplatten benötigen keine künstlichen Bindemittel, sie werden durch ihre eigenen Harze gebunden. Der Transport des Korkrohstoffes von Portugal in die Schweiz verursacht nur 1.2 MJ/kg. Grösser ist der Transportaufwand von Baumwolle (Südamerika) und Schafschurwolle (Australien) bis in die Schweiz (ca. 2.1 bzw. 5.7 MJ/kg). Das Flammenschutzmittel Borax (3%) bei Baumwolle und die Harnstoffimprägnierung (1%) haben nur einen geringen Einfluss.

Dämmstoff	Spezifikation	Roh- dichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]
Steinwolle	Platten, Produktion CH	30–110	15.7
Glaswolle	Platten 50–70% Altglas, Produktion CH	12–80	41
Schaumglas	Platten, 100% Import	105–165	59
Perlit	Schüttdämmstoff, Produktion CH	ca. 100	9.3
Vermiculit	Schüttdämmstoff, Produktion CH	ca. 80	5.7
Perlit	Platten, 100% Import	ca. 150	17.1
Polystyrol expandiert (EPS)	Platten, Produktion CH	15–40	105
Polystyrol extrudiert (XPS)	Platten, 100% Import	20–60	109
Polyurethan (PUR)	Platten, Ortschaum, Produktion CH	ca. 30	102
Polyisocyanurat (PIR)	Rohrisolation, Produktion CH	ca. 30	102
Harnstoff-Formaldehyd (UF)	Ortschaum, Produktion CH	ca. 12	40
Zellulosefasern	Schüttdämmstoff, Produktion CH	35–80	3.2
Zellulosefasern	Schüttdämmstoff, Import	33–80	4.1
Holzfasern	Platten, Produktion CH	160–200	20
Korkplatte	Platten, 100% Import	90–120	12.7
Baumwolle	Matten, Filze, 100% Import	20–60	17.6
Schafschurwolle	Platten, Matten, 100% Import	25–65	16.4

Bei Wärmedämmschichten auf **Flachdächern** muss je nach Dämmmaterial Bitumen als Klebe- oder Vergussmasse berücksichtigt werden (vgl. auch Kap. Abdichtungen und Folien). Das vollflächige Verkleben von Kork-, Perlit-, oder Steinwolleplatten benötigt pro Quadratmeter ca. 1.5 kg Bitumen (75 MJ/m²), das Vergiessen von Schaumglasplatten durchschnittlich ca. 6 kg Bitumen (300 MJ/m²) pro Schicht. Das Erwärmen und Verarbeiten des Bitumens benötigt zusätzlich 4 bzw. 16 MJ/m² an Grauer Energie.

Abdichtungen und Folien

Alle Grauenergiewerte sind anhand der Zusammensetzung und des Aufwandes für die Endverarbeitung berechnet. Die Graue Energie für die Ausgangsprodukte ist repräsentativ, diejenige für die Endverarbeitung geschätzt. Den grössten Anteil an der Grauen Energie machen die Ausgangsprodukte Bitumen, Papier, Kunststoffe und Alufolien aus. Durch den Einsatz von Recyclingkunststoffen kann die Graue Energie signifikant reduziert werden (ca. 80% bei 100% Recyclatanteil). Der Einsatz von Kunststoffrecyclaten ist aus Qualitätsgründen auf wenige Anwendungsbereiche begrenzt. Trägermaterialien und Füllstoffe spielen für die Graue Energie eine untergeordnete Rolle. Zusatzstoffe wie Weichmacher, Flammschutzmittel, Pigmente und Biozide sind aus energetischer Sicht kaum relevant, weil ihre Graue Energie in derselben Grössenordnung liegt wie diejenige der Hauptbestandteile (Bitumen, Kunststoffe). Auch der Einfluss der Verarbeitung der Rohstoffe zum fertigen Produkt ist von untergeordneter Bedeutung. Wichtig ist dagegen der Energieverbrauch des Einbaus, bzw. die Graue Energie des Bitumens beim Verlegen von bituminösen Dichtungsbahnen.

In den Tabellen sind die wichtigsten Produkte für verschiedene Anwendungsbereiche und typische Schichtdicken aufgeführt. Dabei kann kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Die Produktpalette ist bezüglich Materialzusammensetzung sehr vielfältig. Bei Abweichungen von den aufgeführten Materialdicken lässt sich die Graue Energie linear anpassen. Praktisch alle Produkte werden in der Schweiz hergestellt (Endverarbeitung). Für importierte Produkte muss der entsprechende Transportzuschlag vorgenommen werden.

Bei den verschiedenen **Zwischenlagen, Schutzbahnen, Ausgleichlagen** und **Gleitlagen** sind die Materialien und Anwendungsbereiche vielfältig.

57

Materialtyp	Anwendungsbereich, Spezifikation	Dicke [mm]	Graue Energie [MJ/m²]
Polyestervlies	Trenn-, Dämm- und Schutzvlies	3	18
Polyestervlies	Draineschicht aus 100% PET-Recyclat	35	35
PP-Vlies	Trenn- und Schutzvlies	4	24
PP-Vlies	Trenn- und Schutzvlies mit 20% PP-Recyclat	4	20
PE-Folie	Schutzfolie	0.2	16
Paraffinpapier	Trennlage für Gussasphaltenwendungen	<0.1	1.2
Glasvlies bitumiert	Trennlage für Gussasphaltenwendungen	0.6	20
PVC-Schutzbahn	Schutzbahn	1.3	118
PVC-Recyclingschutzbahn	Schutzbahn mit 40% PVC-Recyclat	5	221
Polyolefin (FPO)-Recyclingschutzbahn	Schutzbahn mit 50% Polyolefin-Recyclat	1.3	64

Dampfbremsen weisen gemäss Norm eine diffusionsäquivalente Luftschicht $s\text{-D} < 130 \text{ m}$ auf. Bei den Dampfbremsen kann diese Funktion durch Kunststofffolien mit deutlich weniger Energieaufwand erreicht werden als mit Bitumenprodukten, da letztere wesentlich mehr Masse und Dicke erfordern.

Dampfbremsen	s-D [m]	Dicke [mm]	Graue Energie [MJ/m²]
Kraftpapier mit Bitumen	9–18	0.4–0.75	7–11
Bitumenbahn GV2	150	2.3	96
Polymerbitumenbahn EV3	150	3	131
PE-Folie nicht flammgeschützt	119–130	0.25–0.32	19–24
PE-Folie flammgeschützt (100% PE- Recyclat)	*	0.2	3
PE-Folie flammgeschützt	126	0.2	16

* keine Angaben verfügbar

Bei den **Dampfsperren** ($s\text{-D} > 130 \text{ m}$) sind es vor allem die dünnen Aluminiumfolien in Produkten, die eine hohe dampfsperrende Wirkung mit verhältnismässig geringer Grauer Energie erzielen (geringe Masse pro Flächeneinheit).

Dampfsperren	s-D [m]	Dicke [mm]	Graue Energie [MJ/m²]
Kraftpapier/Alu mit Bitumen	655–4500	0.38–0.4	19–30
Kraftpapier/PE/Alu	362–3012	0.08–0.25	6.5–15
Bitumenbahn V60	150	2	86
Bitumenbahn J3, GV3	200	2.8	118–129
Bitumenbahn VA4	>2000	4	190
Bitumenbahn Alu80	2000	2	123
Polymerbitumenbahn EV3, EGV3, EP3	150	3	131–142
Polymerbitumenbahn EP4	200	4	200
Polymerbitumenbahn EVA4	>2000	4	199
Polymerbitumenbahn E Alu80	>2000	2	124
PE-Folie nicht flammgeschützt	216–240	0.2–0.4	15–30
PE-Folie flammgeschützt (100% PE- Recyclat)	*	0.2	3
PE-Folie flammgeschützt	156	0.25	20

* keine Angaben verfügbar

Als **Unterdächer** bei Steildachkonstruktionen kommen gleiche oder ähnliche Produkte wie bei den Dampfsperren und Dampfbremsen zum Einsatz. Die leichten Vliese aus verschiedenen Materialien weisen deutlich geringere Grauenergiewerte auf als die dicken und schweren Unterdächer aus Kunststoff oder Bitumenbahnen. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Produkte auch unterschiedliche bauphysikalische Eigenschaften und Anwendungsbereiche aufweisen.

Unterdachfolien	s-D [m]	Dicke [mm]	Graue Energie [MJ/m²]
Kraftpapier mit Glasfasernetz	4.4	0.25	6
PP-Vlies bitumenbeschichtet	5.61	0.5	22
PE-Spinnvlies	0.02	0.15–0.75	4–18
Polyestervlies polyacrylatbeschichtet	0.12	0.55	34
Bitumenbahn V60	150	2	86
Bitumenbahn J3, GV3	200	2.8	118–129
Bitumenbahn J4	280	3.8	162
Polymerbitumenbahn EV3, EGV3, EP3	150	3	131–142
PVC-Folie	10	0.7	62–66
PVC-Folie geschäumt	3	1.5	62
Polyolefin (FPO)-Folie	0.3	0.8	56

Dichtungsbahnen werden vor allem zur Wasserabdichtung auf Flachdächern und im Tiefbau verwendet. Bei den Bitumendichtungsbahnen werden normalerweise mehrere Lagen übereinander aufgebracht. Bei den Werten für die Polyolefindichtungsbahnen handelt es sich um grobe Schätzwerte. Sie sind mit Vorsicht zu verwenden.

Bei der Verarbeitung auf der Baustelle muss zusätzlich das **Verkleben** oder **Verschweissen** der Dichtungsbahnen berücksichtigt werden. Für das vollflächige Verkleben von 1 m² bituminöser Dichtungsbahn werden pro Schicht ca. 1.5 kg Bitumen (75 MJ/m²) gebraucht, das Erwärmen und Verarbeiten benötigen zusätzlich ca. 4 MJ/m² an Energie. Das Verschweissen von bituminösen und thermoplastischen Dichtungsbahnen benötigt pro Schicht rund 4 MJ/m². Bei der Berechnung der Grauen Energie von Abdichtungen, Vliesen und Folien ist je nach Verlegeart (lose, verschweisst, verklebt) die Graue Energie der Materialien um den Verarbeitungsaufwand zu erhöhen.

Dichtungsbahnen	Dicke [mm]	Graue Energie [MJ/m²]
Bitumenbahn V60	2	86
Bitumenbahn J3, GV3	2.8	118–129
Bitumenbahn VA4	4	190
Bitumenbahn Alu80	2	123
Polymerbitumenbahn EV3, EGV3, EP3	3	131–142
Polymerbitumenbahn EP4, EP4 flam WF	4	200–207
Polymerbitumenbahn EVA4	4	199
Polymerbitumenbahn EP5 flam, EP5 flam WF	5	257–258
Polymerbitumenbahn GA2 EPV5 GA, EPA 5 GA flam (gussasphaltverträglich)	5	224–256
Polymerbitumenbahn E Alu80	2	124
PVC-Dichtungsbahn (Dachhaut)	1.8	144–149
PVC-Dichtungsbahn (Feuchtigkeitsabdichtung)	2	167
Polyolefin (FPO)-Dichtungsbahn (Dachhaut)	1.6	135
Polyolefin (FPO)-Dichtungsbahn (Feuchtigkeitsabdichtung)	1.6	149

Bodenbeläge

Die Datenqualität ist für auf der Baustelle verarbeitete Fussbodenbeläge (fugenlose Bodenbeläge) gut. Es handelt sich hauptsächlich um die mineralisch gebundenen Unterlags- und Industrieböden. Bei allen anderen Bodenbelägen sind die Daten unsicher. Es fehlen die Daten für gewisse Kunststoffe, Additive und im Allgemeinen auch für den Endverarbeitungsprozess. Es handelt sich bei den Werten um Grobabschätzungen, die mit der notwendigen Vorsicht zu verwenden und zu interpretieren sind. Alle Grauenergiewerte stehen für in der Schweiz produzierte Materialien. Bei Importprodukten ist ein Transportzuschlag vorzunehmen.

Die meisten Grauenergiewerte wurden anhand der Zusammensetzung und des Aufwandes für die Endverarbeitung berechnet. Die Zusammensetzungen und damit auch die Grauenergiewerte können je nach Hersteller und Produkt stark von den angegebenen Werten abweichen.

Abhängig vom Belagstyp und Untergrund werden beim Einbau zusätzlich Spachtelmassen, Primer, Zwischenschichten, Klebstoffe und Materialien für die Oberflächenversiegelung verwendet. Der Verbrauch und die Graue Energie dieser Chemikalien hängt innerhalb gleicher Belagstypen von verschiedenen Faktoren ab und lässt sich nicht für eine einzelne Standardanwendung angeben. Sie sind fall-spezifisch zu berücksichtigen. Bei den Fertigparkett-typen und beim Linoleum ist in den Grauenergie-werten eine werksseitige Oberflächenversiegelung eingeschlossen. Lösemittlemissionen durch die Anwendung dieser Chemikalien sind separat zu bewerten (vgl. Kap. 9).

In den Tabellen sind Grauenergiewerte für die wichtigsten Bodenbelagstypen aufgeführt. Die Belagsdicken und Flächengewichte beziehen sich auf Angaben aus den einschlägigen SIA-Normen oder auf typische Standardprodukte. Bei Abweichungen von den angegebenen Belagsdicken ist die Graue Energie resp. Flächenmasse entsprechend umzu-rechnen.

Bei den **Unterlagsböden** verursacht das Bindemittel je nach Gehalt und Art ca. 50–75% der Grauen Energie, der verbleibende Anteil entfällt auf die Zuschlagstoffe, Zusatzmittel und die Verarbeitung. Die hohe Graue Energie von Gussasphalt ist durch das Bitumen bedingt. Die Verlegung von Unterlagsböden erfolgt direkt auf dem Untergrund (im Verbund) oder bei schwimmenden Unterlagsböden auf eine Trennlage oder Dämmschicht. Schwimmende Unter-lagsböden werden vor allem im Wohnungsbau ein-gesetzt, wo sie zur Verbesserung der Trittschalldäm-mung nicht mehr wegzudenken sind. Zement- und anhydritgebundene Unterlagsböden sind geeignet für Bodenheizungen. Unterlagsböden aus Guss-asphalt kommen u.a. dort zur Anwendung, wo aus bauphysikalischen Gründen eine Dampfsperre erfor-derlich ist.

61

Unterlagsböden	Verlegeart	Zusammensetzung	Dicke [mm]	Flächen- gewicht [kg/m²]	Graue Energie [MJ/m²]
Mörtel zement- gebunden PC 300–450	Im Verbund	13–20% PC, 0.15% Zusatzmittel	30	69	77–95
Mörtel zement- gebunden PC 300–450	Schwimmend	13–20% PC, 0.15% Zusatzmittel	55	127	141–174
Fliessmörtel anhydritgebunden	Im Verbund	32% Anhydrit, 1.8% Kalkhydrat, 0.18% Zusatzmittel	20	40	93
Fliessmörtel anhydritgebunden	Schwimmend	32% Anhydrit, 1.8% Kalkhydrat, 0.18% Zusatzmittel	30	60	140
Mörtel anhydritgebunden	Schwimmend	32% Anhydrit, 1.8% Kalkhydrat, 0.18% Zusatzmittel	50	100	233
Gussasphalt	Im Verbund, schwimmend	8% Bitumen	30	69	511

Auch bei den **fugenlosen Industriebodenbelägen** und **Zementüberzügen** verursachen die Bindemittel den grössten Teil der Grauen Energie. Sie erhöht sich mit steigendem Anteil an organischen Bindemitteln. Bei den Kunstharzbelägen wird dieser Effekt durch das geringe Flächengewicht zum Teil wieder aufgehoben. Je nach Anwendungsbereich und Beanspruchung werden fugenlose Industrieböden und Zementüberzüge mit Haftbrücken oder direkt auf den sauberen Untergrund aufgebracht.

Bezeichnung	Anwendungsbereich besondere Eigenschaften	Bindemittel, Zusatzmittel und spezielle Zuschläge	Dicke [mm]	Flächen- gewicht [kg/m ²]	Graue Energie [MJ/m ²]
Zementüberzug PC 300–450	–	13–20% PC, 0.15% Zusatzmittel	30	69	77–95
Hartbetonbelag PC 300–500	Erhöhte Verschleissfestigkeit	13–22% PC, 0.15% Zusatzmittel, Hartzuschläge	30	72	80–105
Zement-Kunstharz- belag PC 300–450	Erhöhte Beständigkeit gegen Öl und Benzin	13–20% PC, 0.5–1.5% organ. Bindemittel, 0.15% Zusatzmittel	30	71	142–160
Magnesiabelag	Korrosiv gegen Metalle, empfindlich auf stehende Nässe	15% Magnesit, 12% Magnesiumchlorid, 0.6% Pigmente	15	35	69
Steinholzbelag	Wärmeschützend, korrosiv gegen Metalle, empfindlich auf stehende Nässe	15% Magnesit, 12% Magnesiumchlorid, 34% Holzspähne, 1.9% Pigmente	20	24	90
Gussasphaltbelag	Geeignet für Nassbereich, dampfbremsend	8% Bitumen	30	69	511
Kunstharzmörtel- belag	Geeignet für Nassbereich, dampfbremsend, für erhöhte Beständigkeit gegenüber Chemikalien	15% Kunstharzbindemittel (UP, EP, PMMA, PU)	6	11	153
Kunstharzflies- mörtelbelag	Geeignet für Nassbereich, dampfbremsend, für erhöhte Beständigkeit gegenüber Chemikalien	20% Kunstharzbindemittel (UP, EP, PMMA, PU)	4	8.5	156
Kunstharzflies- belag	Geeignet für Nassbereich, dampfbremsend, für erhöhte Beständigkeit gegenüber Chemikalien	27.5% Kunstharzbindemittel (UP, EP, PMMA, PU)	2.5	5.5	138

Die Graue Energiewerte für die verschiedenen **Holzparketttypen** beziehen sich auf einheimische Hölzer mit entsprechend geringen Transportdistanzen. Werden ausländische Holzrohstoffe verwendet, muss die Graue Energie mit den entsprechenden Transportleistungen ergänzt werden.

Die Werte für **Kork**beläge sind als Grobabschätzung zu verstehen. Die Bindemittel verursachen 25–40% der Grauen Energie, beim PVC-beschichteten Kork das PVC rund 50%.

Bei den mineralischen Plattenbelägen haben die **Keramik**platten aufgrund des hohen Temperaturniveaus beim Brennprozess sowohl massenbezogen als auch pro Flächeneinheit relativ hohe Grauenenergiewerte. Für **Kunststein**- und **Naturstein**platten sind die Werte etwa gleich gross. Die Graue Energie von Natursteinplatten erhöht sich, sobald das Gesteinsmaterial über weitere Distanzen transportiert werden muss. Die Graue Energie ist v.a. für Überseeprodukte mit der entsprechenden Transportleistung zu ergänzen.

Bei den elastischen und textilen Bodenbelägen ist die Datenqualität ungenügend. Ausser beim PVC-Belag handelt es sich um Schätzwerte anhand der Zusammensetzung und Analogieüberlegungen zur Produktion von Dichtungsbahnen und Folien. Die Graue Energie von Bodenbelägen aus nachwachsenden Rohstoffen (Linoleum, Naturkautschuk) sind im Vergleich zu Belägen auf Erdölbasis (Polyolefin, PVC, Synthesekautschuk) deutlich niedriger. Beim **Linoleum** besteht das Bindemittel (Linoleumzement) aus 75% Leinöl (Samenöl der Flachspflanze) und 25% Kolophonium (Kiefernharz), beim **Naturkautschuk** (Naturlatex) hauptsächlich aus dem Milchsaft des Kautschukbaumes. Bei den Kunststoffbelägen (**Polyolefin, PVC, Synthesekautschuk**) sind die unverarbeiteten Polymere, beim PVC zusätzlich die Weichmacher für den grössten Teil der Grauen Energie (75–90%) verantwortlich. Füllstoffe, Zusätze, Pigmente und die Herstellung haben nur eine untergeordnete Bedeutung. Die beiden Grauenenergiewerte für Teppiche (**textile Naturfasern, textile Kunststofffasern**) sind als Grobabschätzungen zu verstehen. Unterschiedliche Grauenenergiewerte der Nuttschichtmaterialien (Schafschurwolle ca. 16 MJ/kg, Nylon ca. 155 MJ/kg) machen die Differenzen in der Grauen Energie aus.

Bezeichnung	Spezifikation, Anwendungsbereich	Zusammensetzung	Dicke [mm]	Flächen- gewicht [kg/m²]	Graue Energie [MJ/m²]
Klebparkett	Verkehrsbereich, Wohnen	0.4% Klebenetz	8	5.1	80
Fertigparkett zweischichtig	Werkversiegelt, Nutzschichtdicke 4 mm, Verkehrsbereich, Wohnen	1.2% Bindemittel, 1% Versiegelung	11	6.5	119
Fertigparkett dreischichtig	Werkversiegelt, für schwimmende Verlegung, Nutzschichtdicke 3.75 mm, Verkehrsbereich, Wohnen	3.8% Bindemittel, 0.9% Versiegelung	15	7.4	110
Korkplatten natur	Wohnen	90% Kork, 10% Bindemittel	4	2.5	49
Korkplatten beschichtet	Gewerbe, Wohnen	65% Kork, 10% Bindemittel, 15 % PVC, 10% Weichmacher	3.2	3.5	114
Keramikplatten	Industrie, Gewerbe, Wohnen	Ton, Lehm, evtl. Glasur	5	11	78
Kunststeinplatten PC 300	Verkehrsbereich	13% PC, spezielle Zuschläge	10	19	21
Natursteinplatten	Industrie, Gewerbe, Wohnen	z.B. Travertin, Granit, Gneis, Marmor	15	30–42	15–21
Linoleum	Linoleumbelag auf Juteträger acrylatbeschichtet, Gewerbe, Wohnen	35% Linoleumzement, 35% Holz-/Korkmehl, 16% Füllstoffe, Pigmente	3.2	3.9	64
Naturkautschuk	Industrie, Gewerbe, Verkehrsbereich	52% Kautschuk, 44% Füllstoff, 4%, Pigmente	4	6.4	89
Polyolefinbelag	Industrie, Gewerbe, Wohnen	31% Polyolefine, 67% Füllstoff, 2% Antistatika, Pigmente	2	3.4	116
PVC-Belag	Industrie, Gewerbe, Wohnen	58% PVC, 30% Weichmacher, 11% Füllstoffe, 0.65% Stabilisatoren	3	2.55	164
Synthesekaut- schukbelag (SBR)	Industrie, Gewerbe, Verkehrsbereich	52% Kautschuk, 44% Füllstoff, 4% Pigmente	4	6.4	325
Textile Natur- fasern	Gewerbe, Wohnen	40% Schafschurwolle, 10% Latex, 40% Filler, 5% Chemikalien, 5% Gewebe	10	2	57
Textile Kunst- stofffasern	Gewerbe, Wohnen	40% Nylon, 10% Latex, 40% Filler, 5% Chemikalien, 5% Gewebe	6	2	168

Rohrleitungen

Die Grauenergiewerte von Beton- und Kunststoffrohren werden anhand der Zusammensetzung und des Aufwandes für die Endverarbeitung berechnet. Der Energieverbrauch der Verarbeitung zum fertigen Rohr spielt in den meisten Fällen in Vergleich zum Energieinhalt der Ausgangsstoffe nur eine untergeordnete Rolle. Am grössten ist der Anteil bei der Betonrohrfertigung (0.33 MJ/kg). Er macht je nach Zementgehalt zwischen 20 und 30% der gesamten Grauen Energie aus. Bei der Herstellung von Kunststoffrohren wird für PVC und PVDF als Näherung mit 6 MJ/kg, bei den restlichen Kunststoffrohren mit einem Herstellungsenergiebedarf von 4.5 MJ/kg (Richtwert für die Rohrextusion) gerechnet. Zu Kupfer und Keramik liegen Energieverbrauchsangaben für gebrauchsfertige Produkte ab Werk vor. Bei Gusseisen, Stahl, vernetztem Polyethylen mit Aluminiumkern (Mepla) und Gusseisen wurden die Grauenergiewerte anhand von Produkten mit vergleichbarem Verarbeitungsaufwand (z.B. Aluminiumblech) abgeschätzt.

Material	Anwendungsbereich	Zusammensetzung	Rohdichte [kg/m³]	Graue Energie [MJ/kg]
Polyethylen (PE)	Abwasser-/Trinkwasserrohre	–	950	80
Polyethylen-Aluminium (MEPLA)	Trinkwasserrohre	70% PE, 30% Aluminium (0% Recyclatanteil)	1470	119
Polypropylen (PP)	Abwasserrohre	–	930	80
Polyvinylchlorid (PVC)	Abwasserrohre	–	1400	69
Polyvinylidenfluorid (PVDF)	Abwasserrohre	–	1780	97
Styrol-Acrylnitril-Butadien (ABS)	Abwasserrohre	–	1060	89
Beton PC 250–500	Abwasserrohre	11–22% PC, Zusatzmittel	2300	1.08–1.55
Keramik	Abwasserrohre	–	2000	7.1
Gusseisen	Abwasserrohre	0% Recyclatanteil	7200	69
Kupfer	Trinkwasserrohre	40% Recyclatanteil	8900	113
Stahl verzinkt	Trinkwasserrohre	20% Recyclatanteil	7850	44
Stahl rostfrei	Trinkwasserrohre	0% Recyclatanteil (16% Cr, 13% Ni)	7900	105

Die Graue Energiewerte müssen für die konkrete Anwendung auf Längeneinheiten (Laufmeter) umgerechnet werden (vgl. Tabelle unten). Dabei sind gleichwertige Funktionen (Druckstufe, Querschnitte) miteinander zu vergleichen. Anschlüsse, Dichtungsringe und Fugen sind nicht berücksichtigt. Bei solchen vergleichenden Betrachtungen sind Kunststoff- und Kunststoffverbundrohre gegenüber mineralischen oder metallischen Werkstoffen in der Regel deutlich weniger energieintensiv.

Graue Energie von Abwasserrohren für die Hausentwässerung und von Trinkwasserrohren

Material/Anwendung	Innen-/Aussendurchmesser [mm]	Metergewicht [kg/Laufmeter]	Graue Energie [MJ/Laufmeter]
Gusseisenrohr Abwasser DN 100	105/112	8.6	593
PVC-Rohr Abwasser DN 100	105.6/110	1.04	72
ABS-Rohr Abwasser DN 100	105.6/110	0.79	70
PP-Rohr Abwasser DN 100	104.6/110	0.85	68
PE-Rohr Abwasser DN 100	101.4/110	1.36	109
PE-Aluminium-Rohr (MEPLA) Trinkwasser DN 20	20/26	0.32	38
Stahlrohr rostfrei Trinkwasser DN 20	19.6/22	0.62	65
Stahlrohr verzinkt Trinkwasser DN 20	21.6/26.9	1.58	69
Kupferrohr Trinkwasser DN 20	20/22	0.59	66
PE-Rohr Trinkwasser DN 20	18/25	0.22	18

Fenster

Fenster haben in der Gesamtenergiebilanz eines Gebäudes eine Schlüsselstellung, wie sie keinem anderen Bauteil zukommt. Grösse, Orientierung, Wärmedurchgangszahl von Glas und Rahmen haben einen oft unterschätzten Einfluss auf die Betriebsenergie. Aber auch die Herstellungenergie von Rahmen und Glas kann je nach Material diejenige einer geschlossenen Wand um ein Vielfaches übersteigen.

Fenstergrösse und Typ werden durch das Verhältnis von Rahmenlichtmass RLM zu Rahmenausmass RAM charakterisiert (vgl. Abb. 19). Als Rahmenlichtmass RLM wird die freie Innenfläche eines Fensterrahmens verstanden (Breite zwischen Rahmeninnenkanten mal Abstand Oberkante/Unterkante), unter Rahmenausmass RAM die Rahmengesamtbreite mal die Rahmengesamthöhe. Für Fenster mit und ohne Flügel werden je drei Typen unterschieden (vgl. Abb. 19). Die Fenstertypen «klein» stehen für einen niedrigen Anteil der freien Glasfläche im Verhältnis zum Rahmenausmass, die Typen «gross» für einen hohen Anteil. Bei Fenstern ohne Flügel verschiebt sich das Verhältnis RLM/RAM in Richtung Typ «gross». Typische Vertreter des Fenstertyps «klein» sind zum Beispiel kleine Kellerfenster, Vertreter des Typs «gross» zum Beispiel eine Balkon-Fenstertüre. Zu den Typen «normal» gehören die meisten Standardfenster mit Fensterflächen von durchschnittlich 2.15 m² (Fensterbreite 1.65 m, Fensterhöhe 1.3 m).

Als einfach handhabbare Bezugsgrösse für die Berechnung der Grauen Energie wird das Konstruktionslichtmass KLM in Quadratmeter (Abstand Leibungen mal Abstand Fensterband/Sturz) verwendet. Diese Grösse kann leicht aus den Konstruktionsplänen bestimmt werden. Bei Metallrahmen ist das KLM normalerweise mit den RAM identisch. Bei Holz-, Holzmetall- und PVC-Fenstern, die auf die Leibungen innen angeschlagen werden, muss berücksichtigt werden, dass das KLM kleiner ist als das RAM. Diesem Umstand wurde in den Grauenenergiewerten für Rahmenmaterialien Rechnung getragen. Alle Grauenenergiewerte für Rahmenmaterialien und Verglasungstypen beziehen sich auf die Flächeneinheit des Konstruktionslichtmasses KLM.

Bei den **Fensterrahmen** sind Grauenenergiewerte zu den 7 wichtigsten in der Schweiz hergestellten Rahmenkonstruktionen bzw. -materialien aufgeführt. Es handelt sich dabei um Metallrahmen aus Aluminium, Bronze, Stahl und Edelstahl, um einen Kunststoff-Rahmen aus PVC sowie Holz und Holz-Aluminium-Rahmen. Die geringste Graue Energie vergleichbarer Grössen, weisen reine Holzfenster auf. Relativ energieintensiv sind die Metallfenster, während Holz-Aluminium und PVC-Fenster im Mittelbereich liegen. Auch bei den k-Werten (Wärmedurchgangszahl) bestehen signifikante Unterschiede. Am tiefsten sind sie für Holz-, PVC- und Holz-Aluminium-Rahmen. Deutlich höher sind sie für alle Metallrahmen. Tiefe k-Werte wirken sich bei Gesamtenergiebetrachtungen positiv aus.

67

Abb. 19
Masseinheiten für
Fenstertypen mit
und ohne Flügel;
RLM: Rahmen-
lichtmass, RAM:
Rahmenausmass

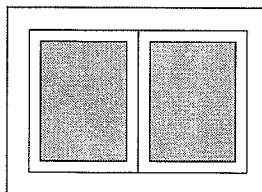
Fenster mit Flügel

Typ klein	RLM/RAM	< 0.58
Typ normal	RLM/RAM	0.58–0.7
Typ gross	RLM/RAM	> 0.7

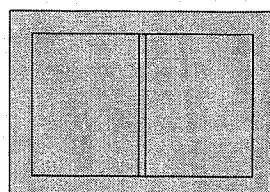
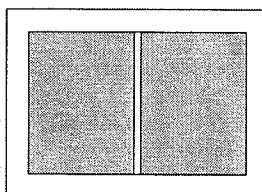
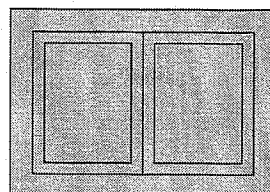
Fenster ohne Flügel

Typ klein	RLM/RAM	< 0.79
Typ normal	RLM/RAM	0.79–0.85
Typ gross	RLM/RAM	> 0.85

Rahmenlichtmass: RLM



Rahmenausmass: RAM



Damit man vom Konstruktionslichtmass (KLM) auf eine bestimmte Glasfläche schliessen kann, wurde ein Korrekturfaktor, der von der Rahmenart abhängig ist, eingeführt. Der Korrekturfaktor bezieht sich auf die Verglasung. Damit werden die durch das Rahmenmaterial bedingten Unterschiede der Glasfläche korrigiert.

Rahmenmaterial mit Flügel	Spezifikation	k-Wert [W/m ² K]	Typ	Korrekturfaktor Verglasung [-]	Masse [kg/m ² KLM]	Graue Energie [MJ/m ² KLM]
Fensterrahmen Aluminium mit Flügel	Wärmegeädämmtes Aluprofilsystem chromatiert und pulverbeschichtet, Recyclatanteil Alu 35%	1.9	klein	1.21	26.1	7300
			normal	1.11	18.5	5200
			gross	1.07	13.1	3700
Fensterrahmen Baubronze mit Flügel	Wärmegeädämmtes Bronze-Profilsystem, Recyclatanteil Baubronze 90%	2.0	klein	1.02	63.3	4800
			normal	1.01	44.8	3400
			gross	1.01	31.7	2400
Fensterrahmen Edelstahl mit Flügel	Edelstahlprofil thermisch getrennt, Recyclatanteil Edelstahl 20%	1.9	klein	1.07	41.9	5400
			normal	1.04	29.6	3800
			gross	1.02	21.0	2700
Fensterrahmen Stahl mit Flügel	Wärmegeädämmtes Profilstahlrohr- system chromatiert und pulverbe- schichtet, Recyclatanteil Stahl 40%	1.8	klein	1.13	49.5	3700
			normal	1.07	35.0	2600
			gross	1.04	24.8	1900
Fensterrahmen PVC mit Flügel	Hart-PVC Profile stahlverstärkt mit Alu-Wetterschenkel chromatiert und pulverbeschichtet, Recyclatanteil Alu 35%	1.5	klein	0.93	28.8	2600
			normal	0.96	20.4	1800
			gross	0.98	14.4	1300
Fensterrahmen Holz/ Aluminium mit Flügel	Vollholzrahmen gestrichen mit chromatiertem und pulverbe- schichtetem Alu-Wetterschutz, Recyclatanteil Alu 35%	1.6	klein	0.84	20.9	2400
			normal	0.91	14.8	1700
			gross	0.95	10.4	1200
Fensterrahmen Holz mit Flügel	Vollholzrahmen gestrichen	1.5	klein	0.82	17.4	1000
			normal	0.90	13.3	700
			gross	0.94	8.7	500

Auch der Flügel hat einen entscheidenden Einfluss auf die Energieintensität eines Fensters. Rahmen mit Flügel sind pro KLM annähernd doppelt so energieintensiv wie Rahmen ohne Flügel.

Rahmenmaterial ohne Flügel	Spezifikation	k-Wert [W/m ² K]	Typ	Korrektur- faktor Verglasung [-]	Masse [kg/m ² KLM]	Graue Energie [MJ/m ² KLM]
Fensterrahmen Aluminium ohne Flügel	Wärmedämmtes Aluprofilsystem chromatiert und pulverbeschichtet, Recyclatanteil Alu 35%	1.9	klein	1.07	13.1	3700
			normal	1.04	9.2	2600
			gross	1.03	6.5	1800
Fensterrahmen Baubronze ohne Flügel	Wärmedämmtes Bronze- Profilsystem, Recyclatanteil Baubronze 90%	2.0	klein	1.01	31.7	2400
			normal	1.00	22.4	1700
			gross	1.00	15.8	1200
Fensterrahmen Edelstahl ohne Flügel	Edelstahlprofil thermisch getrennt, Recyclatanteil Edelstahl 20%	1.9	klein	1.02	21.0	2700
			normal	1.01	14.8	1900
			gross	1.01	10.5	1400
Fensterrahmen Stahl ohne Flügel	Wärmedämmtes Profilstahlrohr- system chromatiert und pulverbe- schichtet, Recyclatanteil Stahl 40%	1.8	klein	1.04	38.1	2900
			normal	1.03	26.9	2000
			gross	1.02	19.0	1400
Fensterrahmen PVC ohne Flügel	Hart-PVC Profile stahlverstärkt mit Alu-Wetterschenkel chromatiert und pulverbeschichtet, Recyclatanteil Alu 35%	1.5	klein	0.98	14.4	1300
			normal	0.99	10.2	900
			gross	0.99	7.2	650
Fensterrahmen Holz/Aluminium ohne Flügel	Vollholzrahmen gestrichen mit chromatiertem und pulverbe- schichtetem Alu-Wetterschutz, Recyclatanteil Alu 35%	1.6	klein	0.95	10.4	1200
			normal	0.97	7.4	850
			gross	0.98	5.2	600
Fensterrahmen Holz ohne Flügel	Vollholzrahmen gestrichen	1.5	klein	0.94	8.7	500
			normal	0.96	6.2	350
			gross	0.97	4.4	250

Bei den **Fenstergläsern** sind die Grauenergiewerte von 5 Fensterglasvarianten (für Rahmen mit oder ohne Flügel) mit sehr unterschiedlichen Wärmedurchgangszahlen (k-Werte) dargestellt. Die Werte beziehen sich auf die Endfertigung der Gläser in der Schweiz und importiertes Flachglas (Floatglas). Auch bei den Gläsern wird zwischen Grauenergiewerten für kleine, normale und grosse Fenster unterschieden. Alle Angaben sind auf das Konstruktionslichtmass (KLM) bezogen und müssen je nach Wahl des Rahmenmaterials mit den entsprechenden

Korrekturfaktoren in der letzten Kolonne der Tabellen zu den Rahmenmaterialien multipliziert werden. Im Vergleich zur Herstellung der Rahmenprofile ist die Graue Energie aller Verglasungsvarianten niedrig. Der Mehraufwand an Herstellungsenergie für die Beschichtung und die Argonfüllung bei den Wärmeschutzgläsern ist marginal und wird durch die Einsparungen bei der Betriebsenergie innert kürzester Zeit «amortisiert».

Verglasungstyp	Spezifikation	k-Wert [W/m ² K]	Typ	Masse [kg/m ² KLM]	Graue Energie [MJ/m ² KLM]
Fensterscheibe – Einfachverglasung (EV) leinölverkittet mit Flügel	4 mm Floatglas mit Dichtungsmasse	5.7	klein	6.2	130
	inkl. Schutzanstrich,		normal	7.7	150
	17% Glasrecyclatanteil		gross	8.8	160
Fensterscheibe – Einfachverglasung (EV) leinölverkittet ohne Flügel	4 mm Floatglas mit Dichtungsmasse	5.7	klein	9.5	200
	inkl. Schutzanstrich,		normal	10.0	190
	17% Glasrecyclatanteil		gross	10.3	190
Fensterscheibe – Doppelverglasung (DV) leinölverkittet mit Flügel	2 x 4 mm Floatglas mit Dichtungsmasse	2.9	klein	12.3	250
	inkl. Schutzanstrich,		normal	15.5	290
	17% Glasrecyclatanteil		gross	17.6	310
Fensterscheibe – Doppelverglasung (DV) leinölverkittet ohne Flügel	2 x 4 mm Floatglas mit Dichtungsmasse	2.9	klein	19.0	390
	inkl. Schutzanstrich,		normal	20.0	380
	17% Glasrecyclatanteil		gross	20.7	370
Fensterscheibe – Isolierverglasung ohne Beschichtung (2-IV) mit Flügel	2 x 4 mm Floatglas mit Randverbund	2.9	klein	12.9	450
	ohne Gasfüllung,		normal	16.3	460
	17% Glasrecyclatanteil		gross	18.5	450
Fensterscheibe – Isolierverglasung ohne Beschichtung (2-IV) ohne Flügel	2 x 4 mm Floatglas mit Randverbund	2.9	klein	20.0	690
	ohne Gasfüllung,		normal	21.0	610
	17% Glasrecyclatanteil		gross	21.7	530
Fensterscheibe – Wärmeschutzglas mit Beschichtung (2-WS N) mit Flügel	2 x 4 mm Floatglas beschichtet	1.6	klein	12.9	480
	mit Randverbund ohne Gasfüllung,		normal	16.3	500
	17% Glasrecyclatanteil		gross	18.5	480
Fensterscheibe – Wärmeschutzglas mit Beschichtung (2-WS N) ohne Flügel	2 x 4 mm Floatglas beschichtet	1.6	klein	20.0	740
	mit Randverbund ohne Gasfüllung,		normal	21.1	640
	17% Glasrecyclatanteil		gross	21.7	560
Fensterscheibe – Wärmeschutzglas mit Beschichtung (2-WS S) und Argonfüllung mit Flügel	2 x 4 mm Floatglas beschichtet	1.3	klein	12.9	480
	mit Randverbund und Argonfüllung,		normal	16.3	500
	17% Glasrecyclatanteil		gross	18.6	480
Fensterscheibe – Wärmeschutzglas mit Beschichtung (2-WS S) und Argonfüllung ohne Flügel	2 x 4 mm Floatglas beschichtet	1.3	klein	20.0	750
	mit Randverbund und Argonfüllung,		normal	21.1	640
	17% Glasrecyclatanteil		gross	21.8	560

Die Graue Energie eines ganzen Fensters (Rahmen und Glas) sei anhand eines **Berechnungsbeispiels** verdeutlicht. Bei einem Gebäude sollen 100 Quadratmeter KLM Baubronzefenster mit Flügeln und beschichteten Wärmeschutzgläsern eingebaut werden. Das Verhältnis RLM/RAM beträgt 0.49. Zusätzlich verfügt das Gebäude über 20 Quadratmeter KLM Holzfenster ohne Flügel mit leinölverkiteten Doppelverglasungen. Das Verhältnis RLM/RAM beträgt für die Holzfenster 0.89. Die Graue Energie der Fenster berechnet sich nach dem folgenden Schema:

1. Auswählen des Rahmenmaterials und der Verglasung, Bestimmen des Fenstertypes	<ul style="list-style-type: none"> • Flügelfenster Baubronze, Wärmeschutzglas mit Beschichtung, Fenstertyp klein: $RLM/ RAM < 0.58$ • Flügelloses Holzfenster, Doppelverglasung, Fenstertyp gross: $RLM/ RAM > 0.85$
2. Auswählen der Grauenenergiewerte und der Korrekturfaktoren für die Rahmenprofile	<ul style="list-style-type: none"> • Baubronze-Flügelrahmen Typ klein: $4800 \text{ MJ/m}^2 \text{ KLM}$ • Korrekturfaktor Baubronze: 1.02 • Holzrahmen flügellos: $250 \text{ MJ/m}^2 \text{ KLM}$ • Korrekturfaktor Holzfenster: 0.97
3. Auswählen des Grauenenergiewertes für die Verglasung	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeschutzglas beschichtet mit Flügel Typ klein: 480 MJ/m^2 • Doppelverglasung leinölverkittet flügellos Typ gross: 370 MJ/m^2
4. Bestimmen des Konstruktionslichtmasses KLM aus den Plänen	<ul style="list-style-type: none"> • $100 \text{ m}^2 \text{ KLM Flügelfenster}$ • $20 \text{ m}^2 \text{ KLM Fenster flügellos}$
5. Berechnen der Grauen Energie von Fenster-rahmen und Verglasung	<ul style="list-style-type: none"> • $100 \text{ m}^2 * (4800 \text{ MJ/m}^2 + 480 \text{ MJ/m}^2 * 1.02)$ = $528'960 \text{ MJ}$ • $20 \text{ m}^2 * (250 \text{ MJ/m}^2 + 370 \text{ MJ/m}^2 * 0.97)$ = $12'178 \text{ MJ}$
Total: $528'960 \text{ MJ} + 12'178 \text{ MJ} = 541'138 \text{ MJ}$	

In der nachfolgenden Tabelle ist die **Gesamtenergiebilanz** für 5 verschiedene Rahmen-Glas-Kombinationen (Fensterfläche 2.15 m²) über 30 Jahre dargestellt. Die Graue Energie der Rahmen und Gläser sind den vorangegangenen Tabellen entnommen. Die Wärmeverluste und -gewinne durch Rahmen und Gläser inkl. die Verluste durch den Randverbund sind berücksichtigt. Die Zahlen in der untenstehenden Tabelle unterstreichen die grosse Bedeutung der Materialwahl und der Orientierung bei Fenstern. Während bei niedrigen k-Werten mit Holzrahmenkonstruktionen und Südorientierung Energiegewinne

erzielt werden können, sind vor allem bei Metallfenstern im Norden ausserordentlich hohe Verluste möglich. Diese Überlegungen gelten allerdings nur, wenn die Wärmegewinne im Gebäude tatsächlich auch genutzt werden, was oft bei sehr grossen, südorientierten Fensterflächen nicht oder nur beschränkt möglich ist. Dennoch illustrieren die Zahlen die Bedeutung der Fensterplanung in der Bauökologie. Zum Vergleich: Ein doppelschaliges, isoliertes Backsteinmauerwerk mit einem k-Wert von 0.25 weist eine Graue Energie von ca. 1000 MJ/m² auf.

Gesamtenergiebilanz von Fenstern

Rahmen/Glas KLM 2.15 m ²	Graue Energie Glas [MJ]	Graue Energie Rahmen [MJ]	Fenster- orientierung [MJ]	Wärmeverlust und -gewinn ¹⁾ [MJ]	Gesamtenergie 30 Jahre [MJ]
Holz 2-WS S kR= 1.5 kF= 1.3	968	1505	N	15810	18283
			S	-12402	-9930
			O	4056	6528
			W	2977	5449
Holz /Alu 2-WS S kR= 1.6 kF= 1.3	978	3655	N	16709	21342
			S	-11944	-7311
			O	4771	9404
			W	3675	8309
Alu 2-WS S kR= 1.9 kF= 1.3	1193	11180	N	21869	34242
			S	-11193	1180
			O	8094	20467
			W	6830	19203
Alu 2-WS N kR= 1.9 kF= 1.6	1193	11180	N	25428	37801
			S	-7228	5145
			O	11654	24027
			W	10389	22762
Alu 2-IV kR= 1.9 kF= 2.9	1098	11180	N	40530	52808
			S	845	13122
			O	23790	36068
			W	22251	34529

1) Nettogewinne und -verluste durch Glas und Rahmen über 30 Jahre für durchschnittliche Meteoverhältnisse in Zürich

Türen und Türzargen

Beim Grauenergiewert der Türkonstruktion handelt es sich um ein gefalztes Türblatt (2050* 860* 40 mm) aus hartfaserplattenbeschichteten Röhrenspanplatten und allseitigen Fichteneinleimern für den Innenausbau ohne besondere Schalldämm- und Brandschutzeigenschaften. Bei den Zargen sind Grauenergiewerte für eine Massivholzzarge aus Dreischichtplatten, eine Holzwerkstoffzarge aus Spanplatten und eine Stahlzarge aufgeführt. Das Lichtmass der Zargen beträgt 80 mal 200 cm, die Tiefe 16 cm. Die Werte verstehen sich inkl. Oberflächenbehandlung. Die Holzwerkstoffzarge (Spanplatte) wird in Deutschland hergestellt, die anderen Produkte in der Schweiz.

Der grösste Teil der Grauen Energie der Stahlzarge wird durch die Stahlproduktion verursacht (ca. 90%). Bei den Holzzargen ist dagegen auch die Bauteilfertigung massgebend. Auf die gleiche Lebensdauer normiert ist die Massivholzzarge etwas weniger energieintensiv als die Holzwerkstoffzarge, die Stahlzarge ist signifikant energieintensiver.

Produkt	Spezifikation	Graue Energie [MJ/Stück]
Türblatt	Lebensdauer 30 Jahre, Produktion CH	700
Massivholzzarge (Dreischichtplatte)	Lebensdauer 50 Jahre, Produktion CH	520
Holzwerkstoffzarge (Spanplatte)	Lebensdauer 30 Jahre, Produktion D	360
Stahlzarge	Lebensdauer 60 Jahre, Produktion CH	1130

Farben und Lacke

Alle Grauenergiewerte für Farben und Lacke basieren auf Standardrezepturen (Inhaltstoffe) und einem Zuschlag für die Formulierung. Die Rezepturen konkreter Produkte können z.T. erheblich abweichen. Die Graue Energie der Farb- und Lackrohstoffe sind nicht repräsentativ, sie beruhen auf Herstellerangaben, die teilweise nicht sehr zuverlässig sind. Den grössten Einfluss auf die Graue Energie von Farben und Lacken haben die Bindemittel, das Weisspigment Titandioxid und die Lösemittel. Bindemittel auf mineralischer Basis und Naturharze (2–30 MJ/kg) sind weniger energieintensiv als Kunstharzbindemittel (40–155 MJ/kg). Für Buntpigmente sind keine Werte verfügbar, so dass vorderhand nur die Graue Energie von weissen Farben oder Lasuren berechnet werden kann. Je nach Farbton dürfte die Graue Energie mineralischer Pigmente deutlich tiefer sein als diejenige des, in der Herstellung sehr energieintensiven, Titandioxid (ca. 80 MJ/kg). Synthetisch-organische Pigmente sind jedoch aufgrund von Überlegungen zu Prozessketten wahrscheinlich wesentlich energieintensiver.

Die Farben und Lacke haben in zweifacher Hinsicht eine Sonderstellung. Die Graue Energie ist im Rahmen eines gesamten Gebäudes oder auch einer Konstruktion meist nicht von grosser Bedeutung und die Graue Energie ist ein beschränkt aussagekräftiger Indikator für die Umweltbelastung. Mindestens so entscheidend sind die Lösemittelemissionen während der Verarbeitung, die nach dem in der Einleitung beschriebenen Verfahren ergänzend zu beurteilen sind (vgl. Kap. 9). Auch die Toxikologie und Ökotoxikologie von Farben wäre an sich zu beurteilen, wobei da erhebliche methodische Probleme entstehen. Ein Vorschlag für eine Gesamtbeurteilung ist in der Schriftenreihe Umwelt Nr. 232 des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (Vergleichende ökologische Bewertung von Anstrichstoffen im Baubereich) publiziert worden. Die entsprechenden Anwendungshilfen dazu sind für die Farbwahl zu verwenden⁷.

7 Vgl. Baudirektion Kt. Zürich-Hochbauamt;
Ökologisches Bauen; Merkblätter nach Baukostenplan (BKP)
für Ausschreibungen, Zürich Mai 1998.

Bezeichnung	Anwendungsbereich, Spezifikation	Zusammensetzung nach Standardrezepturen	Ausgiebigkeit [g/m ²]	Graue Energie [MJ/kg]
Acryl-Dispersion	Wandfarbe weiss auf Wasserbasis innen	34–41% Wasser, 3.5–6% Bindemittel, 40–43% Füllstoffe, 7–12% Weisspigmente (TiO ₂), 0–1% Lösemittel, Hilfsstoffe	250–400	12–18
Acryllack	Dispersionslack weiss auf Wasserbasis für Holz und Metall	40–56% Wasser, 21–27% Bindemittel, 16–22% Weisspigmente (TiO ₂), 5–7% Lösemittel, Hilfsstoffe	120–150	35–50
Alkydharzlack	Kunstharzlack weiss auf Lösemittelbasis für Holz und Metall	24–29% Lösemittel, 23–40% Bindemittel, 0–15% Füllstoffe, 25–36% Weisspigmente (TiO ₂), Hilfsstoffe	150–170	56–78
Alkydharzlack	Kunstharzlack weiss auf Wasserbasis	39–51% Wasser, 20–24% Bindemittel, 0–7% Füllstoffe, 19–23% Weisspigmente (TiO ₂), 4–8% Lösemittel, Hilfsstoffe	120–150	37–43
Bitumenemulsion	Voranstrich im Tief- und Hochbau (Schwarzanstrich)	35–45% Wasser, 55–65% Oxidationsbitumen, Hilfsstoffe	300	26–30
Bitumenlack	Voranstrich im Tief- und Hochbau (Schwarzanstrich)	45–55% Toluol, 35–45% Oxidationsbitumen, 5–15% Füllstoffe	300	46–50
Kalkfarbe	Wandfarbe weiss innen und aussen	45–60% Wasser, 16–40% Bindemittel, 0–33 Füllstoffe, 0–2% Weisspigment (TiO ₂), Hilfsstoffe	150–400	3–6
Kaseinfarbe	Wandfarbe weiss innen	29–36% Wasser, 12–18% Bindemittel, 40–43% Füllstoffe, 10–12% Weisspigmente, Hilfsstoffe	230	10–12
Leimfarbe	Wandfarbe weiss innen	43–45% Wasser, 0–2% Bindemittel, 48–54% Füllstoffe, 0–8% Weisspigmente, Hilfsstoffe	250	2–10
Naturharz-Dispersion	Wandfarbe weiss innen	38–40% Wasser, 3–9% Bindemittel, 17–42% Füllstoffe, 8–9% Weisspigmente (TiO ₂), 2–4% Lösemittel, Hilfsstoffe	145	8–12
Naturharzöllack	Biolack weiss auf Lösemittelbasis für Holz und Metall	24–46% Lösemittel, 14–16% Bindemittel, 31–42% Füllstoffe, 8–9 % Weisspigmente (TiO ₂), Hilfsstoffe	125	24–32
Organo-Silikatfarbe	Wandfarbe weiss	30–42% Wasser, 6–10% Wasserglas, 3–8% organ. Bindemittel, 37–42% Füllstoffe, 9–10% Weisspigmente (TiO ₂), 0–1% Lösemittel, Hilfsstoffe	250–450	11–17
Parkett-versiegelung	Hartöl Naturharz auf Lösemittelbasis	67–71% Lösemittel, 27–31% Bindemittel, Hilfsstoffe	50–100	27–31
Parkett-versiegelung	Hartöl Naturharz lösemittelfrei	1–3% Lösemittel, 96–99% Bindemittel, Hilfsstoffe	50–100	25–29
Parkett-versiegelung	PU-Lack auf Lösemittelbasis	57–63% Lösemittel, 37–41% Bindemittel, Hilfsstoffe	70–100	87–98
Parkett-versiegelung	PU/Acryl-Lack auf Wasserbasis	56–60% Wasser, 27–31% Bindemittel, 2–5% Lösemittel, Hilfsstoffe	70–100	31–35
Parkett-versiegelung	Harnstoff-Formaldehyd (UF)-Harz säurehärtend	51–55% Lösemittel, 46–50% Bindemittel, Hilfsstoffe	100	65–69
Silikatfarbe	Wandfarbe weiss	25–35% Wasser, 6–8% Wasserglas, 52–59% Füllstoffe, 6–8% Weisspigmente (TiO ₂), Hilfsstoffe	600	6–8
Styrol-Acryl-Dispersion	Wandfarbe weiss auf Wasserbasis	31–42% Wasser, 1.2–17% Bindemittel, 38–48% Füllstoffe, 8–31% Weisspigmente (TiO ₂), 0–3% Lösemittel, Hilfsstoffe	210–250	9–42

Energiebereitstellung

Bei den verschiedenen Energieformen wird zwischen Primär-, Sekundär-, End- und Nutzenergie unterschieden. Primärenergie ist zum Beispiel Rohöl im Erdölfeld, die potentielle Energie von Wasser oder Holz im Wald. Als Sekundärenergie werden diejenigen Formen bezeichnet, die nach Ausbeutung, Aufbereitung und Umwandlung vorliegen. Beispielsweise das Benzin nach der Erdölraffinerie oder der Strom an der Klemme des Kraftwerks. Als Endenergie werden Energieformen bezeichnet, wie sie dem Endverbraucher zur direkten Nutzung zur Verfügung stehen (z.B. Heizöl ab Regionallager, Strom ab Steckdose). Die hier aufgeführten Grauenergiewerte beziehen sich auf Endenergien.

Die Graue Energie für die Bereitstellung einer Energieform wird auf die Masse oder die Energieeinheit (kWh beim Strom) bezogen. Sie umfasst bei den Brenn- und Treibstoffen den effektiven Heizwert (stoffgebundene Energie) und die zur Förderung, Aufbereitung und Transport notwendige Betriebsenergie inkl. allfällige Verluste bei diesen Prozessen. Die Graue Energie von Energieformen ist von der physikalischen Form wie auch vom Ort der Bereitstellung abhängig.

Die nachfolgend aufgeführten Grauenergiewerte für die wichtigsten festen, flüssigen und gasförmigen **Energieträger** beziehen sich auf schweizerische, zum Teil auf europäische Produktionsverhältnisse. Der energieintensivste Prozessschritt in der Energiebereitstellung ist die Aufbereitung der Rohenergieträger (Erdöl, Rohgas, Steinkohle, Braunkohle) zu gebrauchsfertigen Produkten. Bei Erdöl ist dies die Auftrennung (Destillation) in die verschiedenen Fraktionen (Benzin, Diesel, Heizöl leicht, Heizöl schwer). Bei Erdgas je nach Herkunft vor allem die Gastrocknung, Entschwefelung und das Abscheiden von höheren Kohlenwasserstoffen. Bei Braun- und Steinkohle die Zerkleinerung und die Trocknung sowie bei Koks die Verkokung zu Steinkohlekoks. Der Energieverbrauch und die Verluste in der Raffineriestufe betragen bis zu 15% des Heizwertes. Die Feinverteilung der Brenn- und Treibstoffe von der Raffinerie in das Regionallager erhöht die Graue Energie zusätzlich um einige wenige Prozent. Die tiefen Grauenergiewerte für **Holz** kommen dadurch zustande, dass bei Holz aus nachhaltiger Nutzung die stoffgebundene Energie (Heizwert) nicht berücksichtigt ist. Die Graue Energie wird durch die Waldpflege, die Holzgewinnung, -verarbeitung und durch Transporte verursacht, der Unterschied zwischen den beiden Holzformen (Schnitzel, Stückholz) durch unterschiedliche Verarbeitungsprozesse. Die Graue Energie von Holz ist rund 10–20-mal niedriger als für fossile Energieträger.

Energieträger	Spezifikation, Bezugsort	Anteil stoffgebundener Energie (Heizwert) [MJ/kg]	Graue Energie [MJ/kg]
Benzin	Bleifrei ab Regionallager CH	42.8	55.8
Benzin	Verbleit ab Regionallager CH	42.8	55.7
Benzin	Bleifrei/verbleit ab Regionallager Europa	42.8	56.7
Braunkohle	Brikett für Haus- oder Industrieofen	20.6	24.5
Diesel	Ab Regionallager CH	42.8	51.1
Diesel	Ab Regionallager Europa	42.8	51.3
Erdgas	Ab Pipeline-Hochdruck CH	46.0	52.0
Erdgas	Ab Pipeline-Niederdruck CH	46.0	52.4
Heizöl	Extraleicht (EL) ab Regionallager CH	42.7	50.7
Heizöl	Extraleicht (EL) ab Regionallager Europa	42.7	51.3
Heizöl	Schwer (S) ab Regionallager CH	40.6	52.5
Heizöl	Schwer (S) ab Regionallager Europa	40.6	53.2
Holz	Holzschnitzel Wald frei Lager	n.b.	2.5
Holz	Stückholz Wald frei Lager	n.b.	4.1
Kerosin	Ab Regionallager CH	43.5	50.7
Koks	Steinkohlenkoks	30.5	38.1
Propan	Ab Raffinerie CH	ca. 46	52.6
Steinkohle	Steinkohle-Briketts	31.5	35.6

n.b.: nicht berücksichtigt

Die **konventionelle Stromproduktion** ist eine Veredelung von verschiedenen Primärenergieformen. Der Gesamtwirkungsgrad, wie er hier ausgewiesen ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Die Art der Bewertung der Primärenergien, der Abbau, die Aufbereitung und der Transport der fossilen Energieträger bis zum Kraftwerk, der Wirkungsgrad des Kraftwerkes und die Verteilverluste bis zum Ort des Bezugs beeinflussen den Gesamtwirkungsgrad. Er errechnet sich aus dem Verhältnis des am entsprechenden Ort nutzbaren Stroms zur Grauen Energie als der Summe des kumulierten Primärenergieaufwandes. Daneben spielen selbstverständlich auch die Systemgrenzen eine gewisse Rolle. Da die grossen Kraftwerke in Stromverbunden zusammengeschlossen sind und Elektrizität innerhalb dieser Verbunde frei zirkulieren kann, ist eine lokale Betrachtung der Stromproduktion nicht sinnvoll. Produktion und Konsumation von elektrischem Strom erfolgt heute im europäischen Verbundnetz (UCPTE), indem Angebot und Nachfrage ständig abgestimmt werden. Die Grauenenergiewerte für die konventionelle Stromproduktion beziehen sich auf Versorgungsgebiete, die die durchschnittlichen Anteile der Stromproduktionsarten des europäischen Verbundnetzes UCPTE zusammenfassen (sog. Strommix).

Deutlich geringer ist die Graue Energie der **alternativen Stromproduktion**. Der hohe Gesamtwirkungsgrad von 87% ist beim **BHKW (Blockheizkraftwerk)** auf die gleichzeitige Nutzung von Wärme und Strom zurückzuführen. Der Gesamtaufwand für die Wärme-/Stromproduktion kann somit sowohl auf die erzeugte Wärme als auch den Strom alloziert (zugeordnet) werden. Bei der **Solarstrombereitstellung** handelt es sich um typische Hausanlagen mit Einspeisung ins öffentliche Niederspannungsnetz. Die Graue Energie umfasst die zur Herstellung von Photovoltaikzellen und anderen Anlagebestandteilen notwendige Primärenergie. Übersteigt die Graue Energie den Wert von 3.6 MJ/kWh, muss mehr Primärenergie für den Bau der Anlage aufgewendet werden als die Anlage an elektrischem Strom liefert. Bei den Solarzellen haben monokristalline Zellen mit einer guten Sonnenausrichtung den besten Wirkungsgrad und auch die tiefste Graue Energie für die Stromproduktion. Die Graue Energie von **Strom aus Windenergie** ist auf dieselbe Weise berechnet worden. Die Graue Energie bei der alternativen Stromproduktion ist von der mutmasslichen Lebensdauer der Anlage abhängig. Sie wurde mit 20 resp. 20–30 Jahren für Wind- resp. Solaranlagen angenommen. Die Graue Energie nimmt mit zunehmender Lebensdauer und Grösse der Anlage ab. Eine weitere Einflussgrösse ist der Ort des Strombezuges. Direkt ab Klemme Kraftwerk bezogen treten keine Übertragungs- und Umformungsverluste (Transformation) auf, die den Gesamtwirkungsgrad reduzieren. Ab Steckdose mit Mittelspannung in einem Industriebetrieb oder mit Niederspannung in einem Haushalt sinkt der Gesamtwirkungsgrad zusätzlich durch Übertragungs- und Umwandlungsverluste. Sie können bei Niederspannung bis 13% betragen. Bei Strom ab Wechselrichter von Photovoltaikanlagen und ab Blockheizkraftwerk entfällt der grösste Teil der Übertragungsverluste.

Bezugsort	Produktionsform, Bemerkungen	Strommix, Wirkungs- grad	Graue Energie [MJ/kWh]
Ab Steckdose, Mittelspannung	47.5% thermisch, 36.9% nuklear, 15.2% hydraulisch, 0.4% andere	UCPTE 90–94, 31% WG	11.5
Ab Steckdose, Niederspannung	47.5% thermisch, 36.9% nuklear, 15.2% hydraulisch, 0.4% andere	UCPTE 90–94, 28% WG	13.1
Ab Blockheizkraft- werk (BHKW)	Gasmotor (60 kW thermische, 160 kW elektrische Leistung) mit Wärme- pumpe und 20 m³ Heizwasserspeicher, Allokation Strom/Wärme nach Energie, Gesamtwirkungsgrad 87%	65% WG	5.51
Ab Wechselrichter Solarstromanlage	3 kWp Hausanlage in Schrägdach integriert, monokristalline Zellen (19.8 m²)	147% WG	2.45
Ab Wechselrichter Solarstromanlage	3 kWp Flachdachanlage, monokristalline Zellen (22 m²)	131% WG	2.74
Ab Wechselrichter Solarstromanlage	3 kWp Hausanlage in Fassade integriert, monokristalline Zellen (19.8 m²)	107% WG	3.38
Ab Wechselrichter Solarstromanlage	3 kWp Hausanlage auf Schrägdach, polykristalline Zellen (24.3 m²)	82% WG	4.39
Ab Wechselrichter Solarstromanlage	3 kWp Flachdachanlage, polykristalline Zellen (21.9 m²)	81% WG	4.43
Ab Wechselrichter Solarstromanlage	3 kWp Hausanlage an Fassade, polykristalline Zellen (24.3 m²)	58% WG	6.19
Ab Wechselrichter Solarstromanlage	560 kWp Solarkraftwerk Mont Soleil, monokristalline Zellen (4576 m²), Ertrag 1200 kWh/kW-peak	123% WG	2.92
Ab Windkraftwerk	150 kW-Anlage auf dem Grenchenberg (Turmhöhe 30 m, Rotordurchmesser 23.8 m)	766% WG	0.47
Ab Windkraftwerk	30 kW-Anlage auf dem Simplon (Turmhöhe 22 m, Rotordurchmesser 12.5 m)	455% WG	0.79

Energienutzung

Die Nutzenergie stellt die letzte Stufe der Energieprozesskette dar. Es handelt sich vor allem um Nutzwärme beispielsweise in Form von Raumwärme einer Bodenheizung, Warmwasser aus der Zapfstelle oder Prozesswärme in der Industrie. Aber auch die Kraft einer Teigknetmaschine oder Licht aus einer Lampe sind Nutzenergieformen. In allen Werten sind die Vorstufen der Endenergiebereitstellung (Precombustion), die Heizungsverluste, die Verteilungsverluste in Gebäuden von ca. 2–3% sowie der Energieverbrauch für die Herstellung der Heizungsinfrastruktur eingeschlossen. Energienutzungstechnologien gibt es in ausserordentlicher Vielzahl. Es sind die Grauenergiewerte für Nutzwärme aus Haus- und Industriefeuerungen sowie aus alternativen Wärmesystemen in typischen Leistungsbereichen angegeben.

Zwei wichtige Kenngrößen für Systeme zur Wärmeerzeugung sind der Erntefaktor und bei Feuerungssystemen der Jahresnutzungsgrad. Der Erntefaktor gibt das Verhältnis zwischen Nutzenergie (z.B. Nutzwärme) und kumulierter nicht erneuerbarer Primärenergie (Graue Energie) wieder. Der Jahresnutzungsgrad ist ein Mass für die Effizienz der Umwandlung eines Endenergieträgers in Nutzwärme durch ein Feuerungssystem. Er setzt sich aus den Abgasverlusten, den Strahlungsverlusten der Brenner, aus der inneren Auskühlung und den Verteilungsverlusten zusammen. Sowohl hohe Erntefaktoren als auch hohe Jahresnutzungsgrade stehen für einen niedrigen Grauenergieverbrauch zur Erzeugung von Nutzwärme.

Für Nutzwärme aus **konventionellen Feuerungen** (fossile Energieträger) ist der Erntefaktor immer kleiner als 1. Erntefaktoren grösser als 1 können nur von Nutzwärmesystemen mit erneuerbaren Energieträgern erreicht werden. Er beträgt für das fossile Wärmesystem mit dem besten Jahresnutzungsgrad (kondensierende Gasheizung, 97% Jahresnutzungsgrad) lediglich 0.81. D.h. für die Erzeugung von 1 MJ Nutzwärme müssen 1.24 MJ nicht erneuerbare Energie aufgewendet werden. Bei den konventionellen Feuerungen kann der Jahresnutzungsgrad zwischen 40% für einen sehr schlechten und 97% für einen modernen Niedertemperaturkessel betragen. Der überwiegende Teil der Verluste wird durch die Abgase, im Speziellen durch das mit den restlichen Verbrennungsgasen entweichende gasförmige Wasser, verursacht. Wird das gasförmige Wasser kondensiert und so die Kondensationswärme genutzt (kondensierender Kessel) erhöht sich der Jahresnutzungsgrad. Bei allen fossilen Heizungssystemen ist der Grauenergieanteil der Infrastruktur verglichen mit dem Anteil der Endenergiebereitstellung und den Heizungsverlusten kaum relevant, da die Graue Energie der Infrastruktur verglichen mit dem Energieumsatz einer Heizung während ihrer Lebensdauer sehr klein ist.

Energie-träger	Feuerungstyp, Spezifikation	Ernte-faktor	Jahresnutzungsgrad, Bemerkungen	Graue Energie [MJ/MJ]
Erdgas	Ab Nahverteilung Blockheizkraftwerk (BHKW), Gasmotor mit Wärmepumpe und 20 m³ Heizwasserspeicher	0.70	60 kW thermische, 160 kW elektrische Leistung, Allokation Strom/Wärme nach Energie, Gesamtwirkungsgrad 87%	1.43
Erdgas	Hausfeuerung < 100 kW, kondensierender Kessel mit LowNOx-Brenner	0.81	Jahresnutzungsgrad 97%	1.24
Erdgas	Hausfeuerung < 100 kW mit atmosphärischem Brenner	0.72	Jahresnutzungsgrad 87%	1.39
Erdgas	Hausfeuerung < 100 kW mit atmosphärischem LowNOx-Brenner	0.72	Jahresnutzungsgrad 87%	1.39
Erdgas	Hausfeuerung < 100 kW mit Gebläsebrenner	0.70	Jahresnutzungsgrad 87%	1.42
Erdgas	Hausfeuerung < 100 kW mit LowNOx-Gebläsebrenner	0.70	Jahresnutzungsgrad 87%	1.42
Erdgas	Hausfeuerung > 100 kW mit LowNOx-Brenner	0.74	Jahresnutzungsgrad 87%	1.35
Erdgas	Industriefeuerung > 100 kW Euro	0.74	Jahresnutzungsgrad 87%	1.35
Heizöl EL (extraleicht)	Hausfeuerung 10 kW Brennwertkessel	0.72	Jahresnutzungsgrad 94%	1.38
Heizöl EL (extraleicht)	Hausfeuerung 10 kW mit Low NOx-Brenner	0.67	Jahresnutzungsgrad 87%	1.49
Heizöl EL (extraleicht)	Hausfeuerung 100 kW Brennwertkessel	0.76	Jahresnutzungsgrad 94%	1.31
Heizöl EL (extraleicht)	Hausfeuerung 100 kW mit Low NOx-Brenner	0.70	Jahresnutzungsgrad 87%	1.42
Heizöl EL (extraleicht)	Industriefeuerung 1 MW	0.68	Jahresnutzungsgrad 85%	1.46
Heizöl S (schwer)	Industriefeuerung 1 MW CH	0.63	Jahresnutzungsgrad 85%	1.58
Heizöl S (schwer)	Industriefeuerung 1 MW Euro	0.61	Jahresnutzungsgrad 85%	1.65
Kohle	Kachelofen 5–15 kW Braunkohlebriketts	0.56	Jahresnutzungsgrad 70%	1.78
Kohle	Industriefeuerung 1–10 MW Steinkohle	0.70	Jahresnutzungsgrad 80%	1.44

Bei der Nutzung **erneuerbarer Energieformen** ist die Infrastruktur fast vollumfänglich für die Graue Energie massgebend, bei Nutzwärme aus Holzfeuerungen zusätzlich durch die Bereitstellung des Brennstoffes Holz. Der restliche Energieanteil zur Erzeugung der Nutzwärme stammt aus erneuerbaren Quellen (Umgebungsenergie, Heizwert Holz, Sonnenenergie) und wird der Grauen Energie nicht zugerechnet.

Mit Abstand die tiefste Graue Energie hat Nutzwärme aus **Holzfeuerungen**. Zwar haben sie im Vergleich zu den meisten Feuerungen mit fossilen Energieträgern einen schlechteren Jahresnutzungsgrad. Trotzdem ist der Erntefaktor bei allen Wärmesystemen mit Holz deutlich grösser als 1.

Der Erntefaktor < 1 für Nutzwärme aus **Sonnenkollektoren** kommt daher, dass bei den betrachteten Systemen ein Teil der Wärme durch eine elektrische Zusatzheizung erzeugt wird. Systeme auf rein solarer Basis (ohne elektrisch betriebene Zusatzheizung) dürften einen deutlich geringeren Anteil nicht erneuerbarer Energie und auch eine niedrigere Graue Energie ausweisen (Erntefaktoren > 1).

Bei Nutzwärme aus **Wärmepumpen** ist der Erntefaktor > 1 auf die Annahme einer sehr hohen Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe von 3.5 und einen günstigen Wirkungsgrad der Stromproduktion (38%) zurückzuführen. Die Jahresarbeitszahl gibt das Verhältnis zwischen der jährlich erzeugten Nutzwärme und dem dafür verbrauchten Strom wieder und dürfte lediglich für Neubauten unter günstigsten Bedingungen den Wert von 3.5 erreichen. Bei einer Jahresarbeitszahl von < 3 und einem Wirkungsgrad der Stromproduktion von 30% wird der Erntefaktor kleiner 1.

Energie- quelle	Feuerungstyp, Spezifikation	Ernte- faktor	Jahresnutzungsgrad, Bemerkungen	Umgebungs- energie, Heizwert Holz, Sonnenenergie [MJ/MJ]	Graue Energie [MJ/MJ]
Erdwärme	Wärmepumpe (WP) mit Erdwärmesonde (150 m), Heizleistung WP 10.25 kW	1.2	Jahresarbeitszahl WP 3.5, Anlagengrösse für Einfamilienhaus, Strommix CH 90–94, 38% WG	1.01	0.83
Holz	Stückholzfeuerung 30 kW mit Wärmespeicher 1800 l	7.7	Jahresnutzungsgrad 55%	2.18	0.13
Holz	Stückholzfeuerung 100 kW mit Wärmespeicher 3000 l	8.3	Jahresnutzungsgrad 65%	1.85	0.12
Holz	Schnitzelfeuerung 50 kW, Holzschnitzel aus Sägerei	10.0	Jahresnutzungsgrad 65%	1.54	0.10
Holz	Schnitzelfeuerung 50 kW, Holzschnitzel Wald	9.1	Jahresnutzungsgrad 65%	1.70	0.11
Holz	Schnitzelfeuerung 300 kW, Holzschnitzel aus Sägerei	11.1	Jahresnutzungsgrad 75%	1.33	0.09
Holz	Schnitzelfeuerung 300 kW, Holzschnitzel Wald	10.0	Jahresnutzungsgrad 75%	1.47	0.10
Sonnenlicht	Sonnenkollektor mit 6 m ² Kollektorfläche und elektrischer Zusatzheizung, Warmwasserspeicher 450 l	0.83–0.60	Bandbreite für verschiedene Kollektortypen, Anlagengrösse für 6-Personen Einfamilienhaus	1.02	1.22–1.66
Sonnenlicht	Sonnenkollektor mit 30 m ² Kollektorfläche und elektrischer Zusatzheizung, Warmwasserspeicher 2250 l	0.67–0.62	Bandbreite für verschiedene Kollektortypen, Anlagengrösse für 34-Personen Mehrfamilien- haus	1.01–1.02	1.49–1.61

Transportleistungen

Bei den **Transportleistungen** sind Grauenergiewerte für den direkten und den indirekten Energieverbrauch von durchschnittlichen europäischen Transportmitteln sowie von baustellenspezifischen Transporten für eine Grossbaustelle ausgewiesen. Der direkte Energieverbrauch besteht aus dem Endenergieverbrauch (z.B. Benzin, Strom) der Transportmittel sowie allen vorgelagerten Energiebereitstellungsstufen (Erdölverarbeitung, Stromproduktion). Der indirekte Verbrauch umfasst die Herstellung, den Unterhalt und die Entsorgung der Transportmittel und der Verkehrsinfrastruktur. Seine Berechnung beruht auf verschiedenen statistischen Durchschnittswerten und Schätzungen und ist mit der entsprechen

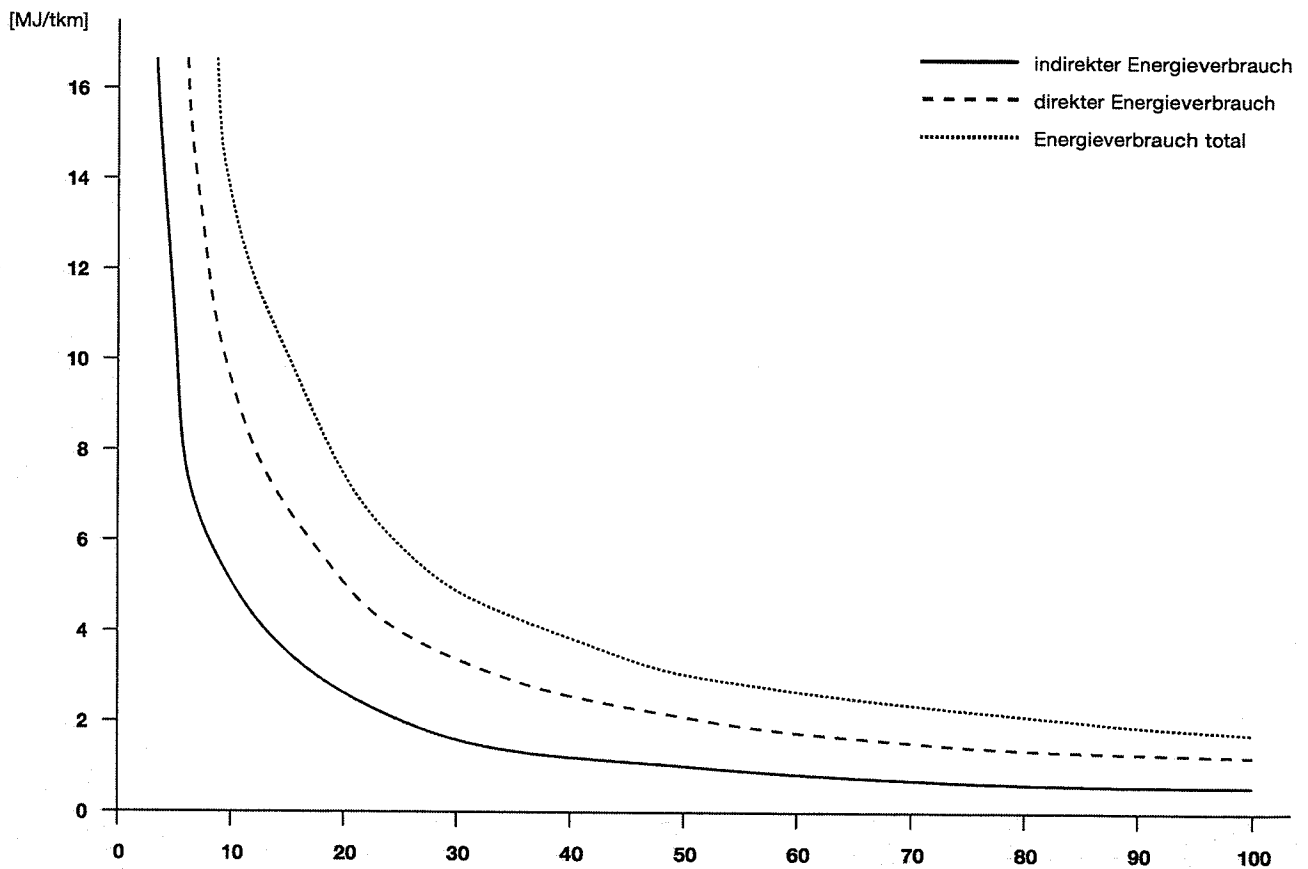
den Vorsicht anzuwenden. Der indirekte Energieverbrauch ist mit Ausnahme des 40-t-LKW für alle Transportmittel niedriger als der direkte Energieverbrauch. In den Grauenergiewerten und der Auslastung ist immer der Transport mit Beladung und die Rückfahrt ohne Beladung (Leerfahrt) berücksichtigt. Eine Auslastung von 50% steht für eine Hinfahrt mit 100% Auslastung und einer Leerfahrt (0% Auslastung) für den Rückweg. Für die Berechnung der Grauen Energie einer Transportleistung muss somit immer zuerst die Auslastung bestimmt werden und dann der direkte und der indirekte Energieverbrauch mit der einfachen Transportdistanz (nur Hinfahrt) multipliziert werden.

Transportmittel	Auslastung [%]	Nutzlast [t]	Bilanzgebiet	direkte Energie [MJ/tkm]	indirekte Energie [MJ/tkm]
Lieferwagen 3.5 t	30	1	Europäische Durchschnittswerte	18.4	6.9
LKW 16 t	40	9.5	Europäische Durchschnittswerte	4.1	1.4
LKW 28 t	9	15	Baustellenspezifische Transporte (Beladung 2.7 t Fassadenelemente)	11.6	6.4
LKW 28 t	15	15	Baustellenspezifische Transporte (Beladung 4.5 t Armierungseisen)	7.0	3.8
LKW 28 t	40	17.5	Europäische Durchschnittswerte	2.2	1.34
LKW 28 t	44	15	Baustellenspezifische Transporte (Beladung 13 t Fertigbetonteile)	2.4	1.30
Betontransporter	50	15	(Beladung 15 t Beton)	2.1	1.14
LKW 28 t	60	15	Baustellenspezifische Transporte (Beladung 18 t Aushub)	1.73	0.95
LKW 28 t	69	15	Baustellenspezifische Transporte (Beladung 20.6 t Abbruch)	1.53	0.83
LKW 40 t	50	27	Europäische Durchschnittswerte	1.24	1.31
Güterzug	50	*	Europäische Durchschnittswerte (80% strombetrieben, 20% dieselbetrieben)	0.64	0.44
Binnenfrachter	60	650–8800	Europäische Durchschnittswerte	0.57	0.28
Binnentanker	65	1900	Europäische Durchschnittswerte	0.62	0.20
Hochseefrachter	65	*	Transport von trockenen Massengütern	0.11	0.01
Hochseetanker	*	*	Verschiedene Grössen und Antriebssysteme	0.10	0.00

* keine Angaben verfügbar

Neben der Art des Transportmittels ist vor allem die Auslastung für die Höhe der Grauen Energie verantwortlich. Ein Grauenenergiewert für die nutzlastspezifische Transportleistung (tkm) ohne Angabe der Auslastung ist deshalb immer unvollständig. Die Auslastung wirkt sich sowohl auf den direkten Betriebsenergieverbrauch als auch auf den indirekten Energieverbrauch aus. Am Beispiel des direkten Energieverbrauchs eines 28t LKW lässt sich die Abhängigkeit von der Auslastung illustrieren (vgl. Abb. 20).

Abb. 20
Zusammenhang zwischen nutzlastspezifischem Energieverbrauch und Auslastung bei einem 28-t-LKW



Der Unterschied beim absoluten Betriebsenergieverbrauch (direkter Energieverbrauch pro gefahrenem Kilometer (Fkm) bei einem 28-t-LKW zwischen einer Leerfahrt (0% Auslastung, 13.9 MJ/Fkm) und voll beladen (100% Auslastung, 17.3 MJ/Fkm) beträgt lediglich 3.4 MJ, d.h. der grösste Teil der Energie wird zum Fortbewegen des Lastwagens selbst verbraucht. Der indirekte Energieverbrauch pro gefahrenem Kilometer (Fkm) ist in erster Näherung unabhängig von der Beladung (Auslastung) und beträgt ca. 8.6 MJ/Fkm. Wählt man als Bezugsgrösse Tonnenkilometer tkm (Energieverbrauch um 1 Tonne 1 Kilometer zu transportieren) dann erhöht sich der spezifische Energieverbrauch (MJ/tkm) ungefähr umgekehrt proportional zur Auslastung des Lastwagens. Eine Halbierung der Auslastung führt zu einer Verdoppelung, eine Reduktion auf 10% Auslastung ungefähr zu einer Verzehnfachung des Energieverbrauches pro Tonnenkilometer. Da sich die Auslastung beim Gütertransport meistens auf das Gewicht bezieht, lassen sich Güter mit geringer Dichte (z.B. Wärmedämmplatten) oder sperrige Gegenstände (z.B. Betonfertigteile) nur mit geringer Auslastung transportieren.

Bei vergleichbarer Auslastung verringert sich die Graue Energie pro Transportleistung mit Zunahme der Grösse der Transportmittel, da sich das Verhältnis von Nutzlast zu Leergewicht mit zunehmender Grösse des Transportmittels verbessert. Bei einem 3.5 t Lieferwagen mit einer zulässigen Nutzlast von 1 t beträgt dieses Verhältnis zum Beispiel 0.29, bei einem 40 t LKW mit 27 t Nutzlast 0.68, d.h. mit einem grösseren Transportmittel muss pro Gewichtseinheit transportierter Ware weniger Fahrzeugmasse mittransportiert werden. Generell vermögen gut ausgelastete Massentransportmittel wie Tanker oder Hochseeschiffe mit hohen Nutzlasten und relativ kleiner Geschwindigkeit Güter mit wenig Energieaufwand zu transportieren.

Baumaschinenleistungen

Die Graue Energie für den Einsatz von Baumaschinen sind repräsentative Durchschnittswerte für das Jahr 1992 und basieren auf einer Bestandesanalyse des schweizerischen Baumaschinenparks. Es handelt sich um Durchschnittswerte für die wichtigsten Baumaschinentypen und Leistungsbereiche ohne die Herstellung der Maschinen.

Die Graue Energie ist in erster Linie von der Maschinenleistung abhängig. Je grösser der Motor, desto mehr Energie wird pro Betriebszeit benötigt. Neben der Motorenleistung spielt der Lastfaktor für den Energieverbrauch eine Rolle. Er gibt das Verhältnis der durchschnittlichen Leistung im typischen Arbeitszyklus zur maximalen Motorenleistung wieder

und ist vor allem vom maschinentypischen Anwendungsbereich abhängig. Ein tiefer Lastfaktor bedeutet, dass eine Maschine nur während einem kleinen Teil ihrer Betriebsdauer unter Last fährt, den Rest der Zeit läuft sie im Leerlauf. Damit lässt sich auch erklären, weshalb Maschinen mit vergleichbarem Leistungsbereich bei höherem Lastfaktor mehr Energie pro Stunde Betrieb verbrauchen. Der Betrieb einer Maschine mit niedrigem Lastfaktor führt jedoch nicht zwangsläufig zu einem niedrigeren Energieverbrauch. Müssen beispielsweise 1000 m³ Erde ausgehoben werden, so ist diese Arbeit mit einer gezielt eingesetzten Maschine auf jeden Fall energieeffizienter auszuführen als mit einer Maschine mit vielen Leerfahrten und Umwegen.

Maschinentyp	Spezifikation	Lastfaktor [-]	Graue Energie [MJ/h]
Dozer	15–30 t, 100–200 kW Leistung, dieselbetrieben mit Rädern	0.47	1030
Dumper	Kleindumper 1.5–3 t, 10–25 kW Leistung, dieselbetrieben mit Rädern	0.34	100
	Grossdumper < 24 t, 100–200 kW Leistung, dieselbetrieben mit Rädern	0.34	840
Hydraulikbagger	Klein 3–10 t, 25–50 kW Leistung, dieselbetrieben mit Raupen	0.47	240
	Teleskopbagger 23–47 t, 100–200 kW Leistung, dieselbetrieben mit Raupen	0.47	1030
Ladeschaufel	8–15 t, 50–100 kW Leistung, dieselbetrieben mit Raupen	0.51	610
	12–24 t, 100–200 kW Leistung, dieselbetrieben mit Rädern	0.51	1130
Mobil-, Autokrane	25–50 t, 100–200 kW Leistung, dieselbetrieben	0.16	390
Rüttler, Vibratoren, Stampfer	> 0.15 t, < 10 kW Leistung, dieselbetrieben mit Rädern	0.47	37
Stapler	5–15 t, 50–100 kW Leistung, dieselbetrieben	0.16	168
Vibrationswalzen, Walzenzüge	3–7 t, 25–50 kW Leistung, dieselbetrieben mit Rädern	0.47	260

Hottingerstrasse 32
8032 Zürich
Telefon 01-262 25 62
Fax 01-262 25 70
bfuzh@access.ch

Beschaffungs- und Entsorgungskonzepte
Produktebeurteilungen
Beratungen Gentechnologie
Ökobilanzanalysen
Ökologische Baubegleitungen
Kurse und Vorträge