

Graue Energie von Bauprodukten aus Aluminium unter Berücksichtigung der wertkorrigierten Substitution

Wir forschen und prüfen für Sie

Dübendorf, 08. November 2004

Mischa Classen,
Hans-Jörg Althaus
Abteilung Technologie und Gesellschaft

Eine Studie im Auftrag des Schweizerischen
Aluminum-Verbandes

Projektbegleitung

Heinz Auer, SMU

Dr. Kurt Buxmann, Alcan Technology & Mgmt. AG

Felix Hofmann, Alcan Technology & Mgmt. AG

Josef Luthiger, EAA

Marcel Menet, Aluminium-Verband Schweiz

Daniel Mühlebach, Alcan Allega AG

Philipp Müller, Hydro Buildings Systems GmbH

Gerald Rebizer, Alcan Technology & Mgmt. AG

Christoph Solenthaler, Solenthaler Recycling AG

Critical Review nach ISO/EN 14040

Johannes Kreissig, PE Europe

Projektverfasser

Mischa Classen

EMPA Dübendorf, Abteilung Technologie und Gesellschaft

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Critical Review nach ISO 14040	2
3	Auftrag und Zielsetzung	3
4	Graue Energie	4
	4.1 Ökoinventare als Basis für „Graue Energie“	4
	4.2 Primärenergie als Bewertungsindikator	5
	4.3 Resümee	6
5	Recycling in der Lebenszyklusbetrachtung	8
	5.1 Lebenszyklus von Aluminium-Bauteilen	8
	5.2 <i>cut-off</i> Ansatz	9
	5.3 Wertkorrigierte Substitution	10
	5.4 Beurteilung für Verwendung in Alu-Recycling	11
6	Berechnung von Primärenergieaufwand mittels Wertkorrigierter Substitution	12
	6.1 Systembeschreibung	12
	6.1.1 Systemgrenzen und Berechnungsbasis	13
	6.1.2 Werte für den kumulierten Primärenergiebedarf CED	16
	6.1.3 Datenbasis und betrachtete Bauteile	17
	6.2 Material-Ausbeuten und Wertkorrektur	19
	6.2.1 Sammel-Ausbeute	19
	6.2.2 Aufbereitungs-Ausbeute	20
	6.2.3 Umschmelz-Ausbeute	21
	6.2.4 Korrekturfaktor für Wertverlust	22
	6.3 Einfluss des Marktpreises von Aluminium	22
7	Resultate	24
8	Diskussion der Resultate	32
	8.1 Vergleichbarkeit der Indikatoren CED und Graue Energie	32
	8.2 Einfluss der Marktpreis-Szenarien auf die Ergebnisse.	34
	8.3 Beurteilung der Ergebnisse.	35
9	Literaturverzeichnis	37
10	Anhang A: Berechnungsgrundlagen	39
11	Anhang B: Reviewbericht	48

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

- Allokation** Zuordnung und quantitative Aufteilung der Input- und Outputflüsse eines Prozesses, bei dem mehrere Produkte gleichzeitig entstehen (sog. Kuppelprozesse), auf die einzelnen Produkte. Erforderlich bei Mehrproduktsystemen, um auch zu einzelnen Produkten Ökobilanzen zu erstellen.
- attributinal LCA** von engl. *attribution* (dt. Zuordnung). Ökobilanz mit dem Ziel, die ökologischen Eigenschaften eines Lebenszyklus mit seinen Untersystemen abzubilden. Der betrachtete Prozess wird in seinen Stoff- und Energieflüssen nach streng technischen Gesichtspunkten definiert.
- CED** Abk. engl. für *Cumulative Energy Demand* (dt. Kumulierter Energiebedarf). Über den ganzen Lebenszyklus aggregierter Energiebedarf. In dieser Studie wird der CED gemäss der primären Energieträger in den Klassen „fossil“, „nuklear“, „wasser“, „bioenergieträger“ und „regenerativ“ (gemeint dabei ist solar-, wind- und geothermische Energie) ausgewiesen.
- consequential LCA** von engl. *consequential* (dt. konsequent). Ökobilanz mit dem Ziel, die die Auswirkungen (Konsequenzen) abzubilden, die durch den Prozess ausgelöst wird. Nicht nur der betrachtete Prozess wird in seinen Stoff- und Energieflüssen erfasst, sondern auch andere Prozesse, die von den Konsequenzen betroffen sind, z.B. der Ersatz eines Produktes B, das entsprechend weniger produziert werden muss (Substitutionseffekte).
- cradle-to-gate** „von der Wiege bis zum Fabriktor“. Betrachtungsrahmen des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung bis zu dessen Fertigstellung. Ökobilanzen mit diesen Systemgrenzen bilden die Herstellung eines Produktes ab (sog. Produktökobilanz), wobei die Anwendung des Produktes sowie dessen Beseitigung nicht mit in die Beurteilung einfließen. Dieser Betrachtungsrahmen entspricht somit nicht dem vollständigen Produktlebenszyklus, ein direkter Produktvergleich ist auf dieser Basis nur dann statthaft, wenn die verglichenen Produkte eine identische Anwendung und Beseitigung haben.
- cradle-to-grave** „von der Wiege bis zur Bahre“. Betrachtungsrahmen des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung bis zu dessen Lebensende (Beseitigung, Recycling, etc.). Ökobilanzen mit diesen Systemgrenzen bilden den gesamten Lebenszyklus eines Produktes ab.
- EAA** Abk. für engl. *European Aluminium Association*. (www.aluminium.org)
- eco-devis** Die eco-devis sind eine Entscheidungshilfe für die Wahl von Bauleistungen nach ökologischen Merkmalen. Der Trägerverband eco-devis kennzeichnet Bauleistungen und Baustoffe als „ökologisch interessant“, „ökologisch bedingt interessant“ oder es gibt keine Kennzeichnung. Die eco-devis sind über www.eco-devis.ch oder als Zusatzkomponente zum Normpositionen-Katalog NPK des CRB erhältlich.
- ecoinvent** Das Schweizer Zentrum für Ökoinventare (*ecoinvent center*) betreibt unter der Leitung der EMPA die ecoinvent Datenbank, für die verschiedene Datenbanken zusammengeführt und überarbeitet wurden. Die Datenbank enthält harmonisierte, generische Ökobilanzdaten für die Bereiche Energie, Materialien, Transport, Entsorgung, Chemikalien, und Landwirtschaft (www.ecoinvent.ch).
- Endenergie** Energie, die dem Endverbraucher, nach Abzug von sämtlichen Transport- und Umwandlungsverlusten in der von ihm nachgefragten Form (Wärme, Strom,...) zur Verfügung steht. Primärenergieträger (Rohöl, Uran,...) werden unter Verlusten durch Prozesse wie Verbrennung, Spaltung oder Raffinieren in Sekundärenergieträger umgewandelt (elektrische Energie, Benzin, Heizöl, etc.). Die beim Verbraucher letztlich genutzte Energie bezeichnet man als Endenergie.
- end-of-life Option** Schicksal eines Produktes am Ende des Lebenszyklus. In der Regel stehen verschiedene Optionen für eine Beseitigung (Deponierung, Verbrennung, etc.) resp. Recycling oder Wiederverwendung zur Verfügung. Je nach *end-of-life* Option können die Umweltbelastungen sehr stark variieren.

- Gusslegierung** Hochlegiertes Aluminium, das in der Regel gegossen wird (Strang-, Druckguss). Wird überwiegend in der Automobilindustrie verwendet. Nahezu 100% des rezyklierten Aluminiumschrotts wird in Gusslegierungen weiterverarbeitet.
- ISO** Abk. für engl. *International Standardisation Organisation*. Deutsch: Internationale Organisation für Standardisierung. Internationale Dachorganisation der nationalen Normungseinrichtungen aus 140 Ländern. Die Schweiz ist in der ISO durch die Schweizerische Normen-Vereinigung SNV vertreten. Die ISO bietet das weitverbreitetste Qualitätsmanagementmodell an und damit auch eine weltweit akzeptierte Definition von Qualität.
- Knetlegierung** Niedriglegiertes Aluminium das sich zur plastischen Verarbeitung eignet (Warmumformen). Stammt zu einem überwiegenden Teil aus Hüttenaluminium, da der Aufwand um das Recycling-Aluminium in der nötigen Reinheit zur Verfügung zu stellen sich in der heutigen Marktsituation weder ökonomisch noch ökologisch rechtfertigen lässt. Praktisch alles im Baubereich eingesetzte Aluminium sind Knetlegierungen.
- KVA** Abk. für Kehrlichtverbrennungsanlage, auch Müllverbrennungsanlage (MVA)
- LCA** Abk. für engl *Life Cycle Assessment*. Deutsch: Lebensweganalyse, Lebenswegbewertung, Ökobilanz. Untersucht Produkte, Prozesse oder Dienstleistungen auf ihre ökologischen Auswirkungen hin. LCA basiert auf Stoff- und Energieflüssen, die für ein Produkt entlang seines gesamten Lebensweges verursacht werden (Sachbilanz, *Life Cycle Inventory*, LCI). Diese Flüsse werden nach Wirkungs- oder Schadenspotentialen bewertet (Wirkungsanalyse, *Life Cycle Impact Assessment*, LCIA).
- LCI** Abk. für engl *Life Cycle Inventory*. Deutsch: → Ökoinventar, Sachbilanz.
- LCIA** Abk. für engl *Life Cycle Impact Assessment*. Deutsch: Wirkungsabschätzung. Phase einer LCA, die die Sachbilanzdaten zu ökologische Wirkungen aggregiert.
- London Metal Exchange (LME)** Die LME ist die weltgrößte Börse für Nicht-Eisen Metalle. An ihr werden verschiedene Aluminium-Qualitäten gehandelt (www.lme.com).
- Ökoinventar** auch Sachbilanz. Eine Zusammenstellung aller relevanter Input- und Outputflüsse eines Prozesses.
- Primärenergie** ist eine Energieform, die keiner vom Menschen absichtlich verursachten Umwandlung unterworfen wurde. Beispiele sind die potentielle Energie der Sonnenstrahlung, des Wassers oder des Windes bzw. die chemisch oder physikalisch gespeicherte Energie in natürlichen Ressourcen. Jede Umwandlung von Primärenergie zu Endenergie ist mit einem Verlust in Form von Abwärme verbunden.
- Produktökobilanz** Ökobilanz für ein bestimmtes Produkt („Produktion einer Einheit eines Produktes XY“).
- Recycling-Potential** Der Anteil des rezyklierten Materials, der in einem nächsten Produktleben die Funktion von Primärmaterial erfüllen kann. Das Potential beinhaltet sowohl die technische Recyclingquote, als auch die eingeschränkte Wertigkeit des Recycling-Aluminiums, das durch die unter Umständen eingeschränkte Funktionalität bedingt ist.
- red mud** (engl. für Rotschlamm: Mineralische Abfälle bei der Produktion von Aluminiumoxid aus Bauxit.. Der Rohstoff Bauxit wird zur Aluminiumgewinnung gemahlen und aufgelöst. Die ungelösten Anteile werden als stark basischer Schlamm ausgeschieden und deponiert.
- site specific Elektrizitätsmix** engl. für standortspezifischer Elektrizitätsmix. Bezeichnet die Zusammensetzung Elektrizitätsquellen für eine individuelle Produktionsanlage.

1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wird die „Graue Energie“ von Aluminium-Bauteilen aus eco-devis mit einer Methode bewertet, die das Recycling-Potential bauteilspezifisch abbildet. Die Ergebnisse der Studie werden mit den bisherigen von eco-devis publizierten Werten verglichen. Das in eco-devis angewendete Beurteilungsraster hat zur Folge, dass die Bewertung für Materialien wie Aluminium im Vergleich zu anderen Materialien schlecht ausfällt, weil einerseits ein grosser Energieeinsatz bei der Herstellung von Hüttenaluminium benötigt wird, andererseits die in der Baubranche besonders grosse Recycling-Quote in der bisherigen Bewertung als solche nicht berücksichtigt wird. Der in eco-devis verwendete *cut-off* Ansatz stellt den Rezyklat-Anteil mit einem durchschnittlichen Europäischen Mix dar. Da der Fokus auf der Beurteilung einzelner Bauteile liegt (*consequential LCA*), wird in dieser Studie die Methode der wertkorrigierten Substitution von Werner (2003) verwendet, da diese das Recycling-Potential individueller Bauteile abbilden kann und somit im Gegensatz zum *cut-off* Ansatz sensitiv für eine nachhaltige Verwendung des Materials ist.

Eine methodische Analyse zeigt, dass die in Kasser und eco-devis gewählte *cradle-to-gate* Betrachtung in Produktökobilanzen nicht dazu geeignet ist, um Produkte über den Primärenergie-Aufwand miteinander zu vergleichen, die so unterschiedlichen Lebenszyklen haben wie Baustoffe. Der Vergleich anhand unvollständiger Lebenszyklen wie er in eco-devis gemacht wird ist nach ISO nicht statthaft, ebenso das Zusammenfassen von „Graue Energie“ Werte und „Lösemittlemissions-Äquivalenten“ zu aggregierter „Grauen Energie“. Die in der vorliegenden Studie verwendete Methode der wertkorrigierten Substitution kann das Bauteil-Recycling korrekt abbilden.

„Graue Energie“ ist keine ISO-konforme Beurteilungsgrösse und scheint als Umweltindikator im Baubereich ungeeignet, da die sehr unterschiedlichen Baustoffe entsprechend ungleich bewertet werden. Dies liegt einerseits am einseitigen Fokus des Indikators auf fossile und nukleare Primärenergie, sowie Wasserkraft und andererseits auf der methodischen Blindheit des Indikators für wichtige Schadensklassen wie Toxizität, Ozonabbau und Treibhauseffekt. In der Studie werden anstelle der „Grauen Energie“ die CED-Klassen nach Frischknecht et al. (2003) verwendet. Die Addition von 3 der 5 Klassen führt zu einem der „Grauen Energie“ vergleichbaren Indikator.

Der Einsatz von Recycling-Aluminium entspricht bei der verwendeten Methode dem tatsächlichen Recycling-Potential der einzelnen Bauteile. Dieses setzt sich aus der technischen Recyclingquote (Sammel-, Aufbereitungs- und Umschmelz-Ausbeute), sowie einer Wertkorrektur (Einschränkung der Funktionalität) zusammen. Die Ermittlung des Recycling-Potentials gründet auf Schätzungen der einzelnen Faktoren, die sich auf Literatur und Experten stützen. Die Grösse des Recycling-Potentials wird durch die Sammelausbeute dominiert, die gleichzeitig auch am schwierigsten zu bestimmen ist. Die ermittelten Recyclingquoten decken sich mit den in der Praxis gefundenen.

Insgesamt wurden in der Studie deutlich geringere „Graue Energie“ Werte ermittelt als ursprünglich in eco-devis publiziert. Die Reduktion deckt sich mit dem Recycling-Potential, das insbesondere gross ist bei Bauteilen mit grossem Alu-Gewicht, mengenmässig grossem Einsatz und hoher Legierungsqualität. Solche Bauteile sind im Bau mengenmässig relevant und weisen ein Recycling-Potential von 80% auf, was sich bezüglich „Grauer Energie“ in einer Reduktion von 50% gegenüber den in eco-devis publizierten Werten niederschlägt.

In einem *worst-case* Szenario mit einem Preiszerfall von Recycling-Aluminium gegenüber von Hüttenaluminium, wird das Recycling-Potential auf bis zu 40% reduziert. Dies gilt nicht für Bauteile, die sauber, sortenrein und in grossen Mengen als Knetlegierungen gesammelt werden können. Das Recycling-Potential ist auch in diesem *worst-case* Szenario grösser, als das in eco-devis eingesetzte.

Der direkte Vergleich mit anderen als in dieser Studie betrachteten Bauteilen (z.B. Stahlbleche) kann aber nicht ohne weiteres gemacht werden, da diese auf unterschiedlichen Betrachtungsrahmen basieren. Da das in eco-devis verwendete Kennzeichnungskriterium für „Graue Energie“ sehr situativ motiviert ist, ist dieses auch nur für den ursprünglichen in eco-devis gewählten Betrachtungsrahmen gültig. Die in dieser Studie ermittelten Werte können deshalb nur mit Einschränkungen auf die ursprünglichen Kennzeichnungskriterien bezogen werden. Um eine durchgängige Vergleichbarkeit zu erreichen, muss ein harmonisierter Betrachtungsrahmen geschaffen werden, in dem eine Gleichbehandlung der Baumaterialien gewährleistet wird und bezüglich der Schliessung von Wertstoff-Kreisläufen zielführende Entschiede bei der Baustoff-Wahl zulässt.

2 Critical Review nach ISO 14040



Kurzfassung der kritischen Prüfung

Der Aluminium Verband Schweiz hat 2004 die EMPA Dübendorf, Abteilung Technologie und Gesellschaft, beauftragt, eine Neuberechnung der grauen Energie Werte von Aluminiumbauteilen unter Berücksichtigung des Recyclingpotentials durchzuführen. Die Studie wurde unter Berücksichtigung der Anforderungen der Normenreihe ISO 14040ff durchgeführt. Die Studie wurde von Beginn an durch eine kritische Prüfung begleitet.

Motivation der Neuberechnung sind vom Verein EcoDevis veröffentlichte ökologische Bewertungen von Gebäudebauteilen, die das Recyclingpotential von Aluminiumbauteilen weitgehend ausklammern. Nach eingehender Diskussion von Methoden zur Berechnung der Grauen Energie unter Berücksichtigung des relevanten Lebenszyklusabschnitts Recycling, wurden die Graue Energie Werte für Bauprodukte aus Aluminium neu berechnet. Eine Auswertung nebst Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse schließt sich an.

Zusammenfassend kommt die kritische Prüfung zu folgender Einschätzung der Studie:

- 1 Die für die Studie angewandten Methoden sind konform zu den internationalen Normen ISO 14040ff.
 - 2 Die bei der Durchführung der geprüften Ökobilanz angewendeten Methoden sind wissenschaftlich begründet und entsprechen dem aktuellen und internationalen Stand der Technik für Ökobilanzen.
 - 3 Im Hinblick auf die Ziele der Studie sind die verwendeten Daten als hinreichend, zweckmässig und konsistent beurteilt.
 - 4 Die Konsistenz der Auswertung in Bezug auf die Zielsetzung und die Einschränkungen der Studie wird als vollständig gegeben eingeschätzt.
 - 5 Dem Bericht kann eine sehr gute Transparenz und Konsistenz bescheinigt werden.
- Insgesamt kommt die kritische Prüfung zu dem Schluss, dass die Studie voll den Anforderungen der ISO 14040ff entspricht.

Leinfelden-Echterdingen, 4. November 2004

Johannes Kreißig

Jürgen Stichling

Das vollständige Dokument ist in Anhang B: Reviewbericht auf Seite 48 abgedruckt.

3 Auftrag und Zielsetzung

Im Sommer 2003 publizierte der Verein eco-devis die Merkblätter zur ökologischen Leistungsbeschreibung von Bauteilen (Vogel et al. (2003)). Die Merkblätter bilden einen Katalog, der als Zusatzkomponente zum Normpositionskatalog (NPK) der CRB-Leistungsbeschreibungen zu verstehen ist. Die ökologischen Leistungsbeschreibungen von eco-devis beurteilen eine Vielzahl von Bauteilen nach ökologischen Kriterien wobei sie als „empfohlen“, „bedingt empfohlen“ oder aber nicht gekennzeichnet werden.

Der Betrachtungsrahmen von eco-devis misst der Bauteil-Herstellung über den Indikator „Graue Energie“ eine grosse Bedeutung bei. Das Recycling-Potential wird jedoch weitgehend aus der Bewertung ausgeklammert. Dies hat zur Folge, dass die Bewertung für Materialien wie Aluminium im Vergleich zu anderen Materialien schlecht ausfällt, weil die Produktion von Hüttenaluminium zwar einen grossen Energieeinsatz verlangt, das Recycling von Aluminium aber besonders einfach und mit wenig Energieeinsatz verbunden ist. Dass in der Baubranche eine besonders grosse Recycling-Quote von Aluminium vorliegt, wird aber in der Bewertung von eco-devis als solches nicht berücksichtigt.

Der Aluminium-Verband Schweiz hat die EMPA beauftragt, die Werte für die graue Energie der Aluminium-Bauteilen in eco-devis mit einer Methode, die dem hohen Recycling-Potential von Aluminium-Bauteilen gerecht wird, neu zu berechnen. Die Ergebnisse der Studie sollen neben den bisherigen von eco-devis publizierten Werten stehen können.

Aus diesem Grund wird zuerst in Kapitel 4 dem Begriff „Graue Energie“ nachgegangen um zu klären, auf welche Grundlagen sich dieser Indikator bezieht, und wie er in eco-devis zur ökologischen Verwendung eingesetzt wird.

Im nächsten Kapitel wird dann gezeigt, warum das Recycling innerhalb eines einzigen Lebenszyklus nicht eindeutig eingerechnet werden kann und welcher Ansatz für den Einbezug von Recycling in der vorliegenden Studie begründet ist.

Im methodischen Kapitel 6 wird die gewählte Methode erklärt und alle für die Berechnung benötigten Werte und Annahmen erläutert. Die daraus resultierenden Resultate – Kapitel 7 – werden im abschliessenden Kapitel 8 anhand verschiedener Überlegungen dargestellt und in einer Synthese zusammengefasst.

4 Graue Energie

Der Begriff „Graue Energie“ wird in der Schweiz schon Mitte der 70er Jahre verwendet. Er wurde in der Publikation von Spreng & Doka (1995) für die Energieverarbeitende Industrie tiefer eingeführt, und von Kasser & Pöll (1995) für Baustoffe in einem Buch, das 1999 in einer überarbeiteten 2. Auflage erschien. Die Methode wurde vom BUWAL aufgegriffen und in Kasser et al. (1999) weiter ausgebaut.

Inhaltlich wird der Begriff von Kasser & Pöll (1998) als „Summe nichterneuerbarer Primärenergieträger“ verstanden, also der Summe der Energie, die für eine bestimmte Tätigkeit aus nicht-nachhaltigen Quellen bereitgestellt werden muss. Die Grösse wird von ihm ausdrücklich als vereinfachende Bewertungsgrösse für Umweltauswirkungen verstanden. Er weist aber gleichzeitig auf die Notwendigkeit hin, zusätzlich die Bewertung mit weiteren Indikatoren zu ergänzen. Gedanklich fusst der Begriff auf einer Lebenszyklus-Perspektive, das heisst, es werden alle direkten und indirekten Energieaufwendungen addiert, die in den vor- und nachgelagerten Prozessen entstehen (s. auch Abbildung 1).

Die Verwendung der „Grauen Energie“ in eco-devis als Bewertungsgrösse lässt sie als vereinfachte Methode im *Life Cycle Impact Assessment* einreihen. „Graue Energie“ kann somit als Ergebnis einer Ökobilanz (*Life Cycle Analysis, LCA*) betrachtet werden, bei der in einem ersten Schritt ein Ökoinventar (*Life Cycle Inventory, LCI*) für den betrachteten Prozess erstellt wird. In einem weiteren Schritt wird dieses Umweltinventar mit entsprechenden Schadensindikatoren bewertet (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*). Das Ergebnis im Falle der „Grauen Energie“ ist dabei eben „Graue Energie“ in MJ-Äquivalenten pro betrachtete Leistung. Das Vorgehen bei der Ökobilanzierung ist von der Internationalen Standardisierungs-Organisation (ISO) in ISO/EN14040 (2000) festgelegt. ISO/EN14041 (1998) regelt dabei den Inventarisierungsschritt und ISO/EN14042 (2000) die eigentliche Wirkungsabschätzung, die mit der ISO/TR14047 (2003) noch einmal konkretisiert wird.

Neben der „Grauen Energie“ wurden andere Methoden zur Bestimmung von Primärenergieverbrauch entwickelt, von denen der *Cumulative Energy Demand* (CED) oder Kumulierter Energie Aufwand (KEA) (VDI (1998)) oder die *Consumption of non renewable energetic resources* (Frischknecht et al. (1998) und Frischknecht et al. (2003)) zu erwähnen sind.

Im Folgenden wird die Bewertung mit der Methode der „Grauen Energie“ nach Kasser & Pöll (1998) vor dem Hintergrund des von ISO festgehaltenen *state of the art* genauer betrachtet. Ein erstes Kapitel geht dabei auf das Ökoinventar (LCI) ein, das zweite auf die Wirkungsabschätzung (LCIA). Ein abschliessendes Kapitel resümiert die Schlussfolgerungen.

4.1 Ökoinventare als Basis für „Graue Energie“

Im Ökoinventar werden alle umweltrelevanten Stoff und Energieflüsse aufgelistet, die durch die Nutzung einer betrachteten Leistung ursächlich entstehen. Eine Leistung kann z.B. die Herstellung eines Backsteines, die Nutzung des Telefons während fünf Minuten oder der Gebrauch einer Getränkeverpackung darstellen. Das Ökoinventar bildet somit immer einen bestimmten Prozess ab. Abhängig von der Fragestellung, die mit einer LCA beantwortet werden soll, wird dem Prozess ein unterschiedlicher Umfang zugewiesen. Im Beispiel der Getränkeverpackung ist für die Beurteilung der gesamte Lebenszyklus von Bedeutung, also neben dem Herstellungsprozess auch die Nutzung, die Entsorgung, das Recycling und der Nutzen, der aus dem Material in zukünftigen Lebenszyklen entsteht. In diesem Fall wird die Getränkeverpackung von „der Wiege bis zur Bahre“ (*cradle-to-grave*) betrachtet, wobei alle dabei verursachten vor und nachgelagerten Prozesse mit einbezogen werden, so zum Beispiel auch die Energiebereitstellung oder die Abwasserreinigung. Es kann aber auch – wie im Beispiel des Backsteins – nur die Herstellung eines einzelnen Produktes betrachtet werden. Man

spricht dann von einer Bilanzierung von der „Wiege bis zum Fabriktor“ (*cradle-to-gate*), wobei die Entsorgungsoptionen nicht mit abgebildet werden und somit aus dem Fokus einer Umweltbewertung herausfallen (Abbildung 1). Die Frage, wie im Inventar mit Recycling umgegangen werden kann, ist in Kapitel 5 dargelegt.

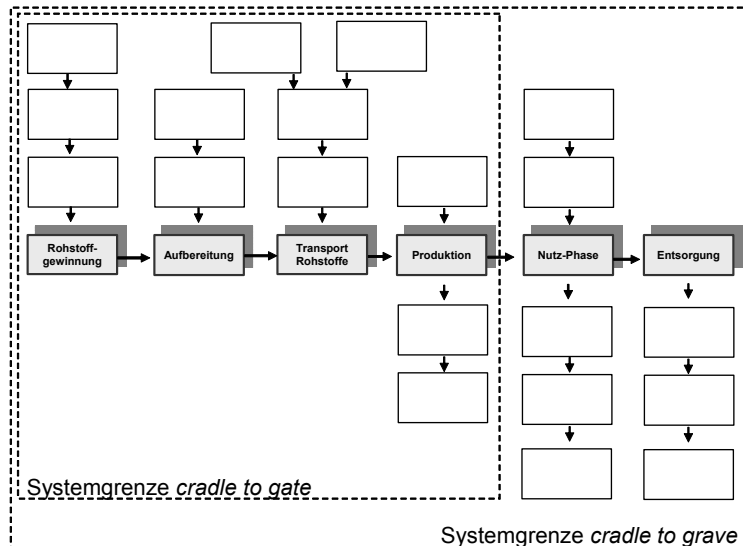


Abbildung 1 Darstellung der Lebenszyklus-Perspektive. *Cradle-to-grave* betrachtet alle Prozesse im gesamten Lebenszyklus, *cradle-to-gate* erfasst nur die Prozesse bis zur Fertigstellung des Produkts.

Die Inventare der in Kasser & Pöll (1998) betrachteten Baustoffe sind modular aus vorgelagerten Prozessen (Rohstoffe, Energiebereitstellung, etc.) und aus den direkt zur Herstellung benötigten Prozessen (walzen, anodisieren, etc.) aufgebaut. Die dazu benutzten Hintergrunddaten stammen aus einer Vielzahl von Ökobilanz-Studien, auf die in Kasser nicht näher eingegangen wurde.

Die publizierten Zahlen entsprechen somit einer *cradle-to-gate* Betrachtung, bei der weder auf die Nutzungsphase noch auf die Entsorgung eingegangen wird. Dieser Umstand führt zu einer Situation, bei der in der Beurteilung der Baustoffe auch keine Aussagen über die Umweltschäden durch Nutzung und Entsorgung gemacht werden können. Aus diesem Grund hält die ISO fest, dass keine vergleichenden Ökobilanzen gemacht werden dürfen, die auf unvollständigen Lebenszyklus-Betrachtungen basieren.

4.2 Primärenergie als Bewertungsindikator

Die Wirkungsabschätzung wird aufgrund der im Ökoinventar bilanzierten Emissionen und Ressourcen-Verbräuche durchgeführt. Dabei werden diese mit einem entsprechenden Schadensindikator bewertet. Im Falle der „Grauen Energie“ in Kasser & Pöll (1998) werden den fossilen und nuklearen Energieträger sowie der Wasserkraft eine bestimmte Menge an Primärenergie zugewiesen und als Energieäquivalente in MJ zu einer einzigen Zahl aggregiert (Tabelle 1). Aus diesem Vorgehen sind zwei Schritte in der Bewertung ersichtlich: die (a) Auswahl der Indikatoren und (b) das Festlegen der Größe der Indikatoren. Die einseitige Auswahl und Ausrichtung auf Primärenergie führen zu einer Situation, in der keine Aussagen gemacht werden können zu anderen Umweltschäden wie z.B. Ökotoxizität. Die Umweltauswirkungen von beispielsweise Entsorgungsprozessen sind relevant und stark durch Emissionen in die Luft und in das Grundwasser bestimmt. Sie verbrauchen jedoch nur wenig Primärenergie und werden deshalb durch die „Graue Energie“ kaum erfasst. Die Umweltauswirkungen der einzelnen Energieträger unterscheiden sich bedeutend: ein MJ Wärme aus einem Braunkohlekraftwerk verursacht deutlich mehr Emissionen als dieselbe Menge aus einem

Kraftwerk mit Erdgas. Als fossile Energiequelle werden sie aber zu derselben Kategorie aggregiert.

ISO/TR14047 (2003) hält einen die Verwendung von Primärenergie als Indikator nur dann für statthaft, wenn er fossile, allenfalls zusätzlich nukleare Energie umfasst. Primärenergie wird dabei, wie in Frischknecht et al. (1998) vorgeschlagen, als Indikator für den Verbrauch energetischer Ressourcen betrachtet.

Das Schweizer Zentrum für Ökoinventare hat basierend auf der Datenbank „ecoinvent“ eine Bewertungsmethode *cumulative energy demand* (CED) umgesetzt. Die von Frischknecht et al. (2003) beschriebene Bewertung zeigt dabei Unterschiede zu Kasser auf (Tabelle 1). Ecoinvent bewertet nur Primärenergieträger (z.B. Rohöl) und zwar als Ressourcen für die Bereitstellung von Sekundärenergieträger (Benzin) oder Endenergie (Wasserkraft ab Netz). In Kasser ist diese Unterscheidung nicht strikt gemacht. Indem die Sekundärenergieträger mit ihrem Brennwert bewertet werden, werden die in der Vorkette nötigen Energieaufwendungen und bei der Produktion anfallenden Verluste nicht berücksichtigt.

Tabelle 1 Gegenüberstellung von Werten zur Berechnung der Primärenergie in Energieträgern aus Kasser et al. (1999) und ecoinvent (Frischknecht et al. (2003)). Während dem sich beide Quellen auf den unteren Heizwert beziehen, gibt es Unterschiede in Energieinhalt und Auswahl der Primärenergie-Träger. Da für die Prozesse in „ecoinvent“ nur Primärenergie-Träger als Ressourcen einfließen sind keine Angaben zu den verfeinerten Stoffen wie Benzin vorhanden. Deren Energieinhalt berechnet sich ausgehend vom Rohstoff Rohöl sowie der übrigen Vorketten.

Ressource		Kasser	ecoinvent
Berechnungsgrundlage		H _u	H _u
Benzin	MJ / kg	42	
Diesel	MJ / kg	42.7	
Heizöl EL	MJ / kg	42.7	
Heizöl S	MJ / kg	40	
Rohöl	MJ / kg		45.8
Braunkohle	MJ / kg	8.1	9.9
Steinkohle	MJ / kg	29.3	19.1
Koks	MJ / kg	29	
Holz	MJ / kg	15.3	
Erdgas	MJ / Nm ³	49.9	40.3
Erdgas, aus Kohleproduktion	MJ / Nm ³	-	39.8
Uran	MJ / kg	460000	560000
Wasserkraft	MJ / MJ	1.1	1

4.3 Resümee

Es gibt verschiedene breit eingeführte Bewertungsmethoden die Primärenergie als Indikator für Umweltauswirkungen betrachten. Je nach Datenquelle und Primärenergie-Indikator können für einen identischen Prozess methodisch bedingt unterschiedliche Bewertungsaussagen entstehen, weil (a) die Bewertungsmethoden nicht dieselben Energiearten berücksichtigen oder (b) den Energieträgern einen anderen Primärenergie-Inhalt zumessen, oder weil die Datenquellen (c) den Prozess in Material und Energiebedarf unterschiedlich abbilden, sei es aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen, sei es aufgrund abweichender technischer Hintergrunddaten wie Benzinverbrauch, etc.

Die in Kasser und eco-devis gewählte *cradle-to-gate* Betrachtung (Produktökobilanz) ist nicht dazu geeignet um Produkte über den Primärenergiebedarf miteinander zu vergleichen, die so unterschiedlich sind wie Baustoffe. Der Vergleich von Produkten anhand unvollständiger Lebenszyklen ist nach ISO nicht statthaft.

Zum Teil werden in eco-devis „Graue Energie“ Werte von Bauteilen mit „Lösemittlemissions-Äquivalenten“ zu einem aggregierten „Graue Energie“ zusammengefasst. Dabei wurden 2 g Lösemittel mit 1 MJ „Graue Energie“ gleichgesetzt (z.B. eco-devis für NPK 347). Dieses Ag-

gregieren von unterschiedlichsten Umweltauswirkungen führt zu Fehlinterpretationen, es ist nach ISO deshalb nicht gestattet.

Die Primärenergie als Indikator bildet die Umweltschäden der Prozesse nicht adäquat ab. „Graue Energie“ ist kein ISO-konformer Indikator (ISO/EN14042 (2000) und ISO/TR14047 (2003)), da ISO Primärenergie – im Gegensatz zu Kasser – als Indikator für den Verbrauch nichterneuerbarer Energiereserven betrachtet und lediglich fossile oder zusätzlich nukleare Primärenergie als gültigen Indikator anerkennt. In der Studie wird aus diesem Grunde mit den CED-Klassen nach Frischknecht et al. (2003) gearbeitet.

5 Recycling in der Lebenszyklusbetrachtung

Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, ist die Bestimmung von Primärenergie abhängig davon, wie der betrachtete Prozess beschrieben wird. Werden die Systemgrenzen enger gefasst und vorher oder nachher stattfindende Prozesse von der Betrachtung ausgeklammert, so wird automatisch auch der Primärenergiebedarf kleiner. Für viele rezyklierbare Rohstoffe ist dabei die Abbildung der Recyclingprozesse von zentraler Bedeutung. Die Frage dabei ist, wem die beim Recycling anfallenden Belastungen angerechnet werden (s. Abbildung 2): dem Produkt 1, das rezykliert wird, oder Produkt 2, dem das Rezyklat in einem neuen Lebenszyklus als Rohstoff dient. Der erste Abschnitt 5.1 geht auf diese Grundsatzproblematik ein. Die folgenden Abschnitte 5.2 und 5.3 zeigen zwei Lösungsansätze, die im abschliessenden Abschnitt 5.4 auf den Einsatz in der vorliegenden Studie beurteilt werden.

5.1 Lebenszyklus von Aluminium-Bauteilen

Aluminium kommt in der Baubranche in einer Vielzahl von Bauteilen zum Einsatz. Erreicht das Gebäude oder das Bauteil sein Lebensende, so stellt das anfallende Alu-Bauteil ein Wertstoff dar, und wird deshalb gesammelt und rezykliert (Abbildung 2). Versucht man den Lebenszyklus eines Alu-Bauteils in einem Ökoinventar zu erfassen, so werden einige Fragen aufgeworfen, die man vor der Inventarisierung beantworten muss.

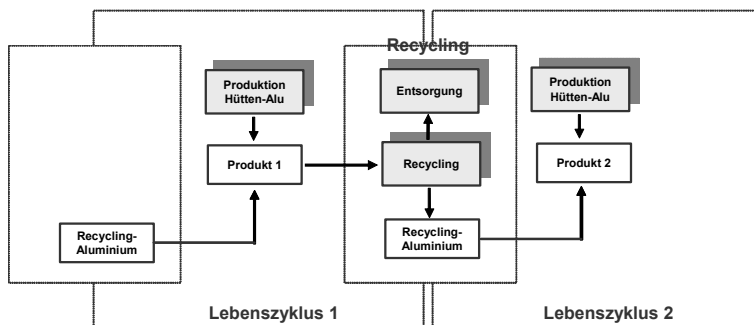


Abbildung 2 Ausschnitt aus einer Kaskade von Lebenszyklen, die ein Aluminium Bauteil durchläuft. Dabei fliesst das Recycling-Aluminium aus dem ersten Lebenszyklus als Input-Material im zweiten Lebenszyklus ein.

Als Erstes muss geklärt werden, wo man den Betrachtungsrahmen eingrenzt. Da das Aluminium im Bauteil ein Metall ist und als solches durch den Gebrauch weder „zerstört“ noch verbraucht wird, kann das Metall theoretisch in beliebig vielen weiteren Produkten wieder verwendet werden. Da bei der Bewertung von Bauteilen der unmittelbare Nutzen des Bauteils als Betrachtungsrahmen gesetzt ist, werden die Systemgrenzen so gezogen, dass nur der eine Lebenszyklus des Bauteils betrachtet wird.

Eine schwierigere Frage ist die, welchem der beiden Lebenszyklen in Abbildung 2 die Umweltauswirkungen aus dem Rezyklieren des Bauteils zugerechnet wird. Wird das Rezyklieren, bei dem ebenfalls Energie aufgewendet werden muss, quasi als Entsorgungsprozess betrachtet und dem ersten Lebenszyklus angelastet. Oder betrachtet man das Recycling als Produktion der sekundären Ressource aus „Alu-Schrott“, womit das Recycling als vorgelagerter Produktionsprozess dem zweiten Lebenszyklus angelastet würde. Auf dem Markt hat „Alu-Schrott“ seinen Preis. Für die Ökobilanzierung heisst das, dass bei der Herstellung des Bauteils nicht nur der Nutzen aus dessen Verwendung entsteht, sondern auch ein weiteres Produkt namens „Alu-Schrott“, das am Ende des Lebenszyklus anfällt. Konsequenterweise muss diesem zweiten Nutzen „Alu-Schrott“ ein Teil des ökologischen Rucksacks aus der Bauteil-Herstellung angelastet werden. Wie gross dieser Teil nun ist kann nicht objektiv bestimmt

werden. Je nach Ziel der Untersuchung gibt es verschiedene Ansätze, mit diesem Allokationsproblem umzugehen. Soll der Prozess in seinen unmittelbar ausgelösten, ökologisch relevanten Flüssen dargestellt werden, spricht man von einer *attributional LCA*. Eine Lebenszyklus-Analyse hingegen, die auf die ökologischen Konsequenzen eines Prozesses fokussiert (*consequential LCA*) kann auch Flüsse betrachten, die zwar nicht unmittelbar technisch mit dem Prozess, aber über den Markt oder gesellschaftliche Interaktion zusammenhängen (Ekvall & Weidema (2004)). Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten dargestellt, die sich aus den in ISO/EN14041 (1998) aufgestellten Regeln ableiten lassen.

5.2 cut-off Ansatz

Bei diesem Gedankenmodell wird davon ausgegangen, dass der entstandene Wertstoff „Alu-Schrott“ die Systemgrenzen ohne ökologischen Rucksack verlässt (*cut-off*). Er wird somit „gratis“ den kommenden Generationen als sekundäre Ressource überlassen. Auf der Input-Seite wird Hütten-Aluminium bezogen, das den gesamten Rucksack aus Bauxit-Extraktion, Elektrolyse, etc. mitbringt. Damit dem Umstand gerecht wird, dass Aluminium auch heute schon recycelt wird, mischt man dem imaginären Aluminium-Input eine entsprechende Menge Recycling-Aluminium bei. Dieses bringt konsequenterweise seinen ökologischen Rucksack aus Sammlung, Aufbereitung und Umschmelzen mit. Weitere Umweltauswirkungen aus dem früheren Produkt-Leben werden nicht angerechnet, der Rohstoff „Alu-Schrott“ wurde ja analog ohne Rucksack aus dem früheren Leben zur Verfügung gestellt. Oben in Abbildung 2 wird das Recycling beim *cut-off* Ansatz somit vollumfänglich dem Lebenszyklus 2 in angelastet

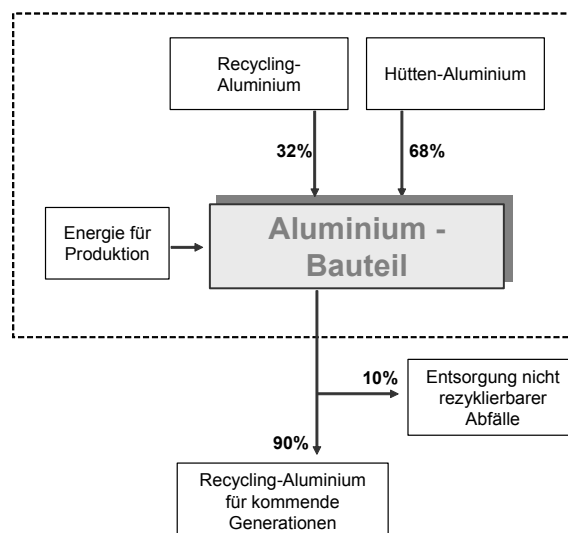


Abbildung 3 Darstellung des Einbezugs von Recycling-Aluminium mit dem *cut-off* Ansatz.

Abbildung 3 stellt den *cut-off* Ansatz am Beispiel bei der Herstellung von einem Kilogramm Aluminium-Bauteil dar. Auf der Input-Seite wird ein gewisser Recycling-Anteil einberechnet. Auf der Output-Seite wird die Entsorgung der 100 g Aluverluste sowie die 900 g Rezyklat zur Verwertung kommenden Generationen überlassen. Auf diese Weise werden für die Bilanzierung entsprechend dem europäischen Produktions-Mix 680 g Hütten-Aluminium und 320 g Recycling-Aluminium registriert, sowie die Energie zur Bauteil-Herstellung. Der „Alu-Schrott“ verlässt das System ohne ökologischen Rucksack (*cut-off*). Dessen Aufbereitung wird in einem nächsten Lebenszyklus fällig, wenn erneut Recycling-Aluminium für ein Bauteil verwendet werden soll. Entsprechend beinhalten die 320 g Recycling-Aluminium auf der Input-Seite die Entsorgung entstandener Abfälle, Alu-Sammlung, Aufbereitung und Umschmelzung, die ja aus einem vorgängigen Produkt-Leben fällig wird.

Dieser Ansatz entspricht der Optik einer *attributional LCA*, indem nur der Stoff- und Energieverbrauch abgebildet wird, der unmittelbar durch die Produktion des Bauteils erzeugt wird (Ekvall & Weidema (2004)). Prozesse wie das Bauteil-Recycling, die zwar mit dem Bauteil zusammenhängen aber nicht direkt physikalisch durch dessen Produktion ausgelöst werden, sind in diesem Ansatz nicht betrachtet. Das Aluminium-Recycling wird als zeitlich vorgelagerter Prozess verstanden und durch einen bestimmten Rezyklat-Anteil auf der Input-Seite abgebildet. Wie gross dieser Anteil für ein bestimmtes Bauteil ist, kann aber nicht objektiv geklärt werden: Kein Produzent kann sagen, ob sein verwendetes Aluminium ein Rezyklat ist oder nicht, resp. zu welchem Anteil Recycling- und Hüttenaluminium gemischt sind. Deshalb wird ein Durchschnitts-Mix angenommen, der in diesem Beispiel europäischen Verhältnissen entspricht. Dies, obwohl für Aluminium-Bauteile eine ungleich höhere Recyclingquote vorherrscht.

5.3 Wertkorrigierte Substitution

Dieser Ansatz wurde von Werner (2003) entwickelt um Entscheidungssituationen mit Fokus auf die Rezyklierbarkeit gerecht zu werden. In Werner (1999) wurde er auf Aluminiumfenster angewendet. Bei der wertkorrigierten Substitution wird das zukünftige Recycling des Alu-Schrotts bereits heute verrechnet. Somit fließt das individuelle Recycling-Potential des betrachteten Bauteils mit in die Bewertung ein. Dabei wird ein Gedankenmodell verwendet, in dem der anfallende Alu-Schrott nach Aufbereitung und Recycling direkt das auf der Input-Seite benötigte Hütten-Aluminium ersetzt (Substitution). Dies, obwohl der Input von Hütten-Aluminium vor dem Recycling des Alu-Schrotts erfolgt. Das Modell hat jedoch den Vorteil, dass das Recycling-Potential des Bauteils unmittelbar abgebildet werden kann und sich inputseitig nicht auf einen konstruierten Durchschnitts-Mix aus Hütten- und Primäraluminium abstützen muss. Der Ansatz der wertkorrigierten Substitution besitzt somit die Optik einer *consequential LCA*, indem das in der Zukunft liegende Recycling sowie – als Konsequenz des Recyclings – die Substitution von Hütten-Aluminium mit betrachtet wird.

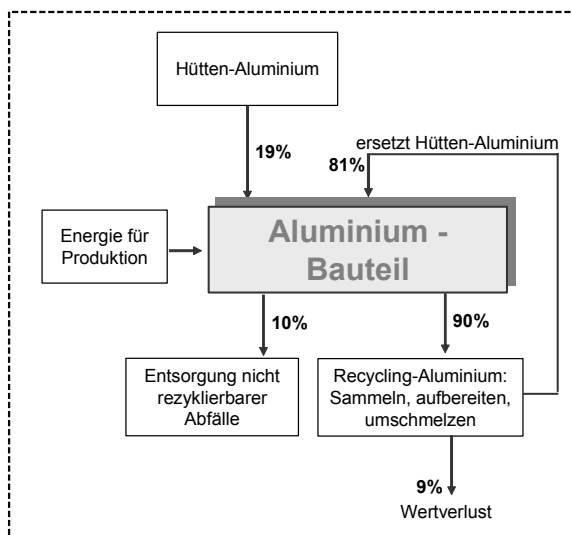


Abbildung 4 Schematische Darstellung der Substitution von Hütten-Aluminium durch Recycling-Aluminium mit der Methode der wertkorrigierten Substitution.

Abbildung 4 stellt die wertkorrigierte Substitution bei der Produktion von 1 kg Alu-Bauteil dar. Dabei wird angenommen, dass von 1 kg Aluminium Knetlegierung in einem Bauteil, das aus einem Gebäude ausgebaut wird, 90% in einem nächsten Lebenszyklus landet (Aluminiumausbeute = 90%), also 900 g. Diese 900 g Recycling-Aluminium besitzen unter Umständen jedoch nicht die Funktionalität der gleichen Menge Hütten-Aluminium, z.B. einen einge-

schränkten Einsatz in der Produktion von Knetlegierungen. Diese Einschränkung (Downcycling) spiegelt sich in einem geringeren Marktwert des Recycling-Aluminiums wieder. Für die Substitution wird die verminderte Wertigkeit eingerechnet, die dem Quotienten der an der Metallbörse quotierten Qualitäten von Hütten- und Recycling-Aluminium entspricht. Dieser Quotient liegt bei 0.9, was ein langjähriges Einjahresmittel von 1993 bis 2000 darstellt mit einer Standardabweichung von 4.5% (Werner (2003)), was heisst, dass 1 kg Recycling-Aluminium mit einer Wertigkeit von 0.9 kg Hüttenaluminium gleichgesetzt wird. Somit ist die Wertkorrektur 90%. Das bedeutet, dass von den 900 g Recycling-Aluminium lediglich 90% – also 810 g – Primärmaterial ersetzen können. Der Rest – also 90 g – geht für die Substitution verloren. Was schlussendlich für die Berechnung der Grauen Energie an relevanten Prozessen übrig bleibt ist die Herstellung von 190 g Hütten-Aluminium, die Sammlung und Sortierung von 1 kg Schrott, die Aufbereitung von 900 g Aluminium, die Entsorgung der physisch verlorenen 100 g Aluminium sowie die benötigte Energie zur Herstellung des Bauteils (Walzen, Extrudieren, etc.).

5.4 Beurteilung für Verwendung in Alu-Recycling

Der *cut-off* Ansatz ist für die Beschreibung des ökologischen Zustands auf grosser geographischer Skala geeignet. In der vorliegenden Studie hingegen werden Bewertungen gemacht, deren Fokus auf der Rezyklierbarkeit von individuellen Aluminium-Bauteilen liegt (*consequential LCA*), was mit dem *cut-off* Ansatz nicht ausreichend explizit abgebildet werden kann. Beim *cut-off* Ansatz wird für alle Bauteile trotz unterschiedlichem Recycling-Potential derselbe Anteil Recycling-Aluminium angerechnet. Deshalb wird in der vorliegenden Studie die Methode der wertkorrigierten Substitution verwendet, da diese das Recycling-Potential individueller Bauteile abbilden kann und somit im Gegensatz zum *cut-off* Ansatz sensitiv auf eine nachhaltige Verwendung des Materials ist.

6 Berechnung von Primärenergieaufwand mittels Wertkorrigierter Substitution

Im ersten Kapitel 7.1 wird festgehalten, welche Prozesse in dieser Studie betrachtet werden, welche Bauteile Aluminium enthalten und wie die Graue Energie definiert wird.

Im nächsten Kapitel 7.2 werden die für die Methode wichtigen Aluminiumausbeuten beschrieben und hergeleitet. Diese Ausbeuten bestimmen, wie viel Aluminium physisch für einen Einsatz in einem nächsten Lebenszyklus zur Verfügung steht. Auch die Wertkorrektur wird hier hergeleitet und begründet.

Im letzten Methodenkapitel 7.3 wird der Einfluss des Marktpreises auf die Ausbeuten und auf die Wertkorrektur betrachtet.

6.1 Systembeschreibung

Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, bildet die Methode der wertkorrigierten Substitution das Recycling mit dem Anteil des Aluminiums ab, das auch tatsächlich in einem nächsten Lebenszyklus eines Bauteils landet (Abbildung 5). Der Weg von Aluminium vom Ausbau des alten Bauteils bis zum Einfließen in ein neues Bauteil führt über den Rezyklier-Betrieb wo das Material aufbereitet und in verschiedene Fraktionen getrennt wird, sowie über die Produktion, wo aus den verschiedenen aufbereiteten Fraktionen Knet- oder Gusslegierungen hergestellt werden. Bei jedem Schritt entstehen Verluste, die dazu führen, dass nicht alles Aluminium, das im Gebäude verbaut wurde, tatsächlich in einem nächsten Bauteil-Lebenszyklus landet. Die Verluste können auch über das Gegenteil – die Ausbeute – definiert werden.

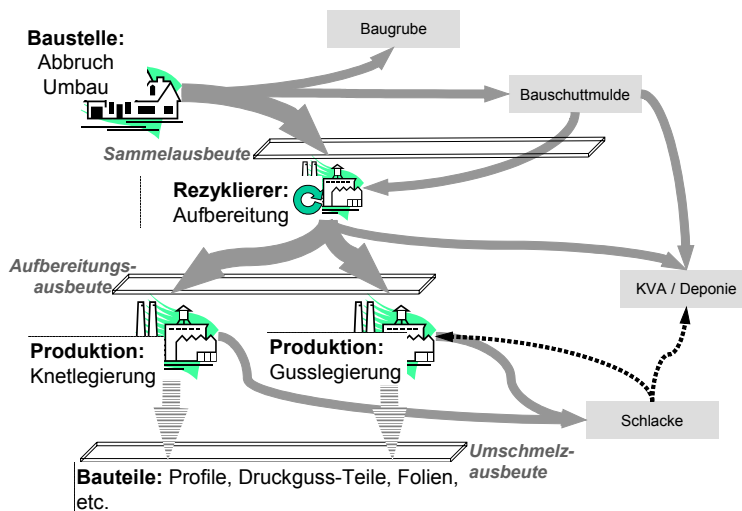


Abbildung 5 System Aluminium im Baustoff-Recycling.

Das Material wird auf der Baustelle gesammelt und gelangt direkt oder über eine Nachsortierung des Mischabbruchs zum Rezyklierer. Dabei treten Verluste auf, da ein Teil des Aluminiums nicht ausgebaut oder nicht aussortiert wird und letztlich in der KVA oder in einer Deponie landet oder aber in der Baugrube verbleibt. Die **Sammelausbeute** bestimmt dabei, welcher Anteil des im Gebäude verbauten Aluminiums tatsächlich beim Rezyklierer ankommt.

Dort wird das Aluminium aufbereitet, homogenisiert und nach Reinheit in verschiedene Fraktionen getrennt. Auch hier treten Verluste auf beim Umladen, beim Homogenisieren und Tren-

nen, etc. Die **Aufbereitungsausbeute** gibt an, wie viel des beim Rezyklierer angelieferten Materials zur Weiterverarbeitung angeliefert wird.

Aus dem angelieferten Aluminium werden entweder Knet- oder Gusslegierungen hergestellt. Auch beim Umschmelzen gibt es Verluste, wobei die **Umschmelzausbeute** den Prozentsatz des angelieferten Aluminiums definiert, das als fertiges Halbzeug die Produktionsstätte verlässt.

Das Produkt aus Sammel-, Aufbereitungs- und Umschmelzausbeute ergibt die **Gesamtausbeute**.

Es wird angenommen, dass die Verluste auf der Ebene der Sammelausbeute letztlich über eine **Deponie** entsorgt werden. Für die restlichen Verluste bei Aufbereiten und Umschmelzen werden die Annahmen des Europäischen Aluminiumverbandes EAA (2000) übernommen, in dessen Studie das Recycling detailliert in den verschiedenen Abfallfraktionen abgebildet wird. Da die Entsorgung von Inertstoffen in Deponien kaum Primärenergie verbraucht, sind diese Prozesse in dieser Studie nicht relevant. Deshalb werden Entsorgungsprozesse im Europäischen Durchschnitt abgebildet und nicht für jedes Bauteil individuell (s. auch Tabelle 3).

6.1.1 Systemgrenzen und Berechnungsbasis

Für die Berechnung der Grauen Energie mit Berücksichtigung des Recycling mit dem Ansatz der wertkorrigierten Substitution ergibt sich das in Abbildung 6 dargestellte Modell. Die Prozesse innerhalb der Systemgrenzen werden von der Rechnung erfasst. Als Inputmaterial wird in jedem Fall Hütten-Aluminium mit der Wertigkeit von Knetlegierung genommen, wobei der beim Recycling entstehende Anteil an Recyclingmaterial gutgeschrieben wird.

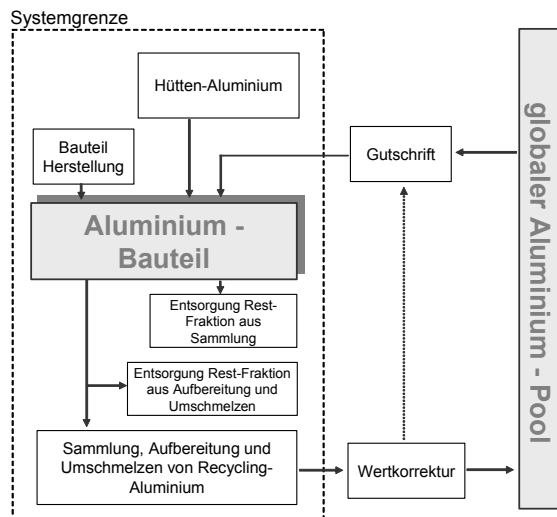


Abbildung 6 System, das beim Berechnen der Grauen Energie mit der Methode der wertkorrigierten Substitution betrachtet wird. Das Recycling-Aluminium fließt in einen gedachten Aluminium-Pool, von dem – die verminderte Wertigkeit des Recycling-Aluminiums eingerechnet – die Gutschrift an Hüttenaluminium gegeben wird (Werner (2003)).

Die Gutschrift an Input-Material bemisst sich am Grad des Wertabschlags, d.h. nach der Wertkorrektur für das rezyklierte Aluminium. In Tabelle 2 ist als Beispiel die Berechnung für ein Bauteil mit 14.3 kg Aluminium dargestellt (Alu-Warzenblech, warm ausgehärtet). Die gutgeschriebene Menge entspricht dem Aluminium, das in einem nächsten Lebenszyklus wieder eingesetzt werden kann (globaler Aluminium-Pool). Die restlichen Werte errechnen sich nach den Angaben im unteren Teil der Tabelle.

Die *end-of-life* Option, d.h. der Recyclingprozess wie er in Abbildung 6 dargestellt ist, muss für die verwendete wertkorrigierte Substitution detailliert modelliert werden. Die Modellierung nimmt dabei Rücksicht auf die in der Datenbank ecoinvent bereits enthaltenen Datensätze, die sich auf EAA (2000) abstützen. Das dabei entstehende System ist in Abbildung 8 dargestellt. Damit keine Doppelzählung entsteht, muss der Wert für das Recycling-Aluminium um den darin bereits enthaltenen Anteil des Alu-Schrotts korrigiert werden (Abbildung 7). Die verwendeten Daten wurden auf die Menge Input-Material skaliert. Bei diesem Vorgehen werden die Entsorgungsprozesse aus Aufbereitung und Umschmelzen mit dem auf einem europäischen Mittel basierenden Modellen von EAA abgebildet. Die in diesen Modellen enthaltenen Abfallmengen weichen von den Rest-Fractionen aus den in dieser Studie betrachteten Bauteilen ab. Da diese Abweichungen klein sind und auch der CED der betrachteten Entsorgungsprozesse gering ist, können sie in Kauf genommen werden ohne die Aussagen der Studie zu beeinflussen.

Das aus diesen Überlegungen resultierende Inventar, auf dem die Berechnung der „Grauen Energie“ beruht ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 2 Rechenbeispiel eines Bauteils mit 14.3 kg Aluminium (Alu-Warzenblech, warm ausgehärtet). Die Ausbeuten bestimmen die Fraktionen, die in der Entsorgung landen, der Rest findet in einem nächsten Lebenszyklus wieder Verwendung. Die um die verminderte Wertigkeit (Wertkorrektur) korrigierte Menge Recycling-Alu wird inputseitig als Gutschrift vergeben, so dass nicht 14.3 kg sondern 2.7 kg Inputmaterial berechnet werden.

Input	kg	Output	kg	Berechnungsgrundlagen
		Entsorgung Rest-Fraktion aus Sammlung	0.29	Sammelausbeute ¹⁾
		Entsorgung Rest-Fraktion aus Aufbereitung	0.60	Aufbereitungsausbeute ²⁾
		Entsorgung Rest-Fraktion aus Umschmelzen	0.54	Umschmelzausbeute ³⁾
Gutschrift von Alurecycling	12.9	Rezykliertes Aluminium	12.9	⁴⁾
Abzug Wertkorrektur	-1.3	Wertkorrektur	(-1.3)	⁵⁾
Input Hütten-Aluminium	2.7			
Total Aluminium	14.30	Total Aluminium	14.30	

$A_s = \text{Sammelausbeute} = 98\%$	$^1) = \text{Total} * A_s$
$A_a = \text{Aufbereitungs-Ausbeute} = 95.75\%$	$^2) = \text{Total} * A_s * (1 - A_a)$
$A_u = \text{Umschmelzausbeute} = 96\%$	$^3) = \text{Total} * A_s * A_a * (1 - A_u)$
$A_s * A_a * A_u = A_g = \text{Gesamtausbeute} = 92.0\%$	$^4) = \text{Total} * A_g * W$
$W = \text{Wertkorrektur} = 90\%$	$^5) = \text{Total} * (1 - W) * A_g$

Tabelle 3 Inventar für die Berechnung der Grauen Energie für das Beispiel. Für die verwendeten Werte s. Kapitel 7.1.2.

Material / Prozess	Wert	Einheit
Hütten-Aluminium, substituiert	2.7	kg
Entsorgung Rest-Fraktion aus Sammlung, inkl. Transport	0.29	kg
Aluminiumschrott, inkl. Entsorgung nach europäischem Mittel	14.01 (=14.3-0.29)	kg
Recycling-Aluminium aus Schrott, inkl. Entsorgung nach europäischem Mittel, abzüglich des „ökologischen Rucksacks“ aus Aluminiumschrott (Doppelzählung, s. Abb. 7)	13.42 (=14.3-0.29-0.60)	kg
Herstellung des Bauteils	Rest-Wert aus eco-devis	

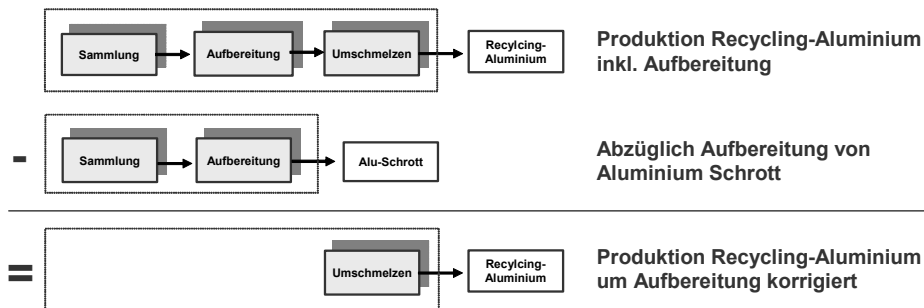


Abbildung 7 Substitution zur Vermeidung einer Doppelzählung. Bei der Modellierung der *end-of-life* Option muss die Produktion von Recycling-Aluminium um den Betrag aus Sammlung und Aufbereitung korrigiert werden, da dieser bereits im Prozess der Aufbereitung von Aluminium-Schrott enthalten ist.

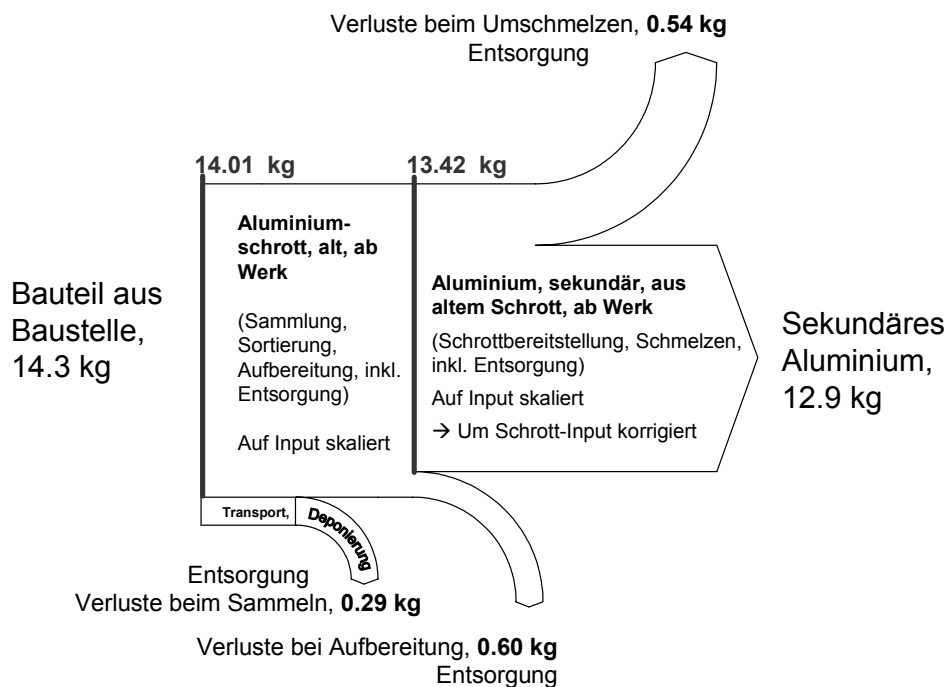


Abbildung 8 Darstellung der Modellierung des Recyclingprozesses mit Datensätzen aus der Datenbank ecoinvent anhand eines Beispiels.

6.1.2 Werte für den kumulierten Primärenergiebedarf CED

Im Folgenden werden die in der Studie verwendeten Werte eingeführt. Sie beziehen sich auf das Inventar in Tabelle 3, das sich aus den gewählten Systemgrenzen ergibt (Abbildung 6).

Um die Vergleichbarkeit mit eco-devis zu gewährleisten, wird bei der Berechnung des Primärenergiebedarfs CED von denselben Annahmen wie in eco-devis ausgegangen. Dabei wurden die „Graue Energie“ Werte für die Herstellung des Bauteils und die übrigen im Bauteil vorhandenen Materialien belassen. Lediglich die Werte für Aluminium wurden für diese Studie angepasst.

Für die wertkorrigierte Substitution werden neben der Herstellung von Hütten-Aluminium die Entsorgungsprozesse, sowie die Herstellung von Recycling-Aluminium bewertet. Diese Prozesse werden wie in Abbildung 8 dargestellt aus den inecoinvent vorhandenen Datensätzen bezogen. Die Entsorgungsprozesse sind in Doka (2003) beschrieben, die Daten für die Herstellung von Hütten- und Recycling-Aluminium basieren weitgehend auf Zahlen des Europäischen Aluminium Verbandes (EAA (2000)) und sind in Althaus et al. (2003) beschrieben. Die Berechnungen und Quellen für die in Tabelle 3 dargestellten in der Studie verwendeten Inventare sind in Tabelle 4 erläutert. Somit werden in der vorliegenden Studie folgende Prozesse mit ihren CED-Werten verwendet:

- **Hütten-Aluminium:** Herstellung von einem Kilogramm Hütten-Aluminium aus natürlichen Rohstoffen. Der Prozess umfasst Extraktion, Deponierung von Abraumhalden und *red mud*, Transport und Verhüttung, sowie die Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle (Althaus et al. (2003)).
- **Herstellung des Bauteils:** Dieser Prozess beinhaltet alle anderen zur Herstellung des Bauteils benötigten Materialien und Prozesse, z.B. die Bereitstellung von Holz oder das Anodisieren von Aluminium. Der Wert variiert von Bauteil zu Bauteil. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden die Werte aus eco-devis verwendet (Pestalozzi (2004)).
- **Entsorgung Rest-Fraktion aus Sammlung:** Entsorgung des Aluminiums, das bei der Sammlung nicht erfasst wurde. Inklusiv Transport und Deponierung (Doka (2003)).
- **Aluminiumschrott:** Aufbereitung inkl. Entsorgung nach europäischem Mittel, skaliert auf Input.
- **Recycling-Aluminium** aus aufbereitetem Schrott, inkl. Entsorgung nach europäischem Mittel, abzüglich der Primärenergien aus Aluminiumschrott.

Tabelle 4 Verwendete Graue Energie Werte, Berechnung und Quellen. Folgende Datensätze aus ecoinvent (ecoinvent Centre (2004)) wurden verwendet: [A] *transport, lorry 28 t: 1tkm* (CH), [B] *disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill: 1kg* (CH), [C] *aluminium scrap, old, at plant: 1kg* (RER), [D] *aluminium, secondary, from old scrap, at plant: 1kg* (RER), [F] *aluminium, primary, at plant* (GLO = globale Betrachtung, RER = gültig für EU, CH = gültig für Schweiz).

Recyclingprozesse	Einheit und [Datensatz]	CED _f	CED _n	CED _b	CED _r	CED _h
		fossil	nuklear	Biomasse	regen.	Wasserk.
Transport in 28t LKW über eine Entfernung von 50 km	0.05 tkm [A]/kg	0.18	0.01	0.00	0.00	0.00
+ Deponierung des Schrotts in einer Deponie	1 kg [B] / kg	0.43	0.10	0.00	0.00	0.03
Entsorgung Rest-Fraktion aus Sammlung, inkl. Transport (Total)	1 kg	0.61	0.11	0.00	0.00	0.03
Aluminiumschrott , inkl. Entsorgung nach europäischem Mittel, skaliert auf Input	1 kg [C] / 1.23 kg	2.12	0.35	0.05	0.01	0.09
Aluminium, sekundär aus altem Schrott (inkl. Schrottaufbereitung)	1 kg [D] / kg	19.1	2.72	0.26	0.07	1.80
- Schrottaufbereitung [kg / kg]	- 1 kg [C] / kg	- 2.61	- 0.44	- 0.06	- 0.01	- 0.11
Aluminium, sekundär aus altem Schrott, um Schrottaufbereitung korrigiert [= E]		16.5	2.28	0.21	0.06	1.69
Recycling-Aluminium aus Schrott, inkl. Entsorgung nach europäischem Mittel, abzüglich der Grauen Energie aus Aluminiumschrott (Doppelzählung)	1 kg [E] / 1.03 kg	16.0	2.21	0.20	0.06	1.64
Hütten-Aluminium	1 kg	127	35.4	0.46	0.15	38.7

6.1.3 Datenbasis und betrachtete Bauteile

Die in dieser Studie betrachteten Bauteile entsprechen den in eco-devis bewerteten Bauteilen, bei denen Aluminium einen entscheidungsrelevanten Anteil hat. Die Berechnung der „Grauen Energie“ Werten wurde auf den ursprünglichen Zahlen von eco-devis aufgebaut. Diese Berechnung fasst einzelne Elemente zu Bauteilen zusammen, wobei sich die Graue Energie aus der Summe dieser Elemente zuzüglich relevanter Bearbeitungsprozessen zusammensetzt. Eine vollständige Liste der Bauteile ist in Tabelle 5 mit den dazugehörigen NPK-Kapiteln dargestellt. Eine detaillierte Liste in Anhang A: Berechnungsgrundlagen zeigt die einzelnen Berechnungsschritte und Grundlagen. Bei den Positionen aus NPK 652 (Dampfsperren), 411/412 (Spanplatten), 421/422 (Gipsfaserplatten), 163/448/444 (PUR-Platten) und 221 (Bitumenbahnen) wurde von vornherein davon ausgegangen, dass das Aluminium keiner stofflichen Wiederverwertung zugeführt werden kann.

Tabelle 5 Übersicht über die in dieser Studie bewerteten Bauteile

Positionen Nummer	Bezeichnung	Positionen Nummer	Bezeichnung
NPK 321 Montagebau in Stahl		NPK 364 Flachdach mit Dichtungsbahnen	
541.200 / 542.200	Alu-Warzenblech, warm ausgehärtet, roh (d = 5/7 mm)	221.211	Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen Alu80
NPK 343 Hinterlüftete Fassaden		221.221	Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen E Alu80
221.000	Alu-Unterkonstruktion mit Traglatten Abstand 30cm (Konsolen, Tragprofile, Traglatten, Therm. Trennelement, Verbindungsmittel, 10 Schrauben)	613.313	Abweisbleche, Alublech (1.0 mm)
231.000	Alu- Unterkonstruktion vertikal, Tragprofile L-Form (Konsole, L- Profil, Therm. Trennelement, Verbindungsmittel, 10 Schrauben)	621.130	Dachrandabschluss, Alublech (1.0 mm)
231.000	Alu- Unterkonstruktion vertikal, Tragprofile T-Form (Konsole, T- Profil, Therm. Trennelement, Verbindungsmittel, 10 Schrauben)	633.130	Stirnblenden, Alublech (1.0 mm)
611.100	Panele aus Alublech roh	641.113	Abschlusschienen, flach, Alu (3x25 mm)
621.100	Kassetten aus Alublech roh (Abwicklungs-Faktor 1.5)	641.122	Abschlusschienen, hohlfach, Alu (3x25 mm)
622.000	Dreischichtplatten aus beidseitig mit Alu belegtem Kunststoffkern (Aluschicht, Kunststoffkern, Kleber)	642.130	Aufbordungsabschluss, Alublech (1.0 mm)
623.000	Dreischichtplatten als Stülpleckung aus beidseitig mit Alu belegtem Kunststoffkern (Aluschicht, Kunststoffkern, Kleber)	644.112	Schwellausbildung, Alu (2x30 mm)
631.000	Platten aus Alu profiliert, roh	644.223	Abdeckblech, Alublech (1.0 mm)
932.110	Fensterbänke aus Alublech geklebt (Fensterbank, Kleber)	651.130	Schutzblech, Alublech (1.0 mm)
932.120	Fensterbänke aus Alublech mit Metallbügel befestigt (Fensterbank, Metallbügel)	NPK 371 Fenster	
933.200	Mauerkronenabdeckungen aus Alublech, roh	000.200 05	Aluminiumfenster, zweizargig, wärmegeklämt, mit PA Stegverbund
NPK 342 Verputzte Aussenwärmedämmungen		NPK 427 Sanitäranlagen Entsorgung	
171.000	Fensterbänke aus Alu, mit Hohlraumdämmung, Alu anodisiert	710.120	Abgasleitungen und Formstücke aus Aluminium (500 µm)
630.130	Sockelabschlüsse spritzwasserfest, Aluminium	721.200	Lüftungsrohre aus Aluminium (500 µm)
NPK 347 Rollläden, Raffstoren, Markisen und Fensterläden		NPK 612 Allgemeine Metallbauarbeiten	
211.000 - 214.000	Alurollläden, Alurollläden, Hand/Motor, regulierbar/fest (bxh = 1.6x2.0, Behang Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Führungsschiene Aluprofil, Welle Stahlrohr)	311.120	Flachdächer mit Konsolen, Eindeckung Profiblech Alu h 40 bis 45 mm
241.000 - 242.000	Alurollläden mit integrierter Abdeckung, Alurollläden, Hand/Motor, regulierbar/fest (bxh = 1.6x2.0, Behang Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Führungsschiene Aluprofil, Welle Stahlrohr)	321.120	Pultdächer mit Konsolen, Eindeckung Profiblech Alu h 40 bis 45 mm
311.000 - 316.000	Aluraffstoren Verbund (bxh = 1.6x2.0, Behang Alulamellen, Alu einbrennlackiert, Führungsschiene Aluprofil, Oberschiene Stahlrohr)	331.000	Satteldächer ohne Stützen, Eindeckung Profiblech Alu h 40 bis 45 mm
321.000 - 322.000	Ganzmetal-Raffstoren (bxh = 1.6x2.0, Behang Alulamellen, Alu einbrennlackiert, Führungsschiene Aluprofil, Oberschiene Stahlrohr)	521.100	Geländer mit Füllungen, Aluminium-Lochblech (Rundloch 4mm, anodisiert)
661.000 - 663.000	Aludrehläden mit beweglichen Lamellen (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Kloben, Rückhalter, Bänder Stahl)	621.110	Jochelemente mit Füllungen und Untergurt, Aluminium-Lochblech (Rundloch 4mm, anodisiert)
664.000	Aludrehläden mit festen Lamellen (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Kloben, Rückhalter, Bänder Stahl)	622.110	Rahmenelemente mit Füllung und Pfosten, Aluminium-Lochblech (Rundloch 4mm, anodisiert)
665.000	Aludrehläden mit Füllung (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Kloben, Rückhalter, Bänder Stahl)	623.110	Rahmenelemente mit Füllung und Laschen, Aluminium-Lochblech (Rundloch 4mm, anodisiert)
666.000	Aludrehläden mit Füllung und Lamellen (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Kloben, Rückhalter, Bänder Stahl)	NPK 622 Türen	
667.000	Aluschiebeläden mit festen Lamellen (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Lauf-/Führungsschiene Aluprofil)	211.200	Aussentüren aus Holz oder Holzwerkstoffen, Klimaklasse III, U-Wert Türkonstruktion 1.5 W/m2K (Rahmen und Türblatt, Mittelwert)
NPK 351 Spenglerarbeiten		411.100	Rahmentüren aus Alu, einflügelig, wärmegeklämt (Klimaklasse III, U-Wert Rahmen 2.1 W/m2K), verglast
045.110	Alublech blank, 1 mm	411.100	Rahmentüren aus Alu, einflügelig, wärmegeklämt (Klimaklasse III, U-Wert Rahmen 2.1 W/m2K), mit Füllung
NPK 352 Bekleidungen und Deckungen aus Dünnblech		511.100	Rahmentüren aus Alu, einflügelig, ungedämmt, verglast
200.510	Alublech blank, 0.7 mm	511.100	Rahmentüren aus Alu, einflügelig, ungedämmt, mit Füllung
200.520	Alublech PVDF beschichtet, 0.7 mm	NPK 643 Gipsarbeiten Trockenbau	
NPK 361 Steildach, Unterkonstruktionen		652.21	Dampfsperren aus Alufolien, beidseitig mit Kraftpapier verstärkt
531.111	Kraftpapier faserbewehrt, einseitig mit Alu belegt (20 µm) mit Dichtungsband luftdicht, 8-10 cm überlappt (0.38 mm, s-D 650 m)	NPK 661 Unterlagsböden	
531.121	Kraftpapier faserbewehrt, beidseitig mit Alu belegt (je 20 µm), mit Dichtungsband luftdicht, 8-10 cm überlappt (0.40 mm, s-D 4500 m)	221.111	Horizontale Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumenbahn V60, Bitumenbahn ALU80, Verschweissen/Verkleben, Überlappung 100 mm)
532.211	Dampfsperre aus Bitumen-Dichtungsbahnen Alu 80, verschweissen, 10 cm überlappt, (2 mm, s-D 150 - >2000 m)	444.400	Wärmedämmschichten EPS mit Alufolie belegt und Ankergewebe auf Rollen, einlagig (Dicke 20-40 mm, W.L. Alu = 0.037 W/mK, Beurteilung bei einem U-Wert von 0.3 W/m2K)
NPK 362 Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen		444.500	Wärmedämmschichten EPS-Platten unbelegt und EPS mit Alufolie belegt auf Rollen (zweilagig, Dicke 40-80 mm, W.L. = 0.037 W/mK)
221.211	Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen Alu80	448.130	Wärmedämmschichten PUR-Platten beidseitig alubelegt (einlagig, Dicke 20-120 mm, W.L. = 0.024 W/mK)
221.221	Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen E Alu80	NPK 662 Fugenlose Bodenbeläge	
621.000	Abschlüsse zu Abdichtungen aus bituminösen oder Kunststoff-Dichtungsbahnen, Flachschiene Alu	163.000	Wärmedämmungen PUR-Platte alubelegt (W.L. = 0.024 W/mK, Beurteilung bei einem U-Wert von 0.3 W/m2K)
622.000 / 623.000	Abschlüsse zu Abdichtungen aus bituminösen oder Kunststoff-Dichtungsbahnen, Blechstreifen Alu	441.220	Feldbegrenzungsprofile aus Alu, Höhe 5-12 mm
NPK 363 Steildach, Deckungen		NPK 663 Beläge in Linoleum, Kunststoffen, Textilien und dgl.	
421.000	Tonziegel instandsetzen, Einfachdach Aluschindeln (Dicke 0.5 mm, 24 Schindeln / m2, 30x5 cm)	611.000	Sockelleisten aus Aluminium (0.2x5 cm)
630.000	Profilierte Platten liefern und verlegen (Alu blank, Dicke 0.8 mm, Profilhöhe 51-60 mm, Überdeckung 25)	651.000	Abschlussprofile aus Aluminium (0.2x5 cm)
630.000	Profilierte Platten liefern und verlegen (Alu einbrennlackiert, Dicke 0.8 mm, Profilhöhe 51-60 mm, Überdeckung 25)	NPK 665 Doppelböden	
		310.000	Unterkonstruktionen Stützen Alu (Beurteilung bei gleichem Materialvolumen, Stützenhöhe 25 cm)
		320.000	Unterkonstruktionen Stützen und Rasterstäbe us Aluminium (Beurteilung bei gleichem Materialvolumen, Stützenhöhe 25 cm)
		411.101	Spanplatte, schwerbrennbar, einseitig alubeschichtet (Bodenbelag verklebt)
		412.101	Spanplatte, schwerbrennbar, beidseitig alubeschichtet (Bodenbelag lose)
		412.102	Spanplatte, schwerbrennbar, stahlblech-alubeschichtet (Bodenbelag lose)
		412.202	Spanplatte, schwerbrennbar, dünn stahlblech-alubeschichtet (Bodenbelag lose)
		421.101	Gipsfaserplatte, nichtbrennbar, einseitig alubeschichtet/hydrophobiert (Bodenbelag verklebt)
		422.101	Gipsfaserplatte, nichtbrennbar, beidseitig alubeschichtet/hydrophobiert (Bodenbelag lose)
		422.102	Gipsfaserplatte, nichtbrennbar, stahlblech-alubeschichtet/hydrophobiert (Bodenbelag lose)

6.2 Material-Ausbeuten und Wertkorrektur

In diesem Kapitel sind die einzelnen Ausbeuten hergeleitet, die zur Berechnung der Substitution von Hüttenaluminium nötig sind. Es wurde bewusst darauf geachtet, dass die einzelnen Ausbeuten in wenige und in Worten klar definierbare Klassen unterschieden sind, um eine möglichst gute Trennschärfe zu erreichen. Diese Klassen sind auf objektiven Kriterien aufgebaut, die für die Höhe der Ausbeute massgebend sind. Die Kriterien beziehen sich auf Materialeigenschaften, die unabhängig vom jeweiligen Kontext bestimmt werden können. Die Multiplikation der einzelnen Ausbeuten ergibt die Gesamtausbeute des Prozesses, also den Anteil des Aluminiums aus einem Bauteil, der tatsächlich in einem nächsten Produktleben weitere Verwendung findet (Abbildung 9). Für eine Gutschrift des Recycling-Aluminiums als Input-Materials wird es um die verminderte Wertigkeit gegenüber Hüttenaluminium korrigiert (Wertkorrektur). Im Folgenden werden die einzelnen Ausbeuten beim Aluminium-Recycling von Bauteilen hergeleitet.

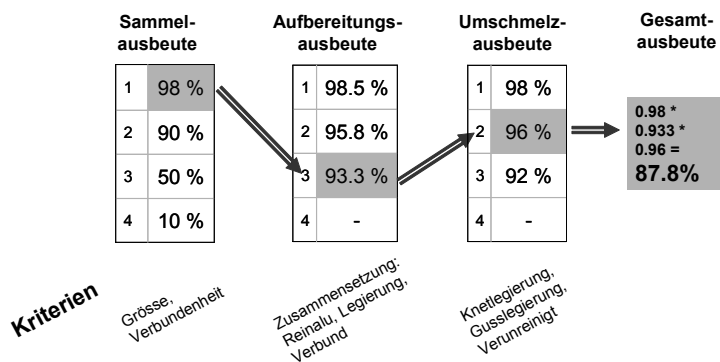


Abbildung 9 Die Gesamtausbeute ergibt sich über die Multiplikation der einzelnen Ausbeuten. Diese sind anhand objektiver Kriterien in trennscharfe Klassen (1, 2, 3, 4) eingeteilt. Die Definition der Klassen und der dazugehörige Wert sind spezifisch auf die Situation des Aluminium-Recyclings von Bauteilen angepasst.

6.2.1 Sammel-Ausbeute

Die Sammelausbeute gibt an, wie viel des Aluminiums von einem aus dem Gebäude ausgebauten Bauteils beim Rezyklierer angeliefert wird. Dabei wird angenommen, dass der Rest an die Deponie verloren geht. Aufgrund verschiedener Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Sammelausbeute massgeblich von der Grösse des ausgebauten Bauteils abhängt und davon, wie leicht sich das Aluminium aus dem Gebäude herauslösen lässt (Boin & Houwelingen (2004), Rubli (2004)). Weitere Faktoren sind die Zugänglichkeit zum Bauteil, der Preis den der Rezyklierer für das Material bezahlt, resp. die Alternativkosten der Sammlung, also die Kosten, die zur Beseitigung des Materials anfallen würden.

Der Normpositionskatalog erfasst die Bauteile pro Quadratmeter (m^2), und auch die Bewertung in eco-devis erfolgt in „ m^2 Bauteil“. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wird auch in dieser Studie in Quadratmetern gerechnet. Ein Wert von 13.8 kg Aluminium pro m^2 Fenster bedeutet für ein Fenster mit 2.5 m^2 Fläche dass $2.5 \times 13.8 = 34.5$ kg Aluminium in einem Stück Aluminiumfenster vorhanden sind. Bei einem Fassadenblech hingegen ist nicht von vornherein klar, welche Menge verbaut wird – es ist deshalb auch nicht ersichtlich wie gross schlussendlich das zu rezyklierende Objekt ist. Auch wenn ein Flächenmass in Bezug auf die Sammelausbeute weniger gut für eine Klassierung geeignet ist als das Gewicht pro Stück, wird die Klassierung in kg Aluminium pro m^2 Bauteil vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Unterteilung trotzdem vernünftig Ergebnisse liefert.

Es gibt nur spärliche Literatur zu Sammelausbeuten individueller Bauteile (z.B. in Boin & Houwelingen (2004)) und keinen bekannten Ansatz, der die Ausbeute in Abhängigkeit von Eigenschaften einzelner Objekte methodisch erfasst. Aufgrund exemplarisch untersuchter Abbrüche kann davon ausgegangen werden, dass Objekte unter 200 g Gewicht nicht mehr ökonomisch rezyklierbar sind und verloren gehen (ebd.). Es wird jedoch kaum möglich sein, quantitative Sammelausbeuten für jedes individuelle Bauteil zu ermitteln. Aus diesem Grund mussten diese Werte auf Schätzungen aus der Literatur (ebd.) und der Praxis (Hr. Caprani, Fa. Eberhard) abgestützt werden. Eine Validierung der Schätzungen anhand der gefundenen Resultate in Kapitel 7 liefert eine Gesamtausbeute von ca. 80%; ein Wert, der sich mit der Literatur deckt (Rombach (2002), Boin & Houwelingen (2004)). In Tabelle 6 sind die Ausbeuten den Kategorien zugeordnet.

Tabelle 6 Die Sammelausbeuten werden anhand der Kriterien Grösse und Verbundenheit mit dem Gebäude in Klassen eingeteilt.

Sammelausbeuten	
Das Bauteil ...	
... ist gross (>5 kg / m ²)	98%
... ist ÜBER 0.5 kg / m ² schwer.	90%
... ist UNTER 0.5 kg / m ² schwer und mit wenigen Verbindungsmittel wie Nägel, Schrauben mit dem Gebäude verbunden, so dass es einfach zu trennen ist.	50%
... ist UNTER 0.5 kg / m ² schwer und mit Klebstoff verbunden, so dass es nur schwer zu trennen ist	0%

6.2.2 Aufbereitungs-Ausbeute

Die Aufbereitungs-Ausbeute gibt an, wie viel des von der Baustelle aus angelieferten Aluschrotts in aufbereiteter Form bei der Weiterverarbeitung angeliefert wird. Die dabei entstehenden Verluste sind teilweise material-unabhängig, wie im Falle der Umladeverluste und der Verluste bei der Zerkleinerung. Bei Verlusten, die beim Trennen im Magnetfeld resp. Wirbelstromabscheider und der Flotation anfallen sind die Verluste jedoch abhängig von magnetischen Eigenschaften und dem spezifischen Gewicht. Abbildung 10 gibt eine Übersicht über die vereinfachten Flüsse durch die Aufbereitung und die dabei anfallenden Verluste.

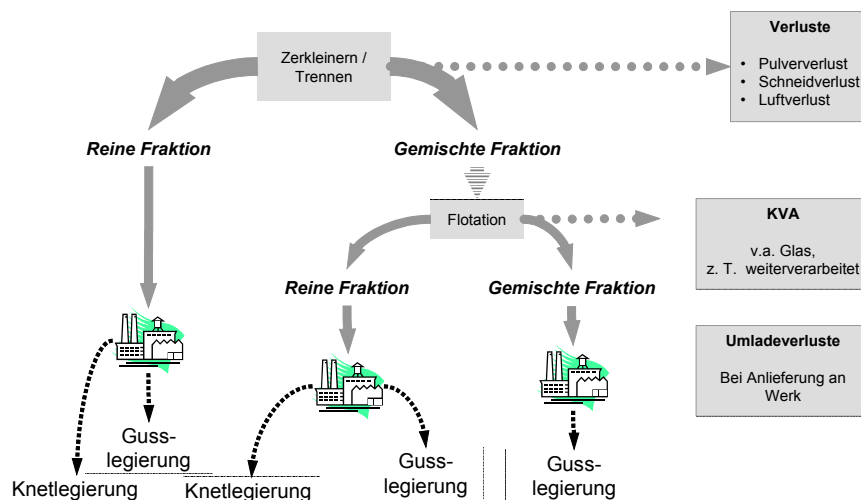


Abbildung 10 Schema des Aufbereitungsprozesses. An verschiedenen Stellen treten Verluste auf, die die Aufbereitungs-Ausbeute bestimmen

Die Aluminiumverluste wurden anhand von Literatur (Gerke et al. (1999), Wolf (2000) und Rombach (2002)) und in Zusammenarbeit mit einem Rezyklierer (Hr. C. Solenthaler, Fa. Solenthaler) erarbeitet. Die Aufbereitungsverluste und die dazu komplementären Aufbereitungs-Ausbeuten, sie sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7 Die Aufbereitungs-Ausbeuten werden anhand der Zusammensetzung charakterisiert. Die Verluste addieren sich zu einem Total auf, das komplementär zur Ausbeute ist.

Aufbereitungs-Ausbeuten		Umlade-	Zerkleiner-	Trennung	Flotation	Total-
		verluste	run-			Verluste
Die angelieferten Teile ...						
... sind aus sauberem, reinen Aluminium (Knet- oder Druckguss-Legierung)	98.50%	0.50%	1%			1.50%
... sind Legierungen mit anderen Metallen verbunden.	95.75%	0.50%	1%	2.5%	0.25%	4.25%
... sind Verbundmaterialien mit grossem Anteil an nichtmetallischen Stoffen	93.25%	0.50%	1%	5%	0.25%	6.75%

6.2.3 Umschmelz-Ausbeute

Die Umschmelz-Ausbeute bezeichnet den Anteil des in der Hütte angelieferten Aluminiums, das nach dem Umschmelzen in einem fertigen Halbzeug die Fabrik verlässt. Die beim Umschmelzen eintretenden Verluste hängen in erster Linie von der angewendeten Technik ab. Verunreinigtes Material muss in einem Flammofen verarbeitet werden, der aufgrund der Prozesssteuerung und den eintretenden Abbrandverlusten das geringste Ausbringen hat (Werner (2003), Quinkertz (2002)). In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass die Oberflächenbehandlungen „Einbrennlackieren pulverbeschichtet“ und „nass auf Wasserbasis“ zu keinen erhöhten Abbrand-Verlusten führen. Eine Beschichtung mit PVDF (Polyvinyliden Fluorid Harz) wird hingegen als Vermischung mit organischen Stoffen betrachtet. Weiter wird davon ausgegangen, dass Gusslegierungen, die im Baubereich eine mengenmässig untergeordnete Rolle spielen, in einer Mischfraktion anfallen, was sich in einer verminderten Ausbeute ausdrückt. Sauberes Material in grosser Qualität kann in Öfen mit grosser Effizienz gewonnen werden, z.B. in Induktionsöfen (EAA (2000)). Dünnwandige Teile wie Folien weisen ebenfalls verstärkte Abbrandverluste auf (Gerke et al. (1999)). In dieser Studie wird dieser Effekt vernachlässigt.

Tabelle 8 fasst die drei Kategorien der Umschmelz-Ausbeute mit den zugeordneten Raten zusammen. Die Ausbeuten berücksichtigen dabei auch die Rückgewinnung aus Salz oder Krätze.

Tabelle 8 Die Umschmelz-Verluste hängen von der Technik ab, deren Wahl auf die Zusammensetzung des Schrotts angepasst ist.

Umschmelzausbeuten	
Die angelieferten Teile ...	
... stammen von Profil (Knetlegierung)	98%
... sind Gusslegierungen	96%
... sind stark mit organischen oder mineralischen Stoffen vermischt	92%

6.2.4 Korrekturfaktor für Wertverlust

Wie weiter oben ausgeführt wird die Wertkorrektur, die das Material durch das Recycling erfährt, durch den Wertverlust ausgedrückt. Dieser kommt durch die eingeschränkte Funktionalität des Recycling-Aluminiums gegenüber Hütten-Aluminium zustande, da Recycling-Aluminium bedingt durch die geforderte Reinheit nur sehr eingeschränkt für die Herstellung von Knetlegierungen verwendet werden kann. Aus einem Gemisch von Guss- und Knetlegierungen lassen sich nur Gusslegierungen erzeugen. In dieser Studie wurde nur eine Klasse von Wertigkeiten für Recycling-Aluminium modelliert, wie es an der London Metal Exchange Börse gehandelt wird. Dessen Wertigkeit entspricht dem Verhältnis der langjährigen LME-Kotierungen (Werner (2003), Quotient Recycling-Aluminium [€/kg] / Hütten-Aluminium [€/kg] = 90%).

Für Recycling-Aluminium aus dem Bausektor wird in dieser Studie konservativ davon ausgegangen, dass durch eine vorgängige Vermischung in der Regel nicht die hochwertige Qualität erreicht wird, die einer Wertigkeit von Hütten-Aluminium entspricht. Lediglich Bauteile wie Fassadenbleche, Belagsbleche etc., die in grossen Stücken, in grossen Mengen und in grosser Reinheit anfallen, werden in der Regel sortenrein und mit bekannter Legierung beim Rezyklierer angeliefert. Dieses Material kann aufgrund definierter Zusammensetzung und Reinheit ohne Wertabschlag direkt Hütten-Aluminium ersetzen und wird deshalb mit der höchsten Wertigkeit (Wertkorrektur 100%) beurteilt. Bei zusammengesetzten Bauteilen wie Fenster und Türen wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass sie nicht beraubt werden, d.h. Verbinder aus Gusslegierungen oder anderen Metallen werden nicht entfernt und verschlechtern so die Qualität des rezyklierten Aluminiums (Wertkorrektur 90%).

Tabelle 9 Die Wertkorrektur ist das Mass für die eingeschränkte Wertigkeit, die sich aus der Qualitätsverminderung und der damit eingeschränkten Funktionalität von Recycling-Aluminium ergibt.

Wertkorrektur	
Die verarbeiteten Teile ...	
... können nicht zu Knet- oder speziellen Gusslegierungen verarbeitet werden	90%

6.3 Einfluss des Marktpreises von Aluminium

Der Marktpreis von Aluminiumprodukten kann sich vielfältig auf die in diesem Kapitel hergeleiteten Grössen auswirken. Die Wertkorrektur ist direkt abhängig vom Verhältnis der an der London Metal Exchange (LME) Preisen für Knet- und Gusslegierungen. Die Sammelausbeute

kann ebenfalls abhängig vom Marktpreis sein, da sich ein gründliches Sammeln von Aluschrott unter Umständen finanziell nicht mehr lohnt. Im Rahmen dieser Arbeit ist es nicht möglich, diese komplexen Zusammenhänge quantitativ zu modellieren. Deshalb ist im Sinne einer Szenario-Analyse ein möglicher Zustand mit negativen Auswirkungen auf das gesamte Aluminium-Recycling beschrieben worden.

Bei diesem *worst-case* Szenario wird angenommen, dass die Preise für Recycling-Aluminium gegenüber dem Preis von Hütten-Aluminium zerfällt. Eine solche Verschiebung kann aufgrund relativ grösserer variablen Produktionskosten beim Sammeln und Rezyklieren erfolgen, oder aufgrund einer einseitig gefallen Nachfrage von Recycling-Aluminium gegenüber Hütten-Aluminium. Währenddem steigende Produktionskosten in einem Szenario nicht begründbar sind, könnte der Rückgang der Nachfrage nach Recycling-Aluminium damit begründet werden, dass in Zukunft immer mehr hochwertiges Aluminium aus dem Bausektor auf den Recycling-Aluminium-Markt gelangen und somit die Menge über das Mass aus geht, wo das Material, das nicht als Gusslegierung verwertet werden kann, mit ausreichender Verdünnung durch Hüttenaluminium zu Knetlegierungen geschmolzen werden kann. Es wird also davon ausgegangen, dass der Preisquotient aus Hütten- und Recycling-Aluminium von 0.9 auf 0.5 sinkt, was einem Szenario entspricht, bei dem Recycling-Aluminium nur noch gerade die Hälfte des Wertes von Hütten-Aluminium hat. Dieser Preis ist so tief sind, dass sich aktives Ausbauen und Aufbereiten für den freien Markt nicht mehr lohnt. Es wird dabei davon ausgegangen, dass

- die Preise für das Beseitigen von Alu-Schrott unverändert bleiben
- die Gesetze und Verordnungen im Bauwesen die Baupraxis unverändert gegenüber heute lassen
- die Klasse 1 der Sammelausbeute unverändert gegenüber heute bleibt (Diese grossen Teile zu rezyklieren lohnt sich noch immer).
- die Klasse 2 der Sammelausbeute auf 50 % sinkt, da diese Objekte gerade noch lohnenswert sind.
- die Klassen 3 und 4 auf 0% sinken; sie werden daher nicht mehr gesammelt.
- die Wertigkeit der Klasse 2 für die Wertkorrektur bedingt durch den Preiszerfall von 90% auf 50% sinkt

Für dieses *worst-case* Szenario ist in Kapitel 9 eine Sensitivitätsbetrachtung gemacht. Es ist dabei zu beachten, dass über gesetzliche Rahmenbedingungen und die Kosten einer alternativen *end-of-life* Option wie die Deponierung etc. der Einfluss des Marktpreises auf die gesamte Recycling-Rate stark kontrolliert werden kann. Eine Situation, bei der der Preis für Recycling-Aluminium auf 0% sinkt, d.h. dass gar kein Recycling-Aluminium nachgefragt wird, ist nicht realistisch, da dieses Material *per se* in Gusslegierungen verwendet werden kann. Die Nachfrage nach Gusslegierungen wird auch in Zukunft gegeben sein.

7 Resultate

Gemäss der Zielsetzung der Studie sollen die „Grauen Energie“ Werte, die mit der Methode der wertkorrigierten Substitution in dieser Studie ermittelt wurden in Bezug zu den Werten aus eco-devis dargestellt werden. Wie in Kapitel 4 dargelegt ist die „Graue Energie“ kein ISO-konformer Umweltindikator, da die Empfehlung von ISO allenfalls CED_f als gültigen Indikator anerkennt (ISO/EN14042 (2000) & ISO/TR14047 (2003)). Die Ergebnisse sind deshalb dargestellt als kumulierter Primärenergiebedarf (Frischknecht et al. (2003)) aus fossilen Quellen (CED_f), nuklearen Quellen (CED_n), Wasserkraft (CED_h), sowie aus regenerativen den Quellen Sonne, Wind und Geothermie (CED_r) und Biomasse (CED_b) (Tabelle 10). Die „Graue Energie“ nach Kasser & Pöll (1998) entspricht dabei der Summe aus CED_f , CED_n und CED_h . Da die von eco-devis verwendeten Werte keine Aussagen über die Aufteilung in die einzelnen CED-Klassen erlauben, sind sie als „Graue Energie“ ausgewiesen. Im Falle der Aluminiumfenster (NPK 371) wurden in eco-devis die Werte aus der Studie von Richter et al. (1996) verwendet, die dem gesamten kumulierten Primärenergiebedarf entsprechen, also inklusive des CED_r und CED_b .

Tabelle 10 Klassen der kumulierten Primärenergie Cumulative Energy Demand (CED) nach Frischknecht et al. (2003).

CED Klasse	Beschreibung
CED_f	Fossile Quellen: Kohle, Torf, Rohöl, Erdgas
CED_n	Nukleare Quellen
CED_h	Wasserkraft als potentielle Energie an der Turbinenschaufel
CED_r	Energie aus regenerativen Quellen: Sonne, Wind und Geothermie
CED_b	Energie aus Biomasse (nachwachsende Rohstoffe)

Aufgrund der durch die Aggregation von Energieklassen entstandene Intransparenz der in eco-devis verwendeten „Graue Energie“ Werten können die Resultate nur mit Einschränkungen mit eco-devis Werten verglichen werden. Da dieser Vergleich jedoch der Zielsetzung der Studie entspricht, wird er in diesem Kapitel mit der nötigen Vorsicht gemacht (s. Grundlagen in Kapitel 4 und Diskussion in Abschnitt 8.1). Für die Berechnung wurden 68 Bauteile bestehend aus insgesamt 80 Aluminium-Elementen beurteilt. Eine Zusammenstellung der Resultate ist in Tabelle 11 zu finden.

Betrachtet man die Summe der CED-Klassen „fossil“, „nuklear“ und „Wasserkraft“ als Äquivalent mit der „Grauen Energie“ nach Kasser & Pöll (1998), so resultieren in dieser Studie allgemein niedrigere Werte als sie eco-devis für Aluminium-Bauteile ausgewiesen hat. Diese Tendenz ist besonders deutlich bei Bauteilen, bei denen Aluminium in grossen Mengen in hoher Qualität anfallen. Formal ist dieses Ergebnis mit dem höheren Rezyklat-Anteil zu erklären, der mit der Methode der wertkorrigierten Substitution geltend gemacht werden kann (s. Kapitel 6). Bei Aluminium das in starkem Masse mit anderen Materialien verbunden ist, sind bei der Sammlung und Aufbereitung erhebliche Verluste zu verzeichnen, die das Recycling-Potential stark einschränken. Oberflächenbehandlung von Bauteil-Elementen können sowohl die Umschmelzausbeuten durch Abbrandverluste wie auch die Wertigkeit des gewonnenen Recycling-Aluminiums und somit deren Recycling-Potential verschlechtern.

Wie in Kapitel 6 beschrieben hängen die Resultate in grossem Masse ab von den Vorgenommenen Klassifizierungen von Sammel-, Aufbereitungs- und Umschmelzausbeuten, sowie der geschätzten Wertigkeit des jeweiligen Recycling-Aluminiums. Diese Annahmen sind im Anhang A: Berechnungsgrundlagen im Detail dargelegt.

Als wichtigster Faktor bei der Berechnung der CED-Klassen eines Bauteils mit der verwendeten Methode kann die Einschätzung der Sammelausbeute betrachtet werden. In der Abbildung 11 ist der Einfluss der Sammelausbeute auf die spezifische fossile Primärenergie pro kg Aluminium dargestellt. Das theoretische Maximum geht von maximaler Aufbereitungs- und Umschmelzausbeute (keine Verluste) und einem vollwertigen Recyclingprodukt aus. Die Angaben Effektives Maximum und Effektives Minimum zeigen die in der Studie angenommenen Extremwerte (minimale Verluste bei Aufbereitung, Umschmelzen und einer Wertigkeit von Primär-Aluminium, resp. maximale Verluste bei einer Wertigkeit von 0.9). Die Sammelausbeute bestimmt somit die betrachteten Ergebnisse in einem viel stärkeren Masse als die anderen Faktoren Aufbereitungs- und Umschmelzausbeute sowie Wertkorrektur.

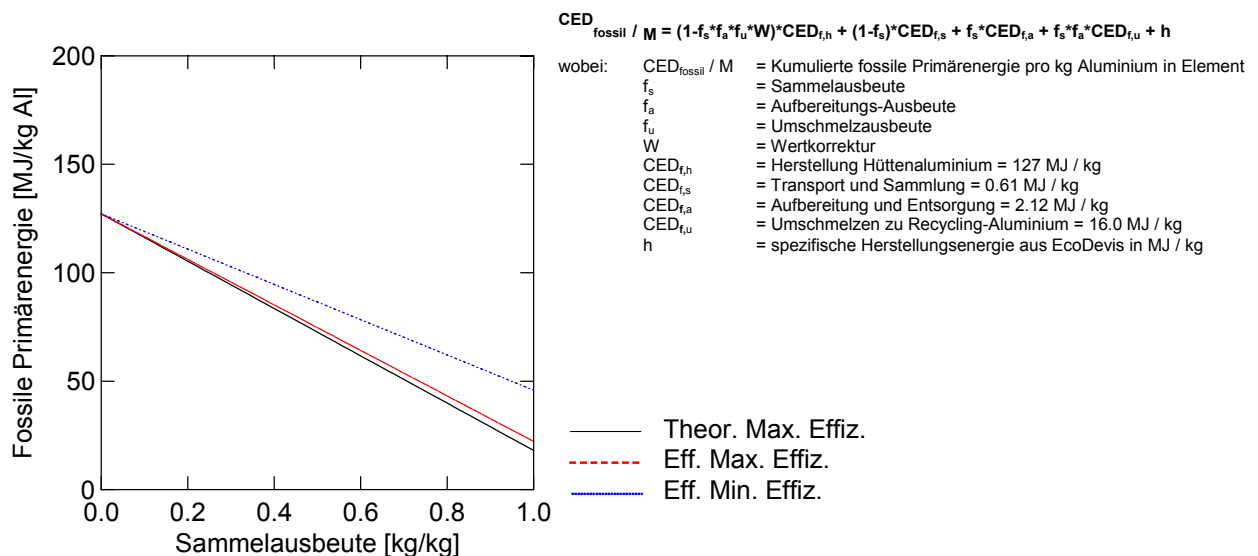


Abbildung 11 Spezifischer fossiler CED für Aluminium in Abhängigkeit von Sammelausbeute bei minimalen und maximalen Werten für Aufbereitungs-, Umschmelzausbeute und Wertkorrektur. Die Funktion lässt sich durch die Formel in der Abbildung beschreiben. (Theoretisch maximale Effizienz = 100% Aufbereitungs- und Umschmelzausbeute, Wertigkeit des Ausgangsmaterials von 100%, Effektive maximale Effizienz in dieser Studie = 98.5% resp. 98% Aufbereitungs- und Umschmelzausbeute mit 100% Wertigkeit, effektive minimale Effizienz mit 93.25% resp. 92% Aufbereitungs- und Umschmelzausbeute und 90% Wertigkeit.

Da die Sammelausbeute wie in 6.2.1 dargelegt von der Masse des Aluminium-Elementes abhängt, sind auch die Ergebnisse von der Masse des Aluminiums im Bauteil abhängig. Abbildung 12 zeigt die die Abhängigkeit der Sammelausbeute der Masse des Aluminium-Elementes pro m^2 (links). Je grösser die Masse, desto grösser die Sammelausbeute. Die meisten der erfassten Elemente sind unter $5 \text{ kg} / m^2$ und haben deshalb eine kleinere Sammelausbeute: Von den 80 beurteilten Elementen sind 20 kleiner als $0.5 \text{ kg} / m^2$ und 33 kleiner als $5 \text{ kg} / m^2$. Die Restlichen 27 Elemente wiegen über $5 \text{ kg} / m^2$ und stellen massenmässig mit 80%_w den weitaus grössten Anteil. Es sind dabei vorwiegend Elemente wie Fenster, Türen oder Bleche aus einem grossen Prozentsatz Aluminium. In einer Gesamtbetrachtung (Abbildung 12, rechts) ist zu sehen, dass für den grössten Teil der Bauteile 80% (Gesamtausbeute inklusive Wertkorrektur) des enthaltenen Aluminiums als Recycling-Aluminiums für die Substitution von Hüttenaluminium angerechnet werden kann.

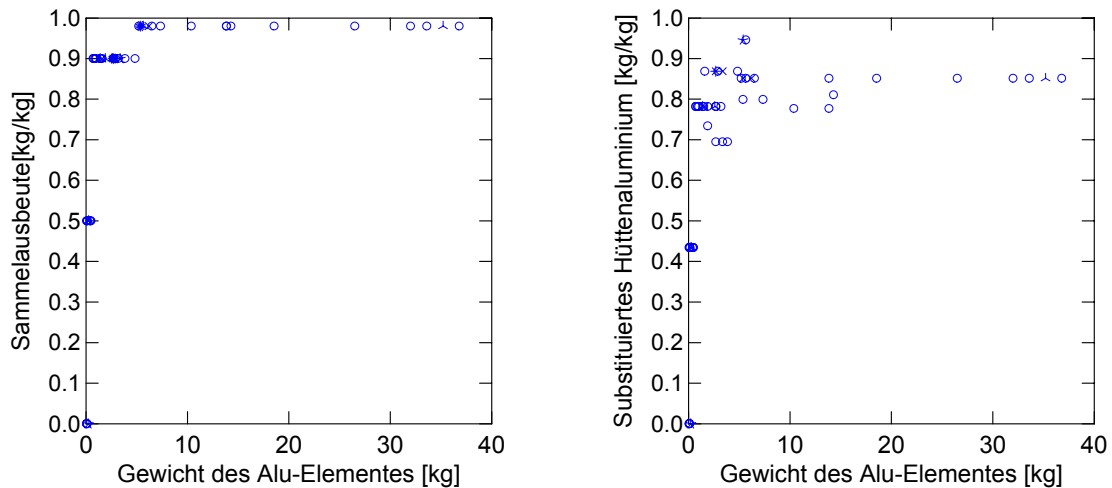


Abbildung 12 Darstellung der Abhängigkeit der Sammelausbeute einzelner Aluminium-Elementen von ihrer Masse (links) und die Abhängigkeit des Anteils durch Rezyklat substituiertes Hütten-Aluminium (Gesamt-Ausbeute inklusive Wertkorrektur) von der Aluminiummasse im Bauteil (rechts).

Der direkte Vergleich mit den in eco-devis publizierten Werten kann aber nur mit Vorbehalten gemacht werden, da die Werte der verglichenen Bauteile mit einem anderen Ansatz errechnet wurden und sich somit auf eine andere Datenlage beziehen. Im Besonderen kann oft keine generelle Aussage darüber gemacht werden, ob ein Aluminiumbauteil mit der Berechnungsmethode der wertkorrigierten Substitution aufgrund der „Grauen Energie“ in eco-devis gekennzeichnet würde, da eine Kennzeichnung von einem Referenzpunkt ausgeht, der sich wiederum auf einen andern Ansatz bezieht.

Als Beispiel dafür soll das in NPK 321 beschriebene Warzenblech dienen. Es hat ein grosses Recycling-Potential wodurch ein grosser Anteil des Inputmaterials substituiert werden kann. Dieser Umstand äussert sich in einem „Grauen Energie“ Wert, der gegenüber dem ursprünglichen in eco-devis publizierten Wert um 71% von $3003 \text{ MJ} / \text{m}^2$ auf $845 \text{ MJ} / \text{m}^2$ reduziert ist. Der direkte Vergleich mit dem Wert für das in eco-devis als „gekennzeichnet“ beurteilte Stahlblech kann jedoch nicht gemacht werden, da sich der „Graue Energie“ Wert des Stahlblechs auf ein anderes Bezugssystem bezieht als derjenige des Alublechs, der mittels wertkorrigierter Substitution ermittelt wurde. Beim Stahlblech wird in Pestalozzi (2003) ein Recycling-Anteil von 0% eingesetzt, und mit einem Wert von $1530 \text{ MJ} / \text{m}^2$ bewertet. Geht man von einem Stahl mit 20% Rezyklat aus, errechnet sich nach Kasser & Pöll (1998) grob ein Wert von $1350 \text{ MJ} / \text{m}^2$. Ein solches mit demselben Rezyklat-Anteil wie das Alu-Warzenblech von 80% erhält einen Wert von $700 \text{ MJ} / \text{m}^2$, und schliesslich mit 100% Rezyklat-Anteil $490 \text{ MJ} / \text{m}^2$. Der Rezyklat-Anteil von 80% entspricht dabei dem für das Alu-Warzenblech ermittelten Anteil substituierten Hütten-Aluminium. Als Ergebnis könnte also gesagt werden, dass bezüglich „Grauer Energie“ das Belagsblech aus Aluminium vergleichbar mit einem Stahlblech ist, wenn nicht sogar besser (bei gleichem Rezyklat-Anteil). Um einen gültigen Vergleich zu machen, muss jedoch die Herstellung und das Recycling von Bauteilen aus Stahl analog zu dieser Studie erhoben werden und die dort gefundenen Werte mit denen aus dieser Studie verglichen werden. Das heisst, das Recycling-Potential von Stahl in Bauteilen muss mit wertkorrigierter Substitution abgebildet werden und die Werte müssen als CED-Klassen aufgeschlüsselt ausgewiesen sein.

Ein weiteres Beispiel soll aufzeigen, dass die ermittelten Werte nicht direkt mit den in eco-devis aufgestellten Grenzwerten für die Kennzeichnung verglichen werden können. Die Pannelle aus Alublech beispielsweise, die in NPK 343 beschrieben sind (611.100), verfügen ebenfalls über ein grosses Recycling-Potential und haben eine kleine Masse verglichen mit anderen Fassadenbekleidungen (geringer Materialinput pro vergleichbare Leistung). In der

Methodik von eco-devis wurde als Kennzeichnungskriterium der Wert für „Graue Energie“ gewählt, der dem Durchschnitt der jeweils verglichenen Leistungen oder Materialien entspricht. Auf dieser Regel aufbauend wurde für Fassadenbekleidungen in NPK 343 ein Grenzwert von 100 MJ / m² für eine Kennzeichnung in der ersten und 250 MJ / m² in der zweiten Stufe gewählt. Während der ursprünglich für das Alublech publizierte Wert von 270 MJ / m² keine Kennzeichnung zur Folge hatte, liegt der in dieser Studie gefundene Wert mit 77 MJ / m² unter dem Grenzwert für die 1. Stufe und müsste – da es auch alle anderen Kriterien erfüllt – dementsprechend gekennzeichnet werden. Dieser Schluss kann jedoch nicht ohne weiteres gemacht werden. Da die Grenzwerte jeweils im Zusammenhang mit den Werten der anderen vergleichbaren Fassadenbekleidungen aufgestellt wurden, beziehen sie sich auf eine andere Berechnung der „Grauen Energie“ als in dieser Studie. Für einen direkten Vergleich müssten deshalb die Grenzwerte im Hinblick auf eine Beurteilung mit wertkorrigierter Substitution neu evaluiert werden.

Tabelle 11 Ergebnisse der Bewertung von Aluminium-Bauteilen aus eco-devis.

Kapitel	Positionen Nummer	Bezeichnung	CED fossil MJ	CED nuklear MJ	CED Wasserkraft MJ	CED Biomasse MJ	CED Solar, Wind, Geoth. MJ	GE Bauteil Herstellung MJ	CED fossil, nuk. & Wasser inkl. GE Bauteil MJ	Wert nach Eco-Devis MJ	Sammel-ausbeute %	Substitution Primärmaterial %	Alu-Masse kg
NPK 321 Montagebau in Stahl													
	541.200 / 542.200	Alu-Warzenblech, warm ausgehärtet, roh (d = 5/7 mm)	586	130	128	5	1	-	845	3003	98%	81%	14.3
NPK 343 Hinterlüftete Fassaden													
	221.000	Alu-Unterkonstruktion mit Traglatten Abstand 30cm (Konsolen, Tragprofile, Traglatten, Therm. Trennelement, Verbindungsmittel, 10 Schrauben)	47	11	11	0	0	15	84	183	86%	74%	0.99
	231.000	Alu- Unterkonstruktion vertikal, Tragprofile L-Form (Konsole, L- Profil, Therm. Trennelement, Verbindungsmittel, 10 Schrauben)	51	12	13	0	0	7	82	170	80%	70%	0.96
	231.000	Alu- Unterkonstruktion vertikal, Tragprofile T-Form (Konsole, T- Profil, Therm. Trennelement, Verbindungsmittel, 10 Schrauben)	81	19	19	1	0	7	126	286	84%	73%	1.64
	611.100	Panele aus Alublech roh	53	11	11	0	0	-	75	274	90%	87%	1.61
	621.100	Kassetten aus Alublech roh (Abwicklungs-Faktor 1.5)	158	34	32	1	0	-	224	823	90%	87%	4.84
	622.000	Dreischichtplatten aus beidseitig mit Alu belegtem Kunststoffkern (Aluschicht, Kunststoffkern, Kleber)	181	44	45	1	0	34	303	605	90%	69%	3.36
	623.000	Dreischichtplatten als Stülpedeckung aus beidseitig mit Alu belegtem Kunststoffkern (Aluschicht, Kunststoffkern, Kleber)	208	50	51	1	0	36	344	689	90%	69%	3.85
	631.000	Platten aus Alu profiliert, roh	95	20	19	1	0	-	134	494	90%	87%	2.91

Tabelle 11 Ergebnisse der Bewertung (Fortsetzung)

Kapitel	Positionen Nummer	Bezeichnung	CED fossil	CED nuklear	CED Wasserkraft	CED Biomasse	CED Solar, Wind, Geoth.	GE Bauteil Herstellung	CED fossil, nuk. & Wasser inkl. GE Bauteil	Wert nach Eco-Devis	Sammel-ausbeute %	Substitution Primärmaterial %	Alu-Masse kg
			MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	%	%
	932.110	Fensterbänke aus Alublech geklebt (Fensterbank, Kleber)	231	52	51	2	1	352	685	1266	98%	80%	5.38
	932.120	Fensterbänke aus Alublech mit Metallbügeln befestigt (Fensterbank, Metallbügel)	234	52	51	2	1	-	337	996	94%	82%	5.86
	933.200	Mauerkronenabdeckungen aus Alublech, roh	195	42	40	2	0	-	277	914	98%	85%	5.38
NPK 342 Verputzte Aussenwärmedämmungen													
	171.000	Fensterbänke aus Alu, mit Hohlraumdämmung, Alu anodisiert	315	70	69	2	1	18	473	1267	98%	80%	7.35
	630.130	Sockelabschlüsse spritzwasserfest, Aluminium	195	42	40	2	0	-	277	914	98%	85%	5.38
NPK 347 Rollläden, Raffstoren, Markisen und Fensterläden													
	211.000 - 214.000	Alurolläden, Alurolläden, Hand/Motor, regulierbar/fest (bxh = 1.6x2.0, Behang Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Führungsschiene Aluprofil, Welle Stahlrohr)	295	64	62	2	1	815	1236	2453	96%	84%	7.8
	241.000 - 242.000	Alurolläden mit integrierter Abdeckung, Alurolläden, Hand/Motor, regulierbar/fest (bxh = 1.6x2.0, Behang Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Führungsschiene Aluprofil, Welle Stahlrohr)	295	64	62	2	1	815	1236	2453	96%	84%	7.8
	311.000 - 316.000	Aluraffstoren Verbund (bxh = 1.6x2.0, Behang Alulamellen, Alu einbrennlackiert, Führungsschiene Aluprofil, Oberschiene Stahlrohr)	184	42	42	1	0	798	1066	1680	90%	78%	4.2
	321.000 - 322.000	Ganzmetall-Raffstoren (bxh = 1.6x2.0, Behang Alulamellen, Alu einbrennlackiert, Führungsschiene Aluprofil, Oberschiene Stahlrohr)	425	90	87	4	1	798	1400	3255	98%	85%	11.7
	661.000 - 663.000	Aludrehläden mit beweglichen Lamellen (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Kloben, Rückhalter, Bänder Stahl)	1336	285	273	11	3	771	2665	8499	98%	85%	36.8
	664.000	Aludrehläden mit festen Lamellen (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Kloben, Rückhalter, Bänder Stahl)	1278	272	261	11	3	771	2582	8163	98%	85%	35.2
	665.000	Aludrehläden mit Füllung (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Kloben, Rückhalter, Bänder Stahl)	1162	248	237	10	3	771	2418	7491	98%	85%	32.0
	666.000	Aludrehläden mit Füllung und Lamellen (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Kloben, Rückhalter, Bänder Stahl)	1220	260	249	10	3	771	2500	7827	98%	85%	33.6
	667.000	Aluschiebeläden mit festen Lamellen (bxh = 1.6x2.0, Laden Aluhohlprofil, Alu einbrennlackiert, Lauf-/Führungsschiene Aluprofil)	1309	280	270	11	3	743	2602	8216	97%	85%	35.6

Tabelle 11 Ergebnisse der Bewertung (Fortsetzung)

Kapitel	Positionen Nummer	Bezeichnung	CED fossil MJ	CED nuklear MJ	CED Wasserkraft MJ	CED Biomasse MJ	CED Solar, Wind, Geoth. MJ	GE Bauteil Herstellung MJ	CED fossil, nuk. & Wasser inkl. GE Bauteil MJ	Wert nach Eco-Devis MJ	Sammel-ausbeute %	Substitution Primärmaterial %	Alu-Masse kg
NPK 351 Spenglerarbeiten													
	045.110	Alublech blank, 1 mm	118	27	27	1	0	-	172	461	90%	78%	2.7
NPK 352 Bekleidungen und Deckungen aus Dünnblech													
	200.510	Alublech blank, 0.7 mm	83	19	19	1	0	-	120	311	90%	78%	1.9
	200.520	Alublech PVDF beschichtet, 0.7 mm	94	22	22	1	0	39	178	350	90%	73%	1.9
NPK 361 Steildach, Unterkonstruktionen													
	531.111	Kraftpapier faserbewehrt, einseitig mit Alu belegt (20 µm) mit Dichtungsband luftdicht, 8-10 cm überlappt (0.38 mm, s-D 650 m)	9	2	3	0	0	6	20	20	0%	0%	0.1
	531.121	Kraftpapier faserbewehrt, beidseitig mit Alu belegt (je 20 µm), mit Dichtungsband luftdicht, 8-10 cm überlappt (0.40 mm, s-D 4500 m)	16	5	5	0	0	6	32	33	0%	0%	0.1
	532.211	Dampfsperre aus Bitumen-Dichtungsbahnen Alu 80, verschweissen, 10 cm überlappt, (2 mm, s-D 150 - >2000 m)	8	2	2	0	0	127	139	140	0%	0%	0.1
NPK 362 Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen													
	221.211	Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen Alu80	27	8	8	0	0	79	123	125	0%	0%	0.2
	221.221	Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen E Alu80	27	8	8	0	0	79	123	125	0%	0%	0.2
	621.000	Abschlüsse zu Abdichtungen aus bituminösen oder Kunststoff-Dichtungsbahnen, Flachschielen Alu	16	4	5	0	0	-	25	42	50%	43%	0.2
	622.000 / 623.000	Abschlüsse zu Abdichtungen aus bituminösen oder Kunststoff-Dichtungsbahnen, Blechstreifen Alu	118	27	27	1	0	-	171	565	90%	78%	2.7
NPK 363 Steildach, Deckungen													
	421.000	Tonziegel instandsetzen, Einfachdach Aluschindeln (Dicke 0.5 mm, 24 Schindeln / m ² ; 30x5 cm)	39	10	11	0	0	-	60	102	50%	43%	0.5
	630.000	Profilierte Platten liefern und verlegen (Alu blank, Dicke 0.8 mm, Profilhöhe 51-60 mm, Überdeckung 25)	137	25	21	1	0	-	183	1186	98%	95%	5.6
	630.000	Profilierte Platten liefern und verlegen (Alu einbrennlackiert, Dicke 0.8 mm, Profilhöhe 51-60 mm, Überdeckung 25)	205	44	42	2	0	78	368	1264	98%	85%	5.6
NPK 364 Flachdach mit Dichtungsbahnen													
	221.211	Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen Alu80	27	8	8	0	0	78	121	123	0%	0%	0.2
	221.221	Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen E Alu80	27	8	8	0	0	79	123	125	0%	0%	0.2

Tabelle 11 Ergebnisse der Bewertung (Fortsetzung)

Kapitel	Positionen Nummer	Bezeichnung	CED fossil MJ	CED nuklear MJ	CED Wasserkraft MJ	CED Biomasse MJ	CED Solar, Wind, Geoth. MJ	GE Bauteil Herstellung MJ	CED fossil, nuk. & Wasser inkl. GE Bauteil MJ	Wert nach Eco- Devis MJ	Sammel-ausbeute %	Substitution Primärmaterial %	Alu-Masse kg
	613.313	Abweisbleche, Alublech (1.0 mm)	88	19	18	1	0	-	124	565	90%	87%	2.7
	621.130	Dachrandabschluss, Alublech (1.0 mm)	88	19	18	1	0	-	124	565	90%	87%	2.7
	633.130	Stirnblenden, Alublech (1.0 mm)	88	19	18	1	0	-	124	565	90%	87%	2.7
	641.113	Abschlusschienen, flach, Alu (3x25 mm)	16	4	5	0	0	-	25	42	50%	43%	0.2
	641.122	Abschlusschienen, hohlfach, Alu (3x25 mm)	16	4	5	0	0	-	25	42	50%	43%	0.2
	642.130	Aufbordungsabschluss, Alublech (1.0 mm)	88	19	18	1	0	-	124	565	90%	87%	2.7
	644.112	Schwellenausbildung, Alu (2x30 mm)	13	3	4	0	0	-	20	34	50%	43%	0.2
	644.223	Abdeckblech, Alublech (1.0 mm)	88	19	18	1	0	-	124	565	90%	87%	2.7
	651.130	Schutzblech, Alublech (1.0 mm)	88	19	18	1	0	-	124	565	90%	87%	2.7
NPK 371 Fenster													
	000.200 05	Aluminiumfenster, zweizargig, wärmegeklämmt, mit PA Stegverbund	503	107	103	4	1	2649	3362	5002	98%	85%	13.8
NPK 427 Sanitäranlagen Entsorgung													
	710.120	Abgasleitungen und Formstücke aus Aluminium (500 µm)	61	14	14	0	0	-	89	231	90%	78%	1.4
	721.200	Lüftungsrohre aus Aluminium (500 µm)	61	14	14	0	0	-	89	231	90%	78%	1.4
NPK 612 Allgemeine Metallbauarbeiten													
	311.120	Flachdächer mit Konsolen, Eindeckung Profilblech Alu h 40 bis 45 mm	110	23	22	1	0	-	156	571	90%	87%	3.4
	321.120	Pultdächer mit Konsolen, Eindeckung Profilblech Alu h 40 bis 45 mm	110	23	22	1	0	-	156	571	90%	87%	3.4
	331.000	Satteldächer ohne Stützen, Eindeckung Profilblech Alu h 40 bis 45 mm	110	23	22	1	0	-	156	571	90%	87%	3.4
	521.100	Geländer mit Füllungen, Aluminium-Lochblech (Rundloch 4mm, anodisiert)	131	24	20	1	0	21	196	936	98%	95%	5.4
	621.110	Jochelemente mit Füllungen und Untergurt, Aluminium-Lochblech (Rundloch 4mm, anodisiert)	131	24	20	1	0	21	196	936	98%	96%	5.3
	622.110	Rahmenelemente mit Füllung und Pfosten, Aluminium-Lochblech (Rundloch 4mm, anodisiert)	131	24	20	1	0	21	196	936	98%	95%	5.4
	623.110	Rahmenelemente mit Füllung und Laschen, Aluminium-Lochblech (Rundloch 4mm, anodisiert)	131	24	20	1	0	21	196	936	98%	95%	5.4
NPK 622 Türen													
	211.200	Aussentüren aus Holz oder Holzwerkstoffen, Klimaklasse III, U-Wert Türkonstruktion 1.5 W/m ² K (Rahmen und Türblatt, Mittelwert)	145	35	36	1	0	1649	1865	2106	90%	69%	2.7
	411.100	Rahmentüren aus Alu, einflüglig, wärmegeklämmt (Klimaklasse III, U-Wert Rahmen 2.1 W/m ² K), verglast	1076	231	223	9	3	1149	2678	6340	97%	85%	29.1
	411.100	Rahmentüren aus Alu, einflüglig, wärmegeklämmt (Klimaklasse III, U-Wert Rahmen 2.1 W/m ² K), mit Füllung	1589	348	339	13	4	663	2939	7876	98%	83%	40.4
	511.100	Rahmentüren aus Alu, einflüglig, ungedämmt, verglast	787	169	164	6	2	750	1870	4523	97%	84%	21.2
	511.100	Rahmentüren aus Alu, einflüglig, ungedämmt, mit Füllung	1144	251	244	9	3	122	1760	5331	98%	82%	28.9

Tabelle 11 Ergebnisse der Bewertung (Fortsetzung)

Kapitel	Positionen Nummer	Bezeichnung	CED fossil MJ	CED nuklear MJ	CED Wasserkraft MJ	CED Biomasse MJ	CED Solar, Wind, Geoth. MJ	GE Bauteil Herstellung MJ	CED fossil, nuk. & Wasser inkl. GE Bauteil MJ	Wert nach Eco-Devis MJ	Sammel-ausbeute %	Substitution Primärmaterial %	Alu-Masse kg
NPK 643 Gipserarbeiten Trockenbau													
	652.210	Dampfsperren aus Alufolien, beidseitig mit Kraftpapier verstärkt								30			
NPK 661 Unterlagsböden													
	221.111	Horizontale Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumenbahn V60, Bitumenbahn ALU80, Verschweißen/Verkleben, Überlappung 100 mm)								231			
	444.400	Wärmedämmschichten EPS mit Alufolie belegt und Ankergewebe auf Rollen, einlagig (Dicke 20-40 mm, W.L. Alu = 0.037 W/mK, Beurteilung bei einem U-Wert von 0.3 W/m ² K)								237			
	444.500	Wärmedämmschichten EPS-Platten unbelegt und EPS mit Alufolie belegt auf Rollen (zweilagig, Dicke 40-80 mm, W.L. = 0.037 W/mK)								237			
	448.130	Wärmedämmschichten PUR-Platten beidseitig alubelegt (einlagig, Dicke 20-120 mm, W.L. = 0.024 W/mK)								286			
NPK 662 Fugenlose Bodenbeläge													
	163.000	Wärmedämmungen PUR-Platte alubelegt (W.L. = 0.024 W/mK, Beurteilung bei einem U-Wert von 0.3 W/m ² K)								278			
	441.220	Feldbegrenzungsprofile aus Alu, Höhe 5-12 mm	4	1	1	0	0	-	7	11	50%	43%	0.1
NPK 663 Beläge in Linoleum, Kunststoffen, Textilien und dgl.													
	611.000	Sockelleisten aus Aluminium (0.2x5 cm)	22	6	6	0	0	-	34	56	50%	43%	0.3
	651.000	Abschlussprofile aus Aluminium (0.2x5 cm)	22	6	6	0	0	-	34	56	50%	43%	0.3
NPK 665 Doppelböden													
	310.000	Unterkonstruktionen Stützen Alu (Beurteilung bei gleichem Materialvolumen, Stützhöhe 25 cm)	31	7	7	0	0	-	45	147	90%	78%	0.7
	320.000	Unterkonstruktionen Stützen und Rasterstäbe aus Aluminium (Beurteilung bei gleichem Materialvolumen, Stützhöhe 25 cm)	66	15	15	0	0	-	96	315	90%	78%	1.5
	411.101	Spanplatte, schwerbrennbar, einseitig alubeschichtet (Bodenbelag verklebt)								455			
	412.101	Spanplatte, schwerbrennbar, beidseitig alubeschichtet (Bodenbelag lose)								491			
	412.102	Spanplatte, schwerbrennbar, stahlblech-alubeschichtet (Bodenbelag lose)								577			
	412.202	Spanplatte, schwerbrennbar, dünn stahlblech-alubeschichtet (Bodenbelag lose)								472			
	421.101	Gipsfaserplatte, nichtbrennbar, einseitig alubeschichtet/hydrophobiert (Bodenbelag verklebt)								401			
	422.101	Gipsfaserplatte, nichtbrennbar, beidseitig alubeschichtet/hydrophobiert (Bodenbelag lose)								437			
	422.102	Gipsfaserplatte, nichtbrennbar, stahlblech-alubeschichtet/hydrophobiert (Bodenbelag lose)								526			

Keine Stoffliche Wiederverwertung Bauteile wurden nicht in die Berechnung einbezogen

Keine Stoffliche Wiederverwertung Bauteile wurden nicht in die Berechnung einbezogen

8 Diskussion der Resultate

Im Folgenden wird die Bedeutung der Resultate diskutiert. In einem ersten Abschnitt wird auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den ursprünglichen Werten eingegangen. In einem Zweiten Abschnitt werden die Ergebnisse vor dem Hintergrund des *worst-case* Szenarios betrachtet: welchen Einfluss hätte ein in 6.3 beschriebenes Szenario auf den Ersatz von Hütten-Aluminium, der bei der Methode der wertkorrigierten Substitution geltend gemacht wird.

8.1 Vergleichbarkeit der Indikatoren CED und Graue Energie

Die Ergebnisse zeigen auf, dass für Aluminium-Teile ein substantieller Teil der kumulierten Primärenergie aus Wasserkraft stammt. Da die Aluminium-Industrie konstant und grosse Mengen an Elektrizität für die Produktion benötigen, sind viele Produktionsstätten in der Nähe von Wasserkraftanlagen gebaut, von denen sie die Bandenergie beziehen. Dieser Umstand ist im ecoinvent - Datensatz für die Produktion von Hütten-Aluminium abgebildet und äussert sich in einem entsprechend grossen Anteil von 28% Primärenergie aus Wasserkraft. Der Einsatz des *site specific* Elektrizitätsmixes ist im Falle der Aluminium-Hütten auch für den *consequential* Ansatz gerechtfertigt, der von einer marginalen Betrachtung ausgeht (Nordheim & Weidema (1999)). Bei den Ergebnissen zeigt sich ein klarer Zusammenhang zwischen dem Anteil von Wasserkraft im gesamten Primärenergiebedarf und der Menge von Hütten-Aluminium, die nicht substituiert werden kann (Abbildung 13). Der Anteil Wasserkraft schwankt zwischen 18% bei einem grossen Anteil an Hütten-Aluminium und 11% bei geringem Anteil Hütten-Aluminium, resp. einem grossen Anteil an Aluminium-Recycling, dessen Prozesse (Aufbereiten, Umschmelzen, etc.) geringere Anteile an Wasserkraft aufweisen. Der Anteil an Primärenergie aus Biomasse (CEN_b) und Umwelt (CED_r) ist hingegen sehr klein (maximal 1 %, s. Abbildung 13). Somit entspricht für die in der Studie betrachteten Bauteile aus Aluminium der gesamte kumulierte Primärenergiebedarf in seiner Grösse praktisch der Grauen Energie aus $CED_f + CED_n + CED_w$.

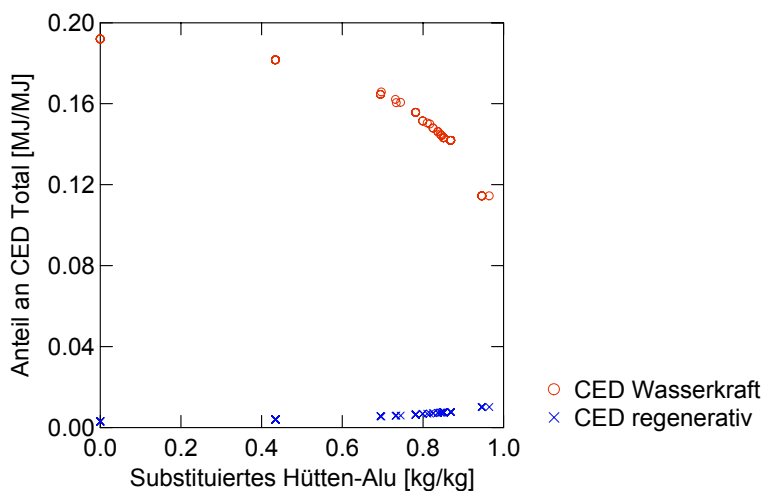


Abbildung 13 Zusammenhang von Substitutions-Rate und CED-Zusammensetzung.

Um die Frage zu klären, ob die Summe der nichterneuerbaren CED-Klassen (fossil und nuklear) der betrachteten Bauteilen aus Aluminium mit den in eco-devis publizierten „Grauen Energie“ Werten für andere Baumaterialien verglichen werden kann, wird der CED einiger ausgewählter nicht-Aluminium Produkte genauer analysiert.

Als Beispiele dienen Bauteile aus hochlegiertem Stahl (ein Geländerstück aus Stahlrohr), aus niedrig legiertem Stahl (Armierungseisen), aus Backstein, aus PVC (Rohrstück) sowie aus Holz (Balken, Spanplatte). Damit der CED nach Klassen aufgeschlüsselt werden kann, wurden die Teile mit Daten aus ecoinvent v1.1 (ecoinvent Centre (2004)) modelliert. Werte beinhalten Herstellungsphase, Nutzungsphase, und *end-of-life* Option (Tabelle 12).

Tabelle 12 Berechnungsgrundlagen und Ergebnisse von Baumaterialien. Die Daten stammen aus ecoinvent v1.1 (ecoinvent Centre (2004)). Für das Chromstahl-Geländer wird als *end-of-life* Option eine stoffliche Wiederverwertung angenommen. Für den Holzbalken wird eine Feuchte von 20%_w und für die Spanplatte eine Dichte von 600 kg / m³.

Bauteil	Datensatz aus ecoinvent	Wert	Einheit	CED _f	CED _n	CED _b	CED _r	CED _h
Backstein		1	kg	2.73	0.24	0.23	0.006	0.04
Herstellung	<i>brick, at plant</i>	1	kg	2.43	0.23	0.23	0.006	0.04
Entsorgung	<i>disposal, building, brick, to final disposal</i>	1	kg	0.30	0.012	0.00	0.00	0.00
Chromstahlgeländer		1	m	323	98.6	2.54	2.52	37.5
Herstellung	<i>chromium steel 18/8, at plant</i>	5	kg	308	93.4	2.43	2.38	36.6
Verarbeitung	<i>drawing of pipes, steel</i>	5	kg	13.8	4.94	0.10	0.12	0.80
Verarbeitung	<i>welding, gas, steel</i>	0.5	m	0.68	0.28	0.006	0.007	0.05
Entsorgung	<i>disposal, building, reinforcement steel, to final disposal</i>	Stoffliche Wiederverwertung						
PVC Rohr		1	m	52.9	28.7	1.08	0.23	2.31
Herstellung	<i>polyvinylchloride, bulk polymerised, at plant</i>	1	kg	40.5	19.9	0.391	0.000	1.00
Verarbeitung	<i>extrusion, plastic pipes</i>	1	kg	12.4	8.86	0.69	0.23	1.32
Entsorgung	<i>disposal, building, polyvinylchloride products, to final disposal</i>	1	kg	7.04	4.52	0.15	0.11	0.72
Armierungs-Stahl				16.7	4.62	0.11	0.12	0.75
Herstellung	<i>reinforcing steel, at plant</i>	1	kg	15.6	4.58	0.11	0.12	0.75
Entsorgung	<i>disposal, building, reinforcement steel, to final disposal</i>	1	kg	1.09	0.031	0.001	0.001	0.006
Holzbalken		1	kg	5.73	1.96	22.5	0.046	0.33
Herstellung	<i>glued laminated timber, indoor use, at plant</i>	1.85	l	5.55	1.95	22.5	0.046	0.33
Entsorgung	<i>disposal, building, waste wood, untreated, to final disposal</i>	1	kg	0.19	0.016	0.000	0.000	0.004
Spanplatte		1	kg	9.24	1.35	23.9	0.033	0.23
Herstellung	<i>particle board, indoor use, at plant</i>	1.67	l	8.98	1.32	23.9	0.032	0.23
Entsorgung	<i>disposal, building, fibre board, to final disposal</i>	1	kg	0.26	0.035	0.001	0.001	0.007

Die daraus resultierenden Ergebnisse zeigen starke Variationen bezüglich der CED-Zusammensetzung (Abbildung 14). Neben den Aluminium-Bauteilen weist auch das Chromstahl-Geländer einen hohen Anteil von Wasserkraft auf. Bezüglich des Anteils CED_b (Biomasse) unterscheiden sich die Werte stark. Im Falle des Backsteins ist der höhere Anteil CED_b auf den Einsatz von Holzspänen beim Brennen zurückzuführen. Mit dem Beimischen von Spänen wird die notwendige Porosität erreicht. Die im Holz gespeicherte Primärenergie entweicht dabei ungenutzt in den Abgasen (Kellenberger et al. (2004)). Ähnliches gilt dabei für die beiden Holzprodukte Spanplatte und Holzbalken, bei denen der Anteil von Primärenergie aus Biomasse über 70% beträgt.

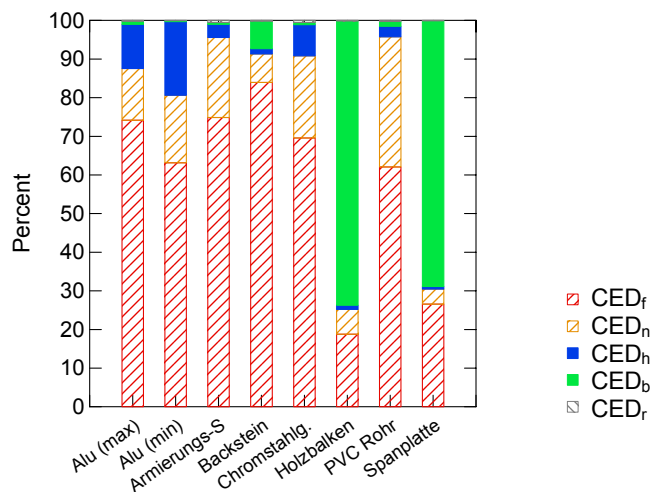


Abbildung 14 Kumulierter Primärenergiebedarf einer Auswahl verschiedener Bauteile. Alu (min) entspricht einem untersuchten Aluminiumbauteil mit minimaler Substitution von Hütten-Aluminium. Demgegenüber stehen Armierungs-Stahl, Backstein, Chromstahl-Geländer, PVC Rohr, Holzbalken und Spanplatte. Werte enthalten Herstellung, Nutzung und Entsorgung.

Eine Bewertung, die lediglich auf einer einzelnen CED-Klasse oder wie die „Graue Energie“ auf aggregierten CED-Werten aufsetzt, erfasst nicht das ganze Bild. Ein Vergleich des nicht-erneuerbaren CED von Aluminium mit der „grauen Energie“ anderer Materialien würde zu einer falschen Einschätzung der verglichenen Produkte und letztlich zu Fehlentscheidungen führen.

8.2 Einfluss der Marktpreis-Szenarien auf die Ergebnisse.

Wie in Kapitel 6 dargelegt wurde, ist die Bewertung mit der Methode der wertkorrigierten Substitution in hohem Masse vom Marktpreis der Rohstoffe Hütten- und Recycling-Aluminium abhängig. Zum einen beeinflusst der Wert des Recycling-Aluminiums die Sammelausbeute, zum anderen fließt der Quotient der Preise von Hütten- und Recycling-Aluminium direkt in die Wertkorrektur ein. Ein Wertzerfall von Aluminium-Schrott wird deshalb die Beurteilung von Aluminium-Bauteilen beeinflussen. Im Weiteren werden die Auswirkungen des in 6.3 definierten Szenarios eines Wertzerfalls von Recycling-Alu auf 50% des Preises von Hütten-Aluminium diskutiert.

In Abbildung 15 sind Sammelausbeute und anrechenbare Substitution (Recycling-Potential) in Abhängigkeit von der Aluminium Masse des Bauteil-Elementes dargestellt. Ein beträchtlicher Teil der Aluminium-Elemente wird mit einer Sammelausbeute von unter 50% belegt, die größeren Teile werden auch nach dem Wertzerfall rückgebaut; sie stellen nach wie vor einen Wert dar.

Betrachtet man in Abbildung 16 die relative Veränderung der Größen Substitution und Sammelausbeute von den Ausgangsgrößen („Studie“) mit dem *worst-case* Szenario, so zeigt sich, dass auch für grosse Aluminium-Teile der Wertzerfall an sich bedeutende Auswirkungen auf das Recycling-Potential hat. Teile, die jedoch sortenrein in guter Qualität gesammelt werden können sind von den Effekten kaum betroffen. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die effektiven Recyclingquoten im Baubereich auch im *worst-case* Szenario höher sind, als der im *cut-off* Ansatz eingesetzten Europäischen Produktionsdurchschnitt, der einen Rezyklat-Anteil von 32% aufweist (Althaus et al. (2003)).

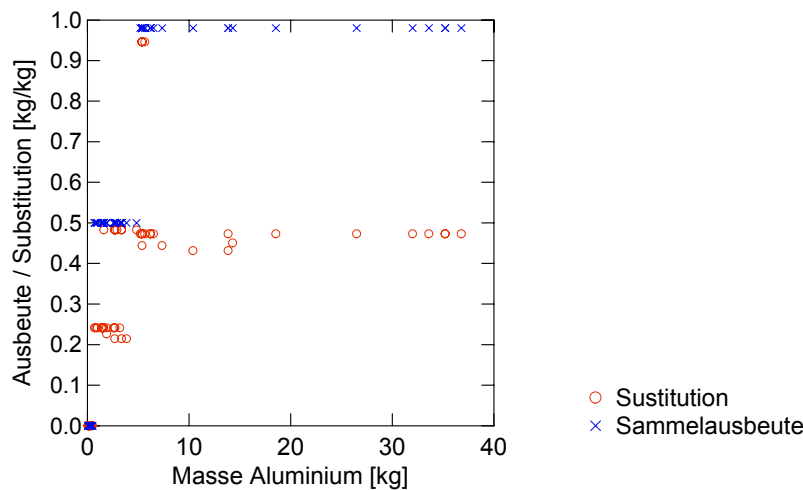


Abbildung 15 Substitutionsrate und Sammelausbeute nach einem Wertzerfall gemäss betrachtetem Szenario.

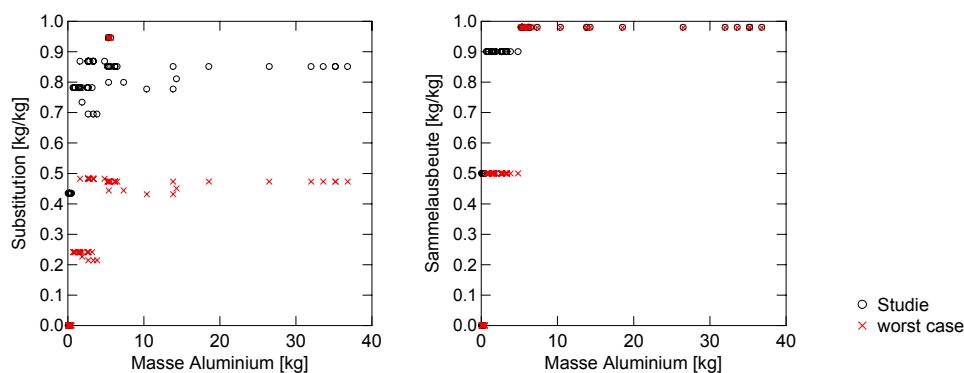


Abbildung 16 Gegenüberstellung von anrechenbarer Substitution und Sammelausbeute vor und nach dem „Wertzerfall“.

8.3 Beurteilung der Ergebnisse.

In dieser Studie wurde der Einsatz von Aluminium in Bauteilen mit der Methode der wertkorrigierten Substitution abgebildet. Dazu war eine Abbildung des Recycling-Potentials auf der Ebene der individuellen Bauteile notwendig. Die Ermittlung des Recycling-Potentials ist von der Unsicherheit dominiert, die bei der Schätzung von Sammelausbeuten einzelner Bauteile entsteht. Bei der Bestimmung der Wertkorrektur, sowie der Umschmelzausbeute wurde von teilweise konservativen Annahmen ausgegangen. Die Validität der ermittelten Primärenergiewerte wird durch diese Unsicherheiten beeinträchtigt. Die Methodik zur Bestimmung individueller Sammelausbeuten sollte deshalb verfeinert und in der Praxis überprüft werden. Eventuell sind Arbeitszeit-Kosten-Überlegungen wie sie in der Automobilbranche zur Anwendung gelangen einzubeziehen. Das in dieser Studie vorgeschlagene Modell lässt sich aber einfach hinsichtlich neuer Ergebnisse verfeinern und erweitern. Insgesamt ergibt sich jedoch ein Resultat, das sich mit dem aktuellen Stand der Forschung deckt.

In einer Sensitivitäts-Betrachtung wurden die Berechnungen mit einem *worst-case* Szenario durchgeführt, bei dem von einem Preiserfall von Recycling-Aluminium gegenüber von Hüttenaluminium ausgegangen wurde. Das in diesem Szenario ermittelte Recycling-Potential ist vor allem bedingt durch die akzentuierte Wertkorrektur auf rund 40% reduziert. Dies gilt je-

doch nicht für Bauteile, die sortenrein und in grossen Mengen als Knetlegierungen gesammelt werden können. Das Recycling-Potential bei der wertkorrigierten Substitution ist auch im *worst-case* Szenario grösser, als der im *cut-off* Ansatz eingesetzte Rezyklat-Anteil.

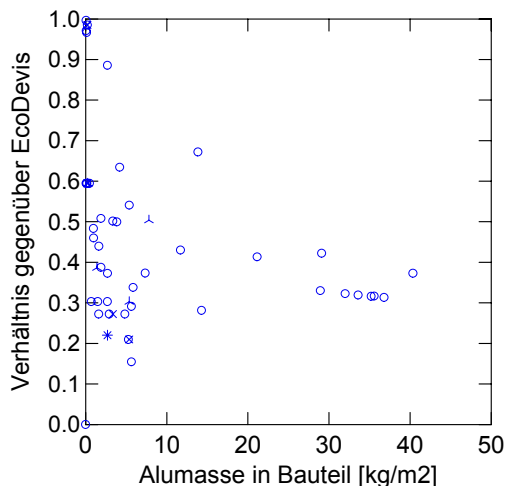


Abbildung 17 Überblick über die Reduktion gegenüber eco-devis in Abhängigkeit der Masse des Aluminium-Elements.

Die Analyse der errechneten Primärenergiewerte und der in eco-devis verwendeten „Grauen Energie“ ergeben, dass Resultate aus der Summe aus fossiler und nuklearer Primärenergie, sowie Wasserkraft mit den mit eco-devis publizierten Werten verglichen werden können. Insgesamt wurden deutlich geringere Werte ermittelt als ursprünglich in eco-devis publiziert (Abbildung 17). Diese Tendenz deckt sich mit dem Recycling-Potential einzelner Bauteile, das insbesondere gross ist bei Bauteilen mit grosser Alu-Masse, mengenmässig grossem Einsatz und hoher Legierungsqualität und 80% erreichen kann.

Der direkte Vergleich mit anderen als in dieser Studie betrachteten Bauteilen kann aber nicht ohne weiteres gemacht werden, da diese auf unterschiedlichen Betrachtungsrahmen basieren. Da das in eco-devis verwendete Kennzeichnungskriterium für „Graue Energie“ sehr situativ motiviert ist, ist dieses auch nur für den ursprünglichen in eco-devis gewählten Betrachtungsrahmen gültig. Die in dieser Studie ermittelten Werte können deshalb nur mit Einschränkungen auf die ursprünglichen Kennzeichnungskriterien bezogen werden.

Die „Graue Energie“ scheint als Umweltindikator im Baubereich ungeeignet, da die sehr unterschiedlichen Baustoffe entsprechend ungleich bewertet werden. Dies liegt einerseits am einseitigen Fokus des Indikators auf fossile und nukleare Primärenergie und Wasserkraft und andererseits auf der methodischen Blindheit des Indikators für wichtige Schadensklassen wie Toxizität, Ozonabbau und Treibhauseffekt.

Um Bauteil-Bewertung in eco-devis mittels Primärenergie methodisch zu verbessern, sollte der Primärenergiebedarf der betrachteten Teile in seine Anteile aufgeschlüsselt werden und die Berechnung auf harmonisierten Inventardaten basieren. Die Autoren der Studie schlagen für Bauteile aus rezyklierbaren Materialien vor, die Recyclingprozesse mit wertkorrigierten Substitution abzubilden. So wird ein harmonisierter Betrachtungsrahmen geschaffen, der bezüglich der Schliessung von Wertstoff-Kreisläufen zielführende Entscheide bei der Baustoff-Wahl zulässt.

9 Literaturverzeichnis

- Althaus H.-J., Blaser S., Classen M. and Jungbluth N. (2003) Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent 2000 No. 10. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.ch.
- Boin U. and Houwelingen J. v. (2004) Collection rates of aluminium products in buildings. In: *Aluminium for Future Generations (in press)*. TU Delft and European Aluminium Association, Brussels.
- Doka G. (2003) Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Final report ecoinvent 2000 No. 13. EMPA St. Gallen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.ch.
- EAA (2000) Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry. European Aluminium Association (EAA), Brussels.
- ecoinvent Centre (2004) ecoinvent data v1.1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.ch.
- Ekvall T. and Weidema B. P. (2004) System Boundaries and Input Data in Consequential Life Cycle Inventory Analysis. In: *International Journal for Life Cycle Assessment*, **9**(3), pp. 161-171.
- Frischknecht R., Heijungs R. and Hofstetter P. (1998) Einstein's Lesson for Energy Accounting in LCA. In: *International Journal for Life Cycle Assessment*, **3**(5), pp. 266-272.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Hellweg S., Hirschier R., Humbert S., Margni M., Nemecek T. and Spielmann M. (2003) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent 2000 No. 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.ch.
- Gerke M., Meier-Kortwig J., Rombach G., Teschers M., Wolf S. and Zapp P. (1999) Analyse der Recyclingaktivitäten bei Aluminiumverpackungen. In: *Entsorgungs-Praxis mit Abfallwirtschafts- Journal*, **Nr. 12**, pp. 21-26.
- ISO/EN14040 (2000) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2000). CEN European Bureau for Standardisation, Brussels.
- ISO/EN14041 (1998) Environmental management -- Life cycle assessment -- Goal and scope definition and inventory analysis (ISO 14041:1998). CEN European Bureau for Standardisation, Brussels.
- ISO/EN14042 (2000) Environmental management -- Life cycle assessment -- Life cycle impact assessment (ISO 14042:2000). CEN European Bureau for Standardisation, Brussels.
- ISO/TR14047 (2003) Environmental management -- Life cycle impact assessment -- Examples of application of ISO 14042 (ISO 14047:2003). CEN European Bureau for Standardisation, Brussels.
- Kasser U. and Pöll M. (1995) Graue Energie von Baustoffen. Büro für Umweltchemie, Zürich.
- Kasser U. and Pöll M. (1998) Graue Energie von Baustoffen; Daten zu Baustoffen, Bauchemikalien, Verarbeitungs- und Transportprozessen mit Erläuterungen und Empfehlungen für die Baupraxis. 2. vollständig neu überarbeitete Aufl. Edition. Büro für Umweltchemie, Zürich.
- Kasser U., Pöll M., Graffe K., Rentsch C. and Egli N. (1999) Oekologische Bewertung mit Hilfe der Grauen Energie Analysieren, Bewerten, Entwerfen, Ueberprüfen und Vereinfachen von Oekobilanzen. Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft Dokumentation, Bern.
- Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N. and Künniger T. (2004) Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent 2000 No. 7. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.ch.
- Nordheim E. and Weidema B. P. (1999) Letters to the Editor: Comment and Reply to "Weidema B. P., Frees N. and Nielsen A.-M. (1999) Marginal Production Technologies for Life Cycle Inventories. In: *International Journal for Life Cycle Assessment*, **4**(1), pp. 48-56." In: *International Journal for Life Cycle Assessment*, **4**(6), pp. 308-310.

- Pestalozzi C. (2003) Schlussbericht zu NPK 321 Montagebau in Stahl - Informationen zur ökologischen Optimierung der Leistungsbeschreibung. Pestalozzi & Stäheli, Basel.
- Pestalozzi C. (2004) Berechnungsgrundlagen für die Bauteil-Bewertung in EcoDevis, Excel-Datei, unveröffentlicht.
- Quinkertz R. (2002) Optimierung der Energienutzung bei der Aluminiumherstellung. Dissertation. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen.
- Richter K., Künniger T. and Brunner K. (1996) Ökologische Bewertung von Fensterkonstruktionen verschiedener Rahmenmaterialien (ohne Verglasung). EMPA-SZFF-Forschungsbericht, Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau (SZFF), Dietikon.
- Rombach G. (2002) Future Availability Of Aluminium Scrap. *In proceedings from: Light Metals 2002*, Seattle, 17 - 22 Februar 2002.
- Rubli S. (2004) Schlussbericht Güterflussanalyse der Bauabfallentsorgung des VZ Werd. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Zürich.
- Spreng D. T. and Doka G. (1995) Graue Energie Energiebilanzen von Energiesystemen. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich etc., Zürich as pdf-File under: Ueberarb. und aktualisierte dt. Ausg. von: Net-energy analysis. New York, 1988.
- VDI (1998) Kumulierter Energieaufwand - Beispiele. In: *VDI-Richtlinie 4600 Blatt 1*. VDI-Gesellschaft Energietechnik.
- Vogel M., Pestalozzi C., Pöll M. and Wüthrich D. B. (2003) EcoDevis - Ökologische Leistungsbeschreibungen von Bauprodukten. Trägerverband eco-devis c/o Hochbauamt des Kantons Bern, Online-Version under: <http://www.eco-devis.ch>.
- Werner F. (1999) Economic Allocation in LCA. A Case Study About Aluminium Window Frames. *In proceedings from: Recovery, Recycling, Reintegration 1999 (R'99)*, Genf.
- Werner F. (2003) Interdependencies Between LC-modelling And The Use Of LCA In Product Design-related Decisions; With Special Emphasis On The Influence Of Cognitive Models And Values On The Modelling Of Reuse & Recycling And Other End-of-life Options. In: *Diss. 14750*. Eidg. Technische Hochschule (ETH), Zürich.
- Wolf S. (2000) Untersuchungen zur Bereitstellung von Rohstoffen für die Erzeugung von Sekundäraluminium in Deutschland: Ein Informationssystem als Hilfsmittel für das Stoffstrommanagement. In: *Berichte aus der Umwelttechnik*. Shaker Verlag, Aachen.

10 Anhang A: Berechnungsgrundlagen

Pos.-Nr.	NPK-Leistung/Systembeispiele	Konstruktions-/Spezifikationen	Dimensionen	Volumen m3 pro m2	Massen in kg pro m2	Rohdichte kg/m3	Graue Energie in MJ pro kg	11 Zusammensetzung	13 Graue Energie MJ/m2	Bemerkungen	Masse [kg/m2]	Input-Wertigkeit	Sammelrate	Aufbereitungsrate	Umschmelzrate	Wertkorrektur	Total	Gutschrift Primärmaterial [kg]	Abfall Deponie (Sammlung) [kg]	Abfall aus Aufbereitung [kg]	Abfall aus Umschmelzen [kg]	Wertverlust [kg]
NPK 321 Montagebau in Stahl																						
540.000	Belagbleche																					
541.200/542.200	Alu-Warzenblech	warm ausgehärtet, roh	d = 5/7 mm		14.30	2700	210.0	Werkstoff AlMgSi1Mn	3003	Recyclatanteil 0%	14.3	1	2	2	2		81%	11.59	0.29	0.60	0.54	1.29
NPK 342 Verputzte Aussenwärmedämmungen																						
170.000	Fensterbänke und Schwellen																					
171.000	Fensterbänke aus Alu	Mit Hohlraumdämmung, Alu anodisiert.																				
		Fensterbank	2	0.003	7.3502	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	1249		7.35	1	1	3	2		80%	5.87	0.15	0.11	0.57	0.65
		Blech anodisieren	15 mm						18		0.00						100%	0.00				
		Total							1267	Ohne Befestigung und Dämmstoff	7.35							5.87	0.15	0.11	0.57	0.65
630.000	Sockelabschlüsse spritzwasserfest																					
630.130	Aluminium		2	0.002	5.38	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	914		5.38	1	1	1	2		85%	4.58	0.11	0.08	0.10	0.51
NPK 343 Hinterlüftete Fassaden																						
220.000	Unterkonstruktion System Holz/ Metall																					
221.000	Alu-Unterkonstruktion mit Traglatten Abstand 30cm																					
221.100	Konsolen	134x80x2.7		0.000	0.11	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	18		0.11	3	1	1	2		43%	0.05	0.05	0.00	0.00	0.01
221.200	Tragprofile	90x1000x2.3		0.000	0.88	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	150		0.88	2	1	1	2		78%	0.69	0.09	0.01	0.02	0.08
251.200	Traglatten	70x30, a=300		0.006	3.12	550	2.6	Kanholz, technisch getrocknet	8		3.12						-					
		Therm. Trennelement	52x80x6.2	0.000	0.05	1400	58.8	PVC-GHS Hartschaum	3		0.05						-					
		Verbindungs mittel 10 Schrauben	10x60		0.05		64.4	Stahl A4	3		0.05						-					
		Total		0.006	4.22				183		4.22							0.74	0.14	0.01	0.02	0.08
230.000	Unterkonstruktion System aus Metall																					
231.000	Alu- Unterkonstruktion vertikal, Tragprofile L-Form																					
		Konsole		0.000	0.24	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	40		0.24	3	1	1	2		43%	0.10	0.12	0.00	0.00	0.01
		L- Profil		0.000	0.73	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	124		0.73	2	1	1	2		78%	0.57	0.07	0.01	0.01	0.06
		Therm. Trennelement		0.000	0.06	1400	58.8	PVC-GHS Hartschaum	3	FALSCH	0.06						-					
		Verbindungs mittel 10 Schrauben	10x60		0.05		64.4	Stahl A4	3		0.05						-					
		Total		0.000	1.07				170		1.07							0.67	0.19	0.01	0.02	0.07
		Alu- Unterkonstruktion vertikal, Tragprofile T-Form																				
		Konsole		0.000	0.24	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	40		0.24	3	1	1	2		43%	0.10	0.12	0.00	0.00	0.01
		T- Profil		0.001	1.41	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	239		1.41	2	1	1	2		78%	1.10	0.14	0.02	0.02	0.12
		Therm. Trennelement		0.000	0.06	1400	58.8	PVC-GHS Hartschaum	3		0.06						-					
		Verbindungs mittel 10 Schrauben	10x60		0.05		64.4	Stahl A4	3		0.05						-					
		Total		0.001	1.75				286		1.75							1.20	0.26	0.02	0.03	0.13
610.000	Kleinförmige Metallplatten																					
611.100	Panele aus Alublech roh		0.4	0.001	1.6	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	274		1.61	2	1	1	1		87%	1.40	0.16	0.02	0.03	0.00
620.000	Grossformatige Metallplatten/ Metallplatten als Stülpedeckung																					
621.100	Kassetten aus Alublech roh	Abwicklungsfaktor 1.5	1.2	0.002	4.8	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	823		4.84	2	1	1	1		87%	4.21	0.48	0.07	0.09	0.00
622.000	Dreischichtplatten aus beidseitig mit Alu belegtem Kunststoffkern	Aluschicht	1	0.001	3.3625	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	571	Trennbare, nicht unklar!	3.36	2	3	3	2		69%	2.34	0.34	0.20	0.23	0.26

Graue Energie von Bauprodukten aus Aluminium unter Berücksichtigung der wertkorrigierten Substitution

Pos.-Nr.	NPK-Leistungssystembeispiele	Konstruktionstyp/Spezifikationen	Dimensionen	Volumen m ³ pro m ²	Masse in kg pro m ²	Rohdichte kg/m ³	Graue Energie in MJ pro kg	11 Zusammensetzung	13 Graue Energie MJ/m ²	Bemerkungen	Masse [kg/m ²]	Input-Wertigkeit	Sammelrate	Aufbereitungsrate	Umschmelzrate	Wertkorrektur	Total	Gutschrift Primärmaterial [kg]	Abfall Deponie (Sammlung) [kg]	Abfall aus Aufbereitung [kg]	Abfall aus Umschmelzen [kg]	Wertverlust [kg]
												2	3	3	2	2						
		Kunststoffkern	3	0.004	0.15	40	100.0	Geschäumtes Polyethylen	15		0.15											
		Kleber			0.15		125.0	Epoxidkleber	19		0.15											
		Total	4	0.01	3.6625	2557.5	206.3	95% Alu, 5% PE	605		3.66						2.34	0.34	0.20	0.23	0.26	
623.000	Dreischichtplatten als Stülpldeckung aus beidseitig mit Alu belegtem Kunststoffkern	Aluschicht	1	0.001	3.8467	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	654	Trennbarkeit unklar!	3.85	2	3	3	2		69%	2.67	0.38	0.23	0.26	0.30
		Kunststoffkern	3	0.00	0.1716	40	100.0	Geschäumtes Polyethylen	17		0.17											
		Kleber			0.15		125.0	Epoxidkleber	19		0.15											
		Total	4	0.01	4.1683	2557.5	206.3	95% Alu, 5% PE	689		4.17						2.67	0.38	0.23	0.26	0.30	
630.000	Metallplatten profiliert																					
631.000	Platten aus Alu profiliert, roh	Abwicklungs-Faktor 1.25-1.5	0.8	0.001	2.9	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	494		2.91	2	1	1	1		87%	2.52	0.29	0.04	0.05	0.00
930.000	Fensterbänke und Mauerabdeckungen																					
932.100	Fensterbänke aus Alublech																					
932.110	Fensterbänke aus Alublech geklebt	Fensterbank	2	0.002	5.38	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	914		5.38	1	1	3	2		80%	4.30	0.11	0.08	0.42	0.48
		Kleber	3	0.003	3.6	1200	97.7	ca. 70% Polyurethane, Kunststoffe, 5% Xylo	352		3.60											
		Total							1266		8.98						4.30	0.11	0.08	0.42	0.48	
932.120	Fensterbänke aus Alublech mit Metallbügeln befestigt	Fensterbank	2	0.002	5.38	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	914		5.38	1	1	1	2		85%	4.58	0.11	0.08	0.10	0.51
		Metallbügel	2	0.000	0.4794	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	81		0.48	3	1	1	2		43%	0.21	0.24	0.00	0.00	0.02
		Total							996		5.86						4.79	0.35	0.08	0.11	0.53	
933.000	Mauerkronenabdeckungen																					
933.200	Aus Alublech	roh	2	0.002	5.38	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	914		5.38	1	1	1	2		85%	4.58	0.11	0.08	0.10	0.51
NPK 347 Rollläden, Raffstoren, Markisen und Fensterläden																						
200.000	Rollläden und Faltrollläden																					
210.000	Alurollläden																					
	Behang	Aluhohlprofil			6.20		210.0	0% Rezyklatanteil	1302		6.20	1	1	1	2		85%	5.28	0.12	0.09	0.12	0.59
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000			MJ/m ² : 116.1		743		0.00											
	Führungsschiene	Aluprofil			1.60		210.0	0% Rezyklatanteil	336	ohne anodisierung	1.60	2	1	1	2		78%	1.25	0.16	0.02	0.03	0.14
	Welle	Stahlrohr			2.60		27.7	deutsche Produktion	72	ohne anodisierung	2.60											
211-214	Alurollläden, Hand/Motor, reguliert = 1.6x2.0								2453		10.4							6.53	0.28	0.11	0.15	0.73
220.000	Alurollläden mit integrierter Abdeckung																					
	Behang	Aluhohlprofil			6.20		210.0	0% Rezyklatanteil	1302		6.20	1	1	1	2		85%	5.28	0.12	0.09	0.12	0.59
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000			MJ/m ² : 116.1		743		0.00											
	Führungsschiene	Aluprofil			1.60		210.0	0% Rezyklatanteil	336	ohne anodisierung	1.60	2	1	1	2		78%	1.25	0.16	0.02	0.03	0.14
	Welle	Stahlrohr			2.60		27.7	deutsche Produktion	72	ohne Verzinkung	2.60											
221-222	Alurollläden, Hand/Motor, reguliert = 1.6x2.0								2453		10.4							6.53	0.28	0.11	0.15	0.73
240.000	Alufaltrollläden																					
	Behang	Aluhohlprofil			6.20		210.0	0% Rezyklatanteil	1302		6.20	1	1	1	2		85%	5.28	0.12	0.09	0.12	0.59
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000			MJ/m ² : 116.1		743		0.00											
	Führungsschiene	Aluprofil			1.60		210.0	0% Rezyklatanteil	336	ohne anodisierung	1.60	2	1	1	2		78%	1.25	0.16	0.02	0.03	0.14
	Welle	Stahlrohr			2.60		27.7	deutsche Produktion	72	ohne Verzinkung	2.60											
241-242	Alufaltrollläden, Hand/Motor bsh = 1.6x2.0								2453		10.4							6.53	0.28	0.11	0.15	0.73
310.000	Aluraffstoren																					
	Behang	Alulamellen			3.20		210.0	0% Rezyklatanteil	672		3.20	2	1	1	2		78%	2.50	0.32	0.04	0.06	0.28
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000			MJ/m ² : 116.1		743		0.00											

Pos.-Nr.	NPK Leistungssystembeispiele	Konstruktionstyp/Spezifikationen	Dimensionen	Volumen m ³ pro m ²	Masse in kg pro m ²	Rohdichte kg/m ³	Graue Energie in MJ pro kg	11 Zusammensetzung	13 Graue Energie MJ/m ²	Bemerkungen	Masse [kg/m ²]	Input-Wertigkeit	Sammelrate	Aufbereitungsrate	Umschmelzrate	Wertkorrektur	Total	Gutschrift Primärmaterial [kg]	Abfall Deponie (Sammlung) [kg]	Abfall aus Aufbereitung [kg]	Abfall aus Umschmelzen [kg]	Wertverlust [kg]
	Führungsschiene	Aluprofil			1.00		210.0	0% Rezyklatanteil	210	ohne anodisierung	1.00	2	1	1	2	78%	0.78	0.10	0.01	0.02	0.09	
	Oberschiene	Stahlrohr			2.00		27.7	deutsche Produktion	55	ohne Verzinkung	2.00											
311-316	Verbundraffstoren Alu		b x h = 1.6 x 2.0						1680		6.20						3.28	0.42	0.06	0.07	0.36	
	Behang	Alulamellen			5.20		210.0	0% Rezyklatanteil	1092		5.20	1	1	1	2	85%	4.43	0.10	0.08	0.10	0.49	
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000		MJ/m ² : 116.1			743		0.00											
	Führungsschiene	Aluprofil			6.50		210.0	0% Rezyklatanteil	1365	ohne anodisierung	6.50	1	1	1	2	85%	5.53	0.13	0.10	0.13	0.61	
	Oberschiene	Stahlrohr			2.00		27.7	deutsche Produktion	55	ohne Verzinkung	2.00											
321-322	Ganzmetall-Raffstoren		b x h = 1.6 x 2.0						3255		13.7						9.96	0.23	0.17	0.23	1.11	
660.000	Aludrehläden																					
	Laden	Aluhohlprofil			36.80		210.0	0% Rezyklatanteil	7728		36.8	1	1	1	2	85%	31.33	0.74	0.54	0.71	3.48	
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000		MJ/m ² : 116.1			743		0.00											
	Kloben, Rückhalter	Stahl			1.00		28.0	deutsche Produktion	28	ohne Oberflächenbehandlung	1.00											
661-663	Aludrehläden mit beweglichen Lar		b x h = 1.6 x 2.0						8499		37.8						31.3	0.74	0.54	0.71	3.48	
	Laden	Aluhohlprofil			35.20		210.0	0% Rezyklatanteil	7392		35.2	1	1	1	2	85%	30.0	0.70	0.52	0.68	3.33	
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000		MJ/m ² : 116.1			743		0.00											
	Kloben, Rückhalter	Stahl			1.00		28.0	deutsche Produktion	28	ohne Oberflächenbehandlung	1.00											
664.000	Aludrehläden mit festen Lamellen		b x h = 1.6 x 2.0						8163		36.2						30.0	0.70	0.52	0.68	3.33	
	Laden	Aluprofil/blech			32.00		210.0	0% Rezyklatanteil	6720		32.0	1	1	1	2	85%	27	0.64	0.47	0.62	3.03	
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000		MJ/m ² : 116.1			743		0.00											
	Kloben, Rückhalter	Stahl			1.00		28.0	deutsche Produktion	28	ohne Oberflächenbehandlung	1.00											
665.000	Aludrehläden mit Füllung		b x h = 1.6 x 2.0						7491		33.0						27	0.64	0.47	0.62	3.03	
	Laden	Aluprofil/blech			33.60		210.0	0% Rezyklatanteil	7056		33.6	1	1	1	2	85%	29	0.67	0.49	0.65	3.18	
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000		MJ/m ² : 116.1			743		0.00											
	Kloben, Rückhalter	Stahl			1.00		28.0	deutsche Produktion	28	ohne Oberflächenbehandlung	1.00											
666.000	Aludrehläden mit Füllung und L		b x h = 1.6 x 2.0						7827		34.6						29	0.67	0.49	0.65	3.18	
670.000	Aluschiebeläden																					
	Laden	Aluhohlprofil			35.20		210.0	0% Rezyklatanteil	7392		35.2	1	1	1	2	85%	30.0	0.70	0.52	0.68	3.33	
	Alu einbrennlackie	einbrennlackiert		6.4000		MJ/m ² : 116.1			743		0.00											
	Lauf-/Führungssch	Aluprofil			0.38		210.0	0% Rezyklatanteil	81	ohne anodisierung	0.38	3	1	1	2	43%	0.17	0.19	0.00	0.00	0.02	
671.000	Aluschiebeläden mit festen Lamel		b x h = 1.6 x 2.0						8216		35.6						30.1	0.90	0.52	0.68	3.35	
NPK 351 Spenglerarbeiten																						
040.000 Werkstoff- und Produkteangaben																						
045.100 Alublech																						
045.110	Alublech blank	mm 1.0	1		2.7000	2700	170.8	26 % Sekundäraluminium	461		2.70	2	1	1	2	78%	2.11	0.27	0.04	0.05	0.23	
NPK 352 Bekleidungen und Deckungen aus Dünoblech																						
200.000 Bekleidungen und Deckungen aus Blechbahnen																						
200.510	Alublech blank	mm 0.7	0.7		1.8900	2700	164.3	26 % Sekundäraluminium	311	-	1.89	2	1	1	2	78%	1.48	0.19	0.03	0.03	0.16	
200.520	Alublech PVDF beschichtet	mm 0.7	0.7		1.8900	2700	164.3	26 % Sekundäraluminium	311		1.89	2	1	3	2	73%	1.39	0.19	0.03	0.13	0.15	
	PVDF Beschichtung, geschätzt								39		0.00											
Total									350		1.89						1.39	0.19	0.03	0.13	0.15	
NPK 361 Steildach, Unterkonstruktionen																						

Pos.-Nr.	NPK Leistung/ Systembeispiele	Konstruktionstyp/ Spezifikationen	Dimensionen	Volumen m3 pro m2	Masse in kg pro m2	Rohdichte kg/m3	Graue Energie in MJ pro kg	11 Zusammensetzung	13 Graue Energie MJ/m2	Bemerkungen	Masse [kg/m2]	Input-Wertigkeit	Sammelrate	Aufbereitungsrate	Umschmelzrate	Wertkorrektur	Total	Gutschrift Primärmaterial [kg]	Abfall Deponie (Sammlung) [kg]	Abfall aus Aufbereitung [kg]	Abfall aus Umschmelzen [kg]	Wertverlust [kg]
NPK 364 Flachdach mit Dichtungsbahnen																						
220.000 Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen																						
	Alufolie		80 µm	0.00008	0.22	2690	210	Alufolie 80 µm	45	gerechnet	0.22	4	3	3	2	0%	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	
	Bitumenbahn Alu80																					
	Rest Bitumenbahn Alu80								78	Differenz												
221.211	Alu 80	lose verlegen	2 mm			2.60	47.4	Oxidationsbitumen, Filler, Talkum, 80 µm Alu	123	(kasser)	2.60						0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	
	Alufolie		80 µm	0.00008	0.22	2690	210	Alufolie 80 µm	45	gerechnet	0.22	4	3	3	2	0%	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	
	Bitumenbahn E Alu80																					
	Rest Bitumenbahn E Alu80	lose verlegen	2 mm						79	Differenz												
221.221	E Alu 80	total				2.60	47.9	Polymerbitumen, Filler, Talkum, 80 µm Alu	125	wie ALU80 gerechnet mit Polymerbitumen	2.60						0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	
600.000 An- und Abschlüsse aus Blech																						
613.313	Abweisbleche	Alublech	1.0 mm	0.00	2.69	2690	210.0	0 % Recyclatanteil	565		2.69	2	1	1	1	87%	2.34	0.27	0.04	0.05	0.00	
621.130	Dachrandabschlüsse	Alublech	1.0 mm	0.00	2.69	2690	210.0	0 % Recyclatanteil	565		2.69	2	1	1	1	87%	2.34	0.27	0.04	0.05	0.00	
633.130	Stimblendens	Alublech	1.0 mm	0.00	2.69	2690	210.0	0 % Recyclatanteil	565		2.69	2	1	1	1	87%	2.34	0.27	0.04	0.05	0.00	
641.113	Abschlusschiene n, flach	Alu	x25 mm	0.00	0.2018	2690	210.0	0 % Recyclatanteil	42		0.20	3	1	1	2	43%	0.09	0.10	0.00	0.00	0.01	
641.122	Abschlusschiene n, hohlfach	Alu	x25 mm	0.00	0.2018	2690	210.0	0 % Recyclatanteil	42		0.20	3	1	1	2	43%	0.09	0.10	0.00	0.00	0.01	
642.130	Aufbordsungsabschluss	Alublech	1.0 mm	0.00	2.69	2690	210.0	0 % Recyclatanteil	565		2.69	2	1	1	1	87%	2.34	0.27	0.04	0.05	0.00	
644.112	Schwellenausbildung	Alu	x30 mm	0.00	0.1614	2690	210.0	0 % Recyclatanteil	34		0.16	3	1	1	2	43%	0.07	0.08	0.00	0.00	0.01	
644.223	Abdeckblech	Alublech	1.0 mm	0.00	2.69	2690	210.0	0 % Recyclatanteil	565		2.69	2	1	1	1	87%	2.34	0.27	0.04	0.05	0.00	
651.130	Schutzblech	Alublech	1.0 mm	0.00	2.69	2690	210.0	0 % Recyclatanteil	565		2.69	2	1	1	1	87%	2.34	0.27	0.04	0.05	0.00	
NPK 371 Fenster																						
000.20005	s. separates Blatt Beurt. 371 Eengrie Anhang I				13.8		169.9	Alu-Profil	2353		13.8	1	1	1	2	85%	11.79	0.28	0.20	0.27	1.31	
					25.8			Herstellung	2649		25.8											
	Total				39.7				5002		39.7						12	0	0	0	1	
NPK 427 Sanitäranlagen Entsorgung																						
700.000 Abluftsysteme																						
710.000 Abgasleitungen und Formstücke																						
710.120	Aluminium	500 µm			1.4000		170.8	26% Recyclat (Sek. Aluminium)	231		1.40	2	1	1	2	78%	1.09	0.14	0.02	0.02	0.12	
720.000 Lüftungsrohre und Formstücke																						
721.000 Lüftungsrohre																						
721.200	Aluminium	500 µm			1.4000		170.8	26% Recyclat (Sek. Aluminium)	231		1.40	2	1	1	2	78%	1.09	0.14	0.02	0.02	0.12	
NPK 612 Allgemeine Metallbauarbeiten																						
311.000 Flachdächer mit Konsolen																						
311.120	Eindeckung Profiblech Alu h 40 bis 45 mm	Alublech	1	0.00	3.3625	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	571		3.36	2	1	1	1	87%	2.92	0.34	0.05	0.06	0.00	
321.000 Pultdächer mit Konsolen																						
321.120	Eindeckung Profiblech Alu h 40 bis 45 mm	Alublech	1	0.00	3.3625	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	571		3.36	2	1	1	1	87%	2.92	0.34	0.05	0.06	0.00	
331.000 Satteldächer ohne Stützen																						
	Eindeckung Profiblech Alu h 40 bis 45 mm	Alublech	1	0.00	3.3625	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	571		3.36	2	1	1	1	87%	2.92	0.34	0.05	0.06	0.00	
520.000 Geländer mit Füllungen																						

Graue Energie von Bauprodukten aus Aluminium unter Berücksichtigung der wertkorrigierten Substitution

Pos.-Nr.	NPK-Leistung/ Systembeispiele	Konstruktionstyp/ Spezifikationen	Dimensionen	Volumen m3 pro m2	Masse in kg pro m2	Rohdichte kg/m3	Graue Energie in MJ pro kg	11 Zusammensetzung	13 Graue Energie MJ/m2	Bemerkungen	Masse [kg/m2]	Input-Wertigkeit	Sammelrate	Aufbereitungsrate	Umschmelzrate	Wertkorrektur	Total	Gutschrift Primärmaterial [kg]	Abfall Deponie (Sammlung) [kg]	Abfall aus Aufbereitung [kg]	Abfall aus Umschmelzen [kg]	Wertverlust [kg]
521.100	Aluminium-Lochblech	Lochblech Alu, Lochung Rundloch 4mm	2	0.00	5.38	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	914	Inkl. Stanzabfälle	5.38	1	1	1	1	95%	5.09	0.11	0.08	0.10	0.00	
		Anodisieren EV1			1.19		18.0		21	Werte Spalten 8 und 10 MJ/m2												
		Total Lochblech	2	0	5	2690	169.9		936		5.38						5.09	0.11	0.08	0.10	0.00	
620.000	Geländer mit Füllungen																					
621.000	Jochelemente mit Füllungen und Untergurt																					
621.110	Lochblech Aluminium	Lochblech Alu, Lochung Rundloch 4mm	2	0.00	5.38	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	914	Inkl. Stanzabfälle	5.38	1	1	1	1	95%	5.09	0.11	0.08	0.10	0.00	
		Anodisieren EV1			1.19		18.0		21	Werte Spalten 8 und 10 MJ/m2												
		Total Lochblech	2	0	5	2690	169.9		936		5.38						5.09	0.11	0.08	0.10	0.00	
622.000	Rahmenelemente mit Füllung und Pfosten																					
622.110	Lochblech Aluminium	Lochblech Alu, Lochung Rundloch 4mm	2	0.00	5.38	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	914	Inkl. Stanzabfälle	5.38	1	1	1	1	95%	5.09	0.11	0.08	0.10	0.00	
		Anodisieren EV1			1.19		18.0		21	Werte Spalten 8 und 10 MJ/m2												
		Total Lochblech	2	0	5	2690	169.9		936		5.38						5.09	0.11	0.08	0.10	0.00	
623.000	Rahmenelemente mit Füllung und Laschen																					
623.110	Lochblech Aluminium	Lochblech Alu, Lochung Rundloch 4mm	2	0.00	5.38	2690	169.9	Aluminium, 26% Recyclat	914	Inkl. Stanzabfälle	5.38	1	1	1	1	95%	5.09	0.11	0.08	0.10	0.00	
		Anodisieren EV1			1.19		18.0		21	Werte Spalten 8 und 10 MJ/m2												
		Total Lochblech	2	0	5	2690	169.9		936		5.38						5.09	0.11	0.08	0.10	0.00	
NPK 622 Türen																						
200.000	Aussentüren aus Holz oder Holzwerkstoffen																					
211.200	Klimaklasse III, U-Wert Türkonstruktion 1.5 W/m2K																					
	Rahmen																					
	Fichte massiv verzinkt	100x50	0.03	11.75	470.0	8.8	Keilverzinktes Nadelholz, analog 1-Schichtplatte, 60% Verschnitt	165														
	Sipo massiv	100x50	0.03	16.75	670.0	4.1	Tropenholz, 60% Verschnitt	109														
	Eiche massiv	100x50	0.03	17.5	700.0	3.1	Eiche Kantholz, techn. getr., 60% Verschnitt	87														
	Total Rahmen						mittel	120		ohne Dichtungen, Schwelle, Montage	120											
	Türblatt																					
	Einleimer Holz massiv, Tropen				670.0	3.1	Tropenholz Afrika, 50% Verschnitt			Aufbau des Türblatts je nach Produkt sehr unterschiedlich												
	Mittellagen Holzwerkstoffplatten				635	9.6-13.1	Nadelholz Europa, 5% Verschnitt															

Pos.-Nr.	NPK Leistung/Systembeispiele	Konstruktionstyp/Spezifikationen	Dimensionen	Volumen m3 pro m2	Masse in kg pro m2	Rohdichte kg/m3	Graue Energie in MJ pro kg	11 Zusammensetzung	13 Graue Energie MJ/m2	Bemerkungen	Masse [kg/m2]	Input-Wertigkeit	Sammelrate	Aufbereitungsrate	Umschmelzrate	Wertkorrektur	Total	Gutschnitt Primärmaterial [kg]	Abfall Deponie (Sammlung) [kg]	Abfall aus Aufbereitung [kg]	Abfall aus Umschmelzen [kg]	Wertverlust [kg]
		Mittellagen Wärme-/Schalldämmung			30-320	17-99	je nach Produkt, 5% Verschnitt			PU-Dämmung enthält relative Bestandteile, Entsorgung vom Produkt abhängig												
		Decklagen Holzwerkstoffplatten			635-1100	152-19.9	Nadelholz Europa/ Tropen, 5% Verschnitt															
		Nicht-Alu - Anteile					min.		1329													
		Nicht-Alu - Anteile					max.		1727													
		Nicht-Alu - Anteile					mittel		1529													
		Alublech	1 mm		2.69	2690	Aluminium, 26% Recyclat, 5% Verschnitt		457		2.69	2	3	3	2	69%	1.87	0.27	0.16	0.18	0.21	
		Total Türblatt	46.0		57.1		min.		1786	ohne Dichtungen, Beschläge, Montage												
			68.0		75.84		max.		2184													
			55.2		67.916		mittel		1986													
		Rahmen und Türblatt total					mittel		2106	ohne Dichtungen, Schwelle, Beschläge, Montage	92.6						1.87	0.27	0.16	0.18	0.21	
400.000	Türen aus Metall, wärmegeämmt																					
410.000	Rahmentüren aus Alu, einflüglig																					
411.100	Ohne Glas oder Füllung Wert Rahmen 2.1 W/m2K																					
	Rahmen- und Flügelprofile																					
		Aluminiumprofil			26.5	2690.0	Aluminium, 26% Recyclat, Verschnitt 5%		4727		26.5	1	1	1	2	85%	22.6	0.53	0.39	0.51	2.51	
		Dämmsteg			3	1350.0	Polyamid, mit 30% Glasfasern		399		3.0											
		Total Rahmen- und Flügelprofil			29.5				5126	ohne Dichtungen, Schwelle, Herstellung	29.5						22.6	0.53	0.39	0.51	2.51	
	Füllungen																					
	Glasfüllung																					
		Wärmeschutzglas 2 WS S, pU-We			26		2x4mm Floatglas, 0% Recyclat, Argon		750		26.0											
		Glasleisten Alu			2.6	2690.0	Aluminium, 26% Recyclat, Verschnitt 5%		464		2.60	2	1	1	2	78%	2.0	0.26	0.04	0.05	0.23	
		Total Glasfüllung			28.6				1214	ohne Dichtungen und Herstellung	28.6						2.03	0.26	0.04	0.05	0.23	
	Füllung vollflächig																					
		Alu-Deckschicht	4	0.01	13.855	2690.0	Aluminium, 26% Recyclat, Verschnitt 10%		2589		13.9	1	2	3	2	78%	10.8	0.28	0.58	1.04	1.20	
		PUR Wärmedämmung oder Steinwolle Wärmedämmung	40	0.05	1.5451	30.0	Verschnitt 5%		161		1.5											
			50	0.06	5.7942	90.0	Verschnitt 5%		103		5.8											
		Total Füllung vollflächig	44		15.4				2750	ohne Dichtungen und Herstellung	21.2						10.76	0.28	0.58	1.04	1.20	
		Total Alu-Rahmentüre mit Verglas			58.1				6340	ohne Dichtungen, Schwelle, Beschläge, Montage	58.1						24.59	0.79	0.42	0.56	2.73	

Graue Energie von Bauprodukten aus Aluminium unter Berücksichtigung der wertkorrigierten Substitution

Pos.-Nr.	NPK-Leistungssystembeispiele	Konstruktionstyp/Spezifikationen	Dimensionen	Volumen m ³ pro m ²	Masse in kg pro m ²	Rohdichte kg/m ³	Graue Energie in MJ pro kg	11 Zusammensetzung	13 Graue Energie MJ/m ²	Bemerkungen	Masse [kg/m ²]	Input-Wertigkeit	Sammelrate	Aufbereitungsrate	Umschmelzrate	Wertkorrektur	Total	Gutschrift Primärmaterial [kg]	Abfall Deponie (Sammlung) [kg]	Abfall aus Aufbereitung [kg]	Abfall aus Umschmelzen [kg]	Wertverlust [kg]
		Total Alu-Rahmentüre mit Füllung			44.9				7876	ohne Dichtungen, Schwelle, Beschläge, Montage	50.7						33.33	0.81	0.97	1.55	3.70	
500		Türen aus Metall, ungedämmt																				
510		Rahmentüren aus Alu, einflüglig																				
511.1		Ohne Glas oder Füllung																				
		Rahmen- und Flügelprofile																				
		Aluminiumprofil			18.55	2690.0	169.9	Aluminium, 26% Recyclat, Verschnitt 5%	3309	ohne Dichtungen, Schwelle, Herstellung	18.6	1	1	1	2	85%	15.8	0.37	0.27	0.36	1.75	
		Total Rahmen- und Flügelprofil			18.55				3309	ohne Dichtungen, Schwelle, Herstellung	18.6						15.79	0.37	0.27	0.36	1.75	
		Füllungen																				
		Glasfüllung																				
		Wärmeschutzglas 2 WS S, 0U-We			26			2x4mm Floatglas, 0% Recyclat, Argon	750		26.0						-					
		Glasleisten Alu			2.6	2690.0	169.9	Aluminium, 26% Recyclat, Verschnitt 5%	464		2.6	2	1	1	2	78%	2.0	0.26	0.04	0.05	0.23	
		Total Glasfüllung			28.6				1214	ohne Dichtungen und Herstellung	28.6						2.03	0.26	0.04	0.05	0.23	
		Füllung vollflächig																				
		Alu-Deckschicht	####	0.00	10.391	2690.0	169.9	Aluminium, 26% Recyclat, Verschnitt 10%	1942		10.4	1	2	3	2	78%	8.1	0.21	0.43	0.78	0.90	
		PUR Wärmedämmung	####	0.03	0.7726	30.0	99.0	Verschnitt 5%	80		0.8						-					
		Steinwolle Wärmedämmung	####	0.03	2.3177	90.0	17.0	Verschnitt 5%	41		2.3						-					
		Total Füllung vollflächig	####		11.163				2022	ohne Dichtungen und Herstellung	13.5						8.07	0.21	0.43	0.78	0.90	
		Total Alu-Rahmentüre mit Verglasung			47.15				4523	ohne Dichtungen, Schwelle, Beschläge, Montage	47.2						17.83	0.63	0.31	0.40	1.98	
		Total Alu-Rahmentüre mit Füllung			29.713				5331	ohne Dichtungen, Schwelle, Beschläge, Montage	32.0						23.87	0.58	0.71	1.14	2.65	
NPK 643 Gipsarbeiten Trockenbau																						
652.200		Dampfsperren																				
652.210		Alufolien beidseitig mit Kraftpapier verstärkt	0.4	s-D 4500 m	0.34		88.9	Papier + Alu 2x20 µm	30													
NPK 661 Unterlagsböden																						
221.000		Horizontale Feuchtigkeitsabdichtung																				
221.111		Bitumenbahn V60 Überlappung 1	2		2.6400	1200	35.9	Bitumen, Filler, Sand/ Talkum, Glasfaservlies	95		2.6											
		Alufolie in Bitumen Überlappung 1	2		2.8600	1300	47.4	Bitumen, Filler, Sand/Talkum, Alu-Folie	136		2.86											
		Verschweissen/Ve	Überlappung 100 mm	4	5.5000		4.7	-	0		5.5											
		Total							231													
440.000		Wärmedämmschichten: Beurteilung bei einem U-Wert von 0.3 W/m ² K																				
444.400		EPS mit Alufolie beieinlagig, Dicke 20-40 mm																				
		EPS mit Alufolie	W/L = 0.037 W/mK	123	2.4600	20.00	92.2	0.9 % HB/C, 0-40 % EPS- Rezyklat, Alu	237													
444.500		EPS-Platten unbelegt und EPS mit Alufolie belegt auf Rollen																				

Pos.-Nr.	NPK Leistung/Systembeispiele	Konstruktionstyp/Spezifikationen	Dimensionen	Volumen m3 pro m2	Masse in kg pro m2	Rohdichte kg/m3	Graue Energie in MJ pro kg	11 Zusammensetzung	13 Graue Energie MJ/m2	Bemerkungen	Masse [kg/m2]	Input-Wertigkeit	Sammelrate	Aufbereitungsrate	Umschmelzrate	Wertkorrektur	Total	Gutschrift Primärmaterial [kg]	Abfall Deponie (Sammlung) [kg]	Abfall aus Aufbereitung [kg]	Abfall aus Umschmelzen [kg]	Wertverlust [kg]
	EPS_20	W.L. = 0.037 W/mK	103		2.0600	20.00	92.2	0.9 % HBCCD, 0-40 % EPS-Rezyklat	190													
	EPS mit Alufolie	W.L. = 0.037 W/mK	20		0.4000	20.00	92.2	0.9 % HBCCD, 0-40 % EPS-Rezyklat, Alu	47													
	Total		123		2.4600				237													
448.130	PUR-Platten beidseitig alubelegt	einlagig, Dicke 20-120 mm																				
	PUR-Platte alubelegt	W.L. = 0.024 W/mK	80		2.6000	32.50	99.0	3-10 % Brandschutzmitte I, Alu	266													
NPK 662 Fugenlose Bodenbeläge																						
163.000	Wärmedämmungen: Beurteilung bei einem U-Wert von 0.3 W/m2K																					
	PUR-Platte alubelegt	W.L. = 0.024 W/mK	80		2.6000	32.50	99.0	3-10 % Brandschutzmitte I, Alu	278													
441.200	Feldbegrenzungsprofile																					
441.220	Alu	Höhe 5-12 mm	2		0.0538	2690	210.0	0 % Rezyklatanteil	11	pro Laufmeter, Höhe 5 mm	0.05	3	1	1	2	43%	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	
NPK 663 Beläge in Linoleum, Kunststoffen, Textilien und dgl.																						
611.000	Sockelleisten																					
	Aluminium	0.2x5 cm	2		0.2690	2690	210.0	-	56	pro Laufmeter	0.27	3	1	1	2	43%	0.12	0.13	0.00	0.00	0.01	
651.000	Abschlussprofile																					
	Aluminium	0.2x5 cm	2		0.2690	2690	210.0	-	56	pro Laufmeter	0.27	3	1	1	2	43%	0.12	0.13	0.00	0.00	0.01	
NPK 665 Doppelböden																						
300.000	Unterkonstruktionen																					
310.000	Stützen; Beurteilung bei gleichem Materialvolumen																					
	Aluminium	Stützenhöhe 25 cm			0.7000	2690	210.0	0 % Rezyklatanteil	147		0.70	2	1	1	2	78%	0.55	0.07	0.01	0.01	0.06	
320.000	Stützen und Rasterstäbe; Beurteilung bei gleichem Materialvolumen																					
	Aluminium	Stützenhöhe 25 cm			1.5000	2690	210.0	0 % Rezyklatanteil	315		1.50	2	1	1	2	78%	1.17	0.15	0.02	0.03	0.13	
400.000	Doppelbodenplatten																					
410.000	Holzwerkstoff schwerbrennbar																					
411.101	Spanplatte einseitig alube-schichtet	Bodenbelag verklebt	38		28.9				455													
412.101	Spanplatte beidseitig alube-schichtet	Bodenbelag lo	38		29.2				491													
412.102	Spanplatte stahlblech-alube-schichtet	Bodenbelag lo	38		33.1				577													
412.202	Spanplatte dünn stahlblech-alube-schichtet	Bodenbelag lo	28		25.3				472													
420.000	Mineralsch, nichtbrennbar																					
421.101	Gipsfaserplatte einseitig alube-schichtet/hyd rophobiert	Bodenbelag	35		51.4				401													
422.101	Gipsfaserplatte beidseitig alube-schichtet/hyd rophobiert	Bodenbelag lo	35		51.6				437													
422.102	Gipsfaserplatte stahlblech-alube-schichtet/hyd rophobiert	Bodenbelag lo	35		55.6				526													

11 Anhang B: Reviewbericht

Critical Review

der EMPA-Studie

Graue Energie von Bauprodukten aus Aluminium unter Berücksichtigung der wertkorrigierten Allokation

im Auftrag des
Aluminium Verbands Schweiz

November 2004

Autoren:
Johannes Kreißig
Jürgen Stichling

PE Europe GmbH



PE EUROPE GMBH
Life Cycle Engineering

Hauptstraße 111 - 113
D – 70771 Leinfelden-Echterdingen
Tel. +49 (0) 711 34 18 17-0
Fax +49 (0) 711 34 18 17-25
E-Mail j.kreissig@pe-europe.com
Internet www.pe-europe.com



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	50
Kurzfassung der kritischen Prüfung.....	52
1 Einleitung und Aufgabenstellung.....	53
1.1 Übersicht.....	53
1.2 Ziel und Untersuchungsrahmen der kritischen Prüfung	53
2 Einschätzung der Studie gemäss ISO 14040ff.	54
2.1 Vorgehen und Überblick	54
2.2 ISO-Konformität der angewendeten Methoden	54
2.3 Wissenschaftlichkeit und Stand der Technik der verwendeten Methoden	54
2.4 Einschätzung der Zweckmässigkeit und Konsistenz der verwendeten Daten	55
2.5 Einschätzung der Konsistenz von Zielsetzung, Einschränkungen und Auswertung	55
2.6 Einschätzung von Transparenz und Konsistenz des Berichts.....	56



12 Kurzfassung der kritischen Prüfung

Der Aluminium Verband Schweiz hat 2004 die EMPA Dübendorf, Abteilung Technologie und Gesellschaft, beauftragt, eine Neuberechnung der grauen Energie Werte von Aluminiumbauteilen unter Berücksichtigung des Recyclingpotentials durchzuführen. Die Studie wurde unter Berücksichtigung der Anforderungen der Normenreihe ISO 14040ff durchgeführt. Die Studie wurde von Beginn an durch eine kritische Prüfung begleitet.

Motivation der Neuberechnung sind vom Verein EcoDevis veröffentlichte ökologische Bewertungen von Gebäudebauteilen, die das Recyclingpotential von Aluminiumbauteilen weitgehend ausklammern. Nach eingehender Diskussion von Methoden zur Berechnung der Grauen Energie unter Berücksichtigung des relevanten Lebenszyklusabschnitts Recycling, wurden die Graue Energie Werte für Bauprodukte aus Aluminium neu berechnet. Eine Auswertung nebst Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse schließt sich an.

Zusammenfassend kommt die kritische Prüfung zu folgender Einschätzung der Studie:

- Die für die Studie angewandten Methoden sind konform zu den internationalen Normen ISO 14040ff.
- Die bei der Durchführung der geprüften Ökobilanz angewendeten Methoden sind wissenschaftlich begründet und entsprechen dem aktuellen und internationalen Stand der Technik für Ökobilanzen.
- Im Hinblick auf die Ziele der Studie sind die verwendeten Daten als hinreichend, zweckmässig und konsistent beurteilt.
- Die Konsistenz der Auswertung in Bezug auf die Zielsetzung und die Einschränkungen der Studie wird als vollständig gegeben eingeschätzt.
- Dem Bericht kann eine sehr gute Transparenz und Konsistenz bescheinigt werden.

Insgesamt kommt die kritische Prüfung zu dem Schluss, dass die Studie voll den Anforderungen der ISO 14040ff entspricht.

Leinfelden-Echterdingen, 4. November 2004

Johannes Kreißig

Jürgen Stichling

13 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Übersicht

Der Aluminium Verband Schweiz hat 2004 die EMPA Dübendorf, Abteilung Technologie und Gesellschaft, beauftragt, eine Neuberechnung der grauen Energie Werte von Aluminiumbauteilen unter Berücksichtigung des Recyclingpotentials durchzuführen. Hintergrund sind vom Verein EcoDevis veröffentlichte ökologische Bewertungen von Gebäudebauteilen, die das Recyclingpotential von Aluminiumbauteilen weitgehend ausklammern.

Da die von der EMPA zu berechnenden graue Energie Werte veröffentlicht werden sollen, wurde Johannes Kreißig, PE Europe GmbH, vom Aluminium-Verband Schweiz mit der begleitenden kritischen Prüfung (Critical Review) nach ISO 14040 Abschnitt 7.3.3 beauftragt.

1.2 Ziel und Untersuchungsrahmen der kritischen Prüfung

Durch die kritische Prüfung soll gemäss ISO 14040, Abschnitt 7.1 sichergestellt werden, dass

- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden der internationalen Norm entsprechen;
- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet sind und dem Stand der internationalen Ökobilanz-Technik entsprechen;
- die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmässig sind;
- die Auswertungen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Studie berücksichtigen;
- der Bericht transparent und konsistent ist.

Für die kritische Prüfung lag der Abschlussbericht der Studie in den Versionen vom 26. Juni 2004 (Methodenkapitel), 13. Juli 2004 und 13. September 2004 sowie die Exceldatei mit den Berechnungen vor.

Während des begleitenden Reviews fanden die folgenden Treffen statt:

- Besprechung mit den Autoren der Studie am 11. Juni bei der EMPA Dübendorf.
- Sitzung der Begleitgruppe „EMPA-Studie“ am 15. Juli 2004 bei der EMPA Dübendorf.

Des Weiteren fand ein Austausch zwischen den Autoren und dem Gutachter per E-Mail und per Telefon statt.

14 Einschätzung der Studie gemäss ISO 14040ff.

2.1 Vorgehen und Überblick

Beginnend mit dem Treffen am 11. Juni 2004 wurde die grundsätzliche Methodik und Zielausrichtung der Studie mit den Durchführenden besprochen. Eine erste Begutachtung der verwendeten Methodik fand auf Basis des Methodenkapitels des Abschlussberichts vom 26. Juni 2004 statt. Die der Studie zu Grunde liegenden Berechnungen wurden anhand der bereitgestellten Exceldatei überprüft. Die diskutierten Ergänzungen und Empfehlungen der kritischen Prüfung wurden von den Autoren der Studie in nachfolgenden Versionen des Abschlussberichts berücksichtigt. Weitere Anmerkungen zum Abschlussbericht in der Version vom 13. Juli 2004 wurden in der endgültigen Fassung vom 13. September 2004 entsprechend umgesetzt.

In den nachfolgenden Unterkapiteln schließt sich die Behandlung der gemäß ISO 14040 für eine kritische Prüfung notwendigen Punkte an.

2.2 ISO-Konformität der angewendeten Methoden

Die für die Studie angewandten Methoden sind konform zu den internationalen Normen ISO 14040ff.

Im Wesentlichen wurde für die Berücksichtigung des Recyclingpotentials von Aluminiumbauteilen der Berechnung eines vergleichbaren Indikators zur *Grauen Energie* auf die Methode der *wertkorrigierten Substitution* zurückgegriffen. Dabei wird über eine Wertkorrektur des Recyclingprodukts in Bezug zum ursprünglich für das Bauteil eingesetzten Werkstoff der „Open-Loop-Fall“ in einen „Closed-Loop-Fall“ überführt. Dies entspricht der geltenden Norm, so kann laut ISO 14041 das Closed-Loop-Verfahren auch für Open-Loop-Systeme angewandt werden, wenn sich die inhärenten Eigenschaften des Recyclingproduktes im Vergleich zum primären Produkt nicht ändern. Stimmen die inhärenten Eigenschaften nicht überein, muss für das Open-Loop-System eine Allokation nach physikalischen Eigenschaften, ökonomischen Werten (Marktwertverhältnis primär/sekundär) oder die Anzahl nachfolgender Nutzungen des wiederverwerteten Materials erfolgen.

Ebenso normkonform ist die verwendete Methode *Cumulative Energy Demand (CED)*, die anstatt der Methode der *Grauen Energie* als Indikator für den Verbrauch an Energieressourcen verwendet wird. Eine bedingte Vergleichbarkeit der beiden Indikatoren ist gegeben, wenn bei *CED* drei (fossil, nuklear, wasser) der fünf Klassen addiert werden.

2.3 Wissenschaftlichkeit und Stand der Technik der verwendeten Methoden

Die bei der Durchführung der geprüften Ökobilanz angewendeten Methoden sind wissenschaftlich begründet und entsprechen dem aktuellen und internationalen Stand der Technik für Ökobilanzen.

Die Methode der *wertkorrigierten Substitution* ist international anerkannt und entspricht somit dem Stand der Technik und den Anforderungen an die Wissenschaftlichkeit. Im Wesentlichen ist diese Methode als Closed-Loop-System anzusehen, bei dem ein „Sicherheitsabschlag“ in Form einer Wertkorrektur zum Tragen kommt. Dadurch werden Unsicherheiten bezüglich der vollständigen Erhaltung der inhärenten Eigenschaften des Recyclingprodukts im Vergleich zum ursprünglich eingesetzten Primärmaterial berücksichtigt.

Dem Stand der Technik und Wissenschaft entspricht ebenso die verwendete Methode des *CED*, die vom Schweizer Zentrum für Ökoinventare basierend auf der Datenbank „ecoinvent“ umgesetzt wurde. Die Entsprechung leitet sich insbesondere daraus ab, dass die *CED*-Werte für fossile, nukleare, Biomasse, regenerative und Wasserkraft Ressourcen getrennt geführt werden und nicht in

unzulässiger Weise aggregiert werden. Allerdings werden, ausschließlich zum Zwecke der Vergleichbarkeit mit der Grauen Energie, die Primärenergieklassen „fossil“, „nuklear“ und „wasser“ aggregiert.

2.4 Einschätzung der Zweckmässigkeit und Konsistenz der verwendeten Daten

Im Hinblick auf die Ziele der Studie sind die verwendeten Daten als hinreichend, zweckmässig und konsistent einzuschätzen. Grundsätzlich sind in der vorliegenden Studie drei Arten von Daten zu unterscheiden. Diese sind Daten zum kumulierten Primärenergiebedarf CED, Daten zu Materialausbeuten der Recyclingprozesskette sowie marktwirtschaftliche Daten zur Berechnung der Wertkorrekturfaktoren.

Kumulierter Primärenergiebedarf CED

Wichtig ist hier die Vergleichbarkeit der aus den Daten errechneten Ergebnisse für den CED in Bezug auf die in EcoDevis gelisteten *Graue Energie* Werte. Um dem Genüge zu tun, sind mit Ausnahme der Daten für Aluminium alle Werte dem EcoDevis entnommen. Im Speziellen betrifft dies die Werte für die Bauteilherstellung und alle Nicht-Aluminium Werkstoffe. Somit ist die Verwendung dieser Daten für die gegebene Ausrichtung der Studie als ideal zu bezeichnen.

Die Herstellung von Hütten-Aluminium (primäres Aluminium), Entsorgungsprozesse sowie die Herstellung von Recyclingaluminium stammen aus der ecoinvent Datenbank. Die ursprünglichen Datenquellen sind für Entsorgungsprozesse Doka (2003) und für die Herstellung von primärem und Recycling Aluminium die Zahlen der European Aluminium Association EAA (2000). Diese Datenquellen sind ebenso als zweckmässig für die Studie anzusehen.

Daten zu Materialausbeuten

Dies umfasst die Ausbeuten der Einzelprozesse Sammlung, Aufbereitung und Umschmelzen, die durch Multiplikation eine Gesamtausbeute ergeben. Die Daten zu Ausbeuten wurden aus der Praxis ermittelt und mit Schätzungen aus der Literatur ergänzt und verifiziert. Bezüglich der Zielsetzung der Studie erscheinen die Abschätzungen zweckmässig und plausibel.

Marktwirtschaftliche Daten – Wertkorrekturfaktor

Die Basis für die Methode der wertkorrigierten Substitution bilden Wertkorrekturfaktoren, die sich aus dem Marktwertverhältnis von Recyclingaluminium im Verhältnis zu in der Regel primären Knetlegierungen ergeben. In der Studie werden zwei Faktoren verwendet, die sich aus den Börsennotierungen des London Metal Exchange und der gängigen Recyclingpraxis ableiten:

- 100% Werterhalt für großflächige Bauteile wie Fassadenbleche oder Belagsblech, die in großer Reinheit einem Recycling zugeführt werden können.
- 90% Werterhalt werden für Recyclingaluminium angesetzt, das aus zusammengesetzten Bauteilen wie Fenster oder Türen stammt.

Geringere Faktoren werden nicht verwendet, da bedingt durch die Annahme, dass Aluminiumteile unter 200 g Gewicht, beispielsweise Folien, für das Recycling verloren gehen, kein Recyclingaluminium mit geringerem Wert berücksichtigt werden muss.

Zur Absicherung der Ergebnisse, die von den hier getroffenen Annahmen zum Wertkorrekturfaktor stark abhängig sind, wird ein worst-case Szenario mit einem Werterhalt von 50% im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung berechnet.

2.5 Einschätzung der Konsistenz von Zielsetzung, Einschränkungen und Auswertung

Die Konsistenz der Auswertung in Bezug auf die Zielsetzung und die Einschränkungen der Studie wird als vollständig gegeben eingeschätzt.

Das Ziel und der Umfang der Studie werden ebenso wie die Gründe zur Durchführung der Studie sowie die Zielgruppe dargelegt. Neben der Definition des Untersuchungsrahmens findet eine Diskussion der Methoden bezüglich der Ermittlung von Primärenergieverbrauch (*Graue Energie, CED*) und Recyclingpotentialen (*Kaskade, cut-off, wertkorrigierte Substitution*) statt. Die Auswahl der geeigneten Methoden ist konsistent mit den Zielen der Studie.

Einschränkungen, die insbesondere die Ausbeuten der Recyclingprozesskette und die Ermittlung der Wertkorrekturfaktoren betreffen, sind klar dargelegt. Die Auswertung trägt dem durch die Berechnung eines worst-case Szenarios Rechnung.

2.6 Einschätzung von Transparenz und Konsistenz des Berichts

Insgesamt kann dem vorliegenden Bericht eine sehr gute Transparenz und Konsistenz bescheinigt werden. Der Bericht ist logisch aufgebaut, die Auswahl von Methoden, Randbedingungen und Annahmen ist nachvollziehbar und die Berechnungen und die Auswertung transparent dargestellt.

Der Bericht geht zunächst auf die Zielsetzung und den Umfang der Studie ein. Daran schließt sich die Diskussion verschiedener Methoden zur Berechnung von Primärenergieverbrauch bzw. zur Modellierung von Recyclingpotentialen an. Im Kapitel 6, „Berechnung von Primärenergieaufwand mittels Wertkorrigierter Substitution“, werden die Randbedingungen und Systemgrenzen dargestellt, die für die Ergebnisberechnung gelten. Die transparente Darstellung der verwendeten Daten und ihrer Quellen ist ebenfalls Bestandteil dieses Kapitels.

Kapitel 7 beschreibt in anschaulicher Form die Resultate der Studie. Zur Darstellung der Ergebnisse werden sowohl Grafiken als auch Tabellen herangezogen. Diese Darstellungselemente werden nachvollziehbar im Text erklärt. Die Darstellung der Ergebnisse für die Bauprodukte findet analog zur Darstellung des EcoDevis statt, so dass eine transparente Vergleichsmöglichkeit gegeben ist.

Die Dokumentation der Auswertung der Ergebnisse in Kapitel 8, „Diskussion der Resultate“ greift die Einschränkungen der Studie auf und prüft die Sensitivität der Ergebnisse bezüglich der Marktpreisszenarien. Eine Beurteilung der Ergebnisse rundet die Auswertung ab.