

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Stahlbau, Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung

Ganzheitliche Analyse und Bewertung von tragenden Aluminiumkonstruktionen

Christina Radlbeck

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für

Bauingenieur- und Vermessungswesen

der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Albrecht

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing.habil. D. Kosteas, i.R.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Faulstich
3. Univ.-Prof. Dr.rer.pol., Dr.rer.pol.habil., Dr. h. c. H. Wildemann

Die Dissertation wurde am 23.02.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für **Bauingenieur- und Vermessungswesen** am 12.05.2006 angenommen.

Kurzfassung

Aluminium als Baustoff – nachhaltig oder unverantwortlich? Um diese Frage zu beantworten wurden tragenden Aluminiumkonstruktionen erstmalig ganzheitlich, d. h. sowohl unter ökologischen, wirtschaftlichen als auch bemessungstechnischen Gesichtspunkten analysiert.

Zur Erfassung der Umweltwirkungen diente dabei die Ökobilanz, zur Kostenabschätzung die Lebenszykluskostenanalyse und zur Bewertung bemessungstechnischer Kriterien einschlägige Richtlinien und Normen. Mit Hilfe dieser Werkzeuge wurden drei konkrete Aluminium- und Stahlkonstruktionen im Rahmen einer Variantenstudie untersucht und verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Aluminium bei geeigneter Anwendung ökologisch und wirtschaftlich bessere Bilanzen liefert als Stahl. Dies ist hauptsächlich auf das geringe Gewicht, die Formbarkeit, die Korrosionsresistenz, den geringen Unterhaltsaufwand und das Recyclingpotenzial von Aluminium zurückzuführen. Zudem sind eine sowohl korrekte als auch effiziente Bemessung und Konstruktion von maßgeblicher Bedeutung.

Der Aluminiemeinsatz sollte daher bei normalen Spannweiten, unter geringen Lasten, mit blanken Oberflächen, mit Recyclingraten größer als 80% und mit einer Masse kleiner als 50% einer vergleichbaren Stahlkonstruktion erfolgen. Zudem ist die Anwendung einer effektiven Bemessungsnorm (z. B. des Eurocodes 9) erforderlich.

Insgesamt können für Aluminium deutliche Potenziale im Sinne der Nachhaltigkeit abgeleitet werden. Eine pauschale Ablehnung des Materials ist daher nicht gerechtfertigt.

Abstract

Aluminium as a building material – a sustainable solution or an irresponsible one? A comprehensive investigation of load-bearing aluminium structures was undertaken to answer that question, including economical, ecological as well as design aspects.

In that regard, environmental effects were evaluated by means of Life-Cycle-Analysis (LCA), costs were estimated using Life-Cycle-Cost-Analysis (LCCA) and design aspects, such as utilization and duration, were analysed by applying respective design guidelines. Using these tools, three aluminium and steel applications were explored and the results compared.

Indeed, the results show that if applied correctly, aluminium's ecological and economical performance outdo that of steel. Factors that contribute to the better performance of aluminium include its high ratio of load-bearing capacity to weight, its smoother formability, its higher corrosion resistance, its considerably lower maintenance requirements and its recycling potential. Thereby efficient design and construction have proved to be basic requirements for above results.

The use of aluminium has been found to be optimal for applications with limited spans, low loadings, untreated surfaces, with minimum 80% recycling potential and maximum 50% weight of respective steel structures. Furthermore the use of efficient design guidelines, such as Eurocode 9, is necessary.

All in all, an over-all rejection of aluminium as building material can not be justified.

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2003 bis 2005 im Rahmen des BayFORREST-Forschungsprojekts „Nachhaltiges Bauen mit Aluminium und/oder Glas“ (F243) während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Assistentin am Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung. Das Forschungsprojekt wurde innerhalb des Verbundvorhabens „Stoffflussmanagement Bauwerke“ durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz gefördert.

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Professor Dimitris Kosteas recht herzlich danken, dass er mich von Kanada an die TUM zurücklockte und mir ermöglichte, innerhalb des Fachgebiets Leichtmetallbau und Ermüdung zu promovieren. In dieser Zeit vermittelt er mir die Begeisterung für den nicht ganz alltäglichen Baustoff Aluminium und gab mir die Gelegenheit sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene unterschiedlichste Erfahrungen zu sammeln. Zudem stand er mir stets mit hilfreichen Tipps und Ratschlägen bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit zur Seite.

Bei Herrn Professor Martin Faulstich und Herrn Professor Horst Wildemann bedanke ich mich für die Bereitschaft die Koreferate zu übernehmen.

An Frau Doktor habil. Gabriele Weber-Blaschke geht ein herzliches Dankeschön für ihre vielen hilfreichen Anmerkungen in der Endphase meiner Arbeit.

Herrn Jörg Schäfer vom Gesamtverband der deutschen Aluminiumindustrie (GDA) sei gedankt für viele aktuelle Informationen, brandneue Literatur und die Gelegenheit meine Forschungsergebnisse vor der Industrielobby zu präsentieren.

Meinem Projektpartner Herrn Michael Schlinz vom Lehrstuhl für Stahlbau möchte ich ganz besonders für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit im Rahmen des BayFORREST-Projekts danken.

Meine treue Kollegin Eszter Dienes möchte ich für ihren unermüdlichen Einsatz und ihre Ausdauer beim Datensammeln insbesondere bei den LCCAs hervorheben. Ohne sie hätte die Fertigstellung dieser Arbeit bedeutend länger gedauert.

Frau Barbara Zauner gilt ein besonderes Dankeschön für die ausführliche Korrektur und die kritische Durchsicht der Arbeit.

Meinen Diplomanden und Projektstudenten Roger Höfle, Mathias Riesemann, Daniel Klein, Andreas Hasselbeck, Katja Karrer, Christian Reichgruber und Vitus Sträuber möchte ich für ihren Einsatz und jeweils wertvollen Beitrag zu meiner Arbeit danken.

Meinen Kolleginnen und Kollegen sowie allen Angestellten des Stahlbaulehrstuhls gebührt Dank für die stets kooperative Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich in jeder Hinsicht unterstützte und mir auch in den „zähen“ Phasen der Arbeit die notwendige Motivation vermittelte um weiterzumachen.

Inhaltsverzeichnis

A ZIELSETZUNG	1
1 Einführung	2
1.1 Das Prinzip der Nachhaltigkeit	2
1.2 Problemstellung im Bauwesen.....	3
1.2.1 Zahlen und Fakten im Baubereich.....	4
1.2.2 Forderungen an nachhaltiges Bauen.....	5
1.2.3 Aufgabe des Planers	6
1.3 Forschungs- und Wissenslücken.....	7
1.4 Fragestellungen	8
B STAND DES WISSENS	9
2 Nachhaltigkeit im Bauwesen: Vorschriften und Umsetzung	10
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen	10
2.1.1 Umweltrecht	10
2.1.2 Baurecht.....	10
2.2 Internationale, europäische und nationale Normen	13
2.3 Sonstige Initiativen	15
2.4 Methoden und Werkzeuge	16
2.4.1 Aufteilung in Kategorien, Unterkategorien und Indikatoren	17
2.4.2 Ökobilanz (Life-Cycle-Analysis)	17
2.4.3 Lebenszykluskostenanalyse (Life-Cycle-Cost-Analysis).....	27
2.4.4 Soziale Verantwortung (Corporate Social Responsibility)	29
2.4.5 Automatisierung durch Software-Tools	30
2.4.6 Internetbasierte Simulation des Ressourcenverbrauchs von Bauwerken	30
2.5 Schlussfolgerung.....	32
3 Aluminium im Bauwesen	34
3.1 Verbrauch.....	34
3.2 Materialeigenschaften	36
3.2.1 Physikalische und mechanische Eigenschaften.....	36
3.2.2 Möglichkeiten der Verarbeitung.....	38
3.2.3 Nutzung	39
3.2.4 Entsorgung bzw. Wiederverwertung	44
3.2.5 Aluminium in der Planungsarbeit.....	44

3.3	Situationsanalyse in der Baupraxis	45
3.3.1	Befragung von Metallbauern und Architekturbüros.....	45
3.3.2	Gründe für den Einsatz von Aluminium in der Praxis	48
3.3.3	Bedenken beim Einsatz von Aluminium in der Praxis.....	49
3.3.4	Stand der Dinge - Metallbauer	50
3.3.5	Stand der Dinge - Planer.....	50
3.4	Schlussfolgerung.....	52
C	GANZHEITLICHE ANALYSE VON ALUMINIUMBAUTEILEN	53
4	Bemessung	54
4.1	Relevante Normen und aktuelle Entwicklungen.....	54
4.1.1	DIN-Normen.....	54
4.1.2	EN-Normen	54
4.2	Gegenüberstellung der Bemessungskonzepte von EC 9 und DIN 4113.....	56
4.2.1	Bemessungsgrundlagen	56
4.2.2	Standardnachweise der Tragfähigkeit für Bauteile	62
4.2.3	Standardnachweise der Tragfähigkeit für Verbindungsmittel.....	70
4.3	Schlussfolgerung.....	75
5	Ökologie.....	77
5.1	Stoffstrom von Aluminium	77
5.1.1	Produktion von Primäraluminium	78
5.1.2	Recycling - Produktion von Sekundäraluminium	88
5.1.3	Entwicklungen und Tendenzen der (deutschen) Aluminiumindustrie	96
5.2	Sachbilanzen für Aluminiumbauteilen	98
5.2.1	Häufig verwendete Datenbanken in Deutschland – Inhalt und Unterschiede..	98
5.2.2	Vergleich der Datenbanken EAA, EcoInvent 1.1 und GEMIS 4.2	100
5.3	Dokumentation ökologischer Studien von Aluminiumbauteilen.....	108
5.3.1	Vergleich von Fensterkonstruktionen (EMPA, 1996; Richter, 1996).....	108
5.3.2	Vergleich von Fenster- und Fassadenkonstruktionen (IKP, 1998)	108
5.3.3	Vergleich von Außenwandkonstruktionen (Ryberg & Eriksson, 1999)	109
5.3.4	Aluminiumanwendungen in Gebäuden (SINTEF 2001a, 2001b)	110
5.3.5	Energiewerte verschiedener Aluminiumbauteile (EMPA, 2004).....	110
5.3.6	Vergleich unterschiedlicher Fassadenelemente (Buxmann, 2004b)	111
5.3.7	Dachbleche und Fassadenflächen (Hillenbrand et al., 2004)	111
5.3.8	Transparente Aluminium-Glas-Fassaden (Wicona, 2005)	112

5.3.9 Diskussion der dargestellten Studien.....	113
5.4 Schlussfolgerung.....	114
6 Wirtschaftlichkeit	115
6.1 Materialkosten von Aluminium	115
6.1.1 Preisentwicklung von Primäraluminium	115
6.1.2 Preisentwicklung von Sekundäraluminium.....	116
6.1.3 Kosten von Aluminium- und Stahlprodukten.....	117
6.2 Kostenfaktoren während des Lebenszyklus von Aluminiumbauteilen.....	118
6.2.1 Planung	118
6.2.2 Herstellung	119
6.2.3 Nutzung	120
6.2.4 Rückbau und Recycling.....	120
6.3 Lebenszykluskostenanalyse (LCCA).....	121
6.3.1 Kapitalwertmethode.....	121
6.3.2 Festsetzung des Kalkulationszins	121
6.4 Dokumentation ökonomischer Studien von Aluminiumkonstruktionen	123
6.4.1 Herstellungskosten von Aluminium- und Stahlbrücken.....	123
6.4.2 LCCA von Fußgängerbrücken.....	124
6.4.3 LCCA einer Aluminiumbrücke (Höfle, 2004)	125
6.4.4 LCCA einer Aluminium- und einer Stahlbrücke (PML, 2005).....	127
6.4.5 Diskussion der dargestellten Studien.....	127
6.5 Trends bei Finanzierung und Kapitalvergabe	128
6.5.1 Betreibermodelle (BOT, BOO)	128
6.5.2 Basel II.....	129
6.6 Schlussfolgerung.....	130
D GANZHEITLICHE BEWERTUNG VON ALUMINIUMBAUTEILEN	132
7 Pfosten-Riegel-Fassaden	133
7.1 Varianten.....	133
7.2 Bemessungstechnische Aspekte.....	136
7.2.1 Parameterstudie	136
7.2.2 Vergleich DIN 4113 – EC 9	139
7.3 Ökologische Bewertung.....	142
7.3.1 Auswahl der Systeme und funktionelle Einheit	142
7.3.2 Modellierung	143

7.3.3	Wirkungsabschätzung und Bewertung	144
7.4	Anwendung der EnEV	149
7.5	Lebenszykluskostenanalyse	150
7.5.1	Systeme, Kostendaten und Modellierung.....	150
7.5.2	Ergebnisse.....	151
7.6	Wertung des Softwarekonzepts von Ekkerlein & Neuberg (2004)	153
7.7	Schlussfolgerung.....	154
8	Schilderbrücken.....	156
8.1	Varianten.....	156
8.2	Bemessungstechnische Aspekte.....	158
8.2.1	Definition relevanter Lastfälle.....	158
8.2.2	Vergleich DIN 4113 - EC 9.....	159
8.3	Ökologische Bewertung.....	166
8.3.1	Auswahl der Systeme und funktionelle Einheit	166
8.3.2	Modellierung	166
8.3.3	Wirkungsabschätzung und Bewertung	167
8.4	Lebenszykluskostenanalyse	173
8.4.1	Systeme, Kostendaten und Modellierung.....	173
8.4.2	Ergebnisse.....	174
8.5	Schlussfolgerung.....	178
9	Dachkonstruktionen	180
9.1	Varianten.....	180
9.2	Bemessungstechnische Aspekte.....	181
9.2.1	Entwurf und Optimierung.....	181
9.2.2	Ergebnisse der Tragwerksoptimierung.....	182
9.3	Ökologische Bewertung.....	184
9.3.1	Auswahl der Systeme und funktionelle Einheit	184
9.3.2	Modellierung	184
9.3.3	Wirkungsabschätzung und Bewertung	184
9.4	Lebenszykluskostenanalyse	189
9.4.1	Modellierung bzw. Annahmen	189
9.4.2	Ergebnisse.....	189
9.5	Schlussfolgerung.....	192

E FOLGERUNGEN	193
10 Fazit und Ausblick	194
10.1 Wissenschaftliches Fazit	194
10.2 Baupraktisches Fazit	196
10.3 Ausblick	197
11 Zusammenfassung	198
12 Literatur	200
13 Normenverzeichnis	213
Abkürzungsverzeichnis.....	218
Abbildungsverzeichnis	221
Tabellenverzeichnis.....	225

ANHANG

Anhang A zu Kapitel 3	A1
A.1 Fragebögen für Metallbauer	A2
A.2 Fragebögen für Architekten	A16
Anhang B zu Kapitel 7	B1
B.1 Vergleich DIN 4113 – EC 9 bei den Fassadensystemen	B2
B.2 Masseverteilung der Fassaden 1 bis 6.....	B6
B.3 Wirkungsabschätzung und Bewertung der Fassadensysteme	B8

A Zielsetzung

1 Einführung

1.1 Das Prinzip der Nachhaltigkeit

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ wird seit ca. 10 Jahren alltäglich und in nahezu jedem Zusammenhang verwendet. Dies geschieht jedoch häufig ohne ein tatsächliches Verständnis der Hintergründe.

Tatsächlich stammt die Bezeichnung „Nachhaltigkeit“ aus der Forstwirtschaft und wurde zum ersten Mal im Jahr 1713 von Hanns Carl von Carlowitz verwendet (zitiert in Weber-Blaschke & Faulstich, 2003). Carlowitz ruft dazu auf, nur soviel Holz zu nutzen, wie nachwächst oder neu angebaut wird. Dadurch soll eine kontinuierliche, beständige und nachhaltige Nutzung erreicht werden, um das Land in seinem gegenwärtigen Zustand zu erhalten.

160 Jahre später, im Jahre 1972, wurde erneut zum „nachhaltigen Wirtschaften“ gemahnt. Auslöser hierfür waren die Ergebnisse des Berichts „The Limits to Growth“ von Meadows et al. (1972). Die Analyse der globalen Zukunft unter den Gesichtspunkten Technologie, Bevölkerung, Ernährung, Ressourcen und Umwelt resultierte demnach in einen Systemkollaps. Basierend auf zunehmender Umweltverschmutzung und unkontrolliertem Bevölkerungsbzw. Industriewachstum wurde spätestens bis zum Jahre 2100 das Erreichen der Wachstumsgrenzen und folglich ein Versagen des globalen Systems prognostiziert. Man rief daher zur Umkehr in Form von Wachstumsbeschränkung und nachhaltiger Wirtschaftsweise auf.

Die erste international anerkannte Definition der Nachhaltigkeit ist im Brundtland-Bericht „Our Common Future“ der UNO-Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (WCED, 1987) enthalten. Nachhaltigkeit wird dabei definiert als „eine Entwicklung, welche die heutigen Bedürfnisse zu decken vermag, ohne für künftige Generationen die Möglichkeiten zu schmälern, ihre eigenen Bedürfnisse zu decken“.

Der Weltgipfel für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro 1992 gilt schließlich als Meilenstein der „nachhaltige Entwicklung“. Mit dem Aktionsprogramm Agenda 21 verpflichteten sich 178 Staaten die Verantwortung für die bisher entstandenen weltweiten Umweltschäden zu übernehmen sowie konkret zu handeln, um die Umweltsituation zu verbessern und Ressourcen zu schonen. Grundlage für diese Ziele sind langfristiger sozialer und wirtschaftlicher Fortschritt in Verbindung mit einem dauerhaften Schutz von Umwelt und Ressourcen. Folglich werden Ökologie, Ökonomie und gesellschaftliche Belange als drei gleichwertige Bereiche definiert (vgl. Abb. 1.1). Individuelles, gesellschaftliches, wirtschaftliches und politisches Handeln sollen sich dementsprechend gleichrangig an ökonomischen, ökologischen und sozialen Zielsetzungen orientieren.

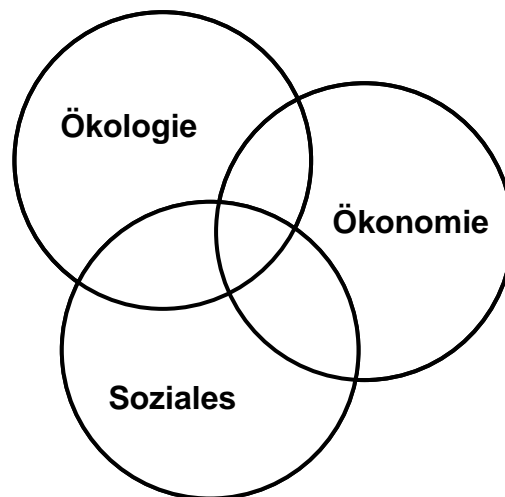


Abb. 1.1: Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit nach Agenda 21

Im Zuge der Rio-Konferenz im Jahr 1992 folgte eine Reihe von Aktivitäten, um eine nachhaltige Entwicklung in Gang zu setzen. International wurden verschiedene Gremien und Arbeitsorgane gegründet, Konferenzen durchgeführt, Leitfäden und Maßnahmenkataloge erarbeitet sowie unterschiedliche Werkzeuge und Methoden zur quantitativen Bewertung entwickelt. In Deutschland haben Bundesregierung und Wirtschaftsverbände, wie zum Beispiel der Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI), das Leitbild der Nachhaltigkeit bereits anerkannt und zum Grundprinzip ihrer Handlungen erklärt. Auch die Gesellschaft ist mittlerweile auf diese Thematik sensibilisiert und fordert zunehmend die Bewertung politischer und wirtschaftlicher Aktivitäten unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit.

1.2 Problemstellung im Bauwesen

Schon lange bevor der Begriff „Nachhaltigkeit“ modern wurde, sind innerhalb des Bausektors Anstrengungen unternommen worden, um Ressourcen zu schonen und Stoff- und Energieströme zu minimieren: Nach dem ersten Weltkrieg wurden Bauprodukte und Bauwerke nach ihrem für die Herstellung benötigten Kohlebedarf bewertet. In den zwanziger Jahren wurde bereits der Kohleverbrauch für Herstellung und Beheizung verschiedener Außenwandkonstruktionen verglichen (Lützkendorf, 1999). Wegen der Ölkrise¹ wurde in den 80er Jahren damit begonnen, den Ressourcenverbrauch von Bauwerken zu optimieren.

Im Laufe der 90er Jahre identifizierte man den Bausektor zunehmend als maßgebenden Einflussfaktor auf Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Die Habitat II Agenda² definierte im Jahre 1996 zudem die Bauindustrie zusammen mit dem Baubestand als die zwei Schlüsselbereiche einer nachhaltigen Entwicklung.

¹ Drastische Erhöhung der Erdölpreise von 2,83 Dollar für einen Barrel Rohöl (159 Liter) im Jahr 1973 auf 36,15 Dollar im Jahr 1980.

² Agenda der 2. Konferenz der Vereinten Nationen über "Human Settlements" in Istanbul, 3.-14. Juni 1996.

1.2.1 Zahlen und Fakten im Baubereich

Soziales

Sämtliche Grundbedürfnisse des Menschen werden durch bauliche Anlagen wie z. B. Wohnungs-, Wirtschaftsbauten, Verkehrsanlagen, Einrichtungen der technischen, sozialen und kulturellen Infrastruktur gedeckt. Landschafts- und Städtebilder werden maßgeblich durch die Architektur von Gebäuden geprägt. Stil und Qualität der bebauten Umgebung wirken kennzeichnend für die Gesellschaft. Aufgrund des langfristigen und dauerhaften Charakters stehen Bauwerke auch künftigen Generationen zur Verfügung. In Deutschland beträgt die Aufenthaltsdauer von Menschen in Gebäuden während ihrer Lebenszeit ca. 90%. Sicherheit, Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen sind folglich eng mit der Erstellung und Nutzung von Gebäuden verknüpft (Graubner & Hülske, 2003).

Ökonomie

Bauwerke, insbesondere Gebäude, gelten als die aufwändigsten und langlebigsten Wirtschaftsgüter (Kaup et al., 2003). Mit 12% des Sozialproduktes ist das Bauwesen bedeutsamster Industriezweig in Deutschland und schafft 8% aller Arbeitsplätze (Graubner & Hülske, 2003). Für Güterumsätze bzw. Roh- und Hilfsstoffe ist die Bauindustrie sogar der volkswirtschaftlich relevanteste Bereich. Deutschland ist darüber hinaus europaweit größter Markt für Bauprodukte (Ornth, 2003).

Ökologie

Bauaktivitäten haben aufgrund des Ressourcenverbrauchs und der Abfallproduktion in ökologischer Hinsicht maßgebliche Bedeutung: Ca. 50% aller der Natur entnommenen materiellen Ressourcen werden für den Bau benötigt (Anink et al., 1996). Täglich werden 130 Hektar Naturraum in Siedlungs- und Verkehrsflächen umgewandelt, wovon die Hälfte überbaut oder versiegelt wird (UBA, 2002). Mit 70% Anteil ist der Bausektor Umschlagplatz der größten Stoffströme in Deutschland (Kaup et al., 2003). Europaweit werden im Gebäudebereich 30% der CO₂-Emissionen produziert (Töpfer, 1997) und 40% der gesamten Primärenergie³ verbraucht (EU-Kommission, 2001). In Deutschland werden sogar fast 50% der verfügbaren Primärenergie für Erstellung und Unterhalt von Gebäuden benötigt. Der Anteil an erneuerbaren Energieträgern, z. B. Wasser, Wind, Biomasse und Sonne, beträgt dabei deutschlandweit nur ca. 2% (Ekkerlein, 2004). Ein Drittel des deutschen Energiebedarfs fällt allein im Bereich der Haushalte an (UBA, 2002). Im statistischen Mittel werden jährlich fast 23 Liter Heizöl, bzw. 23 m³ Erdgas pro Quadratmeter Wohnfläche verbraucht. Spitzenwerte von jährlich fast 50 Litern Heizölverbrauch pro Quadratmeter sind keine Seltenheit (Vorholz, 2004). Der Heizwärmebedarf des Gebäudebestandes liegt damit durchschnittlich um den Faktor acht höher als es nach derzeitigem Stand der Technik⁴ möglich wäre. Darüber hinaus ist die deutsche Bauwirtschaft mit 231 Mio. Tonnen Bauabfällen pro Jahr für ca. 60% Masse und ca. 80% Volumen des Gesamtabfallaufkommens verantwortlich und folglich größter deutscher Abfallproduzent (UBA, 2002). Zudem wird sich laut Prognose der Enquête-Kommission (1998) das Sondermüllaufkommen gegenüber dem Niveau von 2000 im Bau bis 2020 verdreifachen.

³ Primärenergie ist die von natürlichen, noch nicht weiterverarbeiteten Energieträgern (z. B. Kohle, Erdöl, Erdgas, Wasser, Wind, Sonne) stammende Energie.

⁴ Das „Drei-Liter-Haus“ benötigt lediglich drei Liter Heizöl pro Quadratmeter und Jahr. Seit 2004 werden sogar Zwei-Liter-Häuser gebaut (Hasit, 2004).

1.2.2 Forderungen an nachhaltiges Bauen

Die oben genannten Fakten zeigen, dass der Bausektor dringend gefordert ist, sich mit den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung auseinanderzusetzen. Dies bedeutet eine Bewertung zukünftiger Baumaßnahmen nicht nur nach ästhetischen und technischen, sondern zusätzlich nach soziokulturellen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten. Dabei sollte der gesamte Lebenszyklus (siehe Abb. 1.2) eines Bauwerks berücksichtigt werden.

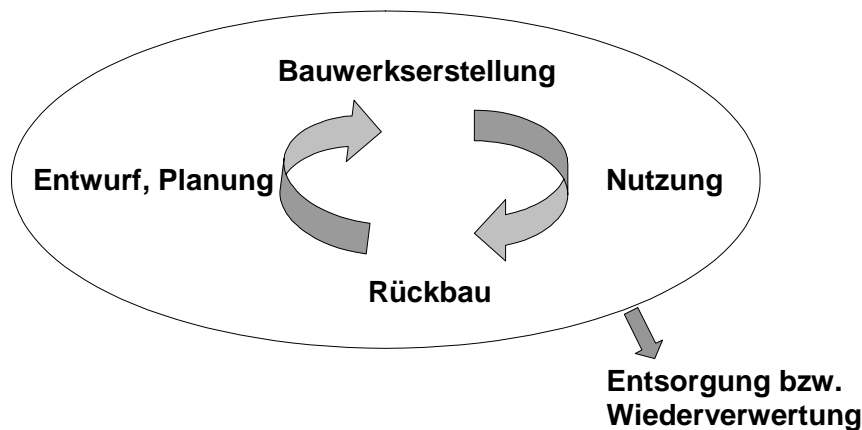


Abb. 1.2: Lebenszyklus eines Bauwerks

Nachhaltiges Bauen bedeutet somit nicht nur die Verwendung von umweltverträglichen Produkten, sondern umfasst vielmehr Analyse und Optimierung eines Bauwerks während der gesamten Lebensdauer.

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen definierte in diesem Zusammenhang folgende Schutzziele für nachhaltiges Bauen (BMVBW, 2001):

- Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen (Natur und Landschaft)
- Schutz der stofflichen und energetischen Ressourcen
- Schutz des Klimas
- Erhaltung des Kapitals
- Niedrige laufende Betriebs- und Unterhaltungskosten
- Schutz der menschliche Gesundheit
- Schutz gesellschaftlicher und kultureller Werte

Auf dieser Basis lassen sich folgende Grundsätze für die verschiedenen Phasen eines Bauwerks ableiten:

Bei **Entwurf und Planung** sollten gestalterische, ökologische, ökonomische und technische Aspekte sowie deren Auswirkung beachtet und optimiert werden. Nachhaltige Bauwerke sollten ein entsprechendes Identifikationspotenzial für Bewohner und Eigner aufweisen und soziokulturelle Aspekte berücksichtigen. Ein Bauwerk muss genügend Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit sowie ausreichenden Korrosionsschutz und Brandschutz gewährleisten und darf zudem die Gesundheit der Nutzer nicht beeinträchtigen. Wichtige Punkte sind außerdem die Schaffung eines angenehmen Raumklimas und die Erfüllung sämtlicher bauphysikalischer Anforderungen. Auch die Bauteilgeometrie gilt es zu optimieren, um dadurch den Nutzwert zu erhöhen und eine größere Verwendungsbreite zu schaffen. Bereits in der frühen Planungsphase sollte das Augenmerk auf minimalen Unterhaltsaufwand sowie auf optimale Weiter- und Wiederverwertung gelegt werden.

Die **Erstellung des Bauwerks** umfasst die Produktion der Bauteile, den Transport sowie die Montage. Der Aufwand für Transport von Baustoffen und Bauteilen sollte hierbei reduziert werden. Auch das Bauverfahren selbst ist von Bedeutung und sollte, z. B. durch einen hohen Vorfertigungsgrad, optimiert werden. Es gilt bedarfsgerechte Lösungen bei niedrigen Baukosten und effektiven Erstellungszeiten umzusetzen.

Für das Bauwerk sollte eine wirtschaftliche **Nutzung** angestrebt werden. Dies bedeutet den Energiebedarf und den Verbrauch von Betriebsmitteln zu minimieren. Außerdem soll der Aufwand für Wartungen gering gehalten werden. Ein hohes Maß an Dauerhaftigkeit sowie eine lange Lebens- bzw. Nutzungsdauer sind in diesem Zusammenhang erstrebenswert. Durch einen hohen Grad an Flexibilität und durch den Einsatz innovativer Technologien sollte zudem die Anpassung an wechselnde Nutzungszyklen ermöglicht werden. Durch Qualitätssicherung sollten sowohl Erstellungs- als auch Nutzungsphase des Bauwerks kontrolliert und dokumentiert werden.

Nach der Nutzung des Bauwerks sollte ein kontrollierter **Rückbau** mit selektiven Abbruchmethoden stattfinden und die Gewinnung von sortierten Baurestmassen vor Ort erfolgen. Konventioneller Abbruch mit Großgeräten ohne differenzierte Demontage und Sortierung sollte vermieden werden. Da sowohl die Menge der Primärbaustoffe als auch der Deponieraum begrenzt sind, sollten Bauabfälle und Entsorgungsquote minimiert werden. Gleichzeitig sollte die derzeitige Aufbereitungsquote gesteigert werden. Im Idealfall sollten alle Stoffe gefahrlos in den Stoffkreislauf rückgeführt werden können.

1.2.3 Aufgabe des Planers

Die Basis für nachhaltiges Bauen wird überwiegend in den Planungsphasen eines Bauwerks gelegt. Dabei ist die Einflussmöglichkeit am größten zum Zeitpunkt der Entwurfsplanung (siehe Abb. 1.3). Für ein nachhaltiges Bauwerk sind folglich Architekten und Ingenieure maßgeblich verantwortlich (Timm, 2003). Planer sind somit gefordert, Gebäuden und Ingenieurbauwerken auf Grundlage einer ganzheitlichen Betrachtung zu gestalten. Dies umfasst die Berücksichtigung von ästhetischen, konstruktiven und baustofftechnologischen Aspekten genauso wie ökologische und wirtschaftliche Betrachtungen.

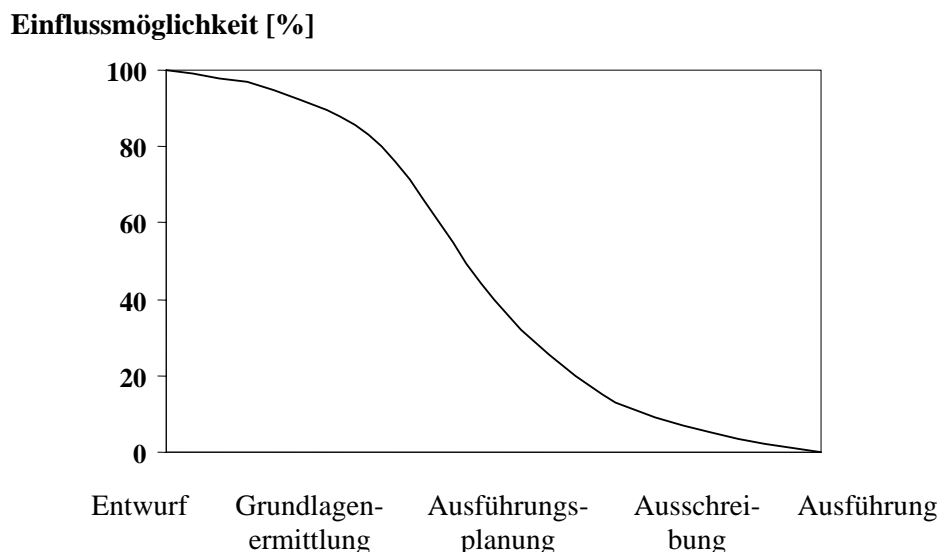


Abb. 1.3: Einflussmöglichkeit auf nachhaltiges Bauen (in Anlehnung an Schnell, 2001)

1.3 Forschungs- und Wissenslücken

Die Wahl der Baustoffe spielt in der Nachhaltigkeitsdiskussion eine große Rolle. Auch hier sind eine Orientierung an nachhaltigen Zielen und eine Auslegung auf den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks erforderlich. Grundsätzlich sollten daher nachwachsende, langfristig verfügbare oder wieder verwertbare Rohstoffe bevorzugt werden. Die Materialien sollten mit geringem (Primär-) Energieaufwand und minimalen Emissionsaufkommen hergestellt, verarbeitet, genutzt und wiederverwertet werden können. Schließlich sollten sie keine gesundheitlich bedenklichen Inhaltsstoffe aufweisen und das Raumklima nicht negativ beeinträchtigen.

Angesichts dieser Anforderungen stellt sich die Frage, wie sich umstrittene Baustoffe, zum Beispiel Aluminium, zukünftig etablieren werden. Kein anderer Baustoff wurde in der Vergangenheit im Hinblick auf Materialeigenschaften, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit in dem Maße kritisiert und viel diskutiert:

- In den 70er Jahren ergaben Energiebilanzen, dass energiebewusste Bauherren ihr Haus statt mit Aluminiumplatten mit Gold einkleiden sollten, da die Verhüttung von Gold im Vergleich zu Aluminium weit weniger Energie erfordere (Goetz, 1977).
- Nachdem 1985 während des Falklandkriegs das Schiff „Sheffield“ durch eine Rakete zerstört worden war, alarmierten Pressemeldungen wie z. B. „Aluminium brennt“ die Öffentlichkeit. Obwohl in Wirklichkeit das Munitionsdepot und das Öl im Maschinenraum brannten, wurden daraufhin in Deutschland Aluminiumanwendungen für Gebäude als „risikoreich“ bewertet und in U-Bahnen aufgrund der „Brandgefahr“ verurteilt.
- 1992 bezeichnete das World Watch Institute die Aluminiumherstellung als eine „der umweltschädlichsten Aktivitäten der Menschheit“.
- Bausenator Nagel (SPD) führte aus ökologischen Gründen 1995 in Berlin ein Aluminiumverbot bei öffentlichen Bauten ein.
- Das Bündnis 90/Die Grünen schrieb 1997 in der großen Anfrage an die Bundesregierung, dass „in kaum einem anderen Produkt das Missverhältnis zwischen betriebswirtschaftlichem Preis und volkswirtschaftlichen Kosten so offensichtlich wird wie bei Aluminium“.
- Die Berliner Jugendumweltzeitung betitelte 1998 Aluminium als „klimaschädigenden Baustoff“.
- Im Jahr 2002 wurde im ökologischen Kriterienkatalog der Stadt München die Verwendung von Aluminium für alle Bauvorhaben auf städtischen Grundstücken sowie im öffentlichen Wohnungsbau verboten. Ausnahmen bildeten Aluminiumrahmen für Fenster und Alurollos bei Büro- und Gewerbebauten sowie genehmigungspflichtige Einzelfälle.
- Die Verwendung von Aluminiumbauteilen wird mitunter als „wirtschaftliche Todsünde“ bezeichnet (Zitat Prof. Barthel, TU München, 2002).

Tatsache ist, dass die Aluminiumproduktion eine erhebliche Menge an Primärenergie benötigt und im Vergleich zu anderen Baustoffen mit relativ hohen Materialkosten verbunden ist. Gleichzeitig bietet Aluminium allerdings interessante Potenziale, wie z. B. geringes Gewicht, Formbarkeit, natürlichen Korrosionsschutz und Recyclingfähigkeit, die sich insbesondere bei lebenszyklusorientierten Betrachtungen positiv auswirken.

Es gilt somit zu untersuchen, inwieweit diese Potenziale oben genannte Kritikpunkte widerlegen könnten. Eine konkrete ganzheitliche Bewertung von Aluminiumbauteilen, d. h. sowohl von (bemessungs-)technischen, ökologischen als auch wirtschaftlichen Aspekten, wurde bisher nicht durchgeführt. Ebenso wurde der Stellenwert im Vergleich zu anderen Materialien, z. B. Stahl, noch nicht wissenschaftlich untermauert.

1.4 Fragestellungen

Ziel dieser Arbeit ist es, den Stellenwert von tragenden Aluminiumkonstruktionen angesichts der Nachhaltigkeitsdiskussion ganzheitlich zu untersuchen und zu bewerten. Da die Anfangsphase eines Bauobjekts maßgeblichen Einfluss auf den nachhaltigen Charakter eines Bauwerks ausübt (vgl. Abb. 1.3), liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf Bereichen, die von Planern/Bauingenieuren direkt beeinflusst werden. Dabei spielt der Bemessungsprozess eine wichtige Rolle. Dieser steuert sowohl die Gestaltungsmöglichkeiten, den Materialverbrauch, die Verbindungstechnik als auch die Handhabbarkeit. Dadurch ist eine unmittelbare Beziehung zu Umweltwirkungen, wie z. B. Energie- und Ressourcenverbrauch, und zur Wirtschaftlichkeit gegeben. Folglich sind all diese Bereiche Kernpunkte der Untersuchungen.

Im Einzelnen ergeben sich demnach folgende Fragestellungen:

- Welche Gesetze, Normen und sonstige Aktivitäten forcieren eine nachhaltige Entwicklung im Bau und sind für Planer/Bauingenieure bei der Umsetzung relevant? Welche Methoden und Werkzeugen stehen zur konkreten Bewertung zur Verfügung? Hierzu wird zunächst eine Übersicht der Regelwerke und aktuellen Entwicklungen gegeben. Im Anschluss daran werden einschlägige Verfahren und Ansätze vorgestellt und Methoden zur Untersuchung von tragenden Aluminiumkonstruktionen ausgewählt (vgl. Kapitel 2).
- Wie ist der Stand der Dinge von Aluminium im Bauwesen? Diese Frage wird zum einen durch die Darstellung von aktuellen Zahlen und baustofftechnologischen Aspekten und zum anderen durch eine Situationsanalyse der Baupraxis mit Hilfe von Fragebögen beantwortet (vgl. Kapitel 3).
- Welches sind die aktuellen Entwicklungen bei der Bemessung von Aluminium und welche Norm liefert das effizientere Verfahren bzw. die günstigeren Ergebnisse? In diesem Zusammenhang werden die Nachweisverfahren der nationalen Norm DIN 4113 und der europäischen Norm Eurocode 9 erstmalig gegenübergestellt und deren Auswirkung auf die Bemessung von Aluminiumkonstruktionen dargelegt (vgl. Kapitel 4).
- Wie werden ökologische Bewertungen von Aluminium korrekt durchgeführt? Hierfür werden der Aluminiumstoffstrom und seine Charakteristiken dargestellt, Sachbilanzdaten und Wirkkategorien dreier Datenbanken zum ersten Mal verglichen und bestehende ökologische Studien von Aluminiumbauteilen analysiert (vgl. Kapitel 5).
- Welches sind die wirtschaftlichen Charakteristiken von Aluminiumkonstruktionen und wie kann eine entsprechende Bewertung erfolgen? Zu diesem Zweck werden die Einflussfaktoren der Materialkosten dargestellt, die Lebenszykluskosten von Bauanwendungen aufgeführt und diskutiert sowie aktuelle Entwicklungen aufgezeigt (vgl. Kapitel 6).
- Wie können die Informationen und Ergebnisse der Kapitel 2 bis 6 im Rahmen einer ganzheitlichen Bewertung angewandt werden? Welche Resultate ergeben sich daraus für Aluminiumkonstruktionen? Wie fällt der Vergleich mit entsprechenden Stahlanwendungen aus? Zur Beantwortung dieser Fragen werden im Rahmen einer Variantenstudie erstmalig drei konkrete Bauobjekte aus Aluminium und Stahl sowohl unter bemessungstechnischen als auch ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Neu bei diesen Betrachtungen ist zudem die Kombination von statischen Nachweisen mit Ökobilanzen und Lebenszykluskostenanalysen (vgl. Kapitel 7 bis 9).
- Wie lässt sich der Aluminiemeinsatz in der Baupraxis letztlich bewerten? Hierzu werden Empfehlungen für die Bemessung, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit gegeben sowie Randbedingungen für den optimalen Einsatz abgeleitet. Außerdem werden von Wissenschaft und Praxis noch zu schließenden Wissenslücken dargelegt (vgl. Kapitel 10).

B Stand des Wissens

2 Nachhaltigkeit im Bauwesen: Vorschriften und Umsetzung

Es stellt sich die Frage, welche Gesetze, Normen und sonstige Aktivitäten für eine nachhaltige Entwicklung im Bau von Relevanz sind, und welche Methoden dem Planer/Bauingenieur bei der praktischen Umsetzung zur Verfügung stehen. Nachstehend werden daher entsprechende Vorschriften vorgestellt, konkrete Verfahren und Werkzeuge für eine ganzheitliche Bewertung im Bauwesen erläutert und passende Methoden für tragende Aluminiumkonstruktionen ausgewählt.

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Für „Nachhaltiges Bauen“ bzw. „Nachhaltige Bauwerke, Bauprodukte und Baumaterialien“ stehen bisher keine expliziten Vorschriften zur Verfügung. In vielen verbindlichen Regelwerken sind bereits allgemeine Grundsätze enthalten, welche deutlich in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung bzw. einer ganzheitlichen Bewertung im Bauwesen weisen. Beispiele hierfür sind die Gesetze des Umweltschutz (vgl. 2.1.1) sowie das Baurecht (vgl. 2.1.2).

2.1.1 Umweltrecht

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Umweltschutz sind auch für Baumaßnahmen verbindlich einzuhalten. Insbesondere nachstehende Gesetze sind von Bedeutung:

- Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP): Prüfung der Auswirkung eines (Bau-) Vorhabens auf die Umwelt
- Bundesimmissionsschutzgesetz (BIMSchG): Verhinderung von Luftverschmutzung, Gewässerverunreinigung, Lärm und Erschütterung durch Vorgabe von Grenzwerten
- Chemikaliengesetz (ChemG): Schutz des Menschen und der Umwelt vor schädlichen Einwirkungen gefährlicher Stoffe
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG): Richtwerte zur Vermeidung von Gewässerverschmutzung
- Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG): Sicherung bzw. Wiederherstellung der nachhaltigen Funktionen des Bodens
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG): Förderung der Verwendung erneuerbarer Energien
- Energieeinsparungsgesetz (EnEG): Gewährleistung der Energieeinsparung im Baubereich

2.1.2 Baurecht

2.1.2.1 Bauordnungsrecht

Unter dem Bauordnungsrecht sind diejenigen Vorschriften zu verstehen, die sich mit dem „Wie“ der Bebauung eines Grundstücks befassen und über die Landesbauordnungen umgesetzt werden. Vorlage hierfür ist die so genannte Musterbauordnung (MBO, 2002).

Die Vorschriften umfassen Bestimmungen für die Bauabnahme, die Aufgaben der Bauaufsicht, die bautechnische Sicherheit, die Schall- und Wärmeisolierung sowie der Feuerschutz.

Ziel dabei ist es, die Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung durch die Errichtung und Nutzung baulicher Anlagen zu vermeiden. Oberste Priorität ist somit der Schutz von Leben, Gesundheit und natürliche Lebensgrundlagen.

2.1.2.2 Bauproduktenrichtlinie und Bauproduktengesetz

Im Zuge der Schaffung eines gemeinsamen Binnenmarktes forcierte die EU die Harmonisierung technischer Vorschriften für Bauprodukte. Als Folge davon wird die erforderliche europäische, technische Zulassung für Bauprodukte auf Grundlage der europäischen Bauproduktenrichtlinie (BPR, 2003) erteilt. In Deutschland ist hierfür das Bauproduktengesetz (BauPG, 2004) maßgebend und wird durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) durchgesetzt.

Bauprodukte dürfen nach BPR demnach nur dann verwendet werden, wenn mit ihnen das Bauwerk, in das sie eingebaut werden sollen, bei ordnungsgemäßer Planung und Bauausführung die folgenden wesentlichen Anforderungen erfüllen kann:

- Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
- Brandschutz
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
- Nutzungssicherheit
- Schallschutz
- Energieeinsparung und Wärmeschutz

Diese Anforderungen dienen als Grundlage für sämtliche harmonisierte europäische Normen (siehe 2.2) und europäische technische Anerkennungen.

2.1.2.3 Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI)

Der Leistungsumfang während des Planungsablaufs nach HOAI (1995) enthält nicht nur technische Anforderungen, sondern beinhaltet auch Aspekte mit deutlichem Bezug zur ökologischen und wirtschaftlichen Bewertung:

Bei der Grundlagenermittlung nach HOAI §15 sind Architekten und Ingenieure verpflichtet, den realen Baubedarf im Rahmen einer Grundleistung abzuklären. Als so genannte „Besondere Leistung“ können dabei allerdings Prüfungen der Umwelterheblichkeit und Umweltverträglichkeit des Baubedarfs fällig werden. Ein weiteres Beispiel ist in der Vorplanungsphase nach HOAI § 15 zu finden. Im Rahmen einer Grundleistung sind hier energiewirtschaftliche Fragen, landschaftsökologische Zusammenhänge sowie die Belastung und Empfindlichkeit betroffener Ökosysteme zu klären. Zusätzlich können „Besondere Leistungen“ in Form von konkreten Untersuchungen zur Verringerung des Energieverbrauchs, der Schadstoffemissionen und zur Nutzung erneuerbarer Energien beauftragt werden.

Im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit sind während der Vorplanung, der Entwurfsplanung, der Mitwirkung bei der Vergabe sowie bei der Objektüberwachung Kostenschätzungen nach DIN 276 als Grundleistung erforderlich. Auch hierbei können besondere Leistungen in Form von Kosten-Nutzen-Analysen, Mitwirkung bei der Kreditbeschaffung, Variantenstudien oder Wirtschaftlichkeitsberechnungen fällig werden (Jochem, 1998).

Die besonderen Leistungen werden in der HOAI nicht bewertet. Sie können daher nur abgerechnet werden, wenn das Honorar schriftlich vereinbart wurde. Von Seiten der Investoren werden Forderungen nach „Besonderen Leistungen“ aus Kostengründen möglichst vermieden. Folglich sind Architekten und Ingenieure nach HOAI zwar theoretisch zum Handeln im Sinne der Nachhaltigkeit verpflichtet, praktisch jedoch selten damit konfrontiert, weil diese Leistung nicht bezahlt wird.

2.1.2.4 EU-Richtlinie „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“

Da Gebäude maßgeblich für den Energieverbrauch und die Entstehung von Emissionen verantwortlich sind, wurde von der EU-Kommission die EU-Richtlinie „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ (EU-Richtlinie, 2002) beschlossen. Hintergründe dieser Richtlinie sind zum einen die Klimaschutzziele der EU im Rahmen des Kyoto-Protokolls (1997). Zum anderen soll die Abhängigkeit von der externen Energieversorgung verringert werden. Um dies zu erreichen, werden folgende Maßnahmen gefordert:

- Festlegung von Kriterien zur ganzheitlichen Beurteilung der Energieeffizienz von Gebäuden (z. B. durch Einbeziehung von Wärmedämmung, Heizungs- und Klimaanlage)
- Verpflichtung zur Anwendung von Mindeststandards für neue und bestehende Gebäude
- Inspektion und Effizienzkontrollen bei Heizkesseln und Klimaanlage
- Festlegung und regelmäßige Aktualisierung von Mindestnormen für den Energiebedarf
- Verfügbarkeit von Energieausweisen

Die EU-Richtlinie ist bis spätestens 4. Januar 2006 von allen Mitgliedsstaaten in nationale Rechtsvorschriften umzusetzen (BMVBW, 2004a). Dementsprechend wurde das Energieeinsparungsgesetz (EnEG) novelliert, welches die rechtliche Grundlage für die 2001 im Bundesgesetzblatt eingeführte „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden“ – kurz EnEV (2004) - darstellt.

Die EnEV gilt seit Februar 2002 verpflichtend für alle Neubauten. Sie wird seitdem ständig weiterentwickelt und ersetzt die ursprüngliche Wärmeschutz- und Heizungsanlagenverordnung. Ab 2006 soll die EnEV auch die energiesparrechtlichen Inhalte der EU-Richtlinie abdecken, z. B. den Energiepass im Baubestand, die Berücksichtigung des Energiebedarfs für Beleuchtung und Kühlung von Nicht-Wohngebäude, etc. In Deutschland sollen diese Anforderungen mit Hilfe der Norm DIN 18599 (vgl. 2.2) umgesetzt werden.

2.1.2.5 Vorschriften zur Entsorgung von Baurestoffmassen

Ziel des Kreislaufwirtschafts-Abfallgesetzes (KrW-/AbfG, 1997) ist die Förderung der Kreislaufwirtschaft und die umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. Produkte sind so zu gestalten, dass die Abfallmenge während der Produktlebensdauer minimiert und eine umweltfreundliche Verwertung bzw. Beseitigung sichergestellt wird. Grundsätzlich hat die Abfallvermeidung Priorität. Unvermeidliche Abfälle sind in hierarchischer Reihenfolge wieder-, weiter- oder energetisch zu verwerten (vgl. Abb. 2.1).

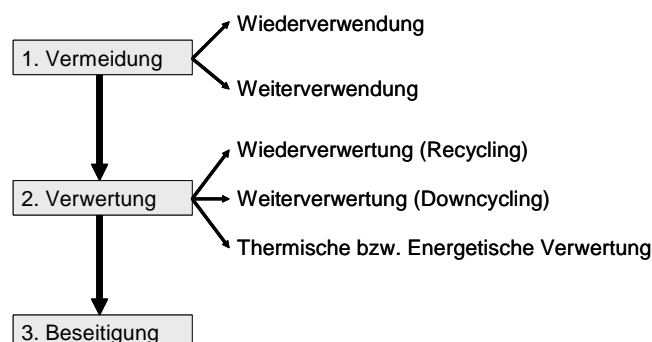


Abb. 2.1: Entsorgung gemäß der Kreislaufwirtschaft (Graubner & Hülske, 2003)

Das KrW-/AbfG ist auch auf die Abfälle aus Baumaßnahmen anzuwenden. Metalle gehören dabei als nichtmineralische Baustoffe mit geringfügigen Fremdanteilen zur Gruppe der Baustellenabfälle und sollten entweder wieder- oder weiterverwertet werden.

2.2 Internationale, europäische und nationale Normen

In nationalen als auch in internationalen Normen für das Bauwesen werden zunehmend nachhaltige Aspekte berücksichtigt. Im Folgenden werden aktuelle Normungsprojekte vorgestellt, deren Fokus auf nachhaltigen Bauweisen im Sinne von Ressourcenschutz und Lebenszyklusorientierung liegt.

ISO TC 59

Das internationale technische Komitee für das Bauwesen ISO (TC 59) initiierte im Jahr 2002 ein Normungsprojekt für nachhaltiges Bauen (SC17 'Sustainability in Building Construction'). Folgende Themen werden dabei bearbeitet:

1. Allgemeine Grundsätze und Terminologie
2. Nachhaltigkeitsindikatoren
3. Umweltdeklaration von Bauprodukten bzw. ISO Typ-III-Deklaration
4. Bewertung und Wirkung von Gebäuden auf die Umwelt

Die allgemeinen Grundsätze (WG 1) und die Indikatoren (WG 2) behandeln sowohl wirtschaftliche, ökologische als auch soziale Aspekte des Bausektors. Die Deklaration von Bauprodukten (WG 3) und die Gebäudebewertung (WG 4) werden hingegen vorerst nur unter Umweltgesichtspunkten bearbeitet.

Ein weiteres Normungsprojekt (SC14 'Design Life of Buildings') innerhalb des ISO (TC 59) bearbeitet derzeit die Lebensdauer von Bauwerken im Hochbau. Hierbei werden u. a. die Lebenszykluskosten (vgl. 2.4.3) im Ausschuss ISO/AWI 15686-5 behandelt.

ISO TC 207

Innerhalb des ISO TC 207 werden die Normen des ISO 14000 ff. bearbeitet. Hierdurch werden neben Messgrößen und Bestimmungen für das Umweltmanagement gleichzeitig die Umweltdeklarationen nach ISO geregelt. Dabei unterscheidet man drei verschiedene Arten:

- Typ I nach ISO 14024 umfasst Umweltzeichen für Produkte, die nach ökologischen Kriterien zu den besten in ihrer Vergleichsklasse gehören (z. B. Blauer Engel.).
- Typ II regelt die Selbstdeklaration nach ISO 14021. Hier sind die zu erfüllenden Kriterien frei wählbar bzw. durch Firmen oder Verbände festgelegt (z. B. Wasserverbrauch, "Chlorfrei gebleicht"). Für die veröffentlichten Aussagen ist der Hersteller verantwortlich. Die Methode wird somit vorwiegend für das Marketing verwendet.
- Typ III beinhaltet die Umweltdeklaration nach ISO 14025. Diese umfasst die objektive Darstellung der Umweltleistungen von Baumaterialien und -produkten. Komplexe Bauteile und Gebäude sollen durch Aufsummieren der einzelnen Komponenten abgebildet werden. Die Erfassung der Umweltleistung basiert hauptsächlich auf der Methodik der Ökobilanzierung (vgl. 2.4.2).

Die deutsche Umweltdeklaration Typ III für Bauprodukte entsteht bei der Arbeitsgemeinschaft umweltverträgliche Bauprodukte (AUB) in Kooperation mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und dem Umweltbundesamt. Die zurzeit aktiven Produktgruppenforen der AUB behandeln die Materialien Ziegel, Beton, Holz, Dämmstoffe sowie Zink und Kupfer. Aluminium fehlt bisher im Arbeitsprogramm der AUB.

Europäische Normung

Auf europäischer Ebene werden derzeit folgende Normen für die Energieeffizienz von Gebäuden erarbeitet:

- CEN TC 89 'Thermal Performance of Buildings and Building Components'
- CEN TC 156 'Ventilation for Buildings'
- CEN TC 169 'Light & Lightning'
- CEN TC 228 'Heating System in Buildings'
- CEN TC 247 'Building Management'

Im Februar 2004 wurde zudem von der Europäische Kommission ein Mandat zur ISO-Typ-III-Umweltdeklaration für Bauprodukte an die europäische Normenreihe (CEN) gegeben.

Deutsche Normung

Zum Projekt SC17 'Sustainability in Building Construction' des ISO TC 59 wurde im Normenausschuss Bauwesen (NABau) des Deutschen Instituts für Normung (DIN) der Spiegelausschuss **01.03.01** gegründet.

Zudem hat sich Deutschland zum Ziel gesetzt, mit Einführung der EnEV den Energiebedarf im Gebäudebereich um rund 30% zu reduzieren. Maßgebender Bewertungsparameter ist dabei der Jahresprimärenergiebedarf⁵ der Gebäude. Dieser wird nach **DIN V 4108-6** „Wärmeschutz im Hochbau“ auf Grundlage der bauphysikalischen Eigenschaften (z. B. Lüftungsverlust, Wärmebrücken, solare Ausbeute, etc.) der Gebäudehülle berechnet. Neu ist dabei im Gegensatz zu älteren Vorschriften die Berücksichtigung des sommerlichen Wärmeschutzes.

Mit Hilfe von **DIN V 4701-10** „Bewertung der Anlagentechnik“ werden die Erfassung der Anlagentechnik sowie die energetische Bewertung des Gesamtgebäudes durchgeführt. Erstmals werden dabei der Energiebedarf für die Warmwasserversorgung und die Hilfsenergien für Heizkreis-, Ladepumpen und Ventilatoren mitberechnet. Zudem wird der Energieverbrauch sämtlicher vorgelagerter Prozessketten, d. h. ab der Rohstoffgewinnung bis hin zur Energiebereitstellung, mit einbezogen. In diesem Zusammenhang spielt die DIN EN 832 „Heizenergiebedarf von Wohnbauten“ eine maßgebliche Rolle. Der Einfluss erneuerbarer Energiequellen wird ebenfalls einkalkuliert.

Auf Grundlage von **DIN V 18599** sollen voraussichtlich ab 2006 die EU-Richtlinie bzw. die EnEV 2006 in der Beratungs- und Planungspraxis umgesetzt werden. Die Normenreihe stellt ein Verfahren zur Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden zur Verfügung. Damit kann der langfristige Energiebedarf für Gebäude/-teile ermittelt werden, und die Einsatzmöglichkeit erneuerbarer Energien abgeschätzt werden. Das Verfahren gilt für Neubau, Bestand und Sanierungen.

⁵ Primärenergie: die von natürlichen, noch nicht weiterverarbeiteten Energieträgern (z. B. Kohle, Erdöl, Erdgas, Wasser, Wind, Sonne) stammende Energie.

2.3 Sonstige Initiativen

In nachstehenden Abschnitten werden weitere bedeutende Initiativen vorgestellt, welche losgelöst von Gesetzen und Normen eine nachhaltige Entwicklung im Bauwesen forcieren.

Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD)

Die OECD erarbeitete einen Bericht über ‘Sustainable Buildings’ (OECD, 2003), um Mitgliedsstaaten bei der Umsetzung nachhaltiger Ziele im Bausektor zu unterstützen. Der Fokus liegt dabei auf der Reduzierung der CO₂-Emissionen, der Baustellenabfälle und der Innenraumluftverschmutzung.

Arbeitsgruppen der EU-Kommission

Im Jahr 1999 wurden von der Europäischen Kommission drei Arbeitsgruppen mit Vertretern der Mitgliedsstaaten und der Industrie gegründet. Diese sollen die Wettbewerbsfähigkeit der Bauindustrie angesichts der Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung analysieren. Folgende Themen werden in diesem Rahmen seitdem bearbeitet (EU-Kommission, 2001):

- Arbeitsgruppe 1: ‘Environmentally Friendly Construction Materials’
- Arbeitsgruppe 2: ‘Energy Efficiency in buildings’
- Arbeitsgruppe 3: ‘Construction and Demolition Waste’.

Im Oktober 2002 wurde zusätzlich eine vierte Arbeitsgruppe für den Bereich ‘Construction Whole Life Cost (WLC)’ berufen (EU-Kommission, 2003a; EU-Kommission, 2003b).

European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research

COST ist das älteste (seit 1971) zwischenstaatliche Netzwerk für den internationalen wissenschaftlichen Austausch. Innerhalb von COST werden derzeit zwei neue Projekte im Hinblick auf Nachhaltigkeit gestartet: ‘Sustainable Energy strategies for the urban built environment’ (C23) und ‘Sustainability of Constructions – Integrated Approach’ (C 24).

Aktivitäten in Deutschland

In Deutschland ist die nationale Nachhaltigkeitsstrategie auch im Bauwesen fest verankert. Neben diversen Veröffentlichungen von Verbänden, Ländern und Forschungseinrichtungen wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen ein Leitfaden für ‘Nachhaltiges Bauen’ herausgegeben (BMVBW, 2001). Das Dokument ist eine Arbeitshilfe für Planung, Erstellung, Unterhalt und Betrieb von Liegenschaften und Gebäuden des Bundes. Neben Planungsgrundsätzen werden dabei sowohl ökologische, wirtschaftliche als auch soziokulturelle Aspekte behandelt und eine ganzheitliche Bewertung angestrebt. Der Leitfaden ist insofern von Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung, da Bund, Länder und Gemeinden nach wie vor größte Bauherren in Deutschland sind und somit eine direkte Umsetzungsmöglichkeit in die Praxis gegeben ist.

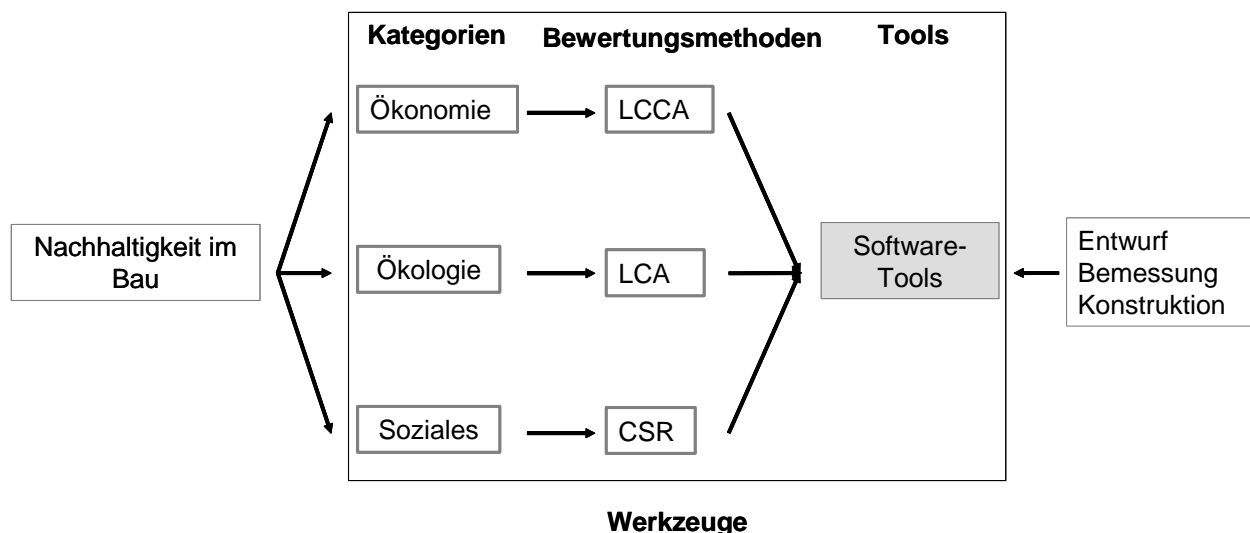
Der Leitfaden wurde in Zusammenarbeit mit dem ‘Runden Tisch’ für ‘Nachhaltiges Bauen’ erarbeitet. Diese Diskussionsplattform wurde eingerichtet, um den Informationsaustausch zu diesem Thema zu intensivieren und die Zusammenarbeit anzuregen.

2.4 Methoden und Werkzeuge

Zur Umsetzung von Nachhaltigkeitsaspekten können Planer und Ingenieure auf eine Vielzahl von Werkzeugen zurückgreifen. Die meisten Instrumente werden in der Planungsphase eingesetzt und ermöglichen eine qualitative Bewertung ökologischer Aspekte. Beispiele hierfür sind Güte- und Umweltzeichen, Positiv-/Negativlisten, Empfehlungs- und Ausschlusskriterien, Elementkataloge, ökologische Ausschreibungshilfen, Energieausweise, Gebäudepässe, Fallstudien, Objektbeispiele und Gefahrstoffinformationen. Ausführliche Beschreibungen der einzelnen Hilfsmittel mit Wertung finden sich in Lützkendorf (2002) und Graubner (2003).

Werkzeuge sollten jedoch nicht nur die qualitative Bewertung der Planungsphase zum Ziel haben, sondern die quantitative Erfassung und Optimierung des gesamten Lebenszyklus von Bauwerken und Bauprodukten. Dies erfordert die Definition von deutlich abgrenzbaren Kategorien. Angesichts der drei Elemente der Nachhaltigkeit liegt es nahe, die Bereiche „Ökologie“, „Wirtschaftlichkeit“ und „Soziales“ festzulegen. Diese Bereiche können nun in weitere Unterkategorien bzw. konkret messbare Indikatoren unterteilt werden (vgl. 2.4.1). Für die Bewertung ökologischer Aspekte steht die Ökobilanz (LCA) (vgl. 2.4.2) zur Verfügung, für die Erfassung ökonomischer Aspekte die Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) (vgl. 2.4.3) und für die Analyse der sozialen Belange das Konzept der sozialen Verantwortung (CSR) (vgl. 2.4.4).

Die einzelnen Bewertungsverfahren sollten zu einem automatisierten Gesamtverfahren zusammengefügt werden. Hierbei sollte gleichzeitig eine direkte Verknüpfung mit der Entwurfsphase eines Bauwerks ermöglicht werden (Radlbeck et al., 2004). In diese Richtung wurden bereits mehrere Software-Tools entwickelt (vgl. 2.4.5 und 2.4.6). In Abbildung 2.2 ist der Zusammenhang zwischen den oben erläuterten Methoden und Werkzeugen dargestellt.



LCCA: Lebenszykluskostenanalyse; LCA: Ökobilanz; CSR: Soziale Verantwortung

Abb. 2.2: Ausgewählte Methoden und Werkzeuge zur Bewertung der Nachhaltigkeit

2.4.1 Aufteilung in Kategorien, Unterkategorien und Indikatoren

Zur Bewertung und Anwendung von Werkzeugen ist es notwendig die Kategorien „Ökologie“, „Ökonomie“ und „Soziales“ in Unterkategorien aufzuteilen. Diese können in den meisten Fällen mit Hilfe von Indikatoren bewertet werden. Indikatorensysteme spielen eine immer größere Rolle im Zuge einer nachhaltigen Entwicklung. Sie bilden eine große und vielfältige Datenmenge in Form von messbaren Parametern ab und dienen so zur Beschreibung und Bewertung eines komplexen Sachverhalts (OECD, 1994; Weber-Blaschke et al., 2002).

Die in Tabelle 2.1 beispielhaft dargestellten (Unter-) Kategorien und Indikatoren für „Nachhaltiges Bauen“ beziehen sich auf ein konkretes Bauobjekt. Manche Unterkategorien können dabei allerdings nicht durch messbare Indikatoren abgebildet werden (z. B. Ästhetik eines Bauwerks), sondern basieren auf der jeweils subjektiven Einschätzung des Betrachters.

Tab. 2.1: (Unter-) Kategorien mit Indikatoren für „Nachhaltiges Bauen“ gemäß Enquête (1998) und SIA (2000)

Kategorien		
Ökologie	Ökonomie	Soziales
Unterkategorien ggf. mit Indikatoren []		
Emissionen [CO ₂], [SO ₂], etc.	Lebenszykluskosten [€]	Ästhetik
Energieverbrauch [MJ]	Kapitalerhaltung [€]	Gestalterische Qualität
Flächenverbrauch [m ²]	Lebensdauer [a]	Sicherheit, Ausnutzung [%]
Ressourcenverbrauch [l], [m ³], etc.	Funktionalität	Schall, Raumakustik [dB]
Wasserverbrauch [l]		Raumklima [C°], [%], etc.
Abfall [kg]		Gesundheit, Behaglichkeit

2.4.2 Ökobilanz (Life-Cycle-Analysis)

Zur Bewertung der Kategorie „Ökologie“ eines (Bau-) Objekts bzw. –produkts kann die Ökobilanz verwendet werden. Hiermit werden die mit einem Produkt verbundenen Umweltwirkungen während dessen gesamten Lebenswegs abgeschätzt. Das Verfahren wird seit 1997 durch die EN ISO 14040 definiert und umfasst die folgenden Schritte:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen nach EN ISO 14041 (vgl. 2.4.2.1)
- Sachbilanz nach EN ISO 14041 (vgl. 2.4.2.2)
- Wirkungsabschätzung nach EN ISO 14042 (vgl. 2.4.2.3)
- Auswertung nach EN ISO 14043 (vgl. 2.4.2.4)

Da sich oben genannte Arbeitsschritte gegenseitig beeinflussen, können sie nicht getrennt voneinander betrachtet werden (vgl. Abb. 2.3).

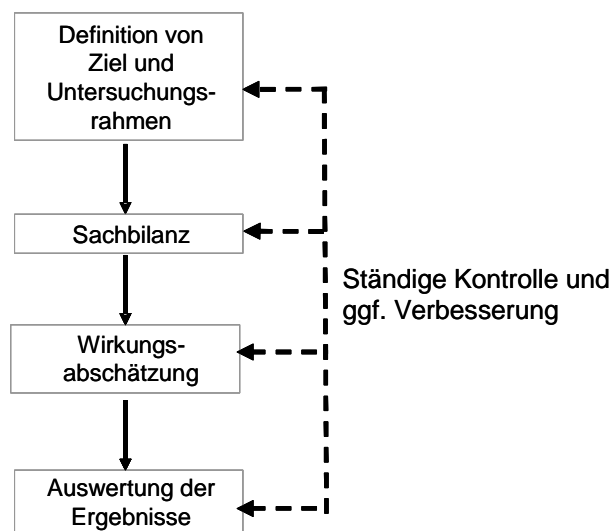


Abb. 2.3: Vorgehensweise bei der Durchführung einer Ökobilanz

Ziel einer Ökobilanz ist das Aufzeigen von Möglichkeiten für die umweltfreundliche Gestaltung von Produkten in den verschiedenen Phasen ihres Lebensweges. Darüber hinaus dient die Ökobilanz als Hilfsmittel bei der ökologischen Entscheidungsfindung von Regierung, Industrie und Nichtregierungsorganisationen.

Wegen der bedeutenden Umweltwirkungen, die von Bauprozessen und Bautätigkeiten ausgehen, werden seit einigen Jahren auch Bauprodukte mit Hilfe von Ökobilanzen erforscht. Die Untersuchung von Bauprodukten ist allerdings aufgrund der langen Gebrauchsdauer, der Einbindung in die Baukonstruktion und der stofflichen Vielfalt bis heute mit methodischen Schwierigkeiten verbunden. Das Verfahren wird bei umweltpolitisch sensiblen Bauprodukten, wie z. B. Aluminiumbauteilen, und öffentlichen Auftraggebern zusätzlich verkompliziert. Es ist daher Vorsicht geboten, wenn Ergebnisse einer Ökobilanz losgelöst von Rahmenbedingungen und Zusammenhängen diskutiert und verallgemeinert werden.

2.4.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz

Für eine Ökobilanz muss im Vorfeld immer ein Ziel festgelegt werden. Dies umfasst sowohl die Darstellung der Hintergründe als auch der beabsichtigten Anwendung und der Zielgruppe.

Der Untersuchungsrahmen definiert sich zunächst über eine funktionelle Einheit. Diese dient als Bezugsgröße für Input- und Outputdaten. Des Weiteren sind räumliche und zeitliche Systemgrenzen festzulegen. Konkrete Grenzen reduzieren einerseits den Arbeitsaufwand, führen jedoch andererseits in der Regel zu unscharfen Ergebnissen. Hier gilt es transparente Kompromisse zu schließen. Letztlich müssen Rahmenbedingungen für die Aufnahme von Daten festgelegt werden.

Die Daten werden entweder gemessen, berechnet oder geschätzt. Wichtiger Punkt ist dabei die Datenqualität. Hierbei sollten Angaben sowohl zum zeitlichen, geographischen und technologischen Erfassungsbereich als auch zur Genauigkeit, Vollständigkeit, Repräsentativität, Konsistenz und Nachvollziehbarkeit gemacht werden. Alle Daten und Annahmen sollten im letzten Schritt kritisch überprüft werden.

Die Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen wird in Tabelle 2.2 anhand eines Aluminiumbauprodukts erläutert.

Tab. 2.2: Mögliches Ziel und Untersuchungsrahmen eines Aluminiumbauprodukts

Hintergründe	Vorwurf bzgl. hohem Energiebedarf des Aluminiumbauprodukts
Beabsichtigte Anwendung	Ökologische Optimierung des Aluminiumbauprodukts
Zielgruppe	Behörden, Umweltministerium
Funktion	Bereitstellung eines Aluminiumbauprodukts
Funktionelle Einheit	Masseneinheit des Bauprodukts [kg _{Al}]
Systemgrenzen	Globale Elementarflüsse des Aluminiumbauprodukts
Datenkategorie	Energie (physikalisch)
Kriterien für Ersterfassung	Energie
Datenqualität	nach 1998, Raum Deutschland
Kritische Prüfung	Aluminiumindustrie (intern), Forschungsinstitut (extern)

2.4.2.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz behandelt die Verfahren zur Sammlung und Berechnung von Daten. Konkret geht es dabei um die Zusammenstellung und Quantifizierung von Input und Output eines gegebenen Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs. Durch die Betrachtung der gesamten Lebensdauer des Produktes soll vermieden werden, dass Umweltlasten in vorherige oder nachfolgende Lebenszyklen verlagert werden. Innerhalb einer Datenbasis können sich allerdings Veränderungen ergeben (z. B. Prozessverbesserungen), die eine Neuorientierung erfordern. Die Erstellung einer Sachbilanz ist folglich ein iterativer Prozess.

Die räumlichen Systemgrenzen für die Datensammlung beziehen sich auf die elementaren Stoffflüsse. Dieses sind auf der Inputseite die natürlichen Ressourcen (unverknüpfter Input) und auf der Outputseite die Emissionen in Luft, Wasser und Boden (unverknüpfter Output). Diejenigen Stoffströme, die im untersuchten Produktsystem als eigene Produkte enthalten sind, müssen mit den ihnen zugehörigen Vorstufen berücksichtigt werden (verknüpfter Input). Genauso verhält es sich mit Outputströmen, die nicht innerhalb sondern außerhalb der Systemgrenzen entsorgt werden (verknüpfter Output) (vgl. Abb. 2.4).

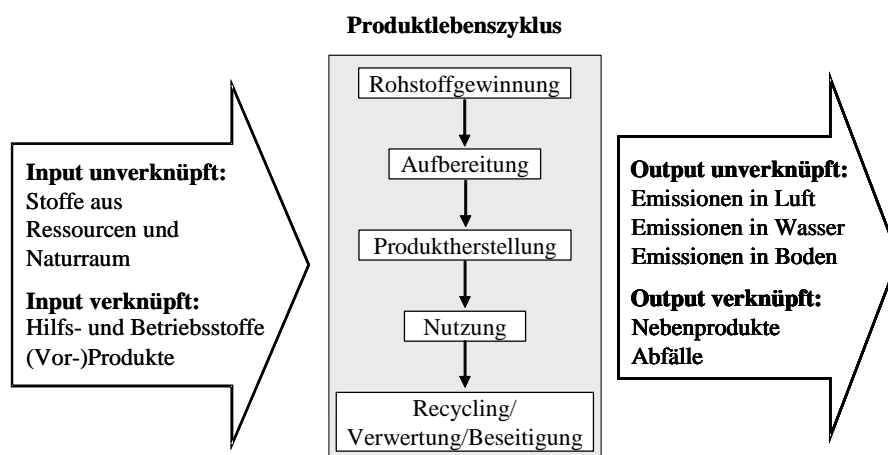


Abb. 2.4: Input- und Outputströme eines Produktlebenszyklus (Kümmel, 2000)

Ströme mit sehr kleinen Massen- oder Energieanteilen, z. B. weniger als 1% (Kreißig et al., 1997), brauchen nicht berücksichtigt zu werden, vorausgesetzt die ökologische Bilanz des Produktsystems bleibt unbeeinflusst.

2.4.2.3 Wirkungsabschätzung

Um die Ergebnisse der Sachbilanz zu interpretieren, ist es erforderlich eine Wirkungsabschätzung nach EN ISO 14042 durchzuführen. Hierzu steht die CML-Methode⁶ von Heijungs (1992) zur Verfügung. Dieses Verfahren ist zudem konform mit den Grundsätzen der Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).

Für die Wirkungsabschätzung ist zunächst eine **Auswahl** an zu berücksichtigenden Wirkkategorien zu treffen. Jede Wirkkategorie repräsentiert dabei ein gewisses Umweltthema. EN ISO 14042 bietet zwar Hilfestellung bei der Auswahl, schreibt jedoch keine bestimmten Kategorien vor. In nachstehenden Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4 sind Listen von häufig verwendeten Wirkkategorien dargestellt. Hierbei wird unterschieden in quantifizierbare und sich noch in der Entwicklung befindlichen Wirkkategorien.

Tab. 2.3: Quantifizierbare Wirkkategorien (in Anlehnung an Eyerer & Reinhardt, 2000)

Wirkkategorie	Kurzbeschreibung	Bsp. Sachbilanz
Treibhauseffekt	Beeinflussung des Wärmehaushalts der Atmosphäre	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Ozonabbau	Ozonschichtabbau in Stratosphäre	FCKW
Sommersmog	Ozonbildung in Bodennähe	Kohlenwasserstoffe
Eutrophierung	Überdüngung von Boden und Gewässer	NO, NO _x , PO ₄ ³⁻
Versauerungspotenzial	Versauerung von Boden, Wasser oder Luft	NO _x , SO ₂ , HCl, HF, NH ₃
Ozonvorläufer Potenzial	Vorprodukt bei Ozonbildung in Bodennähe	NMVOC, NO _x , CO, CH ₄

Tab. 2.4: Wirkkategorien, die sich noch in der Entwicklung befinden (Ekkerlein, 2004)

Wirkkategorie	Kurzbeschreibung	Bsp. Sachbilanz
Ressourcenverbrauch	Verbrauch fossiler Rohstoffe	Erdöl, Erdgas, Erz
Naturraumbeanspruchung	Verbrauch natürlicher Flächen	Versiegelung, Neubau
Humantoxizität	Schädigung menschlicher Gesundheit und menschlichen Erbguts	Schwermetalle, Dioxine
Ökotoxizität	Schädigung von Organismen und Ökosystemen	Schwermetalle, Säuren

⁶ Centrum voor Milieukunde der Rijksuniversiteit Leiden, NL

In der folgenden **Klassifizierung** werden Sachbilanzdaten mit gleicher Umweltwirkung den gewählten Wirkkategorien zugeordnet. Einzelne Stoffe können allerdings verschiedene Umweltwirkungen hervorrufen und folglich zu mehreren Wirkkategorien einen Beitrag leisten (vgl. Abb. 2.5).

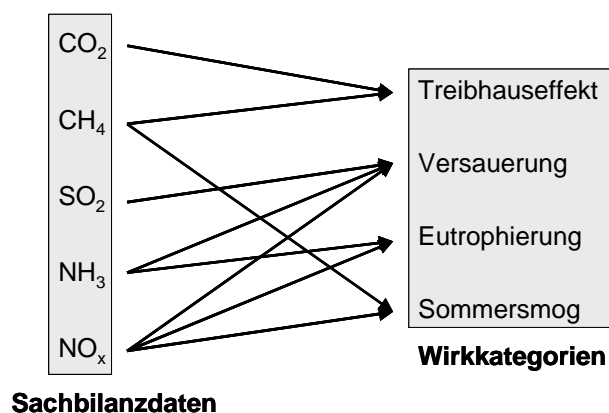


Abb. 2.5: Klassifizierung von Emissionen (in Anlehnung an Ekkerlein, 2004)

Für die quantifizierbaren Wirkkategorien existieren bereits fest definierte Referenzgrößen. Diese entsprechen in der Regel den jeweils maßgebenden Emissionen (vgl. Tab. 2.5).

Tab. 2.5: Quantifizierbare Wirkkategorien mit Referenzgrößen

Wirkkategorie	Bezeichnung (engl.)	Referenzgröße
Treibhauseffekt	Global Warming Potential (GWP)	kg CO ₂ -Äquivalent
Ozonabbau	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg FCKW11-Äquivalent bzw. R11-Äquivalent
Sommersmog	Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)	kg C ₂ H ₄ -Äquivalent
Eutrophierung	Nutrition Potential (NP)	kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalent
Versauerung	Acidification Potential (AP)	kg SO ₂ -Äquivalent
Ozonvorläufer	Tropospheric Ozone Precursor Potential (TOPP)	kg NMVOC-Äquivalent

Enthält die betrachtete Wirkkategorie andere Emissionen als die Referenzgröße, so werden diese im Rahmen der **Charakterisierung** auf Äquivalente der Referenzgröße umgerechnet. Hierzu werden fest definierte Charakterisierungsfaktoren (P_i) verwendet. Je nach der Verweilzeit des Gases in der Atmosphäre werden unterschiedliche Gewichtungen der Stoffe berücksichtigt. Das Gesamtpotenzial ($P_{\text{äq}}$) der entsprechenden Wirkkategorie ergibt sich dann durch die Aufsummierung der einzelnen Äquivalente:

$$P_{\text{äq}} = \sum_i (P_i \cdot m_i) \quad \text{mit } m_i = \text{Stoffmasse in [kg]} \quad (2-1)$$

Zur Veranschaulichung wird in den Tabellen 2.6 bis 2.10 die Berechnung von einigen häufig verwendeten, quantifizierbaren Wirkkategorien, wie z. B. GWP100, NP, AP, ODP und TOPP, mit jeweils drei Charakterisierungsfaktoren dargestellt. Eine vollständige Übersicht über alle Faktoren, welche einen Beitrag zu den entsprechenden Wirkkategorien leisten, ist beispielsweise in Heijungs (1992) zu finden.

Tab. 2.6: Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren (EcoInvent, 2003)

Treibhaus-effekt	Stoff	Chem. Formel	GWP100 _i in [kg CO ₂ - Äq/kg]	Formel
GWP100	Kohlendioxid	CO ₂	1,0	$GWP100_{\ddot{A}q} = \sum_i (GWP100_i \cdot m_i)$ m _i = Stoffmasse in [kg]
	Distickstoffmonoxid	N ₂ O	310	
	Methan	CH ₄	21,0	

Tab. 2.7: Eutrophierungspotenzial (EcoInvent, 2003)

Eutrophierung	Stoff	Chem. Formel	NP _i in [kg PO ₄ ³⁻ - Äq/kg]	Formel
NP	Phosphat	PO ₄ ³⁻	1,0	$NP_{\ddot{A}q} = \sum_i (NP_i \cdot m_i)$ m _i = Stoffmasse in [kg]
	Stickoxide	NO _x	0,13	
	Stickstoffmonoxid	NO	0,2	

Tab. 2.8: Versauerungspotenzial (EcoInvent, 2003)

Versauerung	Stoff	Chem. Formel	AP _i in [kg SO ₂ - Äq/kg]	Formel
AP	Schwefeldioxid	SO ₂	1,0	$AP_{\ddot{A}q} = \sum_i (AP_i \cdot m_i)$ m _i = Stoffmasse in [kg]
	Stickoxide	NO _x	0,7	
	Ammoniak	NH ₃	1,88	

Tab. 2.9: Ozonabbaupotenzial (EcoInvent, 2003)

Ozonabbau	Stoff	Chem. Formel	ODP _i in [kg FCKW11- Äq/kg]	Formel
ODP	FCKW 11	CFCl ₃	1,0	$ODP_{\ddot{A}q} = \sum_i (ODP_i \cdot m_i)$ m _i = Stoffmasse in [kg]
	FCKW 12	CF ₂ Cl ₂	0,82	
	FCKW 113	C ₂ F ₃ Cl ₃	0,9	

Tab. 2.10: Ozonvorläufer Potenzial (Ekkerlein, 2004)

Ozonvorläufer	Stoff	Chem. Formel	AP _i in [kg SO ₂ - Äq/kg]	Formel
TOPP	Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe	NMVOC	1,0	$TOPP_{\ddot{A}q} = \sum_i (TOPP_i \cdot m_i)$ m _i = Stoffmasse in [kg]
	Stickstoffoxide	NO _x	1,22	
	Kohlenmonoxid	CO	0,11	
	Methan	CH ₄	0,014	

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass in vielen Ökobilanzen anstatt des Ozonvorläufer Potentials (TOPP), das Photooxidantienpotenzial (POCP) sowie das Ozonabbaupotenzial (ODP) berechnet werden. Laut Ekkerlein (2004) ist das POCP in Fachkreisen allerdings sehr umstritten. Zum einen, da es auf einer Änderung bestehender Ozonkonzentrationen aufbaut, und zum anderen, da es ursprünglich für regional weiträumige Ausbreitungsrechnungen entwickelt wurde. TOPP erfasst hingegen lediglich die bodennahen Ozonvorläufer und berechnet kein Potenzial zur Ozonbildung selbst. Somit werden die Schwachstellen des POCP umgangen.

Die Bestimmung des ODP ist ebenfalls mit Schwierigkeiten verbunden, da es auf Grundlage der Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW) berechnet wird. Im Zuge des Protokolls von Montreal⁷ gilt aufgrund der ozonschädigenden Wirkung in vielen Ländern ein Produktionsverbot von FCKW. Folglich stehen zur Berechnung dieser Wirkkategorie nur spärliche Informationen zur Verfügung.

2.4.2.4 Auswertung

Die Auswertung nach EN ISO 14043 (vgl. 2.4.2) umfasst zunächst die Identifikation der signifikanten Parameter, z. B. der aussagekräftigsten Wirkkategorien und der maßgebenden Lebensphase des betrachteten Produkts. Im Zuge der anschließenden Ergebnisbeurteilung ist eine Prüfung auf Vollständigkeit, auf Sensitivität und auf Konsistenz mit der Zieldefinition und des Untersuchungsrahmens durchzuführen. Auf dieser Basis werden Schlussfolgerungen, Empfehlungen sowie Einschränkungen abgeleitet.

Eine Ökobilanz hat jedoch auch Schwachpunkte, die es bei der Auswertung zu beachten gilt: Die gewählten Vorgehensweisen, die getroffenen Annahmen und die Auswahl der Wirkkategorie sind subjektiv. Die Modelle für die Sachbilanzen oder die Wirkungsabschätzung können durch diese Annahmen eingeschränkt sein und stehen möglicherweise nicht für alle potenziellen Wirkungen oder Anwendungen zur Verfügung. Die Ergebnisse von Ökobilanzstudien können wegen ihrer Ausrichtung auf globale und überregionale Aspekte für örtliche und regionale Anwendungen ungeeignet sein. Fehlende räumliche und zeitliche Dimensionen bei Sachbilanzen, die für die Wirkungsabschätzung benutzt werden, führen zu Unsicherheiten bei den Resultaten. Letztlich wird die Aussagekraft einer Ökobilanz maßgeblich durch Zugänglichkeit oder Verfügbarkeit von relevanten Daten beeinflusst.

2.4.2.5 Weitere Methoden zur Wirkungsabschätzung und Auswertung

Für die Wirkungsabschätzung und die Auswertung im Rahmen einer Ökobilanz haben sich in der Vergangenheit neben den in EN ISO 14042 (vgl. 2.4.2.4) und EN ISO 14043 (vgl. 2.4.2.3) vorgeschlagenen Verfahren auch weitere Methoden etabliert. Im Folgenden werden einige dieser Methoden mit häufiger Anwendung in Wissenschaft und Praxis vorgestellt.

⁷ 1987 vereinbarte ein Teil der Mitgliedsstaaten der Vereinten Nationen im Montrealer Protokoll erste konkrete Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht. U. a. sollten bis zum Jahr 2000 Produktion und Verbrauch von FCKW um 50% reduziert werden.

2.4.2.5.1 ABC-Analyse

Diese weder quantitative noch formalisierte Methode des Instituts für Wirtschaftsforschung GmbH (IÖW) in Berlin wird in erster Linie von Unternehmen zur Entscheidungsfindung und ökologischen Optimierung von Produkten und Prozessen angewendet. Die erstellte Sachbilanz wird dabei anhand eines ABC-Rasters subjektiv durch das jeweilige Unternehmen bewertet. Hierbei unterscheidet man zwischen

- **A** ökologisch besonders relevantes Problem mit hohem Handlungsbedarf
- **B** ökologisches Problem mit mittelfristigem Handlungsbedarf
- **C** nach jetzigem Kenntnisstand geringes Problem, z. Zt. kein Handlungsbedarf

Mit der erreichten Prioritätenfolge sollen Kernpunkte definiert und entsprechende Maßnahmen abgeleitet werden. Das Vorgehen ist einfach anwendbar und benötigt lediglich geringen Aufwand. Jedoch ist die ABC-Einteilung mit nur drei Möglichkeiten sehr begrenzt, wodurch die Gefahr von unscharfen Ergebnissen gegeben ist. Zudem kann diese Methode wegen der fehlenden Zuordnung zu konkreten Wirkkategorien nicht innerhalb der EN ISO 14040 ff. (vgl. 2.4.2) verwendet werden.

2.4.2.5.2 EcoIndikator 95 (Goedkoop, 1995), Ecoindikator 99 (Pré, 2005)

Die EcoIndikatoren 95 bzw. 99 wurden mit dem Ziel entwickelt, eine einfache Integration ökologischer Aspekte in den Entwurfs- und Konstruktionsprozess zu ermöglichen. Das Vorgehen ist bis zur Wirkungsabschätzung identisch zur CML-Methode. Jedoch werden die einzelnen Wirkkategorien nicht getrennt voneinander betrachtet, sondern in einem weiteren Schritt zu einem einzigen Wert, dem so genannten Ecoindikator (I), zusammengefasst. Hierzu werden die einzelnen Wirkkategorien (WP_i) durch Gegenüberstellung mit europäischen Belastungsdaten genormt (NWP_i), gewichtet und anschließend addiert. Die Anzahl der Wirkkategorien ist verglichen zur CML-Methode geringer, um die Handhabung zu vereinfachen. Die Gewichtung beim EcoIndikator 95 erfolgt je nach der Differenz, zwischen der tatsächlichen und der höchstzulässigen Umweltbelastung („Distance-to-Target“-Prinzip). Die Wertgrundlage des EcoIndikator 99 basiert auf dem Schadensumfang bei menschlicher Gesundheit, Ressourcen und Ökosystemen (Damage Oriented Impact Assessment).

$$NWP_i^* = \frac{WP_i}{WP_i^{\text{Bezugsraum}}} \quad (2-2)$$

WP_i : Wirkkategorie
 $WP_i^{\text{Bezugsraum}}$: Wirkkategorie i des Bezugsraumes

$$NWP_i = NWP_i^* \cdot Z_{\text{Einwohner}} \quad (2-3)$$

NWP_i : auf Einwohner normalisierte Wirkkategorie
 $Z_{\text{Einwohner}}$: Einwohner des Bezugsraumes

$$I = \sum NWP_i \cdot G_i \quad (2-4)$$

I : EcoIndikator des Gebäudes
 G_i : Gewichtungsfaktor der Wirkkategorie

2.4.2.5.3 Erfassung und Bewertung des kumulierten Energieaufwands (KEA)

Mit Hilfe des „Kumulierten Energieaufwands“ (KEA) wird der Energieverbrauch eines Produkts bzw. Prozesses erfasst und bewertet. Zudem werden energiebedingte Umweltbelastungen und energetische Einsparpotenziale aufgedeckt. Von den Sachbilanzdaten im Sinne der EN ISO 14041 (vgl. 2.4.2) werden folglich die Energieflüsse behandelt. Man unterscheidet dabei zwischen zwei Verfahren:

Nach (VDI 4600, 1997) muss in der Gesamtbilanz der Energiegehalt von Stoffen berücksichtigt werden, die bei ihrer chemischen Umsetzung eine Reaktionsenthalpie aufweisen (z. B. Schwefel). Diese Stoffe werden folglich als Brennstoffe definiert. Darüber hinaus werden allerdings auch die Energieinhalte von Energieträgern, welche nicht energetisch genutzt werden, in Form von Heizwerten in der Bilanz mitgerechnet. Dies gilt auch für Stoffe, die nicht als Brennstoffe verwendet werden (z. B. Erdöl für Kunststoffe, Holz für Dachkonstruktionen). Dieser Rechenansatz wird durch entsprechende Gutschriften bei der energetischen Nutzung und Wiederverwendung am Ende des Produktlebenszyklus gerechtfertigt. Die Heizwerte der einzelnen zur Erstellung des Produkts benötigten Stoffe, werden demzufolge dem System wieder zur Verfügung gestellt. Problematisch wird dieser Ansatz bei Produkten mit einem offenen Entsorgungssystem, d. h. wenn Produkte (z. B. Glas) unterschiedlichen Alters gemischt und in verschiedene Entsorgungs- bzw. Wiederverwertungsanlagen geleitet werden. Da diese Anlagen kontinuierlich weiterentwickelt werden, unterliegen sie einer ständigen Veränderung. Die Bestimmung von Gutschriften ist somit vom Stand der Technik abhängig und nur bedingt bestimmbar. Ein weiterer Kritikpunkt der VDI Methode ist das Aufsummieren sämtlicher Energien zu einem KEA-Wert ohne Unterscheidung von erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Energiequellen.

In einer zweiten und mittlerweile gängigeren Methode nach Fritsche, Jenseit & Hochfeld (1999) werden zur Bestimmung des KEA lediglich Energieanteile, die sich direkt aus dem energetisch genutzten Energieinhalt von Brennstoffen bzw. Primärenergien ergeben, mitberechnet. Der Heizwert von stofflich genutzten potenziellen Energieträgern sowie die Reaktionsenthalpien von Stoffen sind nicht relevant. Außerdem wird der Nutzungsgrad jeder Primärenergiegewinnung auf 100% gesetzt. Nur so kann die Vergleichbarkeit von KEA-Ergebnissen und die Kompatibilität mit der nationalen und internationalen Energiestatistik gewährleistet werden. Zudem wird der gesamte KEA (KEA_{ges}) je nach Art der Energiequelle in mehrere Komponenten aufgeteilt (vgl. Tab. 2.11).

Tab. 2.11: Aufteilung des kumulierten Energieaufwands (KEA) in Komponenten

Komponenten	Beschreibung	Beispiele
$KEA_{\text{nicht erneuerbar}}$	Fossile und nukleare Primärenergien	Kohle, Erdgas, Erdöl, Uran
$KEA_{\text{erneuerbar}}$	Regenerative Primärenergien	Wasser, Wind, Sonne, Geothermie, Biomasse
KEA_{andere}	Energetisch genutzte Reststoffe	Müll

2.4.2.5.4 Erfassung und Bewertung des Stoffaufwands (KSA, MIPS)

Um den Ressourcenverbrauch zu optimieren, ist es erforderlich, die verursachten Stoffströme zu erfassen. Hierzu dient der kumulierte Stoffaufwand (KSA_{ges}). Er beinhaltet sämtliche stofflich genutzten Ressourcen, die zur Bereitstellung eines Produkts notwendig sind. Beispielsweise werden innerhalb des KSA Stoffe, die nicht als Brennstoffe verwendet werden (z. B. Erdöl für Kunststoffe, Holz für Dachkonstruktionen) mitbilanziert. Auch beim KSA wird eine Aufteilung je nach Art des verbrauchten Rohstoffs empfohlen (vgl. Tab. 2.12):

Tab. 2.12: Aufteilung von kumulierten Stoffaufwands (KSA) in Komponenten

Komponenten	Beschreibung	Beispiele
$KSA_{\text{nicht erneuerbar}}$	Stoffe aus nicht erneuerbaren Rohstoffen	Erdöl bei Aluminiumproduktion
$KSA_{\text{erneuerbar}}$	Stoffe aus erneuerbaren Rohstoffen	Holz als Baustoff
KSA_{andere}	Stoffe aus stofflich genutzten Reststoffen	Hochofenschlacke für Zement

Der systemweite Ressourcenverbrauch von Produkten kann auch durch die Bestimmung der „Materialintensität pro Serviceeinheit“ (MIPS) nach Schmidt-Bleek (1998) abgeschätzt werden. Der Zahlenwert berechnet sich als Quotient aus dem Materialinput, der für die Produktion notwendig war und der Serviceeinheit, die ein Maß für die Nutzung des Produkts darstellt. Der Materialinput umfasst auch die ökologischen Rucksäcke, d. h. den mit dem Produkt indirekt verbundenen Materialverbrauch (z. B. Abraum bei Steinkohlegewinnung).

2.4.2.6 Wertung der verschiedenen Methoden

Je nach Bewertungsmethode werden die Sachbilanzdaten entweder teilaggregiert oder vollaggregiert. Um eine Verschleierung der Ergebnisse zu vermeiden, wird nach EN ISO 14040 ff. eine Vollaggregation von Sachbilanzdaten zu einer Leitgröße abgelehnt. Die beste Übereinstimmung mit der ISO Norm bietet demnach die teilaggregierende CML-Methode.

Vollaggregierende Methoden wie beispielsweise der Ecoindicator 95 sind hingegen nicht zur normenkonformen Anwendung geeignet. Diese Verfahren sollten daher nur zum Einsatz kommen, wenn der Entscheidungsträger entgegen der Norm eindeutige Parameter fordert. Auch die ABC-Analyse ist mit nur drei Bewertungskategorien (ABC) nicht zur ökologischen Bewertung im Sinne der EN ISO Norm geeignet. Sie dient vielmehr zur verbalargumentativen Abschätzung innerhalb eines Unternehmens. Die Anwendung des Bewertungskriteriums „KEA“ hat sich mittlerweile insbesondere im Baubereich etabliert und kann auf eine lange Tradition zurückblicken (Lützkendorf, 1999). Es bietet sich daher an, diesen Wert aufgeteilt nach Art der Energiequelle (erneuerbar, nicht-erneuerbar und andere) darzustellen. KSA bzw. MIPS sind hingegen zwecks mangelnder Datenverfügbarkeit nicht eindeutig quantifizierbar und haben sich in der Praxis noch nicht als Bewertungsparameter bewährt.

Aufgrund obiger Erkenntnisse wird in vorliegender Arbeit die CML-Methode für ökologische Bewertungen verwendet. Zur Erfassung der Umweltwirkungen von Aluminiumkonstruktionen werden als Wirkkategorien zunächst GWP100, NP und AP ausgewählt. Diese Auswahl ist konform mit vielen bisherigen ökologischen Studien und wird gleichzeitig von der Aluminiumindustrie befürwortet. Anstelle des vielerorts zusätzlich verwendeten POCP und ODP wird hier basierend auf der Begründung von Ekkerlein (2004) (vgl. 2.4.2.3) die Wirkkategorie TOPP berechnet. Da bei Aluminium zudem der Energieverbrauch eine maßgebliche Rolle spielt, wird außerdem der KEA je nach Art der Energiebereitstellung bestimmt.

2.4.3 Lebenszykluskostenanalyse (Life-Cycle-Cost-Analysis)

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit, d. h. der Lebenszykluskosten und der Kapitalerhaltung von Baukonstruktionen in Abhängigkeit der Lebensdauer, kann durch Anwendung einer Lebenszykluskostenanalyse vollzogen werden. Ziel einer Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) ist die Ermittlung und Optimierung sämtlicher Kostenströme von Produkten während ihres Lebenszyklus. Zu diesem Zweck werden alle Einnahmen und Ausgaben während der Produktlebensdauer bilanziert und Einsparpotenziale abgeleitet. Die LCCA kann darüber hinaus zum wirtschaftlichen Vergleich unterschiedlicher Produktvarianten verwendet werden. Die effektivste Lösung wird dabei mit Hilfe einer break-even-Analyse⁸ bestimmt. Der dabei ermittelte break-even-point ist der Schnittpunkt (meistens) zweier Varianten und gibt jenen Zeitpunkt an, ab dem eine Variante kostengünstiger wird als andere. Grundsätzlich gilt für die LCCA - je früher die Anwendung desto größer die Wirksamkeit.

Für den Baubereich ist somit die Planungs- und Entwurfsphase der beste Anwendungszeitpunkt. Die Möglichkeiten die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Bauvorhabens zu beeinflussen, werden von Beginn der Planungsphase bis zum Ende der Herstellungsphase geringer und sind in der Nutzungs- und Abbruchphase minimal (vgl. Kapitel 1, Abb. 1.3). Grundlegende Richtlinien und Empfehlungen für die Erstellung einer LCCA im Bauwesen sind in EU-Kommission (2003b) gegeben. Zudem wird derzeit im Ausschuss ISO/AWI 15686-5 an einer konkreten Norm gearbeitet.

Um die Kostenaufstellung über die gesamte Lebensdauer von Gebäuden, Bauprodukten etc. übersichtlich dazustellen, verwendet man in der Regel Kostengruppen, welche den einzelnen Lebensphasen entsprechen:

- Entwurf, Planung, Entwicklung
Für die Bestimmung der Kosten in der Planungsphase eines Bauprojekts liefert die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI, 1995) entsprechende Werte.
- Bauwerkserstellung
In DIN 276 „Grundlage zur Kostenermittlung für die Investitions- und Baukosten“ stehen Kostendaten für die Fertigung und Montage von Bauwerken zur Verfügung.
- Nutzung
Nutzungskosten können mit Hilfe von DIN 18960 „Nutzungskosten im Hochbau“, GEFMA 200 „Nutzungskosten von Gebäuden und Diensten“ und DIN 32736 „Gebäude-management“ sowie der II. Berechnungsverordnung (BV II, 2003) bestimmt werden.
- Abbruch, Rückbau, Recycling bzw. Entsorgung
Für die letzte Lebensphase eines Bauwerks stehen noch keine Regelwerke mit Kostendaten zur Verfügung. Diese müssen für den Einzelfall recherchiert oder auf Grundlage eines ähnlichen Objekts extrapoliert werden

Die oben genannten Kosten sind deutlich voneinander abhängig. So werden beispielsweise mit der Wahl der Baukonstruktion und der Baumaterialien bereits die Lebensdauer und die Bauunterhaltungs- und Instandsetzungszyklen einzelner Teile festgelegt.

⁸ Begriff aus der Betriebswirtschaft: Verkaufte Produktmenge, bei der das Gleichgewicht zwischen erzieltm Ertrag und geleistetem Aufwand erreicht wird.

Zur Berechnung der Lebenszykluskosten verwendet man die Methoden der Investitionskostenrechnung. Hierbei unterscheidet man zwischen statischen und dynamischen Rechenverfahren.

Bei den statischen Methoden wird mit nominalen Beträgen gerechnet und damit der Zeitpunkt der Ausgaben bzw. Einnahmen vernachlässigt. Demnach wird weder ein Anstieg der Kosten, noch die Geldentwertung infolge von Inflation berücksichtigt. Aus diesem Grund sind statische Verfahren nur für begrenzte Betrachtungszeiträume geeignet.

Bei dynamischen Verfahren werden die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Ausgaben und Einnahmen einer Investition während des gesamten Lebenszyklus durch Aufzinsung bzw. Abzinsung (Diskontierung) auf einen einheitlichen Bezugspunkt zurückgerechnet und vergleichbar gemacht. Diese Berechnungsverfahren sind folglich für Investitionen mit langen Nutzungsdauern geeignet. Je nach Annahme des Kalkulationszinses stehen mehrere Methoden zur Verfügung (vgl. Tab. 2.13):

Tab. 2.13: Dynamische Verfahren zur Berechnung der Lebenszykluskosten (Wildemann, 2000)

Einheitlicher Kalkulationszins [*]	Gespaltener Kalkulationszins ^{**}
- Kapitalwertmethode	- Vermögensendwertmethode
- Annuitätenmethode	- Sollzinssatzmethode
- Methode des internen Zinsfußes	

* Annahme eines vollkommenen Kapitalmarkts mit identischen Kredit- und Guthabenzinsen

** Annahme eines unvollkommenen Kapitalmarkts mit unterschiedlichen Kredit- und Guthabenzinsen

Von oben dargestellten dynamischen Verfahren kommt die Kapitalwertmethode in der Praxis am häufigsten zur Anwendung. Aus diesem Grund wird dieser Ansatz als Grundlage für wirtschaftliche Betrachtungen innerhalb der vorliegenden Arbeit gewählt (vgl. Kapitel 6).

Während die LCCA sich in Maschinen- und Fahrzeugbau bereits bewährt hat, wird sie im Bauwesen noch kaum angewandt. Dies ist zum einen durch den nicht gegebenen Wiederholungseffekt bei Bauvorhaben – es handelt sich meist um ein Unikat mit einzigartigem Standort - zu erklären. Zum anderen wird die Bestimmung der notwendigen Einflussparameter durch die langen Nutzungsdauern von Bauobjekten (ca. 25 bis 80 Jahre) erschwert. Parameter wie z. B. Zins, Inflation, Aufwand während der Nutzung, Weiterentwicklung von Technologien etc. sind grundsätzlich mit einer Reihe von Unsicherheitsfaktoren verknüpft.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist es daher im Bau nach wie vor üblich, eine Investitionsentscheidung auf Grund der Anschaffungskosten zu treffen. Obwohl wissenschaftliche Studien (z. B. Brandes, 2003; Bentrup, 2000; Herzog, 2003; Höfle, 2004; Wicon, 2005) bereits bewiesen haben, dass bei Baukonstruktionen besonders die Nutzungsphase maßgebenden Einfluss auf die Gesamtkosten ausübt, ist eine lebenszyklusbezogene Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte in der Baupraxis noch nicht verankert.

2.4.4 Soziale Verantwortung (Corporate Social Responsibility)

Unter sozialer Verantwortung versteht man die Berücksichtigung von Interessen der Gesellschaft bei Entscheidungen bzw. Handlungen von Politik und Industrie. Die soziale Verantwortung eines Unternehmens (CSR) umfasst beispielsweise Aktionäre, Partner, Mitarbeiter, Kunden sowie Kontakte zu politischen Institutionen, zur regionalen Bevölkerung oder zu Privatpersonen. Alle Anspruchsgruppen stehen dabei auf unterschiedliche Weisen in Interaktion mit einem Unternehmen.

Grundsätzlich unterscheidet man bei Aspekten sozialer Verantwortung zwischen der Betriebsebene und der Produkt- bzw. Objektebene (GDA, 2001). Die betriebliche Ebene umfasst sowohl interne als auch externe Aspekte. Interne Aspekte beziehen sich auf die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter, vorhandene Arbeitsbedingungen, angemessene Arbeitssicherheit und optimierte Arbeitsabläufe. Externe Aspekte umfassen die Repräsentation gegenüber der Außenwelt und das dadurch entstehende Image. Das Augenmerk liegt dabei besonders auf sozialem Engagement im Sinne eines positiven Wirkens auf Umwelt, Bevölkerung und deren Lebensstandard. Auch das berufliche und private Verhalten der Mitarbeiter in Interaktion mit ihrer Umgebung ist ein entscheidender Faktor und steht für die sog. „Corporate Identity“⁹. Eine quantitative Bewertung von sozialer Verantwortung auf betrieblicher Ebene ist nur bedingt möglich. Viele Aspekte beruhen auf freiwilliger Initiative oder werden als „Mittel zum Zweck“ verwendet, z. B. Verbesserung des Image, um die Chancen im Wettbewerb zu erhöhen. Trotz dieser Problematik wird derzeit innerhalb des Ausschuss ISO TC 207 an Richtlinien für die soziale Verantwortung von Unternehmen (CSR) gearbeitet.

Auf Produkt-/Objektebene bedeutet soziale Verantwortung die Gewährleistung von ausreichender Sicherheit, die Nichtbeeinträchtigung menschlicher Gesundheit sowie die Erfüllung ästhetischer Ansprüche. Um die für das Objekt „Bauwerk“ von Enquête (1998) definierten Unterkategorien (vgl. Tab. 2.1) zu erfüllen, gilt es somit Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise einzuhalten sowie ein gesundes und behagliches Raumklima mit ausgewogener Schall- und Raumakustik bereitzustellen. Diese Kriterien sind sowohl durch Kenn- als auch Richtwerte in entsprechenden Normen geregelt und können bei der Bemessung und Konstruktion realisiert werden. Die Bewertung ästhetischer und gestalterischer Ansprüche ist jedoch problematisch und basiert auf subjektivem Empfinden, welches nur mit soziologischen Methoden erfasst werden kann.

Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Bewertung von tragenden Aluminiumkonstruktionen liegt, werden bei den folgenden Untersuchungen die sozialen Aspekte im Sinne von ausreichender Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit behandelt. Die Analyse der Unterkategorien „Schall und Raumakustik“, „Raumklima“ sowie „Gesundheit und Behaglichkeit“ ist dagegen maßgeblich abhängig von den Kombinationsbaustoffen. Ebenso werden die Punkte „Ästhetik“ und „Gestalterische Qualität“ nicht nur von der Tragkonstruktion, sondern von dem gesamten Erscheinungsbild des Bauwerks beeinflusst. Entsprechende Bewertungen können folglich nicht nur durch das tragende Material allein vollzogen werden und werden im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt.

⁹ Auftretens eines Unternehmens als Ganzes und Maß dafür, wie sehr sich Mitarbeiter zugehörig und als zielgerichtete, wertschöpfende Gemeinschaft fühlen.

2.4.5 Automatisierung durch Software-Tools

Ziel von Software-Tools ist es, die Werkzeuge Ökobilanz (LCA), Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) und soziale Aspekten mit Entwurf, Bemessung und Konstruktion zu verknüpfen.

Derartige Software-Tools existieren bereits in unterschiedlicher Form (vgl. Tab. 2.14). Sie richten sich vorwiegend an Planer in frühen Entwurfsphasen, und ermöglichen meistens die Erfassung der Stoff- und Energieströme von Bauobjekten. Je nach Programm wird darüber hinaus die Erstellung von Sachbilanzen, ganzen Ökobilanzen oder Lebenszykluskostenanalysen bewerkstelligt.

Einige Programme, wie z. B. LEGOE und BuildDesk, beinhalten sogar eine Schnittstelle zu CAD-Systemen. Hierdurch kann die Erfassung von Bauwerksdaten automatisiert werden. Jedoch beschränken sich diese Daten in der Regel auf die Geometrie (z. B. Punkt, Linien, Flächen etc.), während die für die Bilanzierung maßgebenden, produktbezogenen Daten (z. B. Masse, Wärmedurchgangskoeffizient etc.) nicht übertragen werden. Eine Lösung hierfür liefern Neuberg (2004) und Ekkerlein (2004), indem sie ein Produktmodell im Architectural Desktop (ADT) mit Produktkennwerten und Berechnungsdiensten erweitern. Dieser Ansatz wird im Folgenden vorgestellt.

2.4.6 Internetbasierte Simulation des Ressourcenverbrauchs von Bauwerken

Zu Beginn des Planungsprozess eines entstehenden Bauobjekts werden von Architekten, Tragwerksplanern und Gebäudeausstattern unterschiedliche abstrakte Modelle generiert. Zu diesem Zweck werden hauptsächlich CAD-Systeme verwendet. Da jedoch die beteiligten Unternehmen meist auf unterschiedlichen CAD-Plattformen arbeiten, sind die einzelnen Modelle nicht miteinander kompatibel. Die Folge ist eine redundante Datenhaltung.

Der Leitgedanke ist daher die Zusammenführung sämtlicher Einzelmodelle für ein Bauobjekt zu einem einzigen Modell, dem so genannten Produktmodell. Dieses enthält sämtliche Informationen und Eigenschaften (z. B. Materialkennwerte, Daten zur Bemessung und Konstruktion etc.), die für den gesamten Lebenszyklus von Relevanz sind.

In der Praxis sind Produktmodelle für Bauwerke bereits in mehreren Programmen implementiert, u. a. im Architectural Desktop (ADT) von Autodesk. Dabei können auf Grundlage von Bauteilobjekten dreidimensionale Modelle von entsprechenden Bauwerken erstellt werden. Die Zuweisung von Eigenschaften und Attributen erfolgt direkt zu den einzelnen Bauobjekten. Von diesem zentralen Datenmodell werden dann alle Informationen abgegriffen. Dadurch ist eine direkte Verknüpfung mit der Entwurfsphase gegeben.

Das von Neuberg (2004) und Ekkerlein (2004) entwickelte Softwarekonzept verbindet ein Produktmodell in ADT über das Internet mit Datenbanken und beinhaltet zudem einen Programmaufsatz mit geeigneter Simulations- und Analysesoftware. Die Datenbank enthält ökologische Kennwerte, die zur Aufstellung einer Sachbilanz benötigt werden. Diese Kenndaten stammen aus den Ökodatenbanken GEMIS und GaBiE (vgl. Tab. 2.14). Mit der integrierten Software wird zudem eine Bewertung mit der CML-Methode, dem KEA/KSA, dem Ecoindikator 95, den Umweltbelastungspunkten und der EnEV (vgl. 2.1.2.4) ermöglicht.

Das Softwarekonzept gibt zudem die Möglichkeit, Kostendaten zu implementieren, wodurch eine ganzheitliche Bewertung automatisiert vorgenommen werden könnte.

Tab. 2.14: Ausgewählte Computerprogramme zur ganzheitlichen Bewertung im Bau*

Programm	Quelle	Kurzbeschreibung; Merkmale
Bauloop	(Graubner & Hülske, 2003)	Analyse der Umweltverträglichkeit u. Wirtschaftlichkeit von Bauwerken basierend auf Stoffströmen; ermittelt Auswirkungen von Planungsentscheidungen auf Gebäude/Konstruktion; enthält Datenbanken über Baustoffe u. Bauteilschichten
BuildDesk	(BuildDesk, 2003)	Energetische, ökologische u. ökonomische Optimierung von Gebäuden mit Datenbanken und Bauteilkatalogen, Datenübernahme aus CAD-Programmen
CUMPAN	(Cumpan, 2003)	Erstellung einer umweltorientierten Produktanalyse zur Unterstützung einer Produkt-Ökobilanzierung bzgl. des gesamten Lebenszyklus; enthält umfangreiche Datenbanken, die allerdings für den Anlagen- und Maschinenbau ausgelegt sind
ECOBIS	(ECOBIS, 2000)	Bereitstellung umwelt- und gesundheitsrelevanten Informationen zu Bauproduktgruppen in allen Lebensphasen; ermöglicht Auswahl an Daten unter den Gesichtspunkten Nachhaltigkeit u. Ökologie; Datenexport in andere Software nicht möglich
EcoInvent	(EcoInvent, 2003)	Bereitstellung harmonisierter, generischer Ökobilanzdaten hoher Qualität (u. a. für Bauwesen) mit Bewertungsmethoden, gültig für westeuropäische Verhältnisse; kompatibel mit Gabi, Umberto u. a.
EcoQuantum	(EcoQuantum, 2001)	Ermittlung/Beurteilung der lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen von Wohnbauten; enthält Daten von SimaPro
Invest	(Invest, 2001)	Ermittlung/Beurteilung der lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen von Bauwerken; enthält Ökopunkte für Bauprodukte, Bauteile u. Dienstleistungen; konzentriert sich auf Bürogebäude
GaBi	(Gabi, 2004) (Eyerer, 2000)	Wirtschaftliche Betrachtungen u. Erstellung von Energie- u. Stoffstromanalysen für ganzheitliche Bilanzierung; ermöglicht 'Design for environment'; enthält umfangreiche Datenbanken (u. a. EcoInvent)
GaBiE	(GaBiE, 1999)	Durchführung detaillierter Stoffstromanalysen zur Erfassung des Energieaufwands bzw. der energiebedingten Emissionen bei der Bereitstellung von Energieträgern, Rohstoffen u. Halbzeugen
GEMIS	(GEMIS, 2004)	Analyse von Umwelteffekten u. Kosten der Energiebereitstellung/-nutzung; enthält Produkte, Prozesse u. Szenarien
LEGOE	(Legoe, 2003)	Erfassung, Beschreibung u. Bewertung des Lebenszyklus von Gebäuden unter ökologischen Gesichtspunkten; kombinierte Berechnung von Energiebedarf, Umweltbelastung u. Baukosten; enthält Verbindungen an CAD- u. Berechnungssysteme
OGIP	(OGIP, 1998)	Optimierung von Baukosten, Energieverbrauch und Umweltbelastung; basiert auf der Element-Methode des CRB (Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung); enthält u. a. EcoInvent Datenbank
OPTIMA	(Optima, 1999)	Planungsplattform für energetische Optimierung von Gebäuden durch thermische Simulation; Aufbereitung von 3-D-Gebäudedaten jedoch keine Kopplung an CAD-System
SimaPro	(SimaPro, 1990)	Durchführung von Ökobilanzen mit umfangreichen Datenbanken u. Bewertungsmethoden; kompatibel u. a. mit EcoInvent
Umberto	(Umberto, 2003)	Erstellung von Produktökobilanzen u. Umweltbilanzen, enthält Modulbibliothek aber ohne Baustoff/-prozessdaten

*Die dargestellte Tabelle gibt einen Überblick über derzeit verfügbare Systeme, erhebt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für weitere Informationen dienen die oben angegebenen Literaturquellen sowie (Diederichs et al., 2003).

2.5 Schlussfolgerung

Ziel dieses Kapitels war es, die für den Planer/Bauingenieur relevanten Gesetze, Normen und sonstige Aktivitäten im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung im Baubereich darzustellen, Methoden für die praktische Umsetzung aufzuzeigen und entsprechende Vorgehensweisen für tragende Aluminiumkonstruktionen auszuwählen.

Tatsächlich enthalten sowohl Umwelt- als auch Baugesetze bereits klare Grundsätze, die eine nachhaltige Entwicklung im Bauwesen unterstützen. Darüber hinaus gibt es vielerorts gezielte Initiativen, welche die Erarbeitung konkreter Richtlinien und Normen zum Thema „Nachhaltigkeit im Bau“ forcieren. Die Bestrebungen laufen dahingehend, detaillierte Anleitungen für die Umsetzung in der Baupraxis bereitzustellen. Auslöser für diese Aktivitäten sind zum einen die sich europaweit verschärfende Energiepolitik im Zuge des Kyoto-Protokolls und die wachsende Abhängigkeit von externen Energielieferanten. Zum anderen verfolgt die EU eine zunehmend integrierte Produktpolitik (IPP), wodurch sämtliche Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Lebenszyklus zu berücksichtigen sind. Tatsache ist, dass der Baubereich in naher Zukunft verstärkt mit nachhaltigen Anforderungen im Sinne von Ressourcenschutz und lebenszyklusorientierten Betrachtungen konfrontiert wird.

Für die Realisierung dieser Forderungen stehen unterschiedliche Werkzeuge zur Verfügung. Vor der Durchführung entsprechender Bewertungen gilt es allerdings zunächst deutlich abgrenzbare Kategorien zu definieren. Angesichts der drei Elemente der Nachhaltigkeit liegt es nahe die Bereiche „Ökologie“, „Wirtschaftlichkeit“ und „Soziales“ festzulegen. Diese Bereiche können dann in Form von Unterkategorien bzw. messbare Indikatoren, z. B. gemäß Enquête (1998) oder SIA (2000), weitergehend unterteilt und analysiert werden:

- Der Bereich „Ökologie“ umfasst dabei sowohl das Emissionsaufkommen, den Energie-, Flächen-, Ressourcen- und Wasserverbrauch als auch die Abfallmengen. Die Bewertung dieser Indikatoren wird zum Beispiel durch Anwendung einer Ökobilanz (LCA) gemäß EN ISO 14040 ff. ermöglicht. Das Verfahren umfasst die Zieldefinition, Sachbilanzerstellung, Wirkungsabschätzung und die Auswertung der erzielten Ergebnisse. Der Energieverbrauch kann zudem durch Anwendung der Energieeinsparverordnung (EnEV) beurteilt werden.
- Die Kategorie „Wirtschaftlichkeit“ umfasst die Lebenszykluskosten, die Kapitalerhaltung, die Lebensdauer und die Funktionalität. Während Kosten und Kapital in Abhängigkeit der Lebensdauer mit Hilfe einer Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) quantitativ untersucht werden können, basiert die Bewertung der Funktionalität auf subjektiver Einschätzung.
- „Soziales“ wird bei Bauobjekten durch Ästhetik, gestalterische Qualität, technische Aspekte, wie z. B. Sicherheit, Raumklima, Schall und Raumakustik sowie Gesundheit und Behaglichkeit abgedeckt. Diese Gesichtspunkte werden großteils durch korrekte Bemessung, Konstruktion und Ausführung abgehandelt. Anforderungen an die Ästhetik, Gestaltung und Behaglichkeit basieren hingegen auf der jeweiligen Sichtweise des Betrachters.

Die Verknüpfung der oben genannten, quantifizierbaren Aspekte mit der Entwurfsphase sollte im Idealfall mit Software-Tools erfolgen. Zwar wurden bereits mehrere Programme entwickelt, doch können bisher lediglich einzelne Aspekte, wie z. B. Emissionen und Energieverbrauch, abgedeckt werden. Ein Tool zur ganzheitlichen Bewertung wurde bisher nicht realisiert. Einen Lösungsansatz hierfür liefern Neuberg (2004) und Ekkerlein (2004), indem sie ein Produktmodell im Architectural Desktop (ADT) mit Produktkennwerten und Berechnungsdiensten erweitern.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit gilt es tragende Aluminiumkonstruktionen zu analysieren und zu bewerten. Aus diesem Grund werden die Indikatoren behandelt, welche zum einen quantifizierbar sind und zum anderen einen direkten Zusammenhang zu tragenden Aluminiumkonstruktionen aufweisen (vgl. Abb. 2.6).

Kategorie	Indikator (messbar)	Werkzeug
Ökologie	Emissionen: GWP100, AP, NP, TOPP Energieverbrauch: KEA, Heizwärme	LCA, EnEV
Wirtschaftlich	Lebenszykluskosten	LCCA
Soziales	Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit	Bemessung
+		
Ganzheitlich	Kombination obiger Indikatoren	Neuberg & Ekkerlein (2004)

Abb. 2.6: Indikatoren und Werkzeuge zur ganzheitlichen Analyse und Bewertung von tragenden Aluminiumkonstruktionen

Für die Bewertung von Umweltwirkungen wird die Ökobilanz angewandt. Um dabei die Übereinstimmung mit EN ISO 14040 ff. zu gewährleisten, wird zur Wirkungsabschätzung die CML-Methode eingesetzt. In Absprache mit der Aluminiumindustrie und basierend auf anderen ökologischen Studien, wird bei den Emissionen der Fokus auf das Treibhauspotenzial (GWP100), das Eutrophierungspotenzial (NP) und das Versauerungspotenzial (AP) gelegt. Anstelle des vielerorts zusätzlich verwendeten Photooxidantienpotenzials (POCP) und des Ozonabbaupotenzials (ODP) wird basierend auf der Erklärung von Ekkerlein (2004) das Ozonvorläuferpotenzial (TOPP) berechnet. Da bei Aluminium zudem der Energieverbrauch eine maßgebliche Rolle spielt, wird des Weiteren der kumulierte Energieaufwand (KEA) je nach Energiebereitstellung bestimmt. Beim Aluminium Einsatz in der Gebäudehülle wird zudem der Heizwärmebedarf gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) berechnet.

Die Untersuchung von ökonomischen Aspekten erfolgt mit Lebenszykluskostenanalysen. Für die hierbei erforderliche dynamische Investitionskostenrechnung kommt die allgemein anerkannte Kapitalwertmethode zur Anwendung.

Bei den sozialen Anforderungen werden Aspekte im Hinblick auf Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit mit den entsprechenden Normen für Bemessung und Konstruktion behandelt.

Darüber hinaus wird die Anwendbarkeit des Software-Tools von Neuberg (2004) und Ekkerlein (2004) zur ganzheitlichen Bilanzierung getestet.

3 Aluminium im Bauwesen

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Dinge von Aluminium im Bauwesen untersucht. Hierzu werden aktuelle Zahlen und baustofftechnologische Aspekte dargestellt sowie die Ergebnisse einer Situationsanalyse von Aluminiumbauteilen in der Braupraxis aufgezeigt.

3.1 Verbrauch

Aluminium wird als flexibler und attraktiver Werkstoff in fast allen Industriezweigen für unterschiedliche Verwendungen eingesetzt. In Europa ist das Bauwesen mit 26% Anteil aller gefertigten Aluminiumendprodukte nach dem Transportwesen der zweitgrößte Absatzmarkt (vgl. Abb. 3.1). In Deutschland ist die Situation ähnlich, doch ist der Anteil des Bausektors an der Gesamtproduktion mit 16% etwas geringer als europaweit (GDA, 2004).

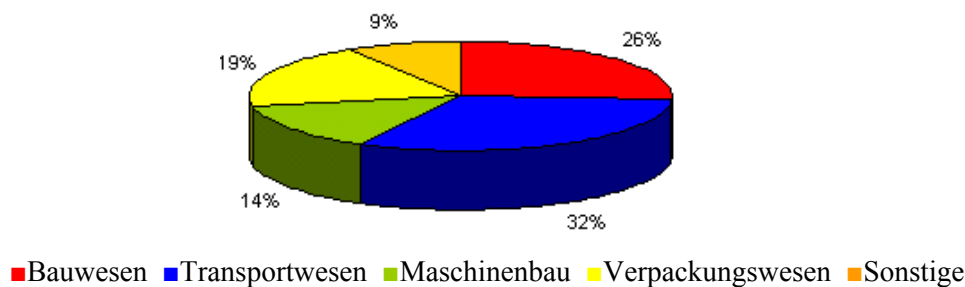


Abb. 3.1: Hauptmärkte für Aluminiumprodukte in Europa (EAA, 2004)

Die Anwendungsbereiche von Aluminium im Bausektor sind vielfältig und reichen von Fenstern, Türen, Fassaden, Dach- und Wandkonstruktionen über Beschläge, Griffe, Folien und Geländer bis hin zu ganzen Bausystemen aus Strukturelementen. Die Anzahl von tragenden und nicht-tragenden Aluminiumanwendungen im Bausektor hat sich in den letzten Jahrzehnten vervielfacht (vgl. Abb. 3.2). Insgesamt wurden seit 1950 in Europa ca. 30 Millionen Tonnen Aluminium verbaut (Gerber, 2004).

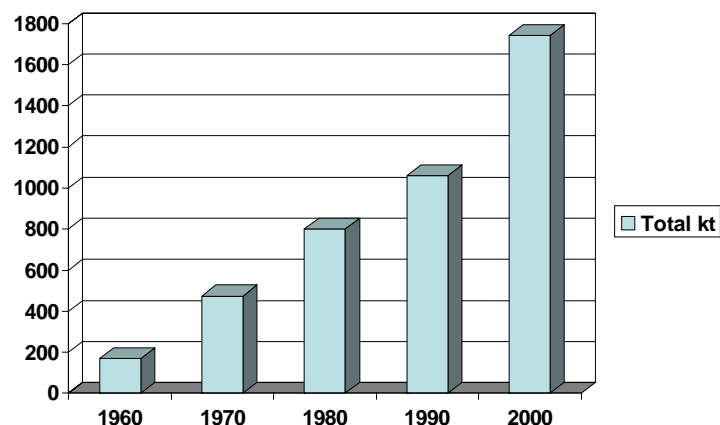


Abb. 3.2: Verbautes Aluminium im europäischen Bausektor seit 1960 (Gerber, 2004)

Im Vergleich zu 1950 wird heute ca. zehnmal mehr Aluminium für Bauwerke verwendet. Mittlerweile werden jährlich ca. 2 Millionen Tonnen Aluminium in der europäischen Bauindustrie benötigt. Dies entspricht ca. 0,8 Millionen Tonnen Walzprodukte (20% der Gesamtproduktion), ca. 1,2 Millionen Tonnen Strangpressprodukte (50% der Gesamtproduktion) und 0,15 Millionen Tonnen Gussteile (6% der Gesamtproduktion) pro Jahr. Im Bereich der Strangpress- und Walzprodukte stellt der Bausektor sogar das größte Marktsegment dar (vgl. Abb. 3.3).

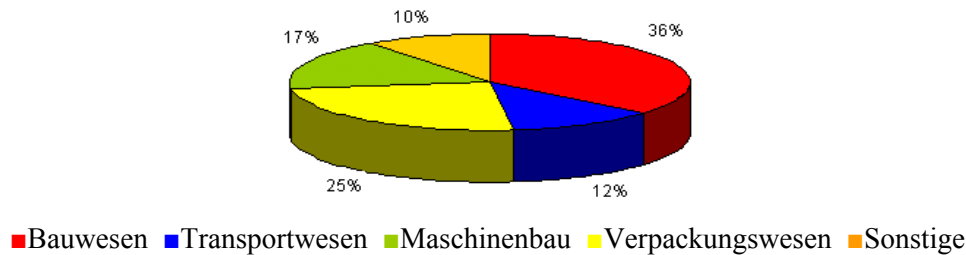


Abb. 3.3: Hauptmärkte für Walzprodukte und Strangpressprofile in Europa (EAA, 2004)

Die Menge des derzeit verbauten Aluminiums in europäischen Bauwerken entspricht der Ausbeute von sechs Jahren Primäraluminiumproduktion mit modernster Anlagentechnik (Gerber, 2004). Trotzdem beträgt der durchschnittliche Anteil von Aluminium in Gebäuden in Europa weniger als 1%. Gemäß Houwelingen (2004) müssen mindestens 4500 Tonnen europäische Gebäudemasse abgebrochen werden, um eine Tonne Aluminium zur Wiederverwertung aus dem Baubereich zu sammeln,

In Deutschland werden derzeit ca. 485000 Tonnen Aluminium pro Jahr für Bauanwendungen benötigt. Davon werden 3% des im Gebäudebereich angewandten Aluminiums für Wohnhäuser verbraucht, während die restlichen 97% für kommerzielle Gebäude verbaut werden. In den letzten vier Jahren betrug der Anteil von Wohnungsbauten am Gesamtneubau ca. 85%. Der Anteil von kommerziellen Gebäuden lag bei ca. 15% (Houwelingen, 2004). Aluminium wird bei diesen Anwendungen vorwiegend in der Gebäudehülle bzw. für Kleinteile (Beschläge, Griffe etc.) verwendet. Im Bereich des Aluminiumfenster- und Fassadenbaus ist Deutschland mittlerweile weltweit führend. Dies ist insbesondere auf neue Entwicklungen in den Bereichen Wärmeschutz, Schallschutz, Raumklima und solare Wärmeengewinnung zurückzuführen.

3.2 Materialeigenschaften

3.2.1 Physikalische und mechanische Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften von Aluminium sind im Vergleich mit entsprechenden Stahleigenschaften in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tab. 3.1: Physikalische Eigenschaften von Aluminium versus Stahl

	Aluminium	Stahl
Elastizitätsmodul E [N/mm ²]	70000	210000
Querdehnungszahl ν [-]	0,3	0,3
Wärmeausdehnungskoeffizient α_T [1/C°]	$23 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit λ_{Alu} [W/mK]	160	60
Schmelzpunkt [C°]	660	1500
Dichte ρ [kg/m ³]	2700	8100

Die Dichte von Aluminium beträgt lediglich ein Drittel des Wertes von Stahl. Das daraus resultierende geringe Eigengewicht bei gleichzeitig hoher Festigkeit ist einer der Hauptgründe für die vielfältige Verwendung von Aluminium im Bauwesen (vgl. Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Charakteristische Festigkeiten für Aluminium nach EC 9 und Stahl nach DIN 18800

	Aluminiumlegierungen	St 37	St 52
Streckgrenze [N/mm ²]	100-290 (Stranggepresst)	215- 240	325- 360
Zugfestigkeit [N/mm ²]	140-350 (Stranggepresst)	360	510

Niedrige Eigenlasten führen zu signifikanten Materialeinsparungen bei Tragkonstruktionen und ermöglichen gleichzeitig höhere Nutzlasten (siehe Abb. 3.4 und vgl. Kostea (1996)). Außerdem werden Transport und Montage von Aluminiumbauteilen erleichtert wodurch ein hoher Vorfertigungsgrad ermöglicht wird.

Aluminium	Stahl	Aluminium	Stahl
$m = 10,43 \text{ kg/m}$	$m = 18,84 \text{ kg/m}$	$m = 8,68 \text{ kg/m}$	$m = 17,71 \text{ kg/m}$
$EI = \text{konst.} = 898 \cdot 10^6 \text{ kN/mm}^2$		$GI = \text{konst.} = 4,04 \cdot 10^6 \text{ kN/mm}^2$	

Abb. 3.4: Gewichtseinsparung von Aluminium gegenüber Stahl (Valtinat, 2003)

Da sich bei Temperatursenkung die (Kerbschlag-) Zähigkeit nicht verändert und sich die Härte gleichzeitig erhöht, bleiben oben genannte Festigkeitswerte von Aluminium auch bei Niedrigtemperaturen erhalten.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Aluminium ist nicht linear und kann daher nicht wie bei Stahl zu einem ideal-elastischen und ideal-plastischen Bereich vereinfacht werden. Aufgrund des niedrigen Elastizitätsmoduls ist Aluminium ein sehr weiches Material und folglich leicht verformbar. Der Wärmeausdehnungskoeffizient begünstigt das Verformungsverhalten insbesondere bei hohen Temperaturen. Bei Anwendungen von Aluminium in der Gebäudehülle sollte die hohe Wärmeleitfähigkeit (vgl. Tab. 3.1) berücksichtigt werden. Um Wärmebrücken zu verhindern ist eine ausreichende Dämmung unbedingt erforderlich. Abbildung 3.5 zeigt beispielsweise die Folgen einer ungenügenden Wärmdämmung. In einem derartigen Fall kann Aluminium zum Kältepol im Gebäudeinneren werden und das Raumklima signifikant beeinträchtigen.

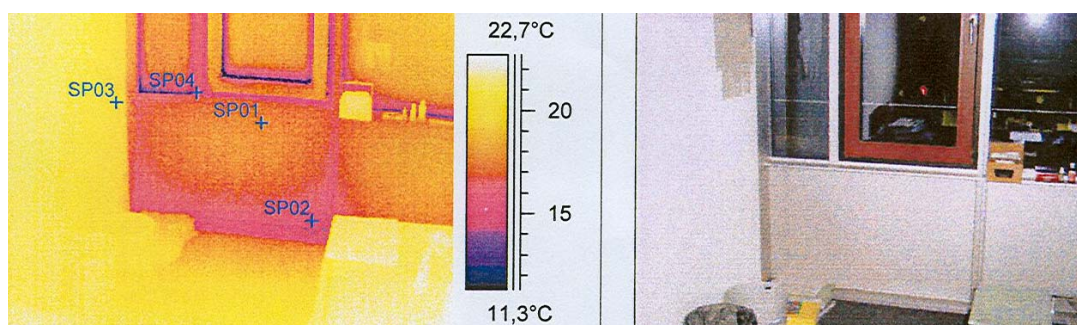


Abb. 3.5: Temperaturverteilung einer Außenfassade mit Aluminiumpaneelen ($\lambda_{\text{RAL}} = 160 \text{ W/(mK)}$), Glas ($\lambda_{\text{Rglas}} = 0,8 \text{ W/(mK)}$) und Holzfensterrahmen ($\lambda_{\text{Rglas}} = 0,17 \text{ W/(mK)}$)

Aluminium ist nicht brennbar, sondern schmilzt sobald die Temperaturen 660°C überschreiten. Beim Erreichen von 180 bis 250°C verlieren jedoch alle Aluminiumlegierungen ca. 50% ihrer ursprünglichen Festigkeit. Im Brandfall bewirkt die hohe Wärmeleitfähigkeit allerdings ein schnelles Abführen der Wärme vom Brandherd, wodurch der Temperaturanstieg verringert wird. Die Tragfähigkeit von Aluminiumteilen kann so mindestens bis zur Evakuierung des Bauwerks gewährleistet werden. Bei Off-Shore Konstruktionen werden sogar gewisse Feuerschutzteile (u. a. Rettungsboote) aus Aluminium gefertigt (Kosteas, 1996). Der Feuerwiderstand kann durch aktive (z. B. Löschsyste) und passive Schutzvorrichtungen (z. B. keramische Fasern, Gipstafeln etc.) erhöht werden. Hinweise zum Feuerschutz und Berechnungsmethoden für den Feuerwiderstand sind in der europäischen Norm prEN 1999-1-2: 2003 enthalten.

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Eigenschaften ist Aluminium nicht toxisch, nicht magnetisch, verfügt über ausgeprägte Leitfähigkeit von Strom und besitzt ein hohes Reflexionsvermögen. Durch die Verwendung von Aluminium in Dächern wird beispielsweise 70 Prozent der Sonnenstrahlung reflektiert. Im Vergleich dazu reflektieren Dächer mit Asphalt lediglich 23 Prozent. Dem amerikanischen „Department of Energy“ (DOE) zufolge könnte man in den USA durch den Ersatz von 50% der bestehenden Asphaltgedächern mit Aluminiumgedächern jährlich bis zu 50 Billionen Kilowattstunden an elektrischer Energie für Kühlung einsparen (Aluminium now, 2004).

3.2.2 Möglichkeiten der Verarbeitung

Die Zugabe von Legierungselementen ermöglicht die direkte Anpassung des Aluminiumwerkstoffs an einen bestimmten Einsatzzweck. In der Regel zieht jedoch die Verbesserung einer oder mehrerer Eigenschaften die Verschlechterung anderer Eigenschaften nach sich. Die richtige Wahl der Legierung ist daher eine Optimierungsaufgabe. Im Bauwesen werden in der Regel die folgenden Legierungselemente verwendet (Kosteas, 1996):

Tab. 3.3: Wesentliche Legierungselemente im Bauwesen

Kupfer	erhöht Festigkeit, Härte; verringert chem. Beständigkeit
Magnesium	erhöht Festigkeit, Härte, chem. Beständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Schweißbarkeit; verringert Verformbarkeit und Bruchdehnung
Mangan	erhöht Festigkeit, chem. Beständigkeit, Korrosionsbeständigkeit
Silizium	erhöht Festigkeit, Funktionalität, Bruchdehnung, Gießbarkeit, Maßkonstanz, gewährleistet konstante Eigenfärbung
Zink	erhöht Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit

Darüber hinaus können die Werkstoffeigenschaften von Aluminium durch mechanische Behandlung (z. B. Kaltverfestigung¹⁰) und durch thermische Verfahren (z. B. Aushärtung¹¹) beeinflusst werden. Umfangreiche Information hierzu bietet die Aluminium-Zentrale e.V. (1995).

Die Duktilität von Aluminium ermöglicht die Fertigung funktionaler Querschnitte durch Walzen und Strangpressen (vgl. Abb. 3.6). Letzteres ermöglicht zudem die unmittelbare Integration von Konstruktionselementen, z. B. Steifen oder sekundäre Elemente, in den Querschnitt. Der maximale Durchmesser des Umschlingungskreises der Strangpressprofile beträgt beispielsweise zwischen 150 mm und 200 mm für die Legierungen 6xxx nach DIN EN 755-3 und höchstens 300 mm für Präzisionsprofile aus AW 6060 und AW 6063 nach EN 12020-1.



Abb. 3.6: Stranggepresste Aluminiumquerschnitte

¹⁰ Kaltverfestigung: Durch Verformen des Werkstoffs bei Raumtemperatur kommt es zur Erhöhung der Versetzungsdichte und dadurch zur Behinderung der Gleitvorgänge im Gefüge. Dies führt zur Verfestigung des Werkstoffs während die Verformbarkeit abnimmt.

¹¹ Aushärtung: Festigkeitssteigerung durch Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern bei aushärtbaren Legierungen (z. B. mit Mg, Si, Zn oder Cu).

Aluminiumhalbzeug, d. h. Walzprodukte, Gussteile¹² oder Strangpressprofile, können durch Sägen, Schmieden, Fräsen, Bohren, Falzen, etc. bearbeitet werden (Hugues, 2001). Für Verbindungen stehen die Fügeverfahren Schweißen, Löten (Anwendung nur bei Gefahr des Verzugs durch Schweißen, nicht für tragende Konstruktionen zulässig), Kleben sowie mechanische Verbindungsmittel zur Verfügung. Durch Schweißen mit herkömmlichen Verfahren (TIG, WIG, Laser) kommt es zur Festigkeitsverminderung im Bereich der Wärmeeinflusszone. Aufgrund der thermischen Anfälligkeit von Aluminium bewirkt die eingebrachte Schweißwärme Veränderung der Struktur (z. B. Poren) und der Eigenschaften des Grundwerkstoffs (z. B. Schrumpfung bei Erstarrung, etc.), welche eine entsprechende Festigkeitsverminderung nach sich ziehen. Bei Anwendung des Reibrührschweißens¹³ (FSW) bleiben die Temperaturen im plastischen Bereich und eine Entfestigung kann vermieden werden. Hierdurch ergeben sich insbesondere unter dynamischer Beanspruchung große Vorteile. Reibrührschweißen ist zwar im Bauwesen noch nicht gängig, wird aber im Schiffbau und Fahrzeugbau bereits häufig angewendet.

3.2.3 Nutzung

3.2.3.1 Natürlicher Korrosionswiderstand

Aluminiumbauteile sind während der Nutzungsphase sehr resistent. Dies ist in erster Linie auf die natürliche Korrosionsresistenz von Aluminium zurückzuführen. Durch die hohe Sauerstoffaffinität von Aluminium bildet sich an der Oberfläche eine ca. 0,01 µm dicke grauweiße bis dunkelgraue Oxidschicht. Diese wächst je nach Umgebungsbedingung auf 0,03 bis 0,1 µm Dicke und hat einen gegenüber dem Metall ca. dreifach höheren Schmelzpunkt (rund 2050 °C). Die Oxidschicht ist sehr resistent und agiert als natürlicher Schutz gegen äußere Einwirkungen. Werden daher keine dekorativen Anforderungen an Bauteile gestellt, z. B. bei Betriebshallen etc., so können Reinaluminium und kupferfreie Aluminiumlegierungen unbehandelt und ohne Beschichtung - also metallblank - eingesetzt werden. Die natürliche Vergrauung der Aluminiumflächen unter Witterungseinfluss wirkt sich gleichzeitig positiv auf den Blendschutz aus.

3.2.3.2 Korrosionsschutz bzw. Farbbehandlung

Die Oxidschicht des Aluminiums kann außerhalb des chemisch neutralen Bereichs (pH 5- 8), z. B. bei Einwirkung von Salzsäure, SO₂, Chloriden und stark alkalischen Medien, beschädigt werden. Dadurch besteht die Gefahr von Korrosion. Es gilt somit direkte Verbindungen mit Erde, Frischbeton, Kalk- und Zementmörtel als auch speziellen Holzarten (Eiche, Zeder, Kastanie) und Holzschutzmitteln entweder zu verhindern oder einen zusätzlichen Korrosionsschutz vorzusehen. Zur Vermeidung von Kontaktkorrosion sollten Verbindungen mit edleren Metallen, z. B. Stahl und Kupfer, unter Einwirkung eines Elektrolyten immer mit Hilfe einer Isolierschicht oder entsprechenden Überzügen (z. B. Zink) ausgeführt werden.

¹² Gussteile werden durch einen hohen Legierungsgehalt von bis zu 20% charakterisiert.

¹³ Beim Reibrührschweißen bzw. Friction Stir Welding (FSW) werden die Fügeteile durch plastische Verformung miteinander verbunden. Dabei wird ein rotierendes Werkzeug entlang der zu verschweißenden Werkstoffe bewegt. Durch die hierdurch entstehende Reibungswärme geht das Aluminium in den plastischen Zustand über. Die Rotation des Werkzeugs führt zur Vermischung der Fügeteile und es kommt zu einer homogenen Schweißnaht (Klug, 1999).

Kupferhaltigen Aluminiumlegierungen unter Einwirkung von Feuchtigkeit erfordern in jedem Fall einen Korrosionsschutz. Alle anderen Legierungen müssen lediglich bei hohen Anforderungen an Ästhetik, Betriebssicherheit und Lebensdauer sowie gleichzeitig aggressiven Umgebungsbedingungen zusätzlich geschützt werden. Konkrete Anweisungen hierzu sind beispielsweise in prEN 1999-1-1 (2005) enthalten.

Durch entsprechende Oberflächenbehandlungen und Anstriche kann der natürliche Korrosionsschutz verstärkt werden, bzw. wenn von den Bauherren gefordert, die Oberfläche und Farbe von Aluminium verändert werden. In Europa kommen für Bauanwendungen hauptsächlich zwei Methoden zum Einsatz: das Eloxieren, bzw. auch genannt Anodisieren und das organische Beschichten bzw. dabei vorwiegend das Pulverbeschichten (vgl. Abb. 3.7).

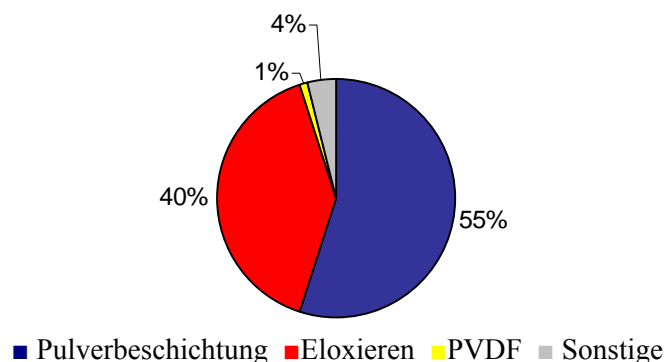


Abb. 3.7: Beschichtungsmethoden von Aluminiumbauteilen in Europa (Seddon, 2004)

Durch Eloxieren wird nach DIN 17611 die natürliche Oxidschicht künstlich erzeugt bzw. verstärkt. Die künstliche Schicht ist dabei ca. 200-mal so dick wie die ursprüngliche Oxidschicht, d. h. je nach Lage und Beanspruchungen des Aluminiumteils beträgt die endgültige Schichtdicke zwischen 10 und 25 μm .

Bei der Pulverbeschichtung wird nach einer entsprechenden Oberflächenbehandlung das Beschichtungspulver aufgesprüht und eingebrannt. Die Vorbehandlung der Oberfläche durch Chromatieren nach DIN 50939 oder einer Zwei-Komponenten Grundierung ist zur besseren Haftung des Pulvers unbedingt erforderlich (Aluminium-Zentrale, 1992). Zur Beschichtung für Außenbauteile werden vorwiegend Polyester-Pulver und Polyurethan-Pulver verwendet. Da hierbei keine Lösungsmittel zum Einsatz kommen, werden diese Beschichtungen als sehr umweltfreundlich eingestuft. Zum Schutz gegen ultraviolette Strahlen besteht zudem die Möglichkeit einer Polyvinyl-Fluorid-Beschichtung (PVDF). Diese wird häufig im Nahen Osten verwendet, muss jedoch mehrschichtig aufgebracht werden und ist daher für architektonische Anwendungen nicht wirtschaftlich.

In Tabelle 3.4 sind die Eigenschaften von Pulverbeschichtungen und Eloxalschichten gegenübergestellt.

Tab. 3.4: Pulverbeschichtung und Eloxieren – Eigenschaften (in Anlehnung an Seddon, 2004)

Pulverbeschichten	Eloxieren
<ul style="list-style-type: none"> - Lebensdauer ca. 25- 30 Jahre - Umfangreiche Farbpalette - Mechanischer Defekt leicht auszubessern - Erneuerung durch Farbanstrich - Auch für andere Materialien geeignet (z. B. Stahl) - Gefahr der Filiformkorrosion - Gefahr des Verblässens 	<ul style="list-style-type: none"> - Lebensdauer > 50 Jahre - Geringere Farbauswahl - Mechanischer Defekt nicht zu korrigieren - Keine Filiformkorrosion¹⁴ - Resistent gegenüber Chloriden und Sulfaten - Bessere Haftung sowie kein Abplatzen bzw. Auskreiden - Verfärbungen bei Einwirkungen von Mörtel und Zement durch alkalische Reaktionen - Größerer Widerstand gegen Reibung - Gefahr des Verblässens nicht gegeben

In Tabelle 3.5 werden Beschichtungsarten in Abhängigkeit des Bauteils und der entsprechenden Legierung dargestellt.

Tab. 3.5: Beschichtungen im Bauwesen (in Anlehnung Aluminium-Zentrale, 1992)

Hauptanwendungsgebiete	Meistverwendete Legierung	Oberfläche
Ebene und geformte Bleche für Fassaden und Bekleidungen aller Art sowie Bedachungen	AlMn1(EN AW-3103) AlMg1(EN AW- 5005 (A)) AlMg3 (EN AW- 5754)* AlMg4,5Mn (EN AW 5083)	metallblank, eloxiert, organisch beschichtet
Fallrohre und Abdeckungen	AlMn1 (EN AW-3103)	metallblank
Profile für Fenster, Türen, Fassaden etc.	AlMgSi0,5 (EN AW- 6061)	in Einzelfällen metallblank, eloxiert, organisch beschichtet
Konstruktionselemente mit statischer Funktion	AlMgSi0,5 (EN AW- 6061) AlMgSi1(EN AW- 6082) AlZn4,5Mg1(EN AW- 7020)	metallblank, eloxiert, organisch schichtet
Beschläge für Türen, Fenster und dgl.	AlMgSi0,5 (EN AW- 6061) Gusslegierungen	eloxiert, organisch beschichtet

* für anodische Oxidation mit Einschränkung

¹⁴ Bei Pulverbeschichtung kann trotz Gütesicherung unter extremer Umweltbelastung der Widerstand gegen Filiformkorrosion (= Korrosion zwischen Metall und Beschichtungen, welche fadenartige Spuren auf der Oberfläche zur Folge hat, wegen der geringen Eindringtiefe jedoch die Festigkeit des Materials nicht gefährdet) nicht gewährleistet werden.

3.2.3.3 Wartungsaufwand

Um die langfristige Erhaltung der Werthaltigkeit von Bauwerken zu sichern, ist eine regelmäßige Wartung erforderlich. Die Wartungsarbeit ist dabei charakterisiert durch folgende Maßnahmen:

- Zeitpunktbezogene Instandsetzung: Wiederherstellung der durch technische Abnutzung und einmalige Schäden verursachten Gebrauchsunfähigkeit.
- Zeitraumbezogene Instandhaltung: kontinuierliche Beseitigung von Schäden, verursacht durch Abnutzung, Gebrauch und Witterungseinwirkungen sowie die Anpassung an baurechtliche Vorschriften (z. B. erhöhte normative Anforderungen an Schallschutz und Wärmeschutz).

Unter normalen Randbedingungen sowie bei korrekter Konstruktion und Ausführung ist der Wartungsaufwand von Aluminiumbauteilen im Vergleich zu anderen Materialien von großer Effizienz geprägt. In der Regel versagen zunächst die Verbundbauteile bevor Instandsetzungsmaßnahmen bei Aluminium erforderlich sind. Die erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen beschränken sich ebenfalls auf ein Minimum. Blanke Aluminiumbauteile erfordern auch bei Bewitterung keinerlei Unterhaltsaufwand und Aluminium mit Oberflächenbehandlung benötigt lediglich eine regelmäßige Reinigung. Diese ist notwendig, um das dekorative Aussehen zu erhalten und durch Schmutzbeseitigung die Korrosionsbelastung zu verringern. Hierbei unterscheidet man zwischen folgenden Reinigungsarten (Aluminium-Zentrale, 2000):

- Erstreinigung: Entfernung von Bauschmutz und atmosphärisch bedingter Verschmutzung im Anschluss an die Erstellung des Bauwerks.
- Grundreinigung: abrasive Reinigung, wenn das Bauteil über mehrere Jahre hinweg bewittert und nicht gereinigt wurde.
- Intervallreinigung: regelmäßige Folgereinigung nach der Erstreinigung bzw. Grundreinigung.

Die Erstreinigung bzw. Grundreinigung ist Ausgangspunkt für die Intervallreinigung. Aluminiumaußenbauteile sollten grundsätzlich bereits nach der Erstreinigung in regelmäßigen Abständen gereinigt werden. Bei anodisierten Fassaden, die langjährig nicht oder nie gereinigt wurden, ist beispielsweise mit Ausblühungen, d. h. mit örtlicher Perforation der Oxidschicht, zu rechnen (Mader, 2004). Eine Grundreinigung sollte im Idealfall nicht erforderlich werden.

In Tabelle 3.6 sind empfohlene Reinigungsintervalle unter der Voraussetzung einer normalen Belastung und durchschnittlichen ästhetischen Anforderungen enthalten:

Tab. 3.6: Reinigungsintervalle von Aluminiumbauteilen (in Anlehnung an Mader, 2004)

	Eloxierte Außenbauteile	Beschichtete Außenbauteile
Erstreinigung bzw. Grundreinigung	vor Bauabnahme bzw. nach mehreren Jahren ohne Reinigung	
Intervallreinigung	Alle 2 bis 3 Jahre	mindestens einmal pro Jahr

3.2.3.4 Lebensdauer

Aluminiumbauteile sind durch eine ausgeprägte Dauerhaftigkeit gekennzeichnet. Ein markantes Beispiel für die Langlebigkeit von Aluminium ist die Kirche San Gioacchino in Rom (vgl. Abb. 3.8). Der Architekt Lorenzo de Rossi ließ 1896 die Kuppel mit unbeschichteten Aluminiumplatten eindecken, da er von der unbegrenzten Haltbarkeit des Materials überzeugt war. Das Dach ist bis zum aktuellen Zeitpunkt optimal erhalten (GDA, 2002a).

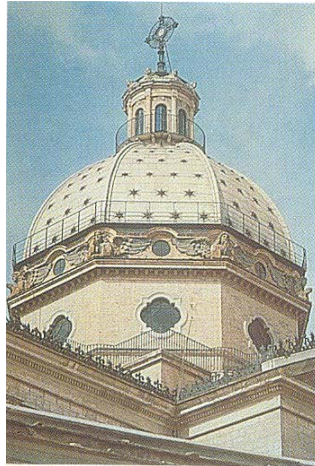


Abb. 3.8: Kirche San Gioacchino in Rom mit Dachplatten aus Aluminium (GDA, 2002a)

In Deutschland war das erste große Vorzeigeprojekt für die Anwendung von Aluminium im Bauwesen das 10.000 Quadratmeter große Aluminium-Leistendach der 1951/52 errichteten Dortmunder Westfalahalle (vgl. Abb. 3.9). Noch heute ist das Dach in einwandfreiem Zustand.



Abb. 3.9: Dortmunder Westfalahalle mit Aluminium-Leistendach

Bei der Angabe von Lebensdauern unterscheidet man zwischen technischer und wirtschaftlicher Lebensdauer. Die technische beschreibt die Obergrenze der Haltbarkeit von Bauteilen unter der Voraussetzung einer regelmäßigen Wartung. Die wirtschaftliche Lebensdauer hängt von der Nutzungsart, der Abhängigkeiten der Bauteilschichten untereinander und den ästhetischen Ansprüchen des Besitzers ab. Je besser ein Bauteil angepasst werden kann, umso größer ist die wirtschaftliche Lebensdauer. Beispielsweise werden beschichtete Fassaden oft lange vor Ablauf der technischen Lebensdauer aus gestalterischen Gründen rückgebaut.

In Tabelle 3.7 sind einige charakteristische, technische Lebensdauern für ausgewählte Aluminiumbauteile dargestellt. Durch Beachtung entsprechender Güte- und Prüfbestimmungen besteht zudem die Möglichkeit die angegebenen Lebensdauern zu optimieren.

Tab. 3.7: Nutzungsdauern unterschiedlicher Bauteile aus Aluminium

Bauteil unter Witterungseinfluss	Schadenspotenzial	Technische Lebensdauer [a]	Gütesicherung
Blankes Aluminium	Temperatur, Feuchte, mechanische Beschädigung der Oberfläche, Verformungen, Säuren, Laugen	70-100 (GFÖB, 2005)	EN 755
Eloxiertes Aluminium		> 40-50 (Seddon, 2004)	(GAA, 2005)
Pulverbeschichtetes Aluminium		70-100 (GFÖB, 2005)	
		25-30 (Seddon, 2004)	(GSB, 2001)
Wärme gedämmte Aluminiumprofile für Fenster und Türen	Versagen der Verbundwerkstoffe (z. B. Kunststoffe) oder der Rahmenecken, Temperatur, Feuchte, mechanische Beschädigung der Oberfläche, Verformungen, Säuren, Laugen	25-40 (GFÖB, 2005)	
		ca. 30 Jahre*	RAL-RG 636/1 RAL-GZ 996 RAL-GZ 424/2

* Für die Einsatzdauer wärme gedämmter Metallprofile sind bisher nur wenige Erfahrungswerte verfügbar.

3.2.4 Entsorgung bzw. Wiederverwertung

Aluminium wird nicht verbraucht, sondern genutzt und wiederverwertet. Dies ist auf die exzellenten Recyclingeigenschaften sowie den hohen Schrottwert von gebrauchtem Aluminium zurückzuführen (vgl. Kapitel 5)

3.2.5 Aluminium in der Planungsarbeit

Entwurf, Berechnung, Konstruktion und Ausführung von Aluminiumbauteilen können nur von Planern mit Erfahrung und ausgezeichneten Werkstoffkenntnissen fachgerecht vorgenommen werden. Die einfache Übertragung der Verfahren, Bauformen, Verarbeitungsmethoden, Transport- und Montageverfahren vom Stahlbau in den Aluminiumbau führt nicht zur optimalen Nutzung des Werkstoffs. Bei Aluminium müssen im Gegensatz zu Stahl das nicht lineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten, die Verformungsanfälligkeit und die Entfestigung bei Wärmeeinwirkung entsprechend einkalkuliert werden. Es ist somit nötig, die Stärken und Schwächen von Aluminium durch Fachkenntnisse, entsprechende Technologien und Bearbeitungsverfahren sowie innovativen Bemessungsnormen zu berücksichtigen.

3.3 Situationsanalyse in der Baupraxis

Um den Stellenwert von Aluminiumbauprodukten in der Baupraxis zu ermitteln, wurde in Zusammenarbeit mit Hasselbeck et al. (2004) eine Situationsanalyse sowohl auf Unternehmenseite als auch auf Planerseite durchgeführt. Ziel war es, Anwendungsgebiete, Stärken, Schwächen, Informationsdefizite und Potenziale von Aluminiumbauprodukten zu untersuchen. Zudem sollte erforscht werden, ob das Bewusstsein für eine nachhaltige Entwicklung in der Baupraxis bereits verankert ist und inwieweit Korrelationen zwischen Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit von Aluminiumbauprodukten in der Praxis vorhanden sind.

Zu diesem Zweck wurden elf Metallbauunternehmer entweder mit Hilfe eines Fragebogens oder im persönlichen Gespräch interviewt. Zur Erfassung der Planerseite wurde gleichzeitig eine Umfrage mit 300 Architekten durchgeführt. Zwar wird die Entscheidung, welches Material bzw. Bauprodukt letztlich verwendet werden soll sowohl von Architekten, Bauherren und Ingenieuren beeinflusst, doch liefern Architekten mit den ersten Konzepten und Entwürfen für ein Bauwerk bereits entsprechende Materialvorschläge. Sie sind daher wichtigster „Kunde“ für Metallbauer und wurden aus diesem Grund als Zielgruppe für die Befragung gewählt.

3.3.1 Befragung von Metallbauern und Planern

Metallbauer

Insgesamt wurden 81 Fragebögen an Metallbauunternehmen mit Vertrieb von Aluminiumbauprodukten deutschlandweit versandt. Der Fragebogen umfasste 44 Fragen, welche in folgende Bereiche unterteilt wurden: „Allgemeines“, „Technik & Konstruktion“, „Ökologie“, „Wirtschaftlichkeit“, „Nachhaltigkeit & Wettbewerb“ und „Persönliche Einschätzung“ (siehe Anhang A.1). Neun ausgefüllte Fragebögen standen letztlich für die Auswertung zur Verfügung. Zusätzlich wurden zwei Unternehmen im persönlichen Gespräch interviewt.

Der Internationalen Marktforschung GmbH (IMAS) zufolge müssen 3% der gesamten Zielgruppe erfasst werden, um die Repräsentativität einer Untersuchung zu gewährleisten. Angesichts der 5282 Einträge von Metallbauunternehmen im „Online-Branchenbuch Deutschland“¹⁵ sind die Ergebnisse der Umfrage folglich nicht repräsentativ. Dennoch ermöglichen sie eine Einschätzung der Situation. Die erhaltenen Daten wurden mit Hilfe des statistischen Auswertungsprogramms SPSS aufbereitet.

Die Größen der befragten Unternehmen sind in Abbildung 3.10 abgebildet:

¹⁵ Im Online-Branchenbuch Deutschland (www.obd.de) sind sämtliche Unternehmen je nach Arbeitsgebiet aufgelistet.

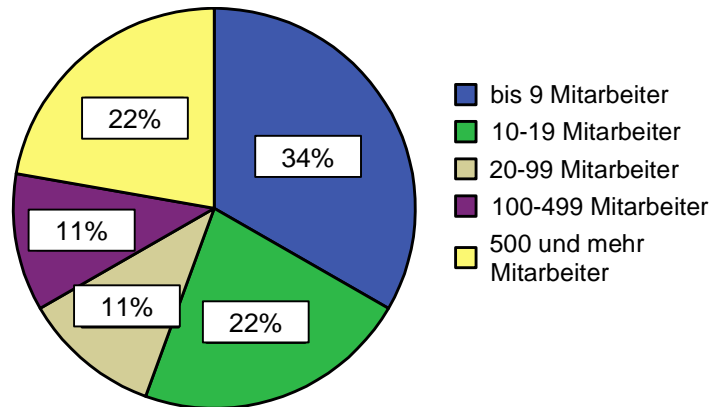


Abb. 3.10: Größe der befragten Metallbauunternehmen

Die Hälfte der befragten Unternehmen erzielt mehr als 60% ihres Umsatzes mit Aluminiumbauprodukten. Bei einem Viertel der Metallbauer sind Aluminiumbauprodukte sogar für mehr als 90% des Umsatzes verantwortlich.

Planer

Für die Befragung der Planer wurden Architekturbüros im Bezirk Oberbayern ausgewählt und angeschrieben. Die insgesamt 16 Fragen wurden in die drei Bereiche „Allgemeines“, „Erfahrungen mit Aluminiumbauprodukten“ (z. B. Fassade) und „Persönliche Einschätzung“ unterteilt (siehe Anhang A.2). Von den 9161 gemeldeten Architekten in Oberbayern¹⁶ beteiligten sich insgesamt 300 an der Umfrage. Die geforderten 3%-Beteiligung nach IMAS wurde damit erreicht, wodurch die Repräsentativität der Ergebnisse für den Bereich Oberbayern gesichert werden konnte.

Die Mitarbeiterzahl der befragten Architekturbüros ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

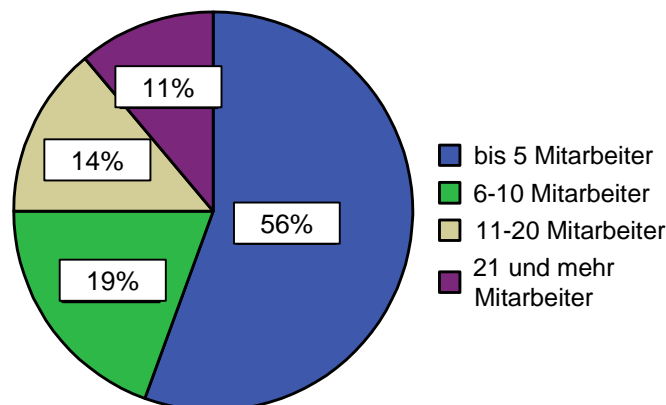


Abb. 3.11: Größe der befragten Architekturbüros

Bei der Auswahl der Architekten wurde darauf geachtet, etablierte Büros mit entsprechenden Referenzobjekten in die Umfrage aufzunehmen. Trotzdem sind in mehr als der Hälfte der befragten Büros nur bis zu fünf Mitarbeiter beschäftigt.

¹⁶ Sämtliche Architekten sind in der Bayerischen Architektenkammer (www.byak.de) registriert.

3.3.1.1 Anwendungsbereiche

Der Schwerpunkt der Anwendungen liegt sowohl bei Metallbauunternehmern (siehe Abb. 3.12) als auch bei Planern (siehe Abb. 3.13) im Fenster- und Fassadenbau. Das Verhältnis von tragenden und nicht-tragenden Anwendungen ist bei den entsprechend relevanten Kategorien (z. B. Fassaden, Balkone etc.) ausgewogen.

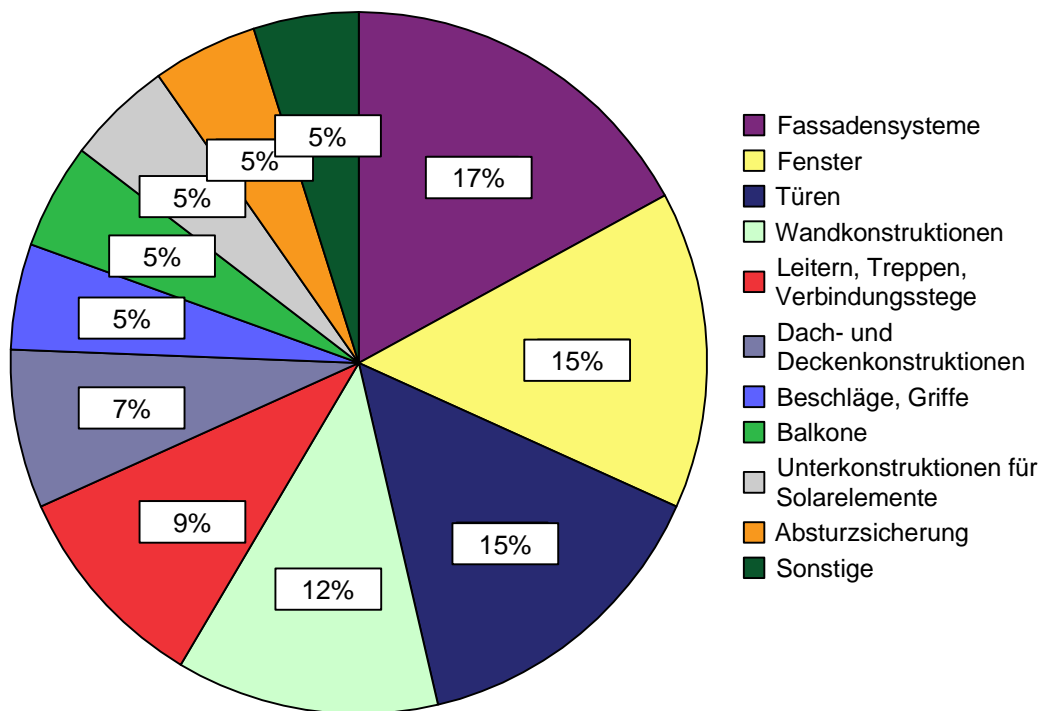


Abb. 3.12: Anwendungsbereiche von Aluminium aus Sicht der Metallbauer

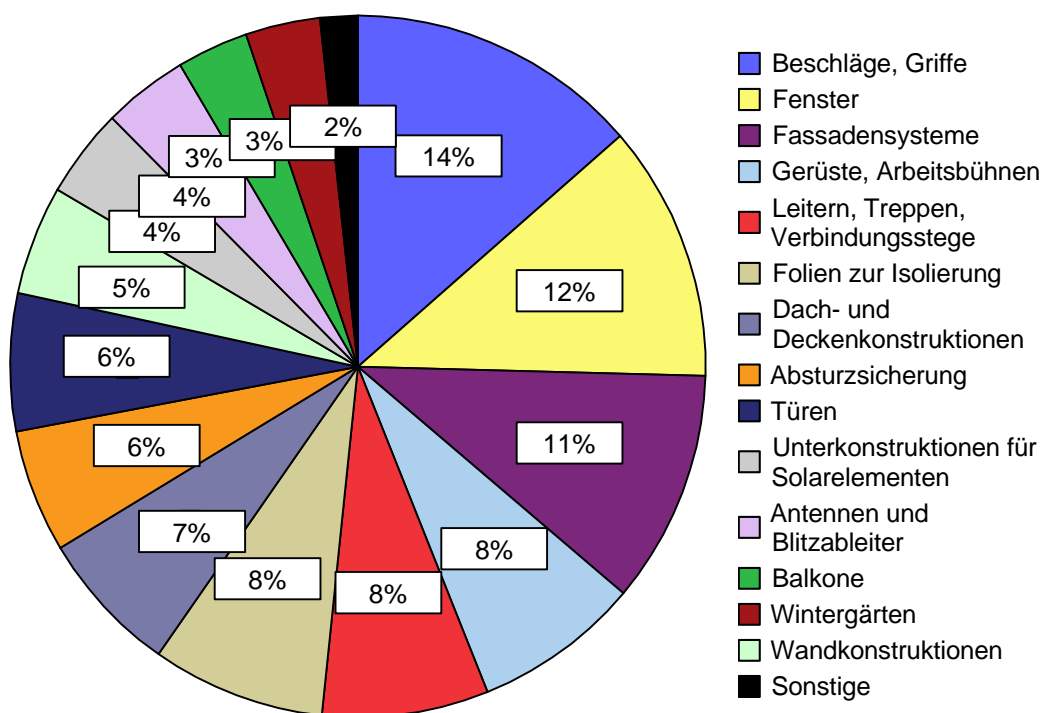


Abb. 3.13: Anwendungsbereiche von Aluminium bei Planern

3.3.2 Gründe für den Einsatz von Aluminium in der Praxis

Aus Unternehmersicht (siehe Abb. 3.14) ist das geringe Gewicht Hauptgrund für die Entscheidung der Kunden zugunsten eines Aluminiumbauprodukts. Als weitere Gründe werden die lange Lebensdauer, die Möglichkeiten der Oberflächengestaltung sowie geringer Unterhalt, Funktionalität und Flexibilität angegeben.

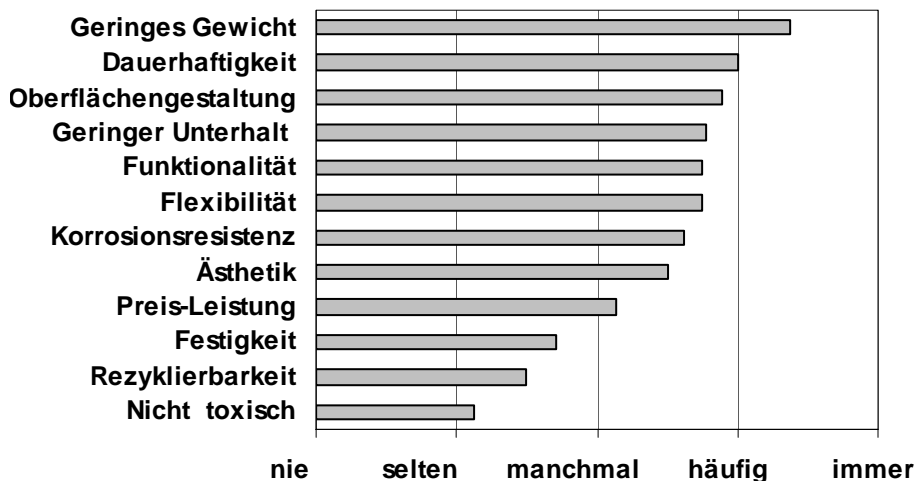


Abb. 3.14: Gründe aus Sicht der Metallbauer um Kunden von Aluminium zu überzeugen

Auf Seiten der Planer (siehe Abb. 3.15) ist die Funktionalität maßgebende Eigenschaft für die Wahl von Aluminium. Diese ist gefolgt von geringem Unterhalt und Dauerhaftigkeit.

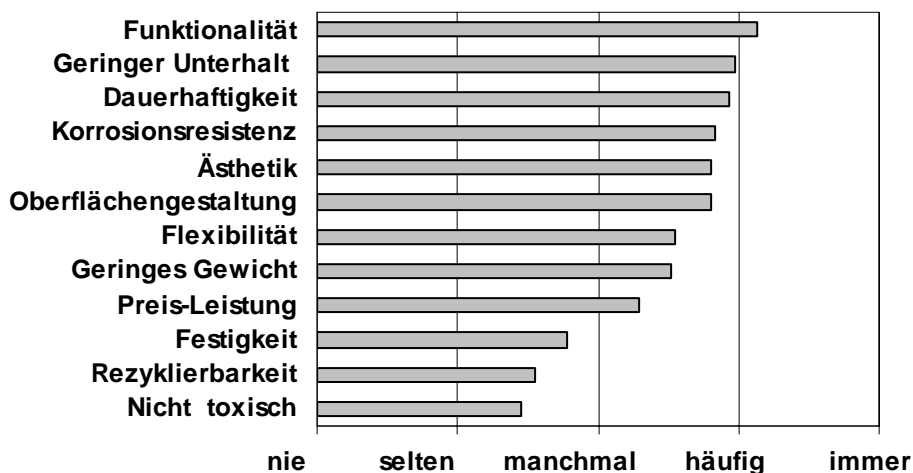


Abb. 3.15: Gründe von Planern für den Einsatz von Aluminium

Sowohl auf Unternehmer- als auch auf Planerseite ist die Bedeutung der Eigenschaften geringer Unterhalt und Dauerhaftigkeit ein Indiz für das Anstreben einer effektiven Nutzungsphase. Dies steht allerdings im Widerspruch mit der geringen Bedeutung des Preis-Leistungs-Verhältnisses auf beiden Seiten. Offensichtlich werden die Kosten lediglich im Hinblick auf die Erstellung eines Bauwerks betrachtet. Der Zusammenhang zwischen geringem Unterhaltsaufwand während der Nutzung und dadurch verbessertem Preis-Leistungs-Verhältnis bezogen auf den gesamten Lebenszyklus wird allerdings noch nicht berücksichtigt.

Die Festigkeit von Aluminium ist ebenfalls kein entscheidendes Kriterium aus Sicht von Unternehmern und Planern. Dies ist allerdings nicht vereinbar mit den gleichzeitig häufigen Anwendungen von Aluminium im tragenden Bereich (vgl. 3.3.1.1). Die nicht vorhandene

Toxizität und die Recyclingeigenschaften werden ebenso nur selten als maßgebende Materialeigenschaften genannt. Die Phase Rückbau und Entsorgung scheint daher im Planungsprozess weder von Planern noch von Unternehmern berücksichtigt zu werden.

3.3.3 Bedenken beim Einsatz von Aluminium in der Praxis

Aus Unternehmensicht (siehe Abb. 3.16) basieren die meisten Bedenken bei der Verwendung von Aluminium im Bauwesen auf dem relativ hohen Anschaffungspreis. Zudem sind die Kunden häufig skeptisch im Hinblick auf die Festigkeitseigenschaften von Aluminium. Zweifel wegen Verformungen, Korrosion, Brandschutz und Umweltwirkungen werden hingegen nur selten erwähnt.



Abb. 3.16: Gründe aus Sicht der Metallbauer, weshalb Kunden auf den Einsatz von Aluminium verzichten

Bei den Planern (siehe Abb. 3.17) gibt es offensichtlich weniger Unsicherheiten bei der Verwendung von Aluminium. Lediglich bei der Gewährleistung von ausreichendem Brandschutz herrschen manchmal Vorbehalte.

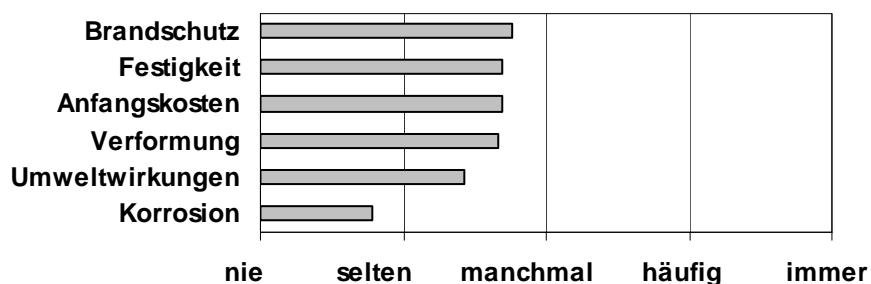


Abb. 3.17: Bedenken von Planern im Hinblick auf den Einsatz von Aluminium

Neben den oben genannten Bedenken gaben Planer in der Diskussion weitere Beweggründe gegen den Einsatz von Aluminium an: Zum einen wurde der ökologische Kriterienkatalog der Stadt München¹⁷ (Landeshauptstadt München, 2004) genannt. Zum anderen wurden die Beulfälligkeit und die Entwicklung einer schöneren Patina im Alterungsprozess bei anderen Metallen (z. B. bei Kupfer) aufgeführt.

¹⁷ „Nicht zulässig ist der großflächige Einsatz von Aluminium. Der großflächige Einsatz ist dann möglich, wenn das eingesetzte Material nachweislich und zum überwiegenden Teil aus Sekundäraluminium hergestellt wurde“ (Landeshauptstadt München, 2004).

3.3.4 Stand der Dinge - Metallbauer

Aus Sicht der Metallbauer sind zum Erreichen der garantierten Lebensdauer ihrer Aluminiumbauprodukte hauptsächlich regelmäßige Reinigungsarbeiten erforderlich. Aufwendungen für Inspektion und Wartung, z. B. in Form von neuen Anstrichen und Ausbesserungsarbeiten, sind hingegen selten bis nie erforderlich. Trotzdem belief sich die durch die Metallbauer garantierte Lebensdauer in nur 22% der Fälle auf 10 bis 30 Jahre. 33% der Befragten gewährleisteten eine Lebensdauer für einen Zeitraum unter zehn Jahren und für 44% der Metallbauer waren entsprechende Angaben nicht relevant. Die zugänglichen Informationsmaterialien über Aluminiumprodukte wurden als „mittel“ oder „mäßig“ bezeichnet.

Im Hinblick auf Umweltaspekte ging aus der Befragung hervor, dass Metallbauunternehmen nur selten mit ökologischen Vorwürfen konfrontiert werden. Dennoch betreiben bereits 66% der Unternehmen aktives Umweltmanagement. Diese Unternehmen erstellen u. a. ökologische Stellungnahmen, betreiben regelmäßiges Benchmarking mit anderen Materialien und verwerten den anfallenden Prozessschrott durch Verkauf an Metallhändler. 22% der Metallbauer entsorgen ausgediente Aluminiumbauteile auf Kundenanfrage und ein befragtes Unternehmen hat sich bereits für rücknahmepflichtig erklärt.

Das Prinzip der Nachhaltigkeit berücksichtigen 66% der Metallbauer. Gründe hierfür sind die Imageverbesserung, die Identifikation von Kostensenkungspotenzialen sowie Förderung der Kapitalerhaltung. 50% der Unternehmen erfassen und bewerten bereits die Material-, Energie- und Kostenflüsse. Hierdurch identifizieren sie ökologische Schwachstellen und setzen Prioritäten. Ein Metallunternehmer hat bereits eine Lebenszykluskostenanalyse für seine Produkte in Auftrag gegeben. Keiner der Metallbauer verfasst jedoch bisher einen Nachhaltigkeitsbericht. Insgesamt betrachten 33,3% der Metallbauer das Prinzip der Nachhaltigkeit als Chance zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. Die Übrigen sahen ihre Chancen durch nachhaltiges Handeln unbeeinflusst.

3.3.5 Stand der Dinge - Planer

Planer verwenden Aluminium am häufigsten zusammen mit Glas in der Gebäudehülle. Darüber hinaus werden Anwendungen in Verbindung mit Holz, Beton, Stahl, Faserzement und Mauerwerk ausgeführt.

Von allen befragten Planern haben 97% Kenntnis über das geringe Gewicht und die Funktionalität von Aluminium. Die Einsparung von zusätzlichen Aussteifungen, Verbindungsarbeiten durch das Strangpressen ist 78% der Befragten bewusst. 97% der Planer sind über die Korrosionsbeständigkeit von Aluminium informiert. Daraus folgern 94% der Befragten den im Vergleich zu Stahl und Holz wesentlich geringeren Wartungsaufwand. Nur 61% der Planer sind sich bewusst, dass bedingt durch die effektive Nutzungsphase die Anfangskosten von Aluminium oft nach weniger als 10 Jahren im Vergleich zu anderen Materialien kompensiert werden können. 74% der Befragten kennen den Schmelzpunkt von Aluminium und sind über die Nicht-Brennbarkeit und -Entflammbarkeit des Werkstoffs im Bilde. 60% sind kundig über die lange Lebensdauer von Aluminiumbauteilen. Jedoch lediglich 42% der Planer haben Kenntnis über die Variationsmöglichkeiten der Festigkeit je nach Legierung und die damit verbundene Möglichkeit Werte im Bereich der Streckgrenze von Stahl zu erzielen.

Im Hinblick auf die Umweltwirkungen sind 94% der Planer über den beträchtlichen Energieaufwand während der Produktion von Primäraluminium informiert. In diesem Zusammenhang wissen 34% von den Bemühungen, die notwendige elektrische Energie hauptsächlich aus Wasserkraft zu gewinnen. Ca. 69% der Planer kennen die hervorragenden Recyclingeigenschaften von Aluminium. Jedoch nur 33% sind darüber aufgeklärt, dass beim Schmelz-

vorgang des Recyclings nur 5% der Energie aufgewendet wird, die zur Herstellung von Primäraluminium erforderlich ist. Über die durchschnittliche Recyclingrate von 85% des im Baubereich eingesetzten Aluminiums sind 8% der befragten Planer informiert.

Das Prinzip der Nachhaltigkeit kennen 77% der Planer, 20% haben davon gehört, während 3% mit dem Begriff nichts anzufangen wissen. Der Trend geht nach Einschätzung der Planer hin zur stärkeren Lebenszyklusorientierung, d. h. zur Berücksichtigung aller Lebensphasen bereits im Planungsprozess. Werden beispielsweise derzeit noch 75% der Investitionsentscheidungen aufgrund der Anschaffungskosten eines Bauwerkes getroffen, so reduziert sich nach Ansicht der Planer dieser Anteil bis 2010 auf 57%. Die Bedeutung der Lebenszykluskosten steigt folglich von aktuell geschätzten 25% auf 43% bis 2010.

Nach Ansicht der Planer werden folgende Potenziale von Aluminium im Bauwesen zu wenig genutzt:

- Ausnutzung des Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht
- Anwendung der individuellen Profilierung
- Einsatz großflächiger Elementen, z. B. zum Beispiel im Fertigteilbau
- Verwendung von Gussteilen
- Wiederverwertung von gebrauchten Aluminiumbauteilen

Um die Anwendung von Aluminium zu fördern und die Informationslücken im Gegensatz zu anderen Materialien zu schließen, wurden folgende Vorschläge gemacht:

- Darstellung der Möglichkeiten in Gestaltung und Design
- Bereitstellen von Informationen über den Einsatz von Aluminium bei tragenden Konstruktionen
- Besserer Informationsfluss im Hinblick auf Brandschutz, Oberflächenschutz (insbesondere bei punktueller Stoßbelastung) und Oberflächengestaltung
- Herausstellen der Merkmale gegenüber anderen Werkstoffen insbesondere Stahl
- Bessere Darstellung des Preis-Leistungs-Verhältnis z. B. im Hinblick auf den gesamten Lebenszyklus
- Aufklärung über die Recyclingeigenschaften und Erhöhung des Anteils an Sekundäraluminium bei Bauprodukten
- Aufzeigen von Mitteln um den Energieverbrauch bei der Herstellung zu kompensieren
- Gezielte Werbung und Workshops um Informationsdefizite zu schließen

3.4 Schlussfolgerung

Innerhalb des Kapitels 3 sollte der Stand der Dinge von Aluminium im Bauwesen erforscht werden. Zu diesem Zweck wurden aktuellen Zahlen und baustofftechnologischen Aspekte gesammelt und mit Hilfe von Fragebögen für Planer und Metallbauunternehmer eine Situationsanalyse der Baupraxis durchgeführt.

Die aktuellen Statistiken zeigen, dass die Zahl der Aluminiumanwendungen im Bauwesen kontinuierlich ansteigt. Verglichen zu 1960 wird heute ca. 10mal mehr Aluminium im Rahmen von Bauwerken verwendet. Führend sind hierbei die Bereiche Fenster- und Fassadenbau. Trotzdem ist der Anteil von Aluminium in europäischen Gebäuden geringer als 1%. Im Gegensatz zu Baustoffen wie Beton und Stahl ist folglich die verbaute Aluminiummenge relativ unbedeutend.

In baustofftechnologischer Hinsicht bietet Aluminium viele interessante Eigenschaften. Das geringe Gewicht zusammen mit der Funktionalität, der langen Lebensdauer, der natürlichen Korrosionsresistenz und den Recyclingeigenschaften bietet optimale Voraussetzungen für innovative (Bau-)Konstruktionen. Zu beachten ist allerdings das nicht-lineare Spannungs-Dehnungsverhalten, die Entfestigung in der Wärmeeinflusszone beim herkömmlichen Schweißen und die Verformungsanfälligkeit.

Mit Hilfe der Situationsanalyse konnte dargelegt werden, dass die Verwendung von Aluminium in der Baupraxis maßgeblich von Planern, insbesondere von Architekten, abhängt. Der Entscheidungsprozess wird dabei vorwiegend von ästhetischen und funktionalen Aspekten sowie der Möglichkeit einer effektiven Nutzung beeinflusst. Metallbauunternehmen sehen hingegen das geringe Gewicht gefolgt von der Dauerhaftigkeit als Hauptgründe für die Wahl von Aluminium bei Bauanwendungen. Unsicherheiten beim Aluminiumeinsatz sind im Hinblick auf Festigkeitseigenschaften, Anfangskosten, Brandschutz und Umweltwirkungen vorhanden. Dies ist hauptsächlich auf Informationsdefizite bei den Planern zurückzuführen. Hinzu kommt, dass entsprechend neue Normen, wie z. B. prEN 1999-1-2: 2003 für den Brandschutz von Aluminium, noch nicht offiziell eingeführt sind.

Ökologische Aspekte haben noch keinen maßgeblichen Stellenwert im Planungsprozess erworben. Weder punkten Planer beim Wettbewerb mit dem umweltfreundlichen Charakter ihres Entwurfs, noch überzeugen Metallbauer ihre Kunden mit Aspekten wie z. B. minimaler Energiebedarfs oder Wiederverwertungsmöglichkeiten. Auch bei den Kosten liegt nach wie vor der Fokus auf den Erstellungs- und nicht auf den Betriebs- bzw. Erhaltungskosten.

Die Entwicklungen im Bausektor werden unterschiedlich bewertet. Planer sind zwar überzeugt, dass die Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in den folgenden Jahren an Bedeutung gewinnt, doch wurde bisher nicht in entsprechende Hilfsmittel, z. B. Software, Fortbildung etc., investiert. Für Metallbauer gilt es angesichts der angespannten wirtschaftlichen Lage in erster Linie am Markt zu bestehen. Dementsprechend verhalten stehen die Unternehmen der Durchführung von konkreten Ökobilanzen und Lebenszykluskostenanalysen gegenüber. Eine Korrelation von Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit ist in der Baupraxis demnach noch nicht vorhanden (Radlbeck et al., 2005a).

C Ganzheitliche Analyse von Aluminiumbauteilen

4 Bemessung

Aluminiumkonstruktionen können derzeit entweder gemäß nationalen oder europäischen Vorschriften bemessen werden. Dies wirft die Frage auf, welches Regelwerk das effizientere Verfahren bzw. die günstigeren Ergebnisse liefert. Um dies zu beantworten, werden die relevanten Normen mit den aktuellen Entwicklungen vorgestellt, die nationalen und europäischen Bemessungskonzepte verglichen und die jeweiligen Auswirkungen dargelegt.

4.1 Relevante Normen und aktuelle Entwicklungen

4.1.1 DIN-Normen

Für die Bemessung von Aluminiumkonstruktionen sind auf nationaler Ebene die Normen DIN 4113 und DIN 4102 relevant.

DIN 4113 ist seit 25 Jahren eine etablierte Norm und ermöglicht die Bemessung von Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung. Die Nachweise bestehen aus übersichtlichen und klaren Formeln, die auf dem Prinzip der zulässigen Spannungen beruhen. Der Fokus der Nachweise liegt auf den Hauptlastfällen. Folgende Dokumente stehen zur Verfügung:

- DIN 4113-1: 1980-05: „Berechnung und bauliche Durchbildung“
- DIN 4113-1/A1: 2002-09: „Berechnung und bauliche Durchbildung, Änderung A1“
- DIN 4113-2: 2002-09: „Berechnung geschweißter Aluminiumkonstruktionen“
- DIN V 4113-3: 2000-11: „Ausführung und Herstellerqualifikation“

Die Vorschrift DIN 4102 behandelt das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Im vierten Teil, d. h. DIN 4102-4: 1994-03 „Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile“ sind Anweisungen für den Brandschutz von Aluminiumkonstruktionen enthalten.

Die nationalen Normenreihen werden bis zum Erscheinen der europäischen Ersatzregelungen fortgeschrieben.

4.1.2 EN-Normen

Durch die Entwicklung von europäischen Normen (EN) sollen sämtliche technische Regelwerke für die Tragwerksplanung von Bauwerken harmonisiert werden. Zu diesem Zweck wurde bereits im Jahr 1975 ein Aktionsprogramm von der Europäischen Kommission beschlossen. Die Aufgabe der Harmonisierung wurde 1989 an die Europäische Normungsorganisation (CEN) übergeben. Der Übergang vom nationalen Regelwerk zu den Eurocodes wird in Deutschland voraussichtlich im Jahr 2006 vollzogen. Bis zum Jahr 2010 sollen die nationalen Bemessungsnormen zurückgezogen werden. Während der Koexistenzperiode von DIN- und EN-Normen sind die Baubehörden aufgefordert, die Anwendung der Eurocodes als Alternative zu den nationalen Richtlinien zuzulassen.

Die Bemessung von Aluminiumkonstruktionen soll dementsprechend zukünftig mit der europäischen Vorschrift „Eurocode 9“ (EC 9) erfolgen. Im Mai 1998 wurden hierzu bereits zwei Vornormen (ENV) freigegeben. Es handelt sich dabei um ENV 1999-1-1: 1998-05 mit allgemeinen Bemessungsregeln und ENV 1999-1-2: 1998-05 für ermüdungsanfällige Bauteile. Diese Vornormen wurden mit dem Ziel der probeweisen Anwendung über die so genannten Nationalen Anwendungsdokumente (NAD)¹⁸ mit den „boxed values“¹⁹ bauaufsichtlich bekannt gemacht. Seitdem sind die Arbeiten zur Überführung in EN-Normen in vollem Gang.

In Tabelle 4.1 sind alle für Aluminiumkonstruktionen relevanten EN-Normen dargestellt.

Tab. 4.1: Zukünftige EN-Richtlinien und dadurch ersetzte DIN-Normen für Aluminium

Zukünftige EN-Norm	Ersatz für DIN-Norm
EN 1999-1-1: „Allgemeine Bemessungsregeln“	DIN 4113-1, DIN 4113-2
EN 1999-1-2: „Brandschutz“	DIN 4102-4
EN 1999-1-3: „Ermüdungsanfällige Bauwerke“	---
EN 1999-1-4: „Trapezbleche“	---
EN 1999-1-5: „Schalen“	---
EN 1090-3: „Ausführung von Stahl- und Aluminiumkonstruktionen Technische Anforderungen an Aluminiumkonstruktionen“	DIN 4113-3

Der EC 9 umfasst in seiner Endfassung insgesamt fünf Teile und ist in vielerlei Hinsicht ein bahnbrechendes Dokument. Zunächst werden fortschrittliche Bemessungsmethoden verwendet, die weitgehend auf Traglastnachweisen basieren. Darüber hinaus werden neben herkömmlichen Beanspruchungen auch ungewöhnliche Problemstellungen, wie z. B. zweiachsige Biegung, Interaktionseffekte und Ermüdungsbeanspruchungen, abgedeckt. Zudem enthält der EC 9 viele weiterführende Informationen in Form von konstruktiven Hinweisen, Empfehlungen für den Korrosionsschutz, etc. und übernimmt dadurch vielmehr die Funktion eines Handbuchs als die einer reinen Bemessungsnorm.

In der zukünftigen, europäischen Richtlinie EN 1090-3 werden weiterführende Hinweise für die Ausführung und Qualitätssicherung von Stahl- und Aluminiumkonstruktionen behandelt.

¹⁸ Nationales Anwendungsdokumente (NADs) zur Verwendung von ENV Eurocodes bezeichnen nationale Wahlmöglichkeiten, insbesondere dort, wo "boxed values" (siehe Fußnote Nr. 19) in den ENV Eurocodes angegeben wurden.

¹⁹ Ein Richtwert, der im ENV-Stadium bei einer gleichzeitigen Anwendung mit den nationalen Anwendungsdokumenten die nationale Wahl für einen Wert ermöglicht.

4.2 Gegenüberstellung der Bemessungskonzepte von EC 9 und DIN 4113

Die Nachweise der statischen Tragfähigkeit basieren in den DIN- und EN-Normen auf unterschiedlichen Bemessungskonzepten. Dies hat zur Folge, dass die jeweils berechneten Ausnutzungsgrade teilweise deutlich voneinander abweichen (Radlbeck & Kostea, 2004; Radlbeck et al., 2005). Um die Unterschiede zu veranschaulichen, werden im Folgenden die nationale Norm DIN 4113 und der Eurocode 9, bzw. dessen aktuelle Version prEN 1999-1-1 (2005), gegenübergestellt. Der Fokus liegt hierbei zum einen auf den Bemessungsgrundlagen und zum anderen auf den Standardnachweisen der Tragfähigkeit.

4.2.1 Bemessungsgrundlagen

4.2.1.1 Bezeichnung von Legierungen und Zuständen

Die Bezeichnung der Werkstoffe erfolgt in den Richtlinien auf unterschiedliche Art und Weise. Legierungen im EC 9 basieren auf einer digitalen, vierstelligen Legierungszahl und auf der Zustandsbeschreibung. Diese ermöglicht Rückschlüsse auf die Herstellbedingungen (vgl. Tab. 4.2). In DIN 4113 werden die Werkstoffe hingegen gemäß ihrer chemischen Zusammensetzung und mit Zuständen, die der Zugfestigkeit entsprechen, dargestellt. Ein Beispiel für die unterschiedlichen Bezeichnungen ist in Tabelle 4.2 enthalten.

Tab. 4.2: Beispiel für Legierungs- und Zustandsdefinition nach EC 9 und DIN 4113

	EC 9	DIN 4113
Legierung	EN AW 6082	AlMgSi1
Zustand	T6: lösungsgeglüht, abgeschreckt, warm ausgelagert	F31: Mindestzugfestigkeit 310 N/mm ²

Die Umstellung auf europäische Normen (EN) macht es notwendig, die unterschiedlichen Bezeichnungen aufeinander abzustimmen. Dies geschieht teilweise mit den Änderungen A1 zu DIN 4113-1: 1980. Hier werden die ursprünglichen DIN-Angaben mit EN-Werkstoffen und zugehörigen Festigkeits- und Spannungswerten ergänzt. Zwar fehlt auch hier eine klare Zuordnung der Zustände von DIN zu EN, doch erfolgt die Darstellung der einzelnen Legierungen zumindest auf beide Arten, d. h. sowohl mit der chemischen DIN- als auch der vierziffrigen EN-Bezeichnung.

Trotzdem können sich bei der Umstellung auf EN-Definition unterschiedliche Festigkeitswerte ergeben. Grund hierfür sind die Wanddicken des zu betrachtenden Querschnitts. Diese haben direkten Einfluss auf die gewährleisteten Mindestfestigkeiten (Gitter, 1998). Im Gegensatz zum EC 9 sind die in DIN 4113 vorgegebenen Wanddicken nur geringfügig abgestuft. Folglich sind die Angaben in DIN 4113 oftmals nicht mit den relevanten Wanddicken praktischer Baukonstruktion kompatibel (vgl. Tab. 4.3).

Tab. 4.3: Zuordnung von Zugfestigkeiten bei AW 6060 nach EC 9 und DIN 4113

EC 9			DIN 4113		
Zustand	Wanddicke	Zugfestigkeit f_u	Zustand	Wanddicke	Zugfestigkeit β_Z
T6	$t \leq 15$ mm	170 N/mm ²	T6	$t \leq 25$ mm	170 N/mm ²
T6	$t \leq 20$ mm	215 N/mm ²			
T66	$t \leq 3$ mm	215 N/mm ²	T66	$t \leq 25$ mm	195 N/mm ²
T66	$3 \text{ mm} < t \leq 25$ mm	195 N/mm ²			

4.2.1.2 Annäherung der σ - ε -Linie

Da Aluminium auf einem nicht-linearen Werkstoffgesetz beruht, kann das Spannungs-Dehnungsverhalten nicht wie beim Stahl als zunächst elastisch und dann voll plastisch vereinfacht werden.

In DIN 4113 wird das Materialverhalten daher mit Hilfe eines dreiteiligen Sekantenzugs angenähert. Die Verfestigung bei erhöhten Dehnungen wird dabei vernachlässigt (vgl. Abb. 4.1).

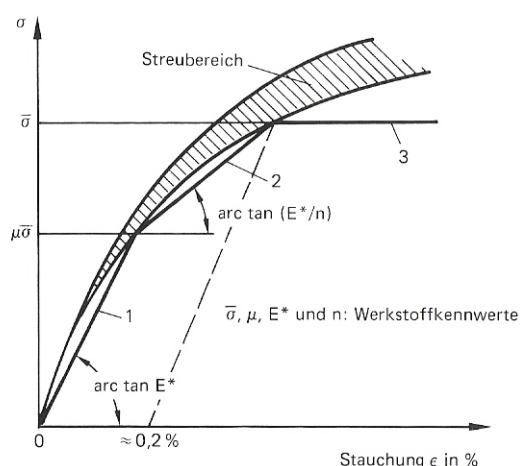


Abb. 4.1: Streubereich der σ - ε -Linien einer Aluminiumlegierung und dreiteiliger Sekantenzug mit Parameterwerten aus DIN 4113 (Kosteas, 1996)

Bei den Nachweisen des EC 9 wird das Spannungs-Dehnungs-Verhalten mit einer stetigen analytischen Funktion, z. B. nach Ramberg-Osgood, abgebildet (Kosteas, 1996).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{f_{0,2}} \right)^n \quad (4-1)$$

$$n = \frac{\ln 2}{\ln \frac{f_{0,2}}{f_{0,1}}} \quad (4-2)$$

$f_{0,1}$ bzw. $f_{0,2}$: Charakteristische Festigkeit bei der 0,1%- bzw. 0,2%-Dehngrenze

Die für obige Annäherungen benötigten Parameter sind jeweils von der Legierung und dem Zustand abhängig. Im Folgenden werden die Einflussgrößen (vgl. Tab. 4.4) und die σ - ε -Linien (vgl. Abb. 4.2) zweier Aluminiumlegierungen basierend auf DIN 4113 und EC 9 aufgezeigt. Zum Vergleich ist zudem das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Stahlsorte S 235 gemäß DIN 18800 gegeben.

Tab. 4.4: Parameter für σ - ε -Linien nach EC 9 und DIN 4113

EC 9		DIN 4113	
EN AW 6082 T6		AlMgSi1 F31	
$f_{0,2}$	150 N/mm ²	$\bar{\sigma}$	170 N/mm ²
E	70000 N/mm ²	E^*	65000 N/mm ²
n	18	n	4,5
		$\bar{\mu}$	0,85
EN AW 6060 T66		AlMgSi0,5 F22	
$f_{0,2}$	240 N/mm ²	$\bar{\sigma}$	270 N/mm ²
E	70000 N/mm ²	E^*	68000 N/mm ²
n	17	n	4
		$\bar{\mu}$	0,85

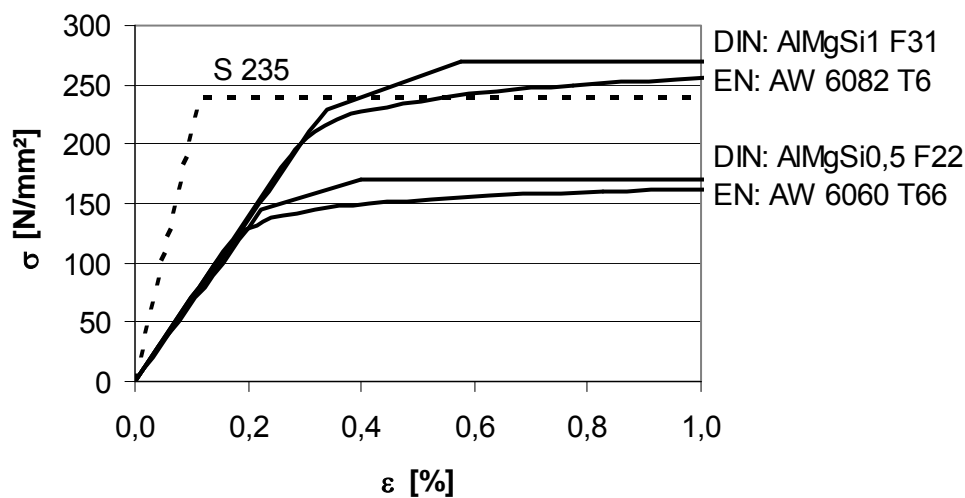


Abb. 4.2: σ - ε -Annäherungen nach EC 9, DIN 4113 und DIN 18800

4.2.1.3 Sicherheitskonzept

Der EC 9 basiert auf dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte. Dabei werden auf der Einwirkungsseite die charakteristischen Lasten S_k mit einem Sicherheitsfaktor γ_F und ggf. mit einem Kombinationsbeiwert ψ_j beaufschlagt. Das Ergebnis ist die Bemessungslast S_d . Gleichzeitig wird die charakteristische Festigkeit R_k mit einem Materialsicherheitsbeiwert γ_{Mi} reduziert. Hierdurch erhält man den Bemessungswiderstand R_d . Der Sicherheitsnachweis gilt als erfüllt, sobald die Bemessungslast kleiner ist als der Bemessungswiderstand, also $S_d \leq R_d$.

DIN 4113 beinhaltet das Konzept der zulässigen Spannungen σ_{zul} . Um diese zu erhalten, werden die Mindestfestigkeiten β mit dem globalen Sicherheitsfaktor ν dividiert. Dieser Wert wird in Abhängigkeit des Lastfalls, d. h. Hauptlasten H oder Haupt- und Zusatzlasten HZ, und dem Versagensfall, z. B. Biegung, Knicken oder Beulen etc., gewählt. Bei den Gebrauchslasten σ_{id} werden keine weiteren Lasterhöhungsfaktoren angewandt. Die Tragfähigkeit gilt als nachgewiesen, sobald die Belastung kleiner ist als die zulässigen Spannungen, d. h. $\sigma_{id} \leq \sigma_{zul}$.

Tab. 4.5: Sicherheitskonzept nach EC 9 und DIN 4113

EC 9		DIN 4113	
$S_k \cdot \gamma_{Load} (\gamma_F, \psi_j) = S_d \leq R_d = \frac{R_k}{\gamma_{Mi}}$		$\sigma_{id} \leq \sigma_{zul} = \frac{\beta}{\nu}$	
S_k/R_k	Charakteristische Last/ Festigkeit	σ_{id}	Maßgebende Belastung
S_d/R_d	Bemessungslast/- widerstand	σ_{zul}	Zulässige Spannungen
γ_{Mi}	Materialsicherheitsbeiwert	β	Mindestzug-, bzw. -druckfestigkeit
γ_F, ψ_j	Sicherheitsfaktor für Lasten (F) u. Lastkombinationen (j)	ν	Materialsicherheitsbeiwert

4.2.1.4 Bemessungswiderstand

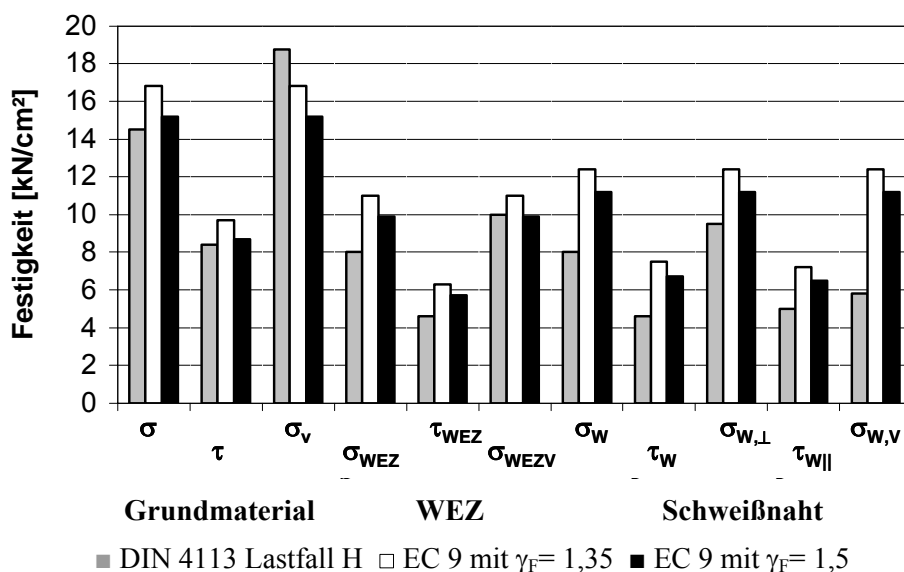
Die Nachweise im EC 9 basieren häufig auf einem deutlich höheren Bemessungswiderstand als in DIN 4113. Einzige Ausnahmen sind die Vergleichsspannungen des Grundmaterials (σ_{zul}). In Tabelle 4.6 und Abbildung 4.3 werden diese Unterschiede veranschaulicht. Dabei werden der Bemessungswiderstand R_d des EC 9 und die zulässigen Spannungen σ_{zul} in DIN 4113 beispielhaft für die Legierung AW 6082 T6 auf ein vergleichbares Sicherheitsniveau gebracht. Folglich werden die Festigkeitswerte im EC 9 mit den Sicherheitsfaktoren für Material γ_M als auch für Lasten γ_F reduziert. Bei den Lasten wird zwischen Eigengewicht ($\gamma_F=1,35$) und veränderlichen Lasten bzw. Verkehrslasten ($\gamma_F=1,5$) unterschieden.

Für DIN 4113 sind die zulässigen Spannungen des Lastfalls H dargestellt. Der Lastfall HZ wird vernachlässigt, da hierbei lediglich der unwahrscheinliche Fall der gleichzeitigen Wirkung von Haupt- und Zusatzlasten in voller Höhe abgedeckt wird.

Tab. 4.6: Bemessungswiderstand für AW 6082 T6 nach EC 9 und DIN 4113

EC 9, $\gamma_F=1,35$ (Eigengewicht)	EC 9, $\gamma_F=1,5$ (Verkehrslasten)	DIN 4113, LF H (Hauptlasten)
Grundmaterial*		
$f_o/(\gamma_{M1} \cdot \gamma_F) = 16,8 \text{ kN/cm}^2$	$f_o/(\gamma_{M1} \cdot \gamma_F) = 15,2 \text{ kN/cm}^2$	zul $\sigma = 14,5 \text{ kN/cm}^2$
$f_o/(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1} \cdot \gamma_F) = 9,7 \text{ kN/cm}^2$	$f_o/(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1} \cdot \gamma_F) = 8,7 \text{ kN/cm}^2$	zul $\tau = 8,4 \text{ kN/cm}^2$
$f_o/(\gamma_{M1} \cdot \gamma_F) = 16,8 \text{ kN/cm}^2$	$f_o/(\gamma_{M1} \cdot \gamma_F) = 15,2 \text{ kN/cm}^2$	zul $\sigma_v = 18,75 \text{ kN/cm}^2$
Wärmeeinflusszone (in EC 9 „haz“ bzw. in DIN 4113 „WEZ“)*		
$f_{u,haz}/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 11,0 \text{ kN/cm}^2$	$f_{u,haz}/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 9,9 \text{ kN/cm}^2$	zul $\sigma_{WEZ} = 8,0 \text{ kN/cm}^2$
$f_{u,haz}/(\sqrt{3} \cdot \gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 6,3 \text{ kN/cm}^2$	$f_{u,haz}/(\sqrt{3} \cdot \gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 5,7 \text{ kN/cm}^2$	zul $\tau_{WEZ} = 4,6 \text{ kN/cm}^2$
$f_{u,haz}/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 11,0 \text{ kN/cm}^2$	$f_{u,haz}/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 9,9 \text{ kN/cm}^2$	zul $\sigma_{WEZ,v} = 10,0 \text{ kN/cm}^2$
Stumpfnah mit Schweißzusatz AW 5183 bzw. AlMg4,5Mn (in EC 9 und DIN 4113 „W“)*		
$f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 12,4 \text{ kN/cm}^2$	$f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 11,2 \text{ kN/cm}^2$	zul $\sigma_w = 8,0 \text{ kN/cm}^2$
$0,6 \cdot f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 7,5 \text{ kN/cm}^2$	$0,6 \cdot f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 6,7 \text{ kN/cm}^2$	zul $\tau_w = 4,6 \text{ kN/cm}^2$
$f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 12,4 \text{ kN/cm}^2$	$f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 11,2 \text{ kN/cm}^2$	zul $\sigma_{w,v} = 9,5 \text{ kN/cm}^2$
Kehlnah mit Schweißzusatz AW 5183 bzw. AlMg4,5Mn (in EC 9 und DIN 4113 „W“)*		
$f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 12,4 \text{ kN/cm}^2$	$f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 11,2 \text{ kN/cm}^2$	zul $\sigma_{w\perp} = 5,0 \text{ kN/cm}^2$
$f_w/(\sqrt{3} \cdot \gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 7,2 \text{ kN/cm}^2$	$f_w/(\sqrt{3} \cdot \gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 6,5 \text{ kN/cm}^2$	zul $\tau_{w\parallel} = 5,0 \text{ kN/cm}^2$
$f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 12,4 \text{ kN/cm}^2$	$f_w/(\gamma_{Mw} \cdot \gamma_F) = 11,2 \text{ kN/cm}^2$	zul $\sigma_{w,v} = 5,8 \text{ kN/cm}^2$

* f_o = charakteristischer Wert der 0,2%-Dehngrenze; f_u = charakteristische Zugfestigkeit; f_w = charakteristische Festigkeit der Schweißnaht; $\gamma_{M1} = 1,1$; $\gamma_{Mw} = 1,25$; zul σ_v = zulässige Vergleichsspannung

Abb. 4.3: Festigkeitswerte für AW 6082 T6 ($t \leq 5 \text{ mm}$) nach EC 9 und DIN 4113

4.2.1.5 Wärmeeinflusszone

Beim EC 9 wird die Entfestigung in der Wärmeeinflusszone (WEZ) durch einen Reduktionsfaktor ρ_{HAZ} berücksichtigt. Dieser ist sowohl von der Legierung als auch vom Zustand abhängig und wird entweder auf die Festigkeit oder die Querschnittswerte angewandt. Die WEZ muss im Abstand b_{haz} rund um die Schweißnaht berücksichtigt werden. Die Größe der Ausdehnung b_{haz} ist abhängig vom Schweißverfahren, von der Blechdicke, der Anzahl der Lagen und von der Bauteiltemperatur. Zudem werden ein Dickenunterschied der zu verschweißenen Bleche und ein Vorhandensein von mehr als drei Wärmeableitungen bei Kehlnähten berücksichtigt.

Bei Anwendung von DIN 4113 wird die Wärmeeinflusszone entweder durch reduzierte Querschnittsgrößen (A_κ , I_κ , W_κ) und zulässige Spannungen des Grundmaterials ($zul\sigma$) oder durch volle Querschnittswerte und zulässige Spannungen in der Wärmeeinflusszone ($zul\sigma_{WEZ}$) Rechnung getragen. Zug und Biegung wird beispielsweise mit reduzierten Querschnittswerten nachgewiesen, während Schub mit verminderten zulässigen Spannungen behandelt wird. Die Ausdehnung der WEZ muss bis zu einem Abstand von 30 mm von der Schweißnahtmitte bzw. dem Nahtwurzelpunkt berücksichtigt werden. Da keinerlei weitere Randbedingungen berücksichtigt werden, gilt dieser Abstand für alle Legierungen.

Tab. 4.7: Entfestigung in der Wärmeeinflusszone (WEZ) nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
$A \cdot f_{o,haz} = (\rho_{o,haz} \cdot A) \cdot f_o$ $A \cdot f_{u,haz} = (\rho_{u,haz} \cdot A) \cdot f_u$ $\rho_{o,haz} = \frac{f_{o,haz}}{f_o}; \rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u}$	Entweder A , I , W und $zul\sigma_{WEZ}$ bzw. $zul\tau_{WEZ}$ oder A_κ , I_κ , W_κ und $zul\sigma$ bzw. $zul\tau$ $A_\kappa = A - (1 - \kappa) \cdot \sum_i A_{WEZ,i}$ $I_\kappa = I - (1 - \kappa) \cdot \sum_i (A_{WEZ,i} \cdot z_i^2)$ $\kappa = \frac{\beta_{0,2,WEZ}}{\beta_{0,2}}$

Tab. 4.8: Ausdehnung der Wärmeeinflusszone (WEZ) nach EC 9 und DIN 4113

EC 9			DIN 4113
b_{haz} für MIG ²⁰	b_{haz} für WIG ²¹	Blechdicke	$b_{WEZ} = 30$ mm
$b_{haz} = 20$ mm	30 mm	$0 < t \leq 6$ mm	
$b_{haz} = 30$ mm		$6 < t \leq 12$ mm	
$b_{haz} = 35$ mm		$12 < t \leq 25$ mm	
$b_{haz} = 40$ mm		$t > 25$ mm	
b_{haz} Abstand rund um die Schweißnaht			b_{WEZ} Abstand rund um die Schweißnaht

²⁰ MIG-Schweißverfahren: Schweißdraht wirkt gleichzeitig als Elektrode.

²¹ WIG-Schweißverfahren: Lichtbogenelektrode mit zusätzlichem Schweißdraht.

4.2.2 Standardnachweise der Tragfähigkeit für Bauteile

4.2.2.1 Querschnittsklassifizierung im EC 9

Um die Tragfähigkeit von Bauteilen gemäß EC 9 nachzuweisen, ist zunächst eine Querschnittsklassifikation erforderlich. Hierdurch wird die Analyse des nicht-elastischen Verhaltens ausgehend vom Querschnitt bis hin zum Gesamtbauwerk ermöglicht (Mazzolani, 1998). Die Klassifizierung stellt damit eine maßgebliche Neuerung im Vergleich zur DIN 4113 dar.

Die Einstufung der Querschnitte in vier Verhaltensklassen erfolgt auf Grundlage des Schlankheitsfaktors β . Dieser wird in Abhängigkeit der Geometrie, der Lage der Steifen (z. B. intern zwischen Flanschen oder extern als abstehendes Element), der Belastung und der Beulform berechnet. Die Klassen selbst sind folgendermaßen definiert:

- Klasse 1: duktile Querschnitte, die den gesamten Versagenswiderstand ohne lokales Beulen unter Berücksichtigung der Verfestigungseinflüsse entwickeln.
- Klasse 2: kompakte Querschnitte, welche den plastischen Bereich voll ausnutzen, jedoch aufgrund der Erscheinung plastischer Instabilitätsphänomene nur begrenzte Rotationskapazität aufweisen.
- Klasse 3: semi-kompakte Querschnitte, bei denen in der am meisten beanspruchten Faser die Streckgrenze erreicht wird, aber infolge lokalen Beulens keine plastischen Reserven genutzt werden können.
- Klasse 4: schlanke Querschnitte mit lokalen Instabilitätsphänomenen, welche zu einer Abminderung des effektiven Querschnittswiderstandes ohne plastische Verformung und zu einem auffallend spröden Verhalten führen.

Die lokalen Instabilitäten der Klasse 4 sind durch eine Abminderung der Blechdicken unter Druckbelastung mit dem Faktor ρ_c zu berücksichtigen. Die Klasseneinteilung hat somit direkten Einfluss auf die Tragfähigkeitsnachweise des EC 9.

4.2.2.2 Spannungsnachweise

4.2.2.2.1 Nachweis auf Zug und Druck (ohne Knickgefahr)

Im EC 9 ist bei Zugbelastung (N) der Widerstand gegen allgemeines Fließen des Bauteils ($N_{o,Rd}$) und gegen örtliches Versagen des kritischen Querschnitts ($N_{u,Rd}$) zu führen.

Der Nachweis der Druckbelastung erfolgt nach den gleichen Grundsätzen wie für Zugstäbe. Jedoch ist beim Vorhandensein von Löchern für mechanische Verbindungsmittel ein Abzug der Lochquerschnitte nicht erforderlich. Dies gilt allerdings nur bei Akzeptanz von möglichen Druckplastifizierungen, z. B. bei unausgefüllten Löchern.

In DIN 4113 ist keine Unterscheidung nach Druck- und Zugbelastung enthalten. Hier ist der herkömmlichen Spannungsnachweis zu führen (vgl. Tab. 4.9).

Tab. 4.9: Nachweis auf Zug und Druck (ohne Knickgefahr) nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
Zug: $N_{Ed} \leq \min \begin{cases} N_{o,Rd} = f_o \cdot A_g / \gamma_{M1} \\ N_{u,Rd} = 0,9 \cdot f_u \cdot A_{net} / \gamma_{M2} \end{cases}$ Druck: $N_{Ed} \leq \min \begin{cases} N_{c,Rd} = f_o \cdot A_{eff} / \gamma_{M1} \\ N_{u,Rd} = f_u \cdot A_{net} / \gamma_{M2} \end{cases}$	Zug und Druck: $\sigma_{id} = \frac{N}{A} \leq zul\sigma$
γ_{Mi} Sicherheitsbeiwerte: $\gamma_{M1} = 1,1$; $\gamma_{M2} = 1,25$ A_{net} Nettoquerschnittsfläche A_g Bruttoquerschnitt ggf. Reduktion infolge von Längsnähten A_{eff} Fläche je QS-Klasse und Schweißung	$zul\sigma$ Zulässige Normalspannungen σ_{id} Normalspannungen aus der Belastung A Fläche

4.2.2.2 Nachweis auf Biegung

Der Biegenachweis gemäß EC 9 ist erfüllt, sobald das Bemessungsmoment M_{Ed} kleiner ist als der niedrigere Wert von $M_{u,Rd}$ und $M_{c,Rd}$ (vgl. Tab. 4.10). $M_{u,Rd}$ ist dabei der Bemessungswiderstand in der Nettoquerschnittsfläche, d. h. mit Abzug von Schraubenlöchern und Abminderungen in der WEZ. $M_{c,Rd}$ ist das plastische Grenzmoment, das durch den Formfaktor α plastische Effekte in Abhängigkeit von Schweißnähten und Querschnittsklasse berücksichtigt. Die plastische Grenzlast kann allerdings nur von Querschnitten der Klasse 1 und 2 erreicht werden.

Laut DIN 4113 sollten die Normalspannungen beim Biegenachweis das elastische Grenztragvermögen in Form der zulässigen Spannungen nicht überschreiten (vgl. Tab. 4.10). Beim Vorhandensein von Schweißnähten sind reduzierte Querschnittswerte anzusetzen.

Tab. 4.10: Nachweis auf Biegung nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
$M_{Ed} \leq \min \begin{cases} M_{u,Rd} = f_u \cdot W_{net} / \gamma_{M2} \\ M_{c,Rd} = f_o \cdot \alpha \cdot W_{el} / \gamma_{M1} \end{cases}$	$\sigma_{id} = \frac{M}{W} \leq zul\sigma$
γ_{Mi} Sicherheitsbeiwerte: $\gamma_{M1} = 1,1$; $\gamma_{M2} = 1,25$ W_{net} Widerstandsmoment Nettoquerschnitt W_{el} Widerstandsmoment Bruttoquerschnitt α Formfaktor je QS-Klasse und Schweißung	$zul\sigma$ Zulässige Normalspannungen σ_{id} Normalspannungen aus der Belastung W Widerstandsmoment

4.2.2.2.3 Nachweis auf Schubbeanspruchung

Beim Schubnachweis nach EC 9 ist der Schubwiderstand V_{Rd} durch die Einwirkung V_{Ed} nicht zu überschreiten (vgl. Tab. 4.11). Bei der Berechnung der Schubfläche A_V unterscheidet der EC 9 zwischen schlanken und nicht schlanken Querschnitten. Bei den nicht schlanken Querschnitten wird der Schub direkt den Stegen zugewiesen. Ausnahmen hierbei sind Voll- und Rohrquerschnitte. Bei schlanken Querschnitten müssen gegen Schubbeulen nachgewiesen werden. Abminderungen infolge Schraubenlöchern und WEZ werden bei jeder Querschnittsform berücksichtigt.

Beim Schubnachweis nach DIN 4113 gilt es erneut die elastische Grenzlast einzuhalten (vgl. Tab. 4.11). Zur Berechnung der Schubbelastung wird zwischen Trägern mit oberen und unteren Flanschen und sonstigen Querschnitten unterschieden. Bei Schweißnähten werden die zulässigen Spannungen abgemindert (vgl. 4.2.1.5).

Tab. 4.11: Nachweis auf Schubbeanspruchung nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
$V_{Ed} \leq V_{Rd} = A_V \cdot f_o / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1})$ <p>Stege nicht schlanker Querschnitte:</p> $A_V = \sum_{i=1}^n [(h_w - \sum d)(t_w)_i - (1 - \rho_{o, haz}) \cdot b_{HAZ} \cdot (t_w)_i]$ <p>Voll- und Rohrquerschnitte:</p> $A_V = \eta_v \cdot A_e$	$\tau \leq \text{zul} \tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot t}$ <p>Für Träger mit Stegen zwischen Flanschen:</p> $\tau \leq \text{zul} \tau = \frac{Q}{A_{Steg}}$
h_w Steghöhe zwischen den Gurten n Anzahl der Stege t_w Stegdicke b_{HAZ} Ausdehnung der WEZ (vgl.4.2.1.5) d Lochdurchmesser in Schubfläche η Reduktionsfaktor je Querschnittsform A_e Querschnitt ggf. mit WEZ-Abminderung	$\text{zul} \tau$ Zulässige Schubspannungen A_{Steg} : Stegfläche S Statisches Moment t Stegdicke I Trägheitsmoment

4.2.2.2.4 Nachweis auf Biegung und Schub

Für die gleichzeitige Wirkung von Schub und Biegung ist im EC 9 eine Interaktionsformel enthalten (vgl. Tab. 4.12). Demnach ist der Biegezugwiderstand des Querschnitts zu reduzieren, sobald die Schubeinwirkung V_{Ed} die Hälfte der plastischen Querkraft V_{Rd} übersteigt. Bei der Bestimmung der ggf. verminderten Biegezugfestigkeit $M_{v,Rd}$ wird der Beitrag der Schubfläche durch einen reduzierten Wert der Materialfestigkeit $f_{0,v}$ erfasst. Für $V_{Ed} \leq 0,5 V_{Rd}$, kann der Einfluss der Querkraft vernachlässigt werden.

In DIN 4113 gilt es bei gleichzeitiger Wirkung von Biegung und Schub den Vergleichsspannungsnachweis zu erfüllen (vgl. Tab. 4.12). Hierzu wird die zulässige Spannung $\sigma_{v,zul}$ zu 75% der Streckgrenze des verwendeten Materials angesetzt und ist damit größer als die zulässigen Spannungen für reine Biegung bzw. reinen Schub.

Tab. 4.12: Nachweis auf Schub und Biegung nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
<p>Wenn $V_{Ed} / V_{Rd} \leq 0,5 \rightarrow$ vgl. 4.2.2.2.2</p> <p>Wenn $V_{Ed} / V_{Rd} \geq 0,5$:</p> <p>\rightarrow Reduzierung des Biege widerstands:</p> $M_{v,Rd} = t_f \cdot b_f \cdot (h - t_f) \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} + \frac{t_w \cdot h_w^2 \cdot f_{o,V}}{4 \cdot \gamma_{M1}}$ <p>mit $f_{o,V} = f_o \cdot (1 - (2V_{Ed} / V_{Rd} - 1))^2$</p>	<p>Für Lastfall H:</p> $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \leq zul\sigma_v = 0,75 \cdot \beta_{0,2}$ <p>Für Lastfall HZ:</p> $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \leq zul\sigma_v = 0,8 \cdot \beta_{0,2}$
<p>t_f Flanschdicke</p> <p>b_f Flanschbreite</p> <p>t_w Stegdicke</p> <p>h_w Steghöhe zwischen den Gurten</p> <p>h Querschnittslänge</p>	<p>$zul\sigma$ Zulässige Vergleichsspannung</p> <p>$\beta_{0,2}$ Mindeststreckgrenze</p>

4.2.2.3 Stabilitätsnachweise

4.2.2.3.1 Nachweis auf (Biege-)Knicken

Der EC 9 unterscheidet beim Biegeknicken zwischen reiner Druck- und kombinierter Druck- und Biegebelastung. Eine alleinige Druckkraft sollte die Traglast $N_{b,Rd}$ nicht überschreiten. Der Nachweis ist hierbei um die schwache Achse mit entsprechenden Schlankheitsparametern zu führen. Druck mit gleichzeitiger Biegung ist mit Interaktionsformeln je nach Belastungsrichtung, d. h. um die starke oder schwache Achse, und je nach Querschnittsform, z. B. offen, hohl, symmetrisch etc., nachzuweisen. In Tabelle 4.13 ist beispielhaft der Nachweis für Druck und Biegung von Hohlquerschnitten dargestellt. Abminderungen aufgrund der Querschnittsklasse 4 sind in jedem Fall zu berücksichtigen. Vorhandenen Schweißnähten wird je nach Nahtlage durch entsprechende Parameter, z. B. κ , ω_0 und ω_x , Rechnung getragen.

DIN 4113 beinhaltet zwei unterschiedliche Verfahren für Biegeknicken. Beide gelten sowohl für reinen Druck als auch für Druck mit Biegung - allerdings nur bei einachsigen Spannungszuständen. Rechengang I ist die ausführlichere Methode und stützt sich auf das Traglast-Interaktionskonzept von Aluminium. Dieses basiert auf der Abbildung des σ - ϵ -Verhaltens durch dreiteilige Sekantenzüge mit höchstmöglicher Traglast. Bei Längsnähten sind die reduzierten Querschnittswerte und die Festigkeiten des Grundwerkstoffs zu verwenden. Quernähte werden mit den vollen Querschnitten und den zulässigen WEZ-Festigkeiten erfasst. Zudem wird durch das Moment $M_v(\xi)$ die Nahtlage berücksichtigt. Nahtkombinationen wer-

den wie Quernähte, allerdings mit abgeminderten Querschnittswerten, nachgewiesen.

Die Ergebnisse von Rechengang I sind in der Regel wirtschaftlicher als von Rechengang II. Letzterer basiert auf dem kürzeren aber meistens etwas konservativere ω -Verfahren. Dieses gründet auf der herkömmlichen, aus dem Stahlbau bekannten idealen (Biegedrill-)/Knick- und Beulberechnung. Die Schweißnähte werden dabei in Abhängigkeit einer Grenzschlankheit λ_{gr} behandelt. Wird diese überschritten, so ist eine Vernachlässigung der Schweißnähte erlaubt. Bei Unterschreitung werden Längsnähte mit reduzierten Querschnittswerten und Festigkeiten des Grundwerkstoffs überprüft, während Quernähte je nach Nahtlage und Belastung, d. h. mittig oder außermittig, berechnet werden.

Tab. 4.13: Nachweis auf Biegeknicken nach EC 9 (Hohlquerschnitte) und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
Druck N: $N_{Ed} \leq N_{b,Rd} = \kappa \cdot \chi \cdot A_{eff} \cdot f_o / \gamma_{M1}$ $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}}$ mit $\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$ Druck N und Biegung M: $\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{min} \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1,7} \right]^{0,6} \leq 1$	<u>Rechengang I:</u> $\frac{n+1}{2} \cdot \frac{N_v}{N^*} \geq 1 \rightarrow \frac{N_v}{\mu N} + \frac{M_v}{\left(1 - \frac{N_v}{N^*}\right) \mu M^*} \leq 1$ $\frac{n+1}{2} \cdot \frac{N_v}{N^*} < 1 \rightarrow \psi \cdot \frac{N_v}{N} + \frac{M_v}{\left(1 - \frac{N_v}{N^*}\right) M^*} \leq 1$ <u>Rechengang II:</u> $\omega \cdot \frac{N}{A} \leq zul \sigma$ bzw. $\omega \cdot \frac{N}{A} + 0,9 \frac{M}{W_d} \leq zul \sigma$
κ Für Längsnähte (bei Quernähten $\kappa = \omega_x$) A_{eff} Klasse 1- 3: A Bruttoquerschnitt Klasse 4: A_{eff} mit ρ_c -Abminderungen $\bar{\lambda}$ Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_0$ Plateaugrenze der Knickspannungslinie α Imperfektionsbeiwert χ_{min} Faktor für Knicken in z-x- und y-x-Ebene ψ_c Faktor je nach Ausweichrichtung beim Knicken ω_0, ω_x Für Entfestigungen in der WEZ $M_{y,Rd}, M_{z,Rd}$ Biege widerstand y- bzw. z-Achse	$\bar{\sigma}, E^*, n, \bar{\mu}$ Dreiteiliger Sekantenzug M_v Moment inkl. Außermittigkeiten und Stabendmomente ψ Vergrößerungsfaktor N_v Absolutwert der größten Druckkraft \bar{N} Plastische Querschnittsnormalkraft N^* Eulerlast mit E^* M^* Plastisches Moment bzgl. Biegedruckrand ω Knickzahl je Legierung und Schlankheit λ Schlankheitsgrad

4.2.2.3.2 Nachweis auf (Biege-)Drillknicken

Drillknicken ist Folge einer außermittigen Druckbelastung und wird gemäß EC 9 analog zum Knicken (vgl. 4.2.2.3.1) überprüft. Allerdings wird dabei die relative Schlankheit in Abhängigkeit der kritischen elastischen Belastung N_{cr} bestimmt. Ausgenommen von diesem Nachweis sind Querschnitte, die hohl oder doppelt-symmetrisch sind, bzw. komplett aus abstehenden Elementen bestehen. Letztere müssen darüber hinaus zu Klasse 1 und 2 gehören.

Biegedrillknicken unter Biegung- und ggf. Druckbelastung ist für alle in Querrichtung nicht gehaltenen Balken nachzuweisen. Die Biegebelastung muss dabei kleiner sein als der Bemessungswiderstand $M_{b,Rd}$. Das Verfahren ist in Tabelle 4.14 dargestellt. Drei Fälle sind von dieser Überprüfung ausgeschlossen:

- Biegung um die schwache Achse, wobei der Lastangriffspunkt nicht mit dem Schubmittelpunkt zusammenfällt
- Halterung des Balkens über die gesamte Länge gegen seitliches Ausweichen
- Die bezogene Schlankheit zwischen den Querhalterungen des Balkens (λ_{LT}) ist kleiner als 0,4

Biegedrillknicken wird mit Interaktionsformeln nachgewiesen. Analog zum Knicken werden auch hier die Abminderungen infolge der Querschnittsklassifizierung sowie die Schweißnähte mit entsprechenden Faktoren berücksichtigt.

In DIN 4113 wird Drillknicken nicht explizit behandelt, sondern ist mit dem Verfahren für Biegedrillknicken zu überprüfen. Geschlossene, runde und rechteckige Hohlquerschnitte sind von diesem Nachweis allerdings grundsätzlich ausgeschlossen. Zudem können doppelte T-Profile als Knickstäbe mit entsprechenden Teilschnittgrößen behandelt werden. Zur Überprüfung aller anderen Querschnitte stehen die gleichen Interaktionsformeln wie für das (Biege-)Knicken (vgl. 4.2.2.3.1) zur Verfügung. Beim Verfahren nach Rechengang I ist allerdings die Eulerlast N^* durch den kleineren Wert aus Eulerknicklast N_E^* und idealer Drillknicklast N_{Ki} , die mit der ideellen Schlankheit λ_{vi} ermittelt wird, zu ersetzen. Darüber hinaus wird für das Grenzmoment M^* der kleinere Wert aus plastischem Moment M_{pl} des Knicknachweises und dem idealen Kippmoment M_{Ki} eingesetzt (vgl. Tab. 4.14). Das Verfahren des (Biege-)Knickens ist auch bei Rechengang II anzuwenden. Unter reiner Normalkraft ist allerdings für die Bestimmung von ω die Schlankheit für Biegedrillknicken λ_{vi} maßgebend.

Schweißnähte werden in beiden Rechnungsgängen in gleicher Art und Weise wie beim (Biege-)Knicken berücksichtigt. Die einzelnen Parameter werden allerdings von den Kennwerten des Biegedrillknickens, z. B. durch M_{ki} und λ_{vi} , beeinflusst. Zudem wird beim Nachweis nach Rechengang I für Quernähte ein K-Faktor als maximaler Ausnutzungsgrad eingeführt.

Tab. 4.14: Nachweis auf Biegedrillknicken nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
$M_{Ed} \leq M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \alpha \cdot W_{el,y} \cdot f_o \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}}$ $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$ mit $\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$	Nachweis analog zu Tab. 4.13 mit $N^* = \min(N_{ki}, N_E^*)$ $M^* = \min(M_{ki}, M^*)$
α Formfaktor je QS- Klasse u. Schweißung $W_{el,y}$ Widerstandsmoment Bruttoquerschnitt $\bar{\lambda}_{LT}$ bezogene Schlankheit f. Biegedrillknicken $\bar{\lambda}_{0,LT}$ Plateaugrenze der Biegedrillknicklinie α_{LT} Imperfektionskonstante	N_{ki} Ideale Drillknicklast N_E^* Eulerlast M^* Plastisches Moment M_{ki} Ideales Kippmoment

4.2.2.3.3 Beulen

Durch den niedrigen Elastizitätsmodul sind Aluminiumkonstruktionen besonders anfällig für Beulversagen. Dabei wird unterschieden zwischen Beanspruchungen durch reine Normalspannungen oder durch Schubspannung mit/ohne Normalspannungen.

Lokales Beulen durch Normalspannungen wird im EC 9 bereits durch Einteilung der Elemente in unterschiedliche Querschnittsklassen nachgewiesen (vgl. 4.2.2.1 und Tab. 4.15). Zu diesem Zweck werden dünnwandigen Elemente mit Hilfe eines β -Faktors charakterisiert. Schweißnähte werden durch eine entsprechende Abstufung der Vergleichswerte, also der Schlankheitsparameter β_1 bis β_3 , berücksichtigt.

In DIN 4113 werden bei reinen Normalspannungen die h/t-Verhältnisse dünnwandiger und gedrückter Bauglieder im Rahmen eines Vergleichs mit vordefinierten Grenzverhältnissen überprüft. Sind diese nicht erfüllt, so wird ein ausführlicher Beulnachweis gemäß Tabelle 4.16 fällig. Schweißnähte werden bei dem h/t-Nachweis nicht beachtet (vgl. Tab. 4.15).

Tab. 4.15: Nachweis auf lokales bzw. örtliches Beulen nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
1. Festlegung des Schlankheitsparameters β in Abhängigkeit von b/t-Verhältnis, Steifen, Spannungsverteilung und Beulform 2. Vergleich von β mit β_1 bis β_3 3. Zuordnung des Querschnitts zu entsprechender Klasse 3. Abminderung der Klasse 4-Elemente	1. Berechnung des maßgebenden Schlankheitsgrades λ des Stabs 2. Festlegen von λ_p in Abhängigkeit der Mindeststreckgrenze des Materials 3. Je nach Verhältnis von λ zu λ_p Festlegung der Grenzverhältnisse dünnwandiger Querschnitte 4. Prüfen ob h/t des Querschnittselements innerhalb der Grenzverhältnisse bleibt

Für Beulen bei vorhandener Schubspannung mit und ohne Normalspannungen sind im EC 9 Nachweisverfahren für schlanke Stege von Vollwandträgern sowie für Plattenbauteile mit und ohne Steifen enthalten. Schweißungen werden jeweils mit entsprechenden Abminderungsfaktoren berücksichtigt. In Tabelle 4.16 ist exemplarisch der Nachweis für kombinierte Schub- und Momentenbelastung bei Vollwandträgern dargestellt. Schubbeulen wird dabei durch den Schlankheitsparameter λ_w erfasst. Das abgebildete Verfahren ist zudem einigermaßen vergleichbar mit der in DIN 4113 enthaltenen Methode.

In DIN 4113 wird die Beulproblematik unter kombinierter Beanspruchung für Stegbleche vollwandiger Biegeträger behandelt (vgl. Tab. 4.15). Wärmebeeinflusste Zonen in Beulfeldern sind dabei mit einer reduzierten Festigkeit nachzuweisen (Kosteas, Steidl & Strippelmann, 1978). Innerhalb dieses Nachweises wird für die ideale Vergleichsspannung σ_{VK} auf DIN 4114 verwiesen. Diese Norm ist allerdings ein zurückgezogenes Dokument und wird mittlerweile durch DIN 18800 Teil 3 und 4 ersetzt.

Tab. 4.16: Nachweis auf Beulen bei Stegen von Biegeträgern nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
<p><u>Belastung M und V</u></p> <p>Für $M_{Ed} \geq M_{f,Rd}$:</p> <ol style="list-style-type: none"> $\frac{M_{Ed} + M_{f,Rd}}{2M_{pl,Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \leq 1$ und $M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$ <p>mit $V_{w,Rd} = \rho_V \cdot t_w \cdot h_w \cdot \frac{f_o}{\sqrt{3 \cdot \gamma_M}}$</p> $\lambda_w = \frac{0,81}{\sqrt{k_\tau}} \cdot \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_o}{E}} \rightarrow \rho_V$	<p><u>Belastung M und V</u></p> <p>$vorh\nu_B \geq zul\nu_B$</p> $vorh\nu_B = \frac{\sigma_{VK}}{\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}}$ $zul\nu_B = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{Ki}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{Ki}}\right)^2}{\left(\frac{\sigma}{\nu\sigma_{Ki}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{c \cdot \tau_{Ki}}\right)^2}}$ <p>$\sigma_{ki} = k \cdot \sigma_e$ bzw. $\tau_{Ki} = k' \cdot \sigma_e$</p>
<p>$M_{f,Rd}$ Momentenwiderstand der Flansche inkl. Klasse 4 im Druckflansch und WEZ</p> <p>$M_{C,Rd}$ Bemessungswiderstand des Trägerfelds inkl. ρ_e- oder WEZ-Abminderung</p> <p>$M_{pl,Rd}$ Plastisches Widerstandsmoment</p> <p>t_w Stegdicke</p> <p>b_w Steghöhe ohne Schweißnähte</p> <p>h_w Steghöhe mit Schweißnähten</p> <p>k_τ Beulfaktor für Schubbeulen</p> <p>ρ_V Faktor für Schubbeanspruchbarkeit</p> <p>λ_w Schlankheitsparameter für Schubbeulen</p>	<p>σ, τ Spannungen aus Belastung</p> <p>σ_{VK} Ideale Vergleichsspannung (DIN 4114-1)</p> <p>σ_{Ki} Ideale Beulnormalspannung</p> <p>τ_{Ki} Ideale Beulschubspannung</p> <p>ν Sicherheitsbeiwert</p> <p>c Sicherheitsbeiwert</p> <p>k, k' Beulwerte</p> <p>σ_e Euler'sche Knickspannung</p>

4.2.3 Standardnachweise der Tragfähigkeit für Verbindungsmittel

4.2.3.1 Schweißnähte

4.2.3.1.1 Stumpfnähte

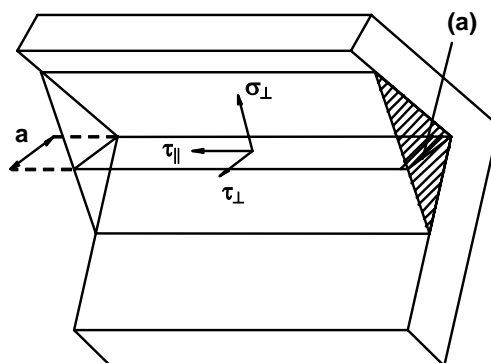
Der Nachweis von Stumpfnähten basiert sowohl im EC 9 als auch in DIN 4113 auf denselben Regelungen. Im EC 9 wird allerdings die Nachweisrichtung bei Stumpfnähten durch σ_{\perp} konkret angegeben. Dies ist in DIN 4113 mit σ_w nicht der Fall. Während im EC 9 Normalspannungen parallel zur Nahtichtung generell vernachlässigt werden, sind diese Spannungen gemäß DIN 4113 zu berücksichtigen (vgl. Tab. 4.17).

Tab. 4.17: Nachweis von Stumpfnähten nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
$\sigma_{\perp} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} ; \tau \leq 0,6 \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$ $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau^2} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$	$\sigma_w \leq \text{zul} \sigma_w ; \tau_w \leq \text{zul} \tau_w$ $\sqrt{\sigma_w^2 + 3\tau_w^2} \leq 0,95 \cdot \text{zul} \sigma_{\text{WEZ,V}}$
σ_{\perp} Normalspannung senkrecht zur Naht τ Schubspannung in der Schweißnaht γ_{Mw} Sicherheitsbeiwert $\gamma_{Mw} = 1,25$	σ_w Normalspannung in Schweißnaht τ_w Schubspannung der Schweißnaht

4.2.3.1.2 Kehlnähte

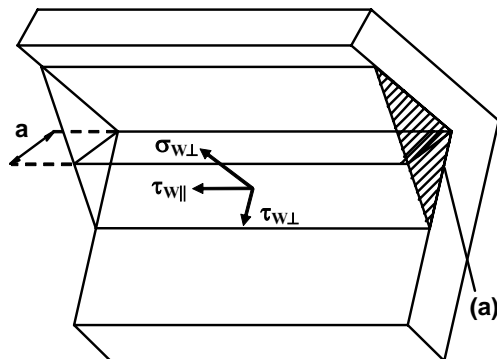
Bei Kehlnähten wird im EC 9 ein Vergleichsspannungsnachweis auf Grundlage der Spannungshypothese nach Huber-Mises-Henky gefordert. Maßgebende Nachweisebene ist diejenige mit der geringsten Nahtfläche (vgl. Abb. 4.4). Die Beanspruchungen quer zur Nahtachse müssen dementsprechend in τ_{\parallel} und τ_{\perp} innerhalb der Nachweisebene und in eine hierzu senkrechte Komponente σ_{\perp} zerlegt werden. Der Anschlusswinkel der Fügeteile wird dadurch in den Schweißnahtnachweis integriert. Die Normalspannung in Nahtlängsrichtung (σ_{\parallel}) ist hingegen zu vernachlässigen. Für Stirnkehlnähte und Flankenkehlnähte sind zwei zusätzliche Nachweisformeln gegeben (vgl. Tab. 4.18).



a= Nahtdicke; (a) = Nahtebene

Abb. 4.4: Spannungen σ_{\perp} , τ_{\parallel} , und τ_{\perp} in Kehlnaht gemäß EC 9

In DIN 4113 wird die Vergleichsspannung ohne den Faktor 3, d. h. durch Vektoraddition der Kraftkomponenten, ermittelt. Der Nachweis ist somit unabhängig von der Nahtebene, d. h. der Winkel zwischen den verschweißten Fügeteilen spielt somit keine Rolle. Folglich ist neben der Spannung parallel zur Nahtichtung ($\tau_{w\parallel}$) lediglich eine Spannungskomponente senkrecht zur Nahtlängsachse, also $\sigma_{w\perp}$ oder $\tau_{w\perp}$, zu ermitteln (vgl. Abb. 4.5 und Tab. 4.18).



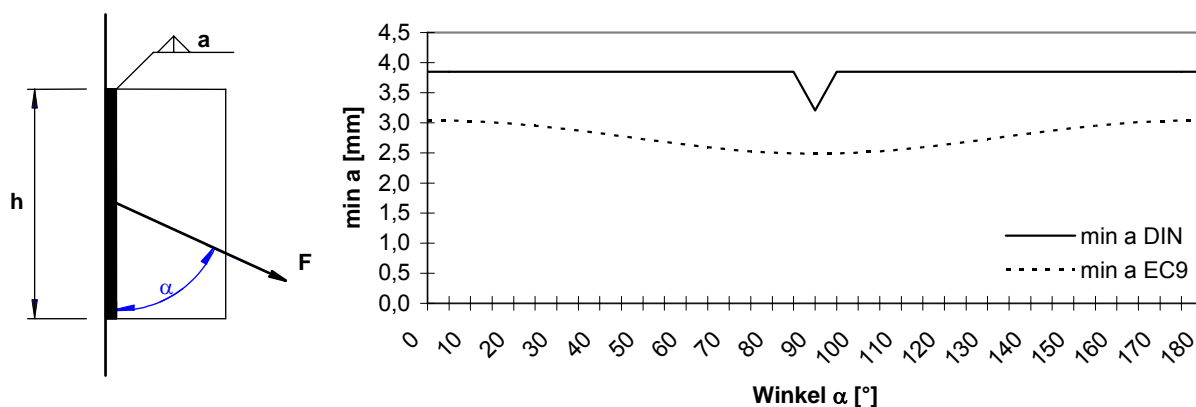
a= Nahtdicke; (a) = Nahtebene

Abb. 4.5: Spannungen $\sigma_{w\perp}$, $\sigma_{w\parallel}$, und $\tau_{w\perp}$ in Kehlnaht gemäß DIN 4113

Tab. 4.18: Nachweis von Kehlnähten nach EC 9 und DIN 4113

EC 9		DIN 4113	
$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$		$\sqrt{\sigma_{w\perp}^2 + \tau_{w\parallel}^2} \leq zul\sigma_{w,v} \text{ bzw.}$ $\sqrt{\tau_{w\perp}^2 + \tau_{w\parallel}^2} \leq zul\sigma_{w,v}$	
Stirnkehlnähte: $a \geq 0,7 \frac{\sigma_{\perp} \cdot t}{f_w / \gamma_{Mw}}$			
Flankenkehlnähte: $a \geq 0,85 \frac{\tau \cdot t}{f_w / \gamma_{Mw}}$			
σ_{\perp}	Normalspannung senkrecht zur Nahtebene	$\sigma_{w\perp}$	Spannung senkrecht zur Nahtlängsrichtung
τ_{\parallel}	Schubspannung in Nahtlängsrichtung in der Nahtebene	$\tau_{w\perp}$	Schubspannung senkrecht zur Nahtlängsrichtung
τ_{\perp}	Schubspannung senkrecht zur Nahtlängsrichtung in der Nahtebene	$\tau_{w\parallel}$	Schubspannung in Nahtlängsrichtung

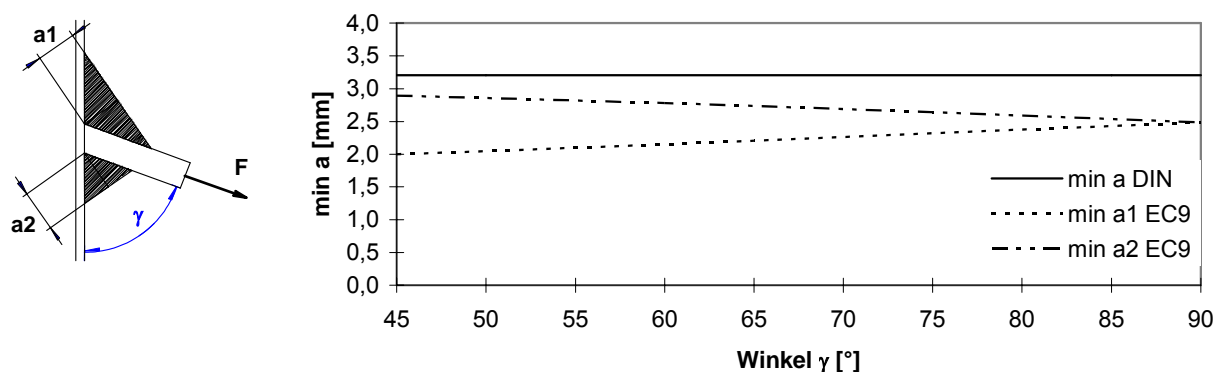
In Meyer-Sternberg et al. (1998) wird die minimale Nahtdicke von Kehlnähten gemäß EC 9 und DIN 4113 in Abhängigkeit des Winkels α der angreifenden Kraft und des Winkels γ zwischen den Fügeilen untersucht (vgl. Abb. 4.6 und Abb. 4.7).



Knotenblech und Anlussteil: AW 6063 T6; $F = 100$ kN; $h = 200$ mm; $\min a$ = minimale Nahtdicke

Abb. 4.6: Schweißnahtdicke a für die Doppelkehlnaht eines Knotenblechs je nach Belastungsrichtung α (Meyer-Sternberg et al., 1998)

Die erforderlichen Nahtdicken nach EC 9 sind deutlich geringer als nach DIN 4113. Bei ausschließlicher Beanspruchung senkrecht zur Anlussebene, d. h. bei einem Winkel von 90° , erlaubt DIN 4113 eine Erhöhung der zulässigen Beanspruchungen um 20%. Daher ist an diesem Punkt der Unterschied zwischen den minimalen Nahtdicken nach EC 9 und DIN 4113 geringer.



Knotenblech und Anlussteil: AW 5083=H111; $F = 100$ kN; $L = 200$ mm

Abb. 4.7: Schweißnahtdicken a , a_1 und a_2 für eine Doppelkehlnaht je nach Anschlusswinkel γ eines Knotenblechs (Meyer-Sternberg et al., 1998)

Die nach DIN 4113 ermittelte Nahtdicke ist unabhängig vom Anschlusswinkels des Fügeils. Beim EC 9 wird hingegen ersichtlich, dass die Naht mit einem Winkel kleiner 90° stärkeren Belastungen ausgesetzt ist und folglich eine entsprechend größere Nahtdicke benötigt.

Zusammenfassend wird in Meyer-Sternberg et al. (1998) gefolgert, dass die erforderlichen Kehlnahtdicken bei Anwendung des EC 9 zwischen 35 und 40% geringer ausfallen als bei DIN 4113.

4.2.3.1.3 Kombinierte Nähte

Für kombinierte Nähte stehen im EC 9 zwei Vorgehensweisen zu Verfügung. Bei Methode 1 werden die Schnittgrößen in der Verbindung so auf die einzelnen Nähte aufgeteilt, dass jede Naht die Kraft erhält, für deren Abtragung sie am besten geeignet ist. Die Bemessung der Schweißnähte gemäß Methode 2 erfolgt entsprechend den Spannungen im Grundwerkstoff der einzelnen Fügeiteile.

Das am häufigsten angewandte Verfahren ist dabei Methode 1. Hier ist allerdings gleichzeitig zu prüfen, ob die Schweißnaht ausreichendes Verformungsvermögen für eine derartig vereinfachte Lastverteilung besitzt. Zudem sollten die einzelnen Fügeiteile nicht überbelastet werden.

Gemäß DIN 4113 wird beim Zusammenwirken von Stumpf- und Kehlnähten entweder nur der Querschnitt der Stumpfnähte angesetzt und mit deren zulässigen Spannungen (vgl. 4.2.3.1.1) gerechnet, oder aber die Flächen von Stumpf- und Kehlnaht berücksichtigt und mit der zulässigen Spannung für Kehlnähte verglichen.

Tab. 4.19: Nachweis von kombinierten Stumpf- und Kehlnähten nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
Nachweis durch Aufteilung der Schnittgrößen oder durch Ansetzen der Spannungen im Grundwerkstoff des entsprechenden Anschlussteils	Entweder wie 4.2.3.1.1, oder $\tau_w = \frac{F}{A_w} \leq \text{zul} \sigma_{w, \text{Kehlnaht}}$
	A_w Schweißnahtfläche Stumpf- und Kehlnaht

4.2.3.1.4 Mechanische Verbindungsmittel

Der EC 9 stellt umfangreiche Informationen zur Bemessung von mechanischen Verbindungsmitteln zur Verfügung. Für Schrauben werden folgende Verbindungstypen behandelt:

- Unter Scherbelastung: Scher-/Lochleibungsverbindung (Kategorie A), Gleitfeste Verbindung im Gebrauchszustand (Kategorie B), Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Kategorie C)
- Unter Zugbelastung: nicht vorgespannt (Kategorie D), vorgespannt (Kategorie E)

Neben Schrauben und Passschrauben werden u. a. Senkschrauben/-niete, Hohlните sowie Nieten mit Kern, hochfeste Schrauben und Bolzenverbindungen behandelt. Zudem sind ausführliche Angaben zu Rand- und Lochabständen sowie Lochspielwerten gegeben. In Tabelle 4.20 sind exemplarisch die Nachweise für Schrauben dargestellt.

In DIN 4113 werden lediglich Verbindungen mit Nieten, Schrauben und Passschrauben behandelt. Für die Bemessung auf Abscheren, Lochleibung und Zug werden zulässige Spannungen und vordefinierte Rand- und Lochabstände gegeben. Die Nachweise selbst sind identisch zu den entsprechenden Verfahren im Stahlbau auszuführen (Kosteas, 1996). Die bei den Stahlnachweisen integrierten Sicherheitsbeiwerte müssen dabei aufgrund des Konzepts der zulässigen Beanspruchungen in DIN 4113 angepasst werden. Darüber hinaus sind in DIN 4113 zulässige Spannungen für Stahlverbindungsmittel, wie z. B. Stahlnieten/-schrauben ohne Vorspannung, hochfeste Schrauben und Schließringbolzen mit Vorspannung, zu finden.

Tab. 4.20: Nachweis von mechanischen Verbindungsmitteln nach EC 9 und DIN 4113

EC 9	DIN 4113
Abscheren: $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$ Lochleibung: $F_{b,Ed} \leq F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$ Zug: $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ Durchstanzen: $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd} = 0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u / \gamma_{M2}$ Schub V und Zug N: $\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$	Keine Nachweisverfahren enthalten
γ_{M2} Sicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1,25$ α_v Faktor abh. von Material, Festigkeitsklasse und Position der Scherfuge A Schaftquerschnittsfläche A _S Spannungsquerschnittsfläche k ₁ Faktor je Lage senkrecht zur Krafrichtung α_b Faktor je Lage in Krafrichtung d Durchmesser des Verbindungsmittels d _M Min. Mittelwert der Eckmaße/ Schlüsselweiten t, t _p Materialdicke k ₂ Faktor abh. von Material und Schraubenart	

4.2.3.2 Kleben

Der EC 9 enthält Bemessungsvorschriften für Klebverbindungen. Die Anwendung dieses Fügeverfahrens erfolgt mit einem hohen Sicherheitsbeiwert ($\gamma_{Ma} \geq 3,0$) und ist mit folgenden Bedingungen verknüpft.

1. Übertragung von Scherkräften
2. Verwendung geeigneter Kleber
3. EC 9-kompatible Oberflächenbehandlung der Fügeiteile vor dem Kleben

Im Gegensatz hierzu wird in DIN 4113 beim Einsatz von Klebverbindungen eine bauaufsichtliche Zulassung gefordert.

4.3 Schlussfolgerung

Mit Kapitel 4 sollten die aktuellen Entwicklungen bei den Bemessungsvorschriften von Aluminiumkonstruktionen aufgezeigt und Aussagen im Hinblick auf die Effizienz des jeweiligen Bemessungskonzeptes geliefert werden. Zu diesem Zweck wurde der Stand der Dinge von nationalen und europäischen Normen erläutert sowie die dazugehörigen Grundlagen und Standardnachweise gegenübergestellt.

Die Bemessung von Aluminiumkonstruktionen erfolgt derzeit entweder gemäß nationaler Norm (DIN 4113) oder europäischer Vorschrift (EC 9). Während DIN 4113 eine etablierte Norm darstellt, besitzt der EC 9 bis dato den Status einer Vornorm. Der Übergang vom nationalen Regelwerk zu den Eurocodes wird in Deutschland voraussichtlich im Jahr 2006 vollzogen. Die nationalen Bemessungsnormen sollen schließlich bis zum Jahr 2010 zurückgezogen werden. Während der Koexistenzperiode von DIN- und EN-Normen sollte die Anwendung der Eurocodes als Alternative zu den nationalen Richtlinien seitens der Baubehörden zugelassen werden.

Die Gegenüberstellung von DIN 4113 und EC 9 zeigt, dass die europäische Norm mehr Nachweise für vielfältigere Lastfälle und Lastkombinationen enthält. Im Gegensatz zur DIN 4113 sind beispielsweise extra Verfahren für die Beanspruchung durch Zug, Druck (ohne Knickgefahr), Lokales Stauchen, Torsion mit und ohne Verwölbung, Torsion mit Querkraft und Stegkrüppeln enthalten. Explizit behandelt werden zudem mehrteilige druckbeanspruchte Bauteile, ausgesteifte und nicht-ausgesteifte Platten sowie Vollwandträger mit schlanken Stegen. Weitere Neuheiten sind die Abdeckung des lokalen Beulens durch die Querschnittsklassifizierung, die ausführlichen Berechnungskonzepte für Stabilitätsnachweise, die sorgfältig ausgearbeiteten Vorgehensweisen bei geschweißten Aluminiumverbindungen, der Durchstanznachweis bei Schrauben und die Bemessungshinweise für Klebverbindungen.

Der EC 9 basiert auf dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte und beinhaltet weitgehend Traglastnachweise. Schweißnähte, Wärmeeinflusszonen und die Gefahr des lokalen Beulens werden durch Querschnittsabminderungen und Reduktionsfaktoren (z. B. ω_0 , ω_x für Schweißnähte und α je Querschnittsklasse) beachtet. Der dem Material zugewiesene Bemessungswiderstand übersteigt häufig die zulässigen Spannungen von DIN 4113. Einzige Ausnahmen sind die zulässigen Vergleichsspannungen, die in DIN 4113 aufgrund der Vektoraddition der einzelnen Kraftkomponenten erhöht werden.

Beim EC 9 handelt es sich um eine in sich geschlossene und für zahlreiche Praxisfälle ausgebaute Normengrundlage. Die gegebenen Informationen und Verfahren sind insgesamt als äußerst umfassend und innovativ zu bewerten. Gleichzeitig basieren allerdings viele der Bauteil- und Verbindungsnachweise auf ausgedehnten und vielschichtigen Vorgehensweisen. Insbesondere die Querschnittsklassifizierung, stellt eine zeitintensive und fehleranfällige Methode dar. Werden beispielsweise Querschnittsteile der Klasse 4 zugeordnet, so ist die Berücksichtigung des lokalen Beulens gefordert. Als Folge davon ist die Dicke der entsprechenden Abschnitte unter Druckbelastung zu reduzieren. Diese Abminderung ist jedoch wiederum abhängig von der jeweiligen Belastungsverteilung. Folglich ergeben sich sowohl für Drucknormalkraft N als auch für Biegung M_y and M_z unterschiedliche Querschnittswerte, die je nach Sicherheitsnachweis maßgebend werden.

Eine ähnliche Situation ist bei den Schweißnähten zu beobachten. Weichen die Nähte von den Standardformen (z. B. Stirn- und Flankenkehlnaht) ab, so ist die komplette Berechnung, d. h. mit Ermittlung der einzelnen Spannungskomponenten, durchzuführen. Dies hat vor allem bei schiefwinkligen Anschlüssen einen hohen Rechenaufwand zur Folge.

Im Vergleich dazu enthält DIN 4113 übersichtliche und klare Nachweisverfahren, die vorwiegend auf dem Prinzip der zulässigen Spannungen beruhen. Dabei kommt hauptsächlich die klassische Elastizitätstheorie zur Anwendung. Das Traglastverfahren wird nur bei Stabilitätsproblemen (Rechengang I) unter Berücksichtigung der für jede Legierung speziellen σ - ε -Diagramme angewandt. Die Berechnungsverfahren in DIN 4113 basieren somit in erster Linie auf herkömmlichen Methoden. Des Weiteren ist die Anzahl der behandelten Nachweise auf die Hauptlastfälle begrenzt. Dies kann einerseits als Defizit beurteilt werden, ermöglicht jedoch andererseits dem Ingenieur ein großes Maß an Flexibilität. Insgesamt ist die Handhabung von DIN 4113 als einfach und überschaubar einzustufen.

Erste konkrete Vergleiche von EC 9 und DIN 4113 in Meyer-Sternberg et al. (1998), Radlbeck & Kostea (2004) und Radlbeck et al. (2005c) zeigen überwiegend wirtschaftlichere Ergebnisse für die europäische Norm. Dies gilt insbesondere für Schweißnahtausführungen. Es bleibt abzuwarten ob bei Einführung der Eurocodes dem enormen Bemessungsaufwand oder den wirtschaftlichen Ergebnissen mehr Bedeutung beigemessen wird.

5 Ökologie

Nachdem der Aluminiumeinsatz insbesondere in ökologischer Hinsicht vielerorts mit Kritik belegt wird, stellen sich die Fragen, welche Umweltwirkungen tatsächlich mit Aluminiumbauteilen verbunden sind und wie eine ökologische Bewertung korrekt durchzuführen ist. Innerhalb dieses Kapitels werden daher der Aluminiumstoffstrom und seine Charakteristiken erläutert, unterschiedliche Datenbanken zur Ökobilanzierung verglichen und bestehende ökologische Studien von Aluminiumbauteilen bewertet. Mit Hilfe der Ergebnisse wird schließlich eine Datenbank zur Durchführung der Variantenstudie in Kapitel 7 bis 9 ausgewählt.

5.1 Stoffstrom von Aluminium

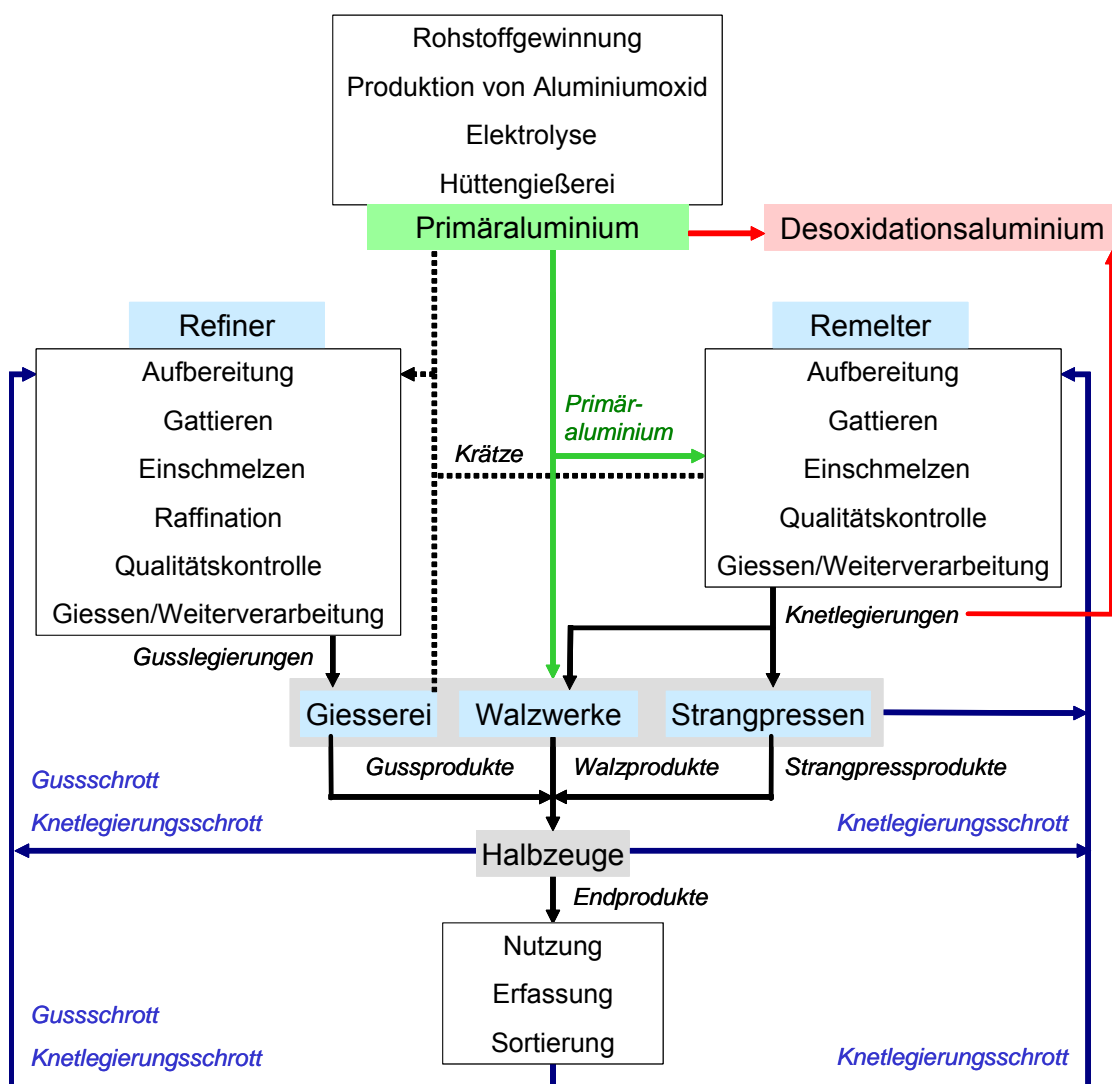


Abb. 5.1: Stoffstrom von Primär- und Sekundär-aluminium (in Anlehnung an OEA, 2004)

5.1.1 Produktion von Primäraluminium

Derzeit werden weltweit knapp 30 Millionen Tonnen Primäraluminium in 45 Ländern erzeugt (IAI, 2005). Deutschland produziert davon ca. 2,2% (GDA, 2005c). In Abbildung 5.2 ist die Produktionsmenge von Primäraluminium im Lauf der letzten 100 Jahre dargestellt. Allein in den letzten 10 Jahren wurde ein Drittel der Gesamtmenge hergestellt.

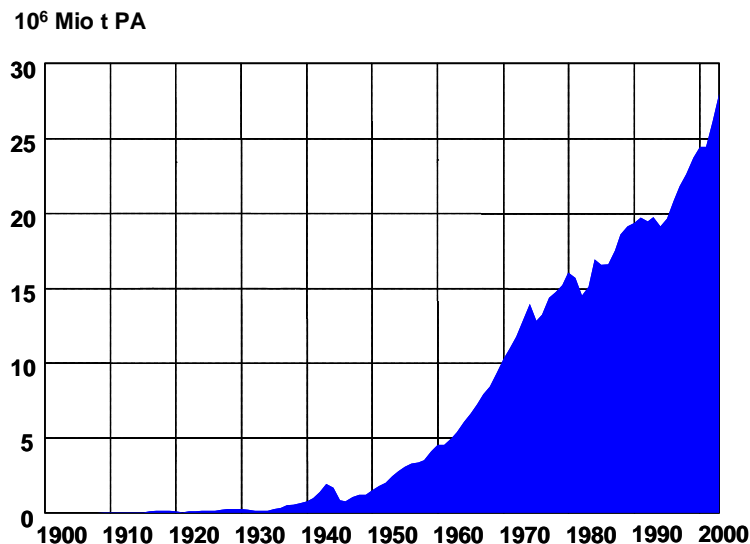


Abb. 5.2: Weltweite Gesamtproduktion von Primäraluminium seit 1900 (Gerber, 2004)

Im Jahr 2004 benötigte Deutschland ca. 3,02 Millionen Tonnen fertiger Aluminiumprodukte (GDA, 2005c). Dies entspricht ca. 10% des weltweiten Bedarfs (SFB 525, 2002). Diese hohe Nachfrage nach Produkten aus Guss- und Knetlegierungen führt dazu, dass Deutschland stark auf Importe angewiesen ist. Insgesamt muss ca. ein Drittel des deutschen Aluminiumbedarfs eingeführt werden (SZ, 2004).

5.1.1.1 Prozesse

Die Produktion von Primäraluminium umfasst folgende Prozessstufen:

Rohstoffgewinnung

Das Ausgangsmaterial zur Herstellung von Primäraluminium ist Bauxit. Weltweit werden ca. 135 Millionen Tonnen Bauxit pro Jahr abgebaut. Davon werden 85% zur Herstellung von Aluminium verwendet (SFB 525, 2002). Für eine Tonne Primäraluminium werden je nach Rohstoffqualität vier bis sechs Tonnen Bauxit benötigt (IAI, 2004). Der aktuelle Bauxitvorrat reicht nach derzeitigem Stand der Technik noch über 200 Jahre um den weltweiten Aluminiumbedarf zu decken (Glimm, 2003a). Bauxit wird hauptsächlich in Australien (43,8 Mio. t/a), Guinea (15 Mio. t/a), Brasilien (14 Mio. t/a), Jamaika (11 Mio. t/a) und China (9 Mio. t/a) im Tagebau gefördert (SFB 525, 2002). 98% der Abbaugelände liegen damit in tropischen und mediterranen Gebieten. Die Abbaustätten werden nach der Genehmigungserteilung im Mittel 64,2 Jahre genutzt (IAI, 2004).

Produktion von Aluminiumoxid

Aus Bauxit wird mit Hilfe des Bayerverfahrens Aluminiumoxid bzw. Tonerde (Al_2O_3) gewonnen. Dies geschieht durch chemisches Lösen in Natronlauge (NaOH). Hierfür wird Bauxit mit einem durchschnittlichen Gehalt von 41,4% Tonerde verwendet (IAI, 2004). Der größte Produzent von Tonerde ist Australien (15,7 Mio. t/a) gefolgt von den USA (4,8 Mio. t/a), China (4,3 Mio. t/a), Jamaika (3,6 Mio. t/a) und Brasilien (3,5 Mio. t/a). Deutschland nimmt mit 0,7 Mio. Tonnen Tonerde pro Jahr weltweit Platz 14 ein (SFB 525, 2002).

Elektrolyse

Im nächsten Produktionsschritt wird per Schmelzflusselektrolyse der in der Tonerde gebundene Sauerstoff abgespalten und Primäraluminium (PA) bzw. Hüttenaluminium erzeugt. Dieses hat einen Reinheitsgrad von 99,5 bis 99,7%. Das Flüssigmetall wird als Reinaluminium oder als Legierung entweder direkt vermarktet oder in der Hüttengießerei zu Masseln gegossen. Diese werden in Formgießereien zu Gussstücken und in Formatgießereien zu Press-, Walz- und Schmiedebarren weiterverarbeitet. Die größten Produzenten von Primäraluminium sind die USA (3,7 Mio. t/a), Russland (3,2 Mio. t/a), China (2,6 Mio. t/a), Kanada (2,4 Mio. t/a) und Australien (1,8 Mio. t/a) (SFB 525, 2002). Deutschland belegt hierbei weltweit Rang 10 (Kramer, 2005).

Verarbeitung

Durch Umformen bzw. Kneten der Aluminiumbarren etc. werden letztlich Halbzeuge wie Strangpress-, Walz- und Zieherzeugnisse gefertigt.

5.1.1.2 Energieverbrauch

Die Werte für den Energieverbrauch von einer Tonne Primäraluminium (t_{PA}) weichen je nach Bezugsquelle und Art der Energiequellen stark voneinander ab. Folgende Werte werden in der Literatur angegeben:

- (Krone, 2000): 174,0 GJ/ t_{PA} Primärenergie²²
- (EAA, 2000a): 142,2 GJ/ t_{PA} nicht erneuerbare Energie
- (GEMIS, 2004): 240,3 GJ/ t_{PA} nicht erneuerbare Energie
- (EcoInvent, 2003): 161,6 GJ/ t_{PA} nicht erneuerbare Energie
- (GaBi, 2003): 200 GJ/ t_{PA} nicht erneuerbare Energie für länderspezifische Bilanzierung je nach Importanteil und 60 GJ/ t_{PA} für die effizienteste Produktionstechnologie (BAT)
- (BUWAL/SVI, 1996): 130 GJ/ t_{PA} nicht erneuerbare Energie
- (Buxmann, 2004a): 141,0 GJ/ t_{PA} Graue Energie²³

Diese unterschiedlichen Werte kommen durch unterschiedliche Datengrundlagen, Bezugsräume, Quellen etc. zustande (vgl. hierzu 5.2.2.6). Tatsache ist, dass der Prozess der Elektrolyse mit ca. 75% den größten Anteil an Energie benötigt. Grund hierfür ist der Stromverbrauch, welcher mit ca. 97% Anteil an der für die gesamte Produktion benötigten Stromaufwendungen zu Buche schlägt (Krone, 2000). Dies entspricht ca. 15 $\text{MWh}_{\text{el}}/t_{\text{PA}}$, wobei dieser Wert je nach eingesetzter Elektrolysetechnologie zwischen 12,9 und 18,3 $\text{MWh}_{\text{el}}/t_{\text{PA}}$ variieren kann (Martens, 2002; Koch & Harnisch, 2001). Im Lauf der letzten 50 Jahre wurde die Produktion von Primäraluminium zunehmend energieeffizienter. Der Strombedarf für die Elektrolyse wurde beispielsweise seit 1950 um ca. ein Drittel reduziert (vgl. Abb. 5.3).

²² Primärenergie: die von natürlichen, noch nicht weiterverarbeiteten Energieträgern (z. B. Kohle, Erdöl, Erdgas, Wasser, Wind, Sonne) stammende Energie.

²³ Graue Energie: Anteil an ausgebeuteter fossiler Energie.

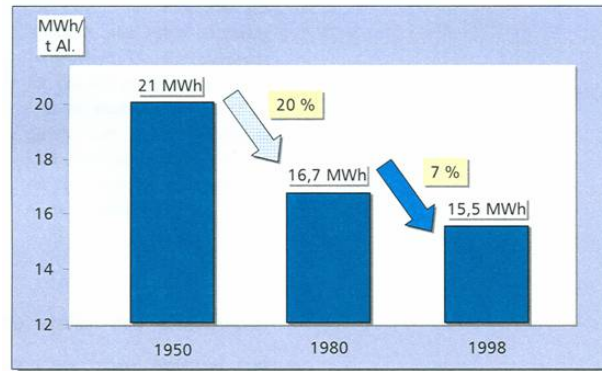


Abb. 5.3: Durchschnittlicher Strombedarf der Elektrolyse (Schäfer, 2001)

5.1.1.3 Einfluss der Energiebereitstellung

Der Primärenergieaufwand der Aluminiumherstellung ist wesentlich abhängig von Strombereitstellung und Elektrolysetechnik. Nach Quinkertz & Rombach (1999) hat dabei die Art der Energiebereitstellung wesentlich größeren Einfluss auf den Energiebedarf und die energiebedingten Emissionen als die Elektrolysetechnik selbst.

Bei der Erstellung eines Energiemodells für die Stromversorgung bei der Aluminiumerzeugung gilt es folglich die Art und die Anteile der jeweiligen Energieträger möglichst wirklichkeitsgetreu zu berücksichtigen. Hierzu stehende folgende Ansätze zur Verfügung:

5.1.1.3.1 Nationaler Netzstrom-Mix

Der nationale Netzstrom-Mix basiert auf den durchschnittlichen Anteilen der Energieträger an der Stromerzeugung im jeweiligen Land. Der Strommix wird daher entweder durch das vorherrschende Versorgungsunternehmen oder durch das gesamte Netzwerk an nationalen Energieerzeugungssystemen repräsentiert. Länder wie Kanada, Brasilien und Island haben beim nationalen Netzstrom-Mix einen ausgeprägten Anteil an Wasserkraft. In den USA, Indien und China ist hingegen Kohle der Hauptenergieträger. Zur Veranschaulichung werden nachstehend der deutsche, brasilianische und chinesische Netzstrom-Mix dargestellt (vgl. Abb. 5.4).

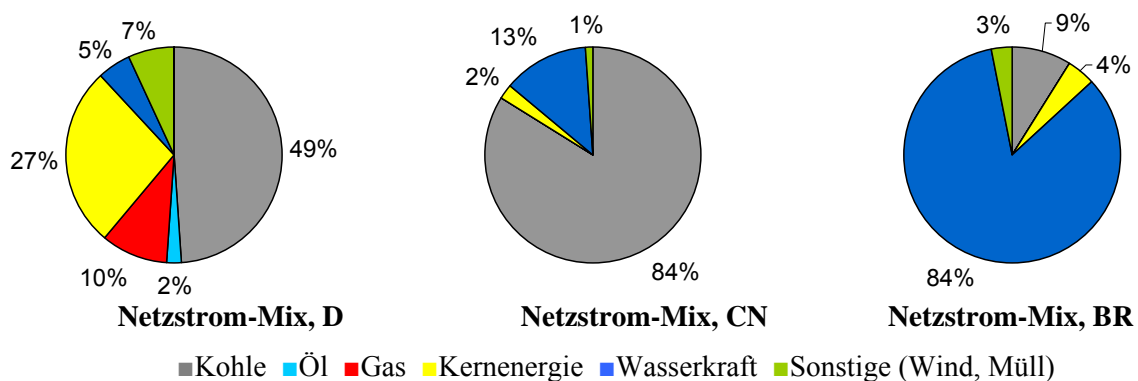


Abb. 5.4: Netzstrom-Mix in Deutschland, China und Brasilien im Jahr 2003 (DWI, 2005; EDF, 2004)

Vor der Liberalisierung des Strommarktes stellte der nationale Strommix ein wirkungsvolles Hilfsmittel zur Darstellung der Energieversorgung dar. Mittlerweile wird Strom allerdings grenzüberschreitend gehandelt. Da der nationale Netzstrom-Mix in der Regel keine Stromimporte oder Exporte mitberücksichtigt, ist er damit nur noch bedingt zur Abbildung der realen Verhältnisse geeignet.

5.1.1.3.2 Europäischer Netzstrom-Mix je nach Netzwerkorganisation

Der europäische Netzstrom-Mix präsentiert die Anteile der Energieträger an der Stromerzeugung je nach zugrunde liegender Netzwerkorganisation von Stromlieferanten. Das Netzwerk der UCTE²⁴ (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) umfasst beispielsweise den Großteil Europas. Staaten in Skandinavien werden hingegen durch die Netzwerkorganisation NORDEL²⁵, Osteuropa durch CENTREL²⁶, Großbritannien durch UKTSOA und (Nord-) Irland durch ATSOI abgebildet. Im Folgenden sind die Strommixe der UCTE und von NORDEL im Jahr 2003 dargestellt. Die Bedeutung der Wasserkraft in den nördlichen Ländern ist dabei mit einem Anteil von 47% deutlich ersichtlich (vgl. Abb. 5.5).

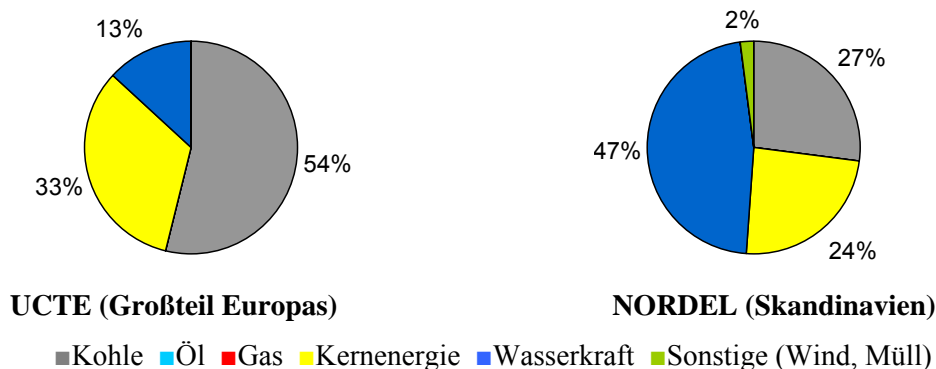


Abb. 5.5: Europäische Netzstrom-Mixe im Jahr 2003

Der Vorteil dieser Betrachtungsweise liegt in der Aufweitung der Systemgrenzen je nach Marktgegebenheiten der Energieversorgungsunternehmen. Der Bezugsraum wird allerdings durch die begrenzte Übertragungskapazität von Strom eingeschränkt. Darüber hinaus werden beim europäischen Netzstrom-Mix lokale und regionale Gegebenheiten nicht beachtet. Auch die Berücksichtigung von Stromimporten und -exporten ist zwecks mangelnder Datenverfügbarkeit und die nicht gegebene Kompatibilität der jeweiligen nationalen Datenerhebung mit Schwierigkeiten behaftet. Außerdem besteht durch eine zunehmende Liberalisierung des Strommarktes die Gefahr der Verschleierung der jeweiligen Energiequellen.

5.1.1.3.3 Vertrags-Mix

Der Vertrags-Mix einer Aluminiumhütte setzt sich aus den Anteilen der Stromversorgungsunternehmen und - falls vorhanden - aus der Eigenerzeugung des genutzten Kraftwerksparks zusammen. Damit besteht eine deutliche Abhängigkeit zwischen dem Strommix und den jeweils gültigen Verträgen zwischen Stromabnehmer und Energieversorger.

In Abbildung 5.6 wird der Unterschied zwischen Vertrags-Mix und Netzstrom-Mix anhand der Energieversorgung von Primäraluminiumhütten in den USA dargestellt. Die größten Abweichungen sind beim Wasserkraftanteil zu beobachten.

²⁴ UCTE: P, E, B, NL, L, F, CH, D, A, I, HR, SLO, SCG, BIH, H, BG, RO, GR, FYROM, CZ, PL, SK, West UA

²⁵ NORDEL: DK, FI, IS, N, S

²⁶ CENTREL: PL, CZ, SLO, BG

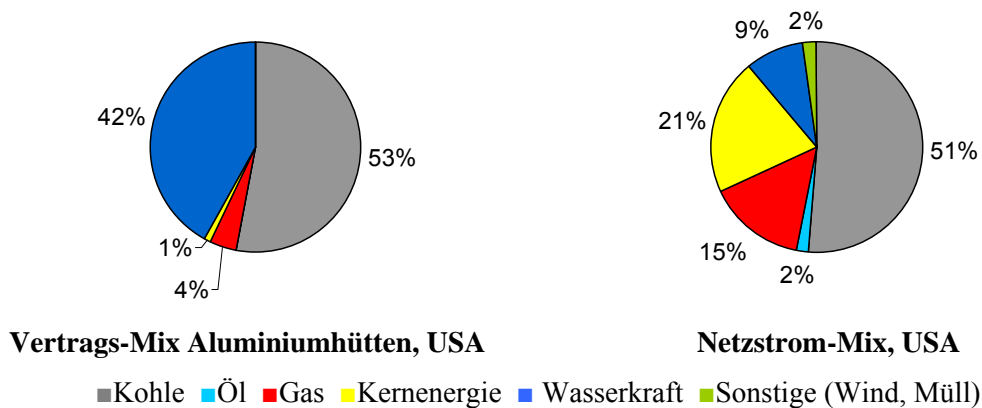


Abb. 5.6: Versorgungs-Mix vs. Landesverbund-Mix, USA, 1995 (Kugeler et al., 2004)

Auch bei diesem Energiemodell besteht die Gefahr die Energiequellen durch die zunehmende Netzwerkorganisation der Stromlieferanten zu verfälschen.

5.1.1.3.4 Insellösung bzw. Zuordnungsansatz

Viele Unternehmen mit sehr hohem Energieverbrauch beziehen Strom nicht aus dem landestypischen Verbundnetz, sondern aus eigenen bzw. eindeutig zuweisbaren Kraftwerken. Der große Vorteil hierbei ist die Unabhängigkeit von externen Kraftwerken. Zudem entstehen durch die direkte Verwendung des Stroms keine Verteilungsverluste. Die meisten Aluminiumhütten verwenden diese autarke Art der Energieerzeugung. Folglich weichen die Anteile der Primärenergieträger an der Stromerzeugung für Aluminiumhütten oft deutlich vom landestypischen Strommix ab. Dieser Unterschied ist im Folgenden am Beispiel von Kanada dargestellt (vgl. Abb. 5.7).

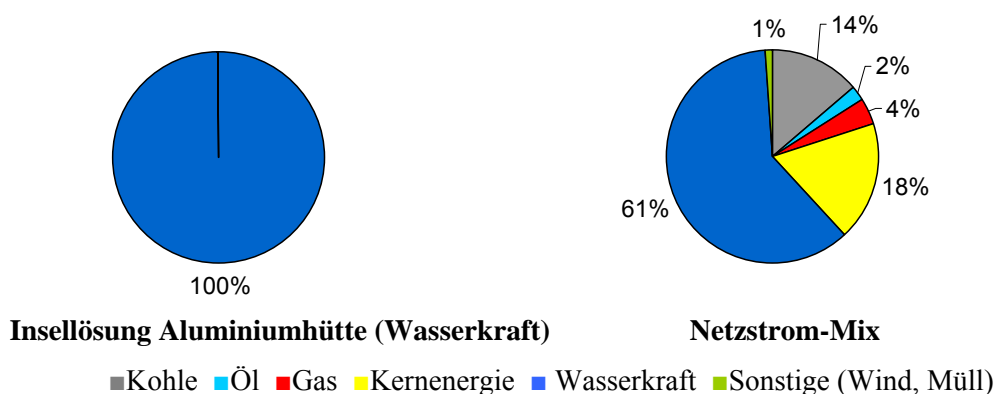


Abb. 5.7: Insellösung vs. Landesverbundmix, Kanada, 1995 (Kugeler et al., 2004)

Bei diesem Modell ist kritisch anzumerken, dass die ausschließliche Versorgung durch ein Kraftwerk, insbesondere in Europa, äußerst selten der Fall ist. Um kurzfristigen Ausfällen vorzubeugen besteht in den meisten Fällen eine zusätzliche Verbindung (sog. Back-up-Supply) zum Landesverbundnetz oder zu anderen Kraftwerken. Dadurch ist die Stromversorgung nicht mehr eindeutig zu definieren.

5.1.1.3.5 Grundlast Ansatz

Die Grundlast bezeichnet die Netzbelastung, welche in einem Stromnetz nie unterschritten wird (vgl. Abb. 5.8). Da der niedrigste Stromverbrauch meist nachts auftritt, wird die Höhe der Grundlast von durchgehend produzierenden Industrieanlagen, Straßenbeleuchtung und Dauerverbrauchern in Haushalt und Gewerbe bestimmt.

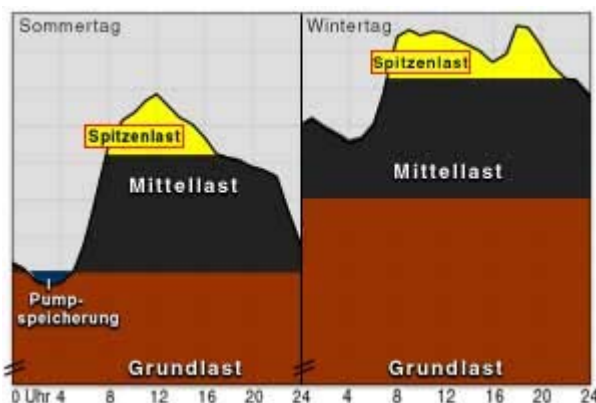


Abb. 5.8: Verlauf des Stromverbrauchs (Energielexikon, 2005)

Zur Deckung der Grundlast werden Kraftwerke eingesetzt, die den Strom kostengünstig produzieren. Hierzu gehören Atomkraftwerke, Braunkohlekraftwerke und Wasserkraftwerke. In Abbildung 5.9 wird der Unterschied zwischen Versorgungs-Mix, Landesverbundnetz und Grundlast-Mix innerhalb Deutschlands dargestellt.

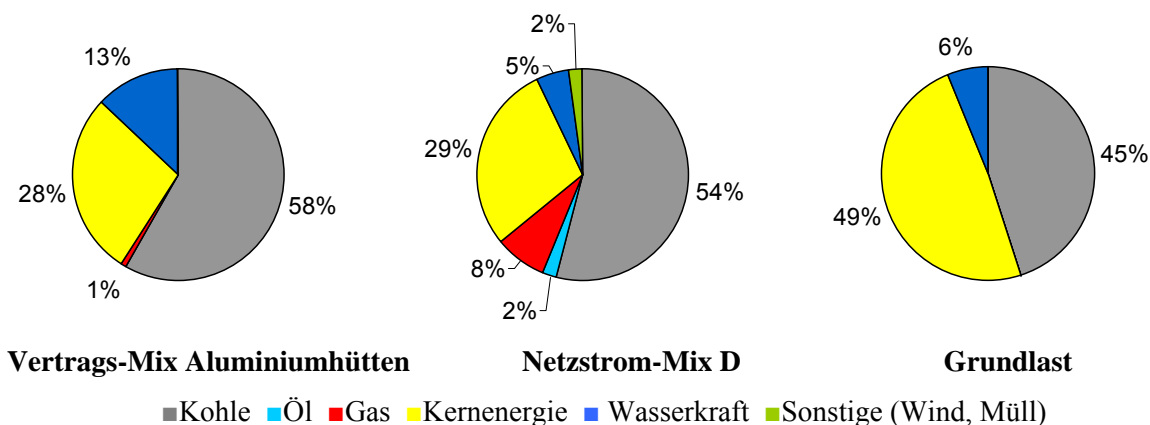


Abb. 5.9: Vertragsmix vs. Landesverbund vs. Grundlast, D, 1995 (Kugeler et al., 2004)

Da oben genannte Kraftwerke nur sehr schwerfällig zu regulieren sind, versuchen die Energieversorgungsunternehmen den Grundlastbedarf möglichst langfristig im Voraus abzuschätzen. Bei Unterschreitung des abgeschätzten Werts muss daher entsprechend reagiert werden, d. h. entweder durch Einschalten zusätzlicher Verbraucher (z. B. Pumpspeicherkraftwerke) oder durch Abgabe von Strom in andere Stromnetze. Hierdurch kann es auch bei diesem Modell zur Verschleierung der Energieanteile kommen. Zudem ist den seltensten Fällen nachvollziehbar ob dem Strommodell die Grundlast, Mittellast oder Spitzenlast der Kraftwerke zugrunde liegt.

5.1.1.3.6 Energiemodelle von EAA, IAI und IPAI

Die „European Aluminium Association“ (EAA) und das „International Aluminium Institute“ (IAI) stellen kombinierte Energiemodelle für die Aluminiumproduktion zur Verfügung. Die EAA berücksichtigt hierbei je nach Importanteil die Energieversorgung von europäischen (61%), russischen (19%) und westlichen (20%) Schmelzwerken. Mit derselben Vorgehensweise erarbeitete das Institut für „International Primary Aluminium Production“ (IPAI) einen Strommix für die westliche Welt (ohne Europa). Das Energiemodell des IAI beruht ebenfalls auf unmittelbaren Daten von weltweit produzierenden Aluminiumhütten. Im Folgenden sind die von der Aluminiumindustrie erstellten Energiemodelle zur Stromversorgung dargestellt (Abb. 5.10).

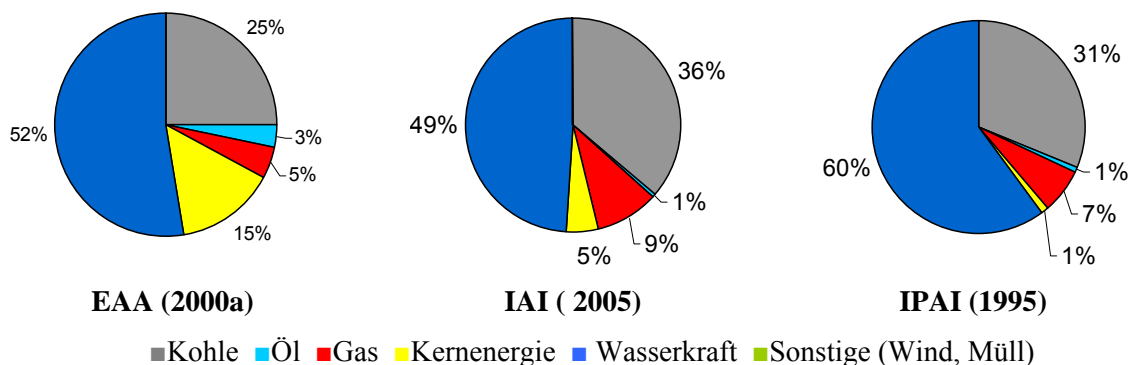


Abb. 5.10: Strommix von EAA, IPAI und IAI für die Aluminiumerzeugung

Der Vorteil dieser kombinierten Energiemodelle liegt in der Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten der Bezugsländer je nach Importanteil.

5.1.1.3.7 Wertung der Energiemodelle

Bezogen auf den weltweit verflochtenen Aluminiumstoffstrom bilden die dargestellten Modelle in den Abschnitten 5.1.1.3.1 bis 5.1.1.3.5 jeweils nur einen Teil der Energieversorgung ab. Sie eignen sich folglich lediglich für begrenzte Bezugsräume, z. B. für einzelne Schmelzhütten mit genau definierter Stromversorgung.

Bei der Betrachtung von ausgedehnten Bezugsräumen sollten Energiemodelle je nach vorhandenen Gegebenheiten und Importanteil zur Anwendung kommen. Hierfür bieten sich die kombinierten Modelle der Aluminiumindustrie an (vgl. 5.1.1.3.6). Zur Abbildung des europäischen Aluminiumstoffstroms im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher das Energiemodell der Europäischen Aluminiumindustrie (EAA) verwendet.

5.1.1.4 Umweltwirkungen

Das Umweltbundesamt (UBA) definiert bei der Herstellung von Primäraluminium die folgenden Umweltwirkungen als wichtigste ökologische Probleme (UBA, 2001):

- Flächenverbrauch beim Bauxitabbau,
- Erzeugung fester Abfälle bei der Herstellung von Aluminiumoxid (z. B. Rotschlamm) und in den Elektrolysezellen (z. B. Ofenausbruch)
- Entstehung von Emissionen, (z. B. die Treibhausgase PFC und CO₂ sowie Fluoride)

Diese Umweltbelastungen werden in nachstehenden Abschnitten genauer erläutert:

5.1.1.4.1 Flächenverbrauch

Je Abbaugbiet werden bei der Bauxitgewinnung zwischen 4 und 200 km² Land zerstört (IAI, 2004). Der durchschnittliche Flächenverbrauch eines Abbaugbiets beträgt ca. 67 km². Pro Jahr werden damit ca. 2,4 km² reine Regenwaldfläche durch den Bauxitabbau gerodet (Martens, 2002). Der durch den gesamten Rohstoffabbau (Erz, Kohle, Öl etc.) verursachte Flächenverbrauch im Regenwald wird mit ca. 1% beziffert. In der Studie „Deforestation of Tropical Rain Forests“ des Greenpeace e.V. wurde daher bereits 1992 darauf hingewiesen, dass der Flächenverbrauch im Regenwald durch den Bauxitabbau im Verhältnis zu anderen Aktivitäten, wie z. B. dem Wanderfeldbau, zu vernachlässigen ist (Bundesregierung, 1997).

Die Abbaugbiets werden nach der Nutzung rekultiviert. Dabei werden ca. 80% der Flächen mit der ursprünglichen Vegetation bepflanzt, weitere ca. 18% für die Land- und Forstwirtschaft genutzt und die restlichen ca. 2% in Erholungs- und Gewerbegebiete umfunktioniert. Auch beim zerstörten Regenwald wird eine Form der Kultivierung angestrebt, die dem ursprünglichen Ökosystem möglichst nahe kommt (Glimm, 2003a).

5.1.1.4.2 Feste Abfälle

Bei der Produktion von einer Tonne Primäraluminium werden ca. 1,3 Tonnen Abfälle zur Entsorgung verursacht²⁷. Dabei übernimmt der bei der Produktion von Aluminiumoxid als Nebenprodukt anfallende Rotschlamm (ca. 1,5 t/t_{PA}) den Hauptanteil. Rotschlamm besitzt einen hohen Gehalt an Eisenverbindungen und einen Restgehalt an Alkali. Zwar wird die Natronlauge weitgehend zurückgewonnen und wiederverwertet (entspricht ca. 0,2 t/t_{PA}), doch für den verbleibenden Abfallstoff (ca. 1,3 t/t_{PA}) (EAA, 2000a) wurden bisher noch keine effizienten Nutzungsmethoden gefunden. Es gibt jedoch Bestrebungen Rotschlamm als Füllstoff für den Straßenbau oder zur Gewinnung von Eisen weiterzuverwerten (AFI, 2005). Da Rotschlamm keine weiteren industriellen Zusätze enthält, fällt er nicht in die Kategorie Sondermüll und kann umweltneutral deponiert werden. Manche dieser Deponien können in Abhängigkeit von den jeweiligen örtlichen klimatischen Voraussetzungen rekultiviert werden (Glimm, 2003b).

Ein weiterer Reststoff der Aluminiumproduktion ist der während der Elektrolyse in den Schmelzöfen anfallende Ofenausbruch (ca. 23- 30 kg/t_{PA}) (EAA, 2000; Krone, 2000). Dieser kann entweder als Kohlenstoffträger verwendet werden oder muss als Sondermüll deponiert werden (UBA, 2001).

²⁷ Auskunft von Frau Dr. P. Kistler, Manager EHS FIRST (Alcan Inc.), am 2.05.2005 in Montreal.

5.1.1.4.3 Emissionen

Je Tonne Primäraluminium entstehen 10,9 t atmosphärischer Emissionen (EAA, 2000a). Diese sind neben dem Bauxitabbau, dem Transport und der Brennstoffbereitstellung bzw. -verbrennung hauptsächlich auf den Elektrolyseprozess und die hierfür benötigte Energiebereitstellung zurückzuführen.

Während der **Elektrolyse** entstehen neben Kohlendioxiden (1737 kg/t_{PA}) und Schwefeldioxi- den (10,5 kg/t_{PA}) u. a. Fluoride (als HF 0,6 kg/t_{PA}) und Fluor (1,2 kg/t_{PA}).

Die Fluorid-Emissionen konnten in den letzten Jahren durch umfangreiche Maßnahmen der Abgasreinigung erheblich reduziert werden. In Deutschland wird beispielsweise häufig die trockene Abgasreinigung angewendet. Mit Aluminiumoxid als Filtermittel können dabei die gasförmigen Fluoride gebunden und mittlerweile bis zu 99 Prozent der emittierten Fluoride aufgefangen werden (GDA, 2002c). Der entstehende Filterstaub wird dann ohne weitere Behandlung in den Stoffkreislauf des Aluminiums zurückgeführt (Bundesregierung, 1997).

Die Entstehung von Fluor ist auf die Zersetzung des Schmelzmittels Kryolith zurückzuführen. Fluor kann bei so genannten Anodeneffekten mit dem Kohlenstoff der Anoden zu Tetrafluormethan (CF₄) und Hexafluorethan (C₂F₆) im Verhältnis 10:1 reagieren. Bei der Produktion von einer Tonne Primäraluminium entstehen so insgesamt ca. 0,28 kg dieser hochwirksamen polyfluorierten Kohlenwasserstoffe (PFC). Deren Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt ist zu rund 60 Prozent auf die Aluminiumindustrie zurückzuführen (Glimm, 2003c). Zur Veranschaulichung ist in Tabelle 5.1 das Treibhauspotenzial dieser PFC-Emissionen im Vergleich zu Kohlendioxid dargestellt.

Tab. 5.1: Treibhausgase mit Treibhauspotenzialen (Glimm, 2003c)

Treibhausgas	Lebensdauer [a]	Treibhauspotenzial
Kohlendioxid (CO ₂)	50-200	1
Tetrafluormethan (CF ₄)	50.000	6.500
Hexafluorethan (C ₂ F ₆)	10.000	9.200

Die Emissionen der **Energiebereitstellung** bestehen hauptsächlich aus Kohlendioxiden (5558 kg/t_{PA}) und einem deutlich geringeren Anteil an Schwefeldioxid (31,4 kg/t_{PA}), Stickoxiden (15,7 kg/t_{PA}) und Staub (7,8 kg/t_{PA}) (EAA, 2000a). Energiebedingte Emissionen sind deutlich abhängig von der Art der Energiebereitstellung. So verursachen beispielsweise fossile Energieträger eine Vielzahl von Emissionen während durch Wasserkraft nur gering belastete Energie erzeugt wird. In Tabelle 5.2 wird dies verdeutlicht, indem die spezifischen CO₂-Emissionen von Aluminiumhütten je nach Bezugsraum und in Abhängigkeit der Energiebereitstellung dargestellt werden.

Tab. 5.2: Spezifische CO₂-Emissionen [kg CO₂/t_{AL}] von Aluminiumhütten in Europa, Westeuropa und Osteuropa je nach Energieversorgung (in Anlehnung an Koch & Harnisch, 2001)

Energieversorgung	Europa	Westeuropa	Osteuropa
Insellösung	5,7·10 ³	5,0·10 ³	10·10 ³
Versorgungs-Mix	6,1·10 ³	5,3·10 ³	11·10 ³
Nationaler Netzstrom-Mix	6,8·10 ³	6,1·10 ³	11·10 ³
UCTE-Mix	7,8·10 ³	7,8·10 ³	7,7·10 ³
EAA	-----	5,6·10 ³	-----

Die höheren Werte in Osteuropa sind auf die dortige Energiegewinnung aus Kohle zurückzuführen. Die Werte im Bereich von 5·10³ kgCO₂/t_{PA} sind auf einen ausgeprägten Anteil an Wasserkraft in der Stromversorgung zurückzuführen.

5.1.1.4.4 Selbstverpflichtungen der Aluminiumindustrie

Auf **nationaler Ebene** hat sich die NE-Metallindustrie²⁸ verpflichtet, die Primäraluminiumproduktion angesichts der zunehmend stringenten Umweltpolitik weiterhin zu optimieren. Bis 2005 sollte bei der Produktion eine Energieeinsparung um 22% gegenüber dem Niveau von 1990 erreicht werden (GDA, 2005a). Die deutsche Aluminiumindustrie hatte sich darüber hinaus zum Ziel gesetzt, die PFC-Emissionen bis zum Jahr 2005 um rund die Hälfte gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren (SFB 525, 2002). Obige Grenzwerte wurden für den Energieverbrauch und die PFC-Emissionen seitens der deutschen Aluminiumindustrie bereits vor dem Jahr 2005 erreicht²⁹.

Auf **internationaler Ebene** hat sich die Aluminiumindustrie drüber hinaus folgende Ziele gesteckt (IAI, 2004):

- 80% Reduzierung der PFC-Treibhausgasemissionen pro Tonne Primäraluminium bis 2010 im Bezug auf das Niveau von 1990
- 33% Reduzierung der Fluoride pro Tonne Primäraluminium bis 2010 im Bezug auf das Niveau von 1990
- 10% Reduzierung des Energiebedarfs für den Schmelzvorgang pro Tonne Primäraluminium bis 2010 im Bezug auf das Niveau von 1990.

²⁸ NE= Nicht-Eisen

²⁹ Aussage per Telefon von Herrn J. Schäfer, Metallurgist (Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.), am 25.04.2005.

5.1.2 Recycling - Produktion von Sekundäraluminium

Aluminium kann beliebig oft eingeschmolzen und wiederverwertet werden. Bereits Anfang der 80er Jahre führten der hohe Energiebedarf für die Primärerzeugung und die Notwendigkeit Reststoffe zu verwerten, Abfall zu vermeiden und Deponien zu entlasten zu einem deutlichen Anstieg der Sekundärproduktion von Aluminium. Seitdem wird in den meisten Fällen, in denen Aluminium zur Anwendung kommt, dieses nach der Nutzung gesammelt und dem Recyclingkreislauf zugeführt. Zwar zeichnen sich Primäraluminiumlegierungen durch einen höheren Reinheitsgrad aus, doch durch moderne Produktionstechnologien gelingt es mittlerweile auch der Sekundärindustrie Legierungen herzustellen, die dem Primäraluminium gleichwertig sind. Mit steigendem Anteil des Sekundäraluminiums können allerdings die für die Endprodukte erforderlichen Reinheiten des Metalls eine Begrenzung bilden. Ein vollständiger Ersatz des Primäraluminiums durch Sekundäraluminium ist somit nicht möglich. Die Erzeugung von Primär- und Sekundäraluminium stehen dadurch im Verhältnis gegenseitiger Abhängigkeit.

Weltweit wurden im Jahr 2003 ca. 7,7 Millionen Tonnen Sekundäraluminium produziert. Dies entspricht ca. 25% der jährlichen Gesamtproduktion. Europaweit beträgt der Anteil an Sekundäraluminium bereits 34% bei allen gefertigten Aluminiumprodukten (EAA, 2004). In Deutschland wird bereits seit 2002 mehr Sekundäraluminium als Primäraluminium produziert (GDA, 2005b). Gegenwärtig wird der deutsche Gesamtaluminiumbedarf durch ca. 30% Primäraluminium aus Eigenproduktion, 35% Sekundäraluminium aus Eigenproduktion und ca. 35% Primäraluminium aus Importen gedeckt (Aluminium-Verlag, 2005).

5.1.2.1 Prozesse

Analog zu den Recyclingmöglichkeiten werden zwischen zwei Typen von Sekundärindustrie unterschieden - den Schmelzhütten, bzw. „Refiners“, und den Umschmelzwerken, bzw. „Remelters“:

Refiner setzen als Rohstoff nahezu 100% Aluminiumschrott ein. D. h. hier werden nicht-sortenreine Legierungen und stärker verunreinigte Schrotte zu Gusslegierungen³⁰ verarbeitet. In vielen Statistiken, z. B. der deutschen Aluminiumindustrie (GDA), sind die Angaben im Hinblick auf Sekundäraluminium mit der Refinerproduktion gleichzusetzen³¹. Im Jahr 2003 wurden demnach 680.400 Tonnen Sekundäraluminium von Refinern produziert. Die Refinerindustrie besteht schon seit den 30er Jahren (Schucht, 1999). Ihr Zuwachs betrug zwischen 1980 bis 2004 europaweit ca. 50% (EAA, 2004).

Remelter verarbeiten³² Aluminium, welches in definierter Form gesammelt wurde. Zusammen mit Primäraluminium werden daraus Knetlegierungen für die Herstellung von Halbzeugen gefertigt. Da die metallurgische Analyse der Schmelze genau mit dem zu produzierendem Typ der Knetlegierung zusammenpassen muss, werden definierbare und nicht-verunreinigte Schrottqualitäten benötigt. Im Jahr 2004 betrug der Schrotteinsatz ca. 413.000 Tonnen. Das Verhältnis liegt häufig bei 60% Schrott und 40% Primäraluminium. Durch die Verwendung von Primäraluminium, ist die Remelterproduktion nicht ohne weiteres dem Sekundäraluminium zuzuordnen und bleibt somit in vielen Statistiken unberücksichtigt³¹.

³⁰ Gusslegierungen werden durch einen hohen Legierungsgehalt von bis zu 20% (EAA, 2004) charakterisiert (vgl. Kapitel 3).

³¹ Aussage per Email von Herrn G. Kirchner, Geschäftsführer des VAR (Verband der Aluminiumrecycling-Industrie e.V.), am 26.04.2005.

³² Knetlegierungen besitzen einen maximalen Legierungsanteil von bis zu 10%.

In Europa verzeichnet die Remelterindustrie zwischen 1980 und 2004 einen Zuwachs von ca. 94% (EAA, 2004). Gründe hierfür waren die steigende Menge von Alt- und Neuschrott im Lauf der 80er Jahre sowie technologische Entwicklungen zum Trennen und Sortieren von Schrotten mit entsprechender Qualität.

Folgende Schrottsorten werden zur Herstellung von Sekundäraluminium benötigt:

- Neuschrott (ca. 30%) aus dem Produktionsprozess von Aluminiumwerkstoffen
- Altschrott (ca. 30%) bzw. gebrauchte Produkte, die nach der Nutzungsphase in den Recyclingkreislauf zurückgeführt werden (z. B. Alautos, Verpackungsmaterial, Baumaterial, etc.)
- Späne (ca. 25%), die bei der spanenden Bearbeitung (z. B. Sägen, Fräsen, Bohren) von Aluminiumprodukten anfallen. Späne sind demnach gleichzusetzen mit Neuschrott.
- Krätzen bzw. Skimmings (ca. 15%), welche als Oxidationsprodukt beim Schmelzen, bei einer Schmelzbehandlung oder dem Vergießen von Aluminium bzw. seinen Legierungen an der Oberfläche entstehen.
- Vorschmolz (je nach Verfügbarkeit), der aus dem Zusammenschmelzen inhomogener und verunreinigte Schrotte undefinierbarer Zusammensetzung hervorgeht.

Auf Grundlage oben genannter Schrottarten umfasst das Recycling folgende Prozessschritte:

Erfassung

Neuschrott wird nahezu vollständig gesammelt. Für Altschrott bestehen in den Bereichen Bauwesen, Verpackung, Automobilbau und Elektronik wesentliche Erfassungs- und Aufbereitungssysteme. Refiner und Remelter beziehen die notwendigen Schrotte über den (Altmetall-) Handel, Entfallstellen (z. B. Gießereien, Metallwarenfabriken, Handwerksbetriebe, etc.) und Verwertungsgesellschaften wie z. B. A/U/F (2004), die über ein flächendeckendes Netz von Sammelstellen verfügen.

Aufbereitung

Die Schrottstücke werden zerkleinert und anschließend sortiert. Da die Verunreinigung der Einsatzstoffe sehr gering gehalten werden muss, spielt die Trennung von Fremdstoffen eine große Rolle. In Tabelle 5.3 sind Trennprinzipien für die Entfernung organischer Bestandteile aufgelistet während in Tabelle 5.4. Trennmethode für Nichtmetalle (Glas, Steine, Holz, Papier etc.), Leichtmetalle (Magnesium, Titan, Beryllium), Schwermetalle (Zink, Eisen, Mangan, Kupfer) und Aluminiumlegierungen untereinander dargestellt sind.

Tab. 5.3: Entfernung organischer Bestandteile (in Anlehnung an Krone, 2000)

Trennprinzip	Verfahrenstyp	Trennung von
Sortieren	Mechanisch	Organ. Anhaftungen: Farbe, Wachs, Kunststoffe, Gummi, Lacke, etc.
Pyrolyse	Thermisch: Zersetzen chemischer Verbindungen durch Erhitzen unter Sauerstoffausschluss	
Abschwelen	Thermisch: Zersetzen chemischer Verbindungen durch Erhitzen unter Sauerstoffmangel	
Waschen	Physikalisch-chemisch: Anwendung leicht alkalischer Lösungen	Flüssige Anhaftungen: Schneideöl, Kühlschmiermittel, Emulsionen, etc.
Zentrifugieren	Mechanisch: Fest-flüssig-Trennung	

Tab. 5.4: Mechanische und physikalische Trennprinzipien zum Sortieren von Aluminiumschrott (in Anlehnung an Krone, 2000)

Trennprinzip	Trennmerkmal	Verfahrensbeispiel	Trennung von*
Klaubung	Aussehen, Form, Farbe, Größe, Gewicht, Codierung	von Hand, Greifer	NM-M SM-LM LM-Aleg ALeg
Elektr. Klaubung	Emittierte Strahlung	Sortierband	
Siebklassifizierung	Stückgröße, Dichte	Siebmaschine	
Aerosortierung	Dichte	Windsichter ³³	NM-M
Hydrosortierung	Dichte	Sink-Schwimm-Verfahren ³⁴	NM-M SM-LM LM-ALeg
Magnetsortierung	Permeabilität, Suszeptibilität, elektr. Leitfähigkeit	Magnetscheider ³⁵	SM-LM
Elektrosortierung	Dielektrizitätszahl, Permissivität	Koronawalzenscheider ³⁶	NM-M

*M= Metall, NM= Nicht-Metall, LM= Leichtmetall, SM= Schwermetall, ALeg= Aluminium/-legierung

Gattieren

Vor dem Einschmelzen, werden die verschiedenen Schrottchargen entsprechend ihrer Legierungselemente sortiert. Durch computergestützte Optimierung werden anschließend bestimmte Chargen ausgewählt und gemischt. Hierdurch wird eine präzise Zusammensetzung der zu produzierenden Legierung erreicht.

Einschmelzen

Je nach Oxidgehalt, Anteil und Art der Fremdmaterialien, Schrottgeometrie, Frequenz der sich ändernden Legierungszusammensetzung und Betriebsbedingungen wird ein entsprechender Ofen zum Schmelzen der Schrotte gewählt. Zur Reduzierung von Oxidationsprozessen erfolgt das Einschmelzen bei Refinern mit Hilfe von Salzen. Diese schützen die Schmelze vor Oxidation und binden sowohl vorhandene Oxidfilme als auch sonstige Verunreinigungen.

Raffination

Beim Veredeln wird die Zusammensetzung der geschmolzenen Gusslegierung überprüft und wenn notwendig durch Spülgasbehandlung³⁷ oder Zugabe entsprechender Elemente gereinigt. Beispielsweise kann durch die Beimischung von Chlor Kalzium abgeschieden und die Schmelze entgast werden.

³³ Windsichter: Trennung durch unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten der Partikel im Luftstrom.

³⁴ Sink-Schwimm-Verfahren: Trennung der Komponenten mit Fluid, dessen Dichte zwischen den Dichten der zu trennenden Komponenten liegt.

³⁵ Magnetscheider: Entfernung von ferromagnetischen Bestandteilen durch Magnetkräfte.

³⁶ Koronawalzenscheider: Trennung durch unterschiedliches Verhalten in elektrischem Feld.

³⁷ Entfernung von Wasserstoff, Natrium etc. durch Einleiten von bspw. Stickstoff oder Argon

Qualitätskontrolle

Die chemische Zusammensetzung, der Reinheitsgrad und die Konsistenz der Guss- und Knetlegierungen sind durch strenge Richtlinien festgelegt. Die ständige Überwachung wird dokumentiert um so die Transparenz der einzelnen Produktionsschritte zu gewährleisten. Bei positivem Ergebnis wird ein Zertifikat verliehen.

Giessen/Weiterverarbeitung

Knet- und Gusslegierungen werden entweder als Flüssigmetall zur Gießerei transportiert und dort unmittelbar verarbeitet oder zu Masseln (Gusslegierungen) bzw. Pressbolzen und Walzbarren (Knetlegierungen) vergossen. Um Eigenspannungen abzubauen und eine bestimmte Metallstruktur zu erreichen werden Pressbolzen- und Walzbarren bei Bedarf wärmebehandelt.

Spezielle von Remeltern produzierte Aluminiumlegierungen (Aluminiumanteil > 95%) werden für Desoxidationszwecke verwendet. In der Stahlindustrie wird dieses Desoxidationsaluminium aufgrund der ausgeprägten Sauerstoffaffinität zur Herstellung von hochwertigen Stahlprodukten benötigt.

5.1.2.2 Recyclingraten gemäß OEA (2004)

Bei der Festlegung der Recyclingrate sind sowohl Verluste beim Sammeln, Aufbereiten und Einschmelzen sowie ein möglicher Wertverlust des Sekundärmaterials zu berücksichtigen (vgl. Abb. 5.11).

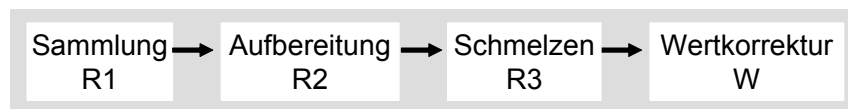


Abb. 5.11: Materialverluste und Wertverlust beim Recycling

Daraus folgt für die Recyclingrate:

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot W \quad (5-1)$$

Sammlungsrates (R1): Das Verhältnis von gesammeltem Aluminium zum verfügbaren Aluminiumschrott wird als Sammlungsrates definiert. Die Differenzmenge geht innerhalb des zu entsorgenden Restabfalls an die Deponie bzw. Verbrennungsanlage verloren und wird als Sammelverlust bezeichnet. Gemäß Classen & Althaus (2004) wird die Recyclingrate R durch die Sammlungsrates R1 maßgeblich bestimmt. Die Sammlungsrates ist von folgenden Faktoren abhängig: Form, Größe, Masse, Fügetechnik bzw. Verbund, Zugänglichkeit des Bauteils, Marktwert des Aluminiumschrotts bzw. alternativ die theoretischen Beseitigungskosten des Materials. In Gebäuden werden derzeit ca. 96% des vorhandenen Aluminiums gesammelt (Houwelingen, 2004). Für bestimmte Bauteile sind einzelne Sammelraten in Tabelle 5.5 enthalten.

Aufbereitungsrates (R2): Durch die Aufbereitungsrates wird festgelegt, wie viel des von der Baustelle angelieferten Aluminiumschrotts in aufbereiteter Form zur nächsten Verarbeitungsstufe weitergeleitet wird. Ist keine Aufbereitung erforderlich, so sind lediglich Umladeverluste (ca. 0,5% nach EMPA, 2004) und Zerkleinerungsverluste (ca. 1% nach EMPA, 2004) zu berücksichtigen. Dies ist der Fall bei größeren Bauteilen, wie z. B. Fenster und Fassaden, die sortenrein zurückgewonnen und sofort umgeschmolzen werden können.

Bei erforderlicher Behandlung bzw. Trennung der Aluminiumschrotte kommt es insgesamt zu Materialverlusten von 2 bis 10% (OEA, 2004). Beispielsweise kann Aluminium beim Zertrennen von Verbundwerkstoffen an anderen Materialien hängen bleiben. Ebenso kommt es beim Schwimm-Sink-Verfahren und bei Anwendung des Magnetabscheiders zu Materialverlusten. Vorschläge für Aufbereitungsraten in Abhängigkeit der Bauteileigenschaften sind in Tabelle 5.5 zu finden.

Schmelzrate (R₃): Die Materialverluste beim Schmelzvorgang werden durch das Verhältnis des in der Schmelzhütte angelieferten Aluminiums zum fertigen Halbzeug bestimmt. Maßgebend hierbei sind Metallverluste durch Oxidation (Abbrand). Diese sind abhängig vom eingesetzten Ofen. So kann sauberes Material beispielsweise in einem Induktionsofen mit Schmelzverlusten lediglich zwischen 0,5 und 1% (OEA, 2004) verarbeitet werden. Verunreinigtes Material bzw. hochlegierter oder feinteilig beschichteter Schrott muss in einem Flammofen mit geringer Effizienz und folglich größeren Metallverlusten geschmolzen werden. In Tabelle 5.5 sind verschiedene Schmelzraten je nach Ausgangsmaterial aufgelistet.

Wertkorrektur (W): Zwar unterliegt Aluminium beim Recycling keinem Down-Grading aber (hoch-)legierte Schrotte sind nach dem Einschmelzen nicht universell einsetzbar. Wegen Reinheitsanforderungen kann beispielsweise mancher Knetlegierungsschrott nur bedingt für die Herstellung von neuen Knetlegierungsprodukten verwendet werden, bzw. erfordert die Zugabe von Primäraluminium. In diesen Fällen ist die Qualität des Sekundäraluminiums gegenüber dem Primäraluminium zu reduzieren. Die Wertminderung beträgt in der Regel 10%, bzw. $W = 90\%$, und basiert auf dem Preisverhältnis von Sekundäraluminium zu Primäraluminium an der London Metal Exchange Börse (Werner, 2002; Werner, 2003). Für Aluminiumanwendungen im Bauwesen ist diese Wertkorrektur allerdings häufig zu konservativ. Für Bauteile werden letztlich nur bestimmte Legierungen verwendet, die sortenrein und oftmals in großen Mengen in den Aluminiumkreislauf zurückgeführt werden können. In diesem Fall ist das Sekundäraluminium dem ursprünglichen Material gleichwertig und bedarf keiner Wertminderung, d. h. $W = 100\%$.

Die in der Literatur angegebenen Recyclingraten (R) weichen im Allgemeinen stark voneinander ab und sollten vor Verwendung immer hinterfragt werden. Für das Bauwesen ergibt sich in Deutschland basierend auf A/U/F (2004), Buxmann (2004a) und GDA (2005b) eine durchschnittliche Recyclingquote (R) von 85%.

Tab. 5.5: Kriterien zur Bestimmung von Sammlungsrate, Aufbereitungsrate, Schmelzrate und Wertverlust (in Anlehnung an EMPA, 2004)

Recyclingprozess	Voraussetzung, Beispiel	Ausbeute
Sammlung	> 5 kg pro m ² Bauteil z. B. Aluminiumträger, -fenster und -fassadenelemente	R1= 98%
	> 0,5 kg pro m ² Bauteil z. B. Türklinken, dünne Aluminiumbleche (Dicke 1 mm)	R1= 90%
	< 0,5 kg pro m ² Bauteil, einfach trennbar z. B. mechanische Verbindungen mit Nägeln und Schrauben	R1= 50%
	< 0,5 kg pro m ² Bauteil, schwer trennbar z. B. Klebverbindungen	R1= 0%
	< 0,2 kg Kleinteile z. B. Folien und Drähte	R1= 0%
Aufbereitung	Sauberes und reines Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen z. B. blanke und eloxierte Fassadenbauteile	R2= 98,5%
	Legierungen in Verbindung mit anderen Metallen z. B. Abtrennung einer Zinkbeschichtung durch Schwimm-Sink-Verfahren oder Magnetabscheider	R2= 95,75%
	Legierungen im Verbund mit nicht metallischen Stoffen z. B. Trennung von Pulverbeschichtungen bzw. Verbundmaterialien durch Pyrolyse oder Windsichter	R2= 93,25%
Schmelzen	Knetlegierungen z. B. blanke und eloxierte Aluminiumprofile	R3= 98%
	Gusslegierungen z. B. unbeschichtete Knotenbleche aus Aluminiumformguss	R3= 96%
	Starke Vermischung mit organischen oder mineralischen Stoffen z. B. pulverbeschichtete Aluminiumteile	R3= 92%
Wertverlust	Ersatz von ursprünglichem Material (Knet- bzw. Gusslegierung) möglich z. B. Fassadenbleche und -profile	W = 100%
	Kein Ersatz von ursprünglichem Material (Knet- bzw. Gusslegierung) möglich z. B. Zink- und Messingbeschläge bzw. Schrott mit hohem Eisenanteil	W= 90%

5.1.2.3 Recyclingmenge und -anteil in Aluminiumprodukten

Die Recyclingmenge ist von der Marktsituation, Lebensdauer und Recyclingrate abhängig. Der Einsatz von Aluminium nahm über die letzten Jahrzehnte hinweg kontinuierlich zu. Aufgrund der langen Lebensdauern kann allerdings der derzeitige Bedarf an Aluminium durch die Rücklaufmengen von Sekundäraluminium nicht gedeckt werden. Es ist folglich mehr Aluminiumschrott gebunden als über den Schrottmarkt zur Befriedigung der aktuellen Nachfrage verfügbar ist. Zusätzlich erschwert wird die Schrottversorgung durch aufstrebende Volkswirtschaften. Dabei ist besonders China ein weltweit starker Abnehmer von Aluminiumschrott.

Ein Ausweg aus dieser Situation ist die Erhöhung der Recyclingraten. Dies kann durch den Zusammenschluss von Systemanbietern, wie zum Beispiel der Initiative für „Aluminium und Umwelt im Fenster- und Fassadenbau“ (A/U/F), erreicht werden. A/U/F hat sich zum Ziel gesetzt, alte Aluminiumfenster, -türen und -fassadenprofile wirtschaftlich wieder zu verwerten und den Anteil von umweltfreundlichem Sekundäraluminium im Baubereich zu erhöhen. Die derzeit 16 Gesellschafter stellen in Deutschland einen Marktanteil von ca. 90% dar und erreichen Recyclingquoten deutlich über dem Durchschnittswert von 85% im Bauwesen (A/U/F, 2004). Der Energieaufwand für das Recycling verunreinigter Schrotte steigt allerdings mit hohen Recyclingraten stark an und ist nicht mehr wirtschaftlich. Das Anstreben einer Recyclingquote von 100% macht somit wenig Sinn (GDA, 2002b) (vgl. Abb. 5.12).

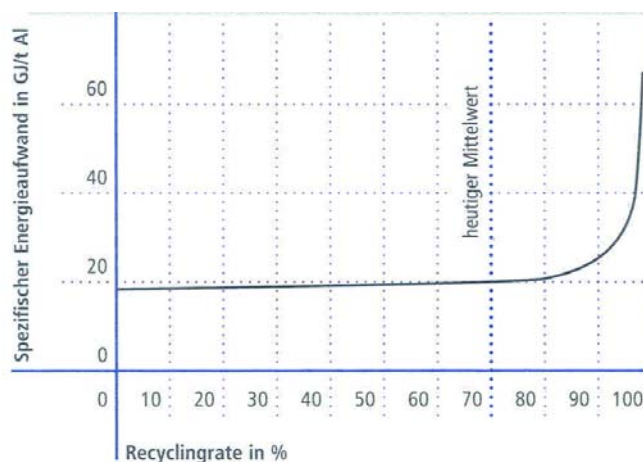


Abb. 5.12: Abhängigkeit des Energieaufwandes von der Recyclingrate (Krone, 2000)

Auch die häufige Forderung nach einer Angabe des Sekundäranteils von Aluminiumprodukten ist kaum zu erfüllen. Zum einen ist es in der Regel nicht möglich, den logistischen Weg eines bestimmten Schrottes beim Recyclingvorgang über die Vielzahl der Prozessstufen in detaillierter Weise nachzuvollziehen (vgl. 5.1.2). Zum anderen würde die Erhöhung des Sekundäranteils, z. B. im Bauwesen, zu einem Schrottmangel in einem anderen Bereich, z. B. Automobilbau, führen. Die Situation des Gesamtaluminiummarkts würde sich somit nicht verändern (Glimm, 2003d).

5.1.2.4 Abbildung des Recyclings in Ökobilanzen

Eine Nichtberücksichtigung von Recycling ist nach DIN EN ISO 14040 nur erlaubt, wenn nichts bzw. nur vernachlässigbare Mengen an Aluminiumschrott wiederverwertet werden oder das Sekundärmaterial wertlos ist.

Bilanzierungsmethoden, die Recycling nur beim geschlossenen Kreislauf, d. h. bei gleichen Eigenschaften von Primär- und Sekundäraluminium, berücksichtigen sind somit nach DIN EN ISO 14040 für Aluminium unzulässig. Eine weitere, oftmals verwendete, Methode zur Abbildung von Recycling vergibt je nach Menge des im Aluminiumprodukt enthaltenen Sekundäraluminiums Gutschriften auf der Input-Seite (Buxmann, 2004b). Da allerdings eine genaue Angabe des Sekundäranteils in bestimmten Produkten nicht möglich ist (siehe 5.1.2.3) wird hier oftmals ein Durchschnittsmix angenommen. Für europäische Verhältnisse entspricht dies beispielsweise 68% Primäraluminium und 32% Sekundäraluminium (EMPA, 2004). Dieser Ansatz ist jedoch für Aluminiumteile im Bauwesen zu konservativ. Oben genannte Methoden sind folglich für Aluminiumbauteile nicht geeignet.

Recycling sollte daher innerhalb eines geschlossenen Aluminiumkreislaufs mit der **Substitutionsmethode** behandelt werden (siehe Beispiel in Abb. 5.13). Besteht hingegen ein offener Materialkreislauf, d. h. die Eigenschaften des Ausgangsmaterials werden durch das Recycling verändert, z. B. durch metallische Verunreinigungen oder durch absichtliches Aufgliedern mit chemischen Elementen, so ist die **wertbereinigte Substitutionsmethode** (siehe Beispiel in Abb. 5.14) anzuwenden.

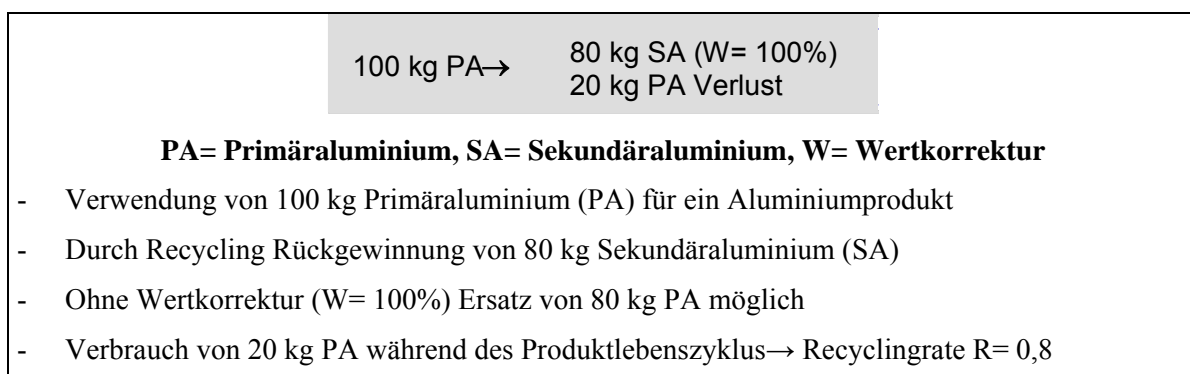


Abb. 5.13: Substitutionsmethode
(Buxmann, 2004b; EMPA, 2004; EAA, 2000b; 2005a)

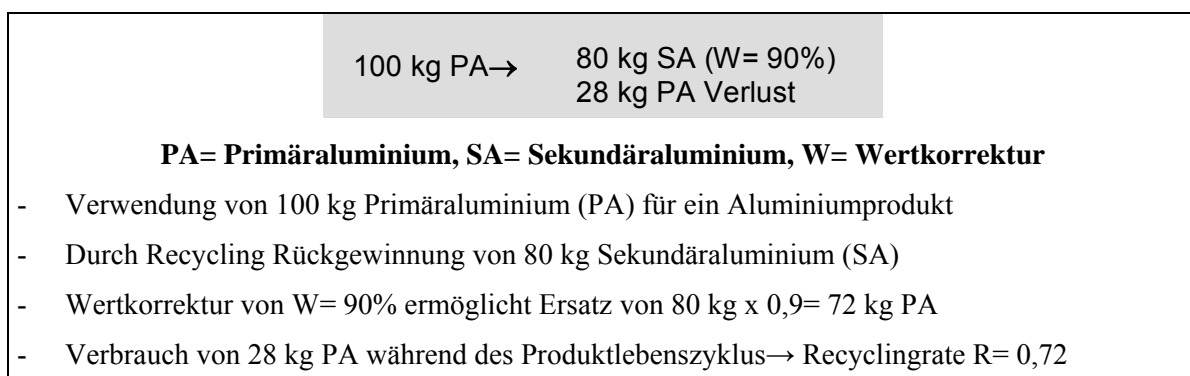


Abb. 5.14: Wertbereinigte Substitutionsmethode
(Buxmann, 2004b; EMPA, 2004; EAA, 2000b; 2005a)

5.1.2.5 Energieverbrauch beim Recycling

Im Gegensatz zur energieintensiven Aluminiumherstellung benötigt man für das erneute Einschmelzen beim Recycling 95% weniger Energie. Der Stromeinsatz ist dabei mit ca. 0,47 MWh/t_{Al} um 97% geringer als bei der Ersterstellung (Krone, 2000).

5.1.2.6 Umweltwirkungen des Recyclings von Aluminium

Durch das Recycling von Aluminium werden Ressourcen geschont, Emissionen und Abfälle vermindert sowie Energie eingespart. Zudem werden Eingriffe in die Natur durch Produktion oder Deponien deutlich reduziert. Der Trend hin zur Sekundärindustrie wird daher als umweltentlastend bewertet (Schucht, 1999).

Reststoffe

Bei der Herstellung von Sekundäraluminium fallen pro Tonne ca. 50 kg Abfall zur Entsorgung an³⁸. Dies ist zum einen der Ofenausbruch (ca. 2 kg/t_{SA}) der Aluminiumschmelzöfen und zum anderen der Filterstaub (ca. 10- 40 kg/t_{SA}) (Winter, 2002). Damit entspricht die Abfallmenge lediglich 4% der Reststoffe, welche während der Produktion zu entsorgen sind.

Emissionen

Bei der Produktion von 1 Tonne Sekundäraluminium entstehen im Gegensatz zu Primäraluminium lediglich 809,9 kg atmosphärische Emissionen (EAA, 2000a). Dabei werden vorwiegend Kohlendioxid (801 kg/t_{SA}), Schwefeldioxid (2,0 kg/t_{SA}), Stickstoff (2,5 kg/t_{SA}), Stickoxide (1,1 kg/t_{SA}) sowie Staub (0,29 kg/t_{SA}) hervorgerufen. Damit ergeben sich ca. 93% weniger atmosphärische Emissionen als bei der Primäraluminiumherstellung. Nach Marks (2002) werden durch das Aluminiumrecycling weltweit bis zu 84 Millionen Treibhausgase pro Jahr vermieden.

Beim Recycling von Schrott mit Anhaftungen von Öl, Plastik oder Chlor kann es allerdings zur Produktion von Dioxinen (PCDD/PCDF) kommen. Diese werden entweder durch unvollständige Verbrennung oder durch neue Verbindungen hervorgerufen. Die Schrotte sollten daher vor dem Umschmelzen unbedingt von oben genannten Substanzen bzw. Farbanstrichen gründlich gereinigt werden (Schucht, 1999).

5.1.3 Entwicklungen und Tendenzen der (deutschen) Aluminiumindustrie

Der Aluminiumstoffstrom ist stark international geprägt. Aluminiumhütten werden mittlerweile vorzugsweise in Ländern mit hoher Energieverfügbarkeit gebaut. Besonders Kanada, Norwegen und Island sind hierfür durch die Verfügbarkeit von billiger Wasserkraft prädestiniert. Doch auch Australien und Südafrika sind günstige Standorte aufgrund der dort vorrätigen Braunkohle. Die Verarbeitung und die Abnahme von Rohaluminium und fertigen Erzeugnissen sind jedoch nicht an diese Standorte gebunden und entsprechend weltweit ausgerichtet.

Abbildung 5.15 gibt einen Überblick über die Mengen und regionale Verteilung von Bauxitreserven, Produktion und Nachfrage von Primär- und Sekundäraluminium.

³⁸ Auskunft von Frau Dr. P. Kistler, Manager EHS FIRST (Alcan Inc.), am 2.05.2005 in Montreal.

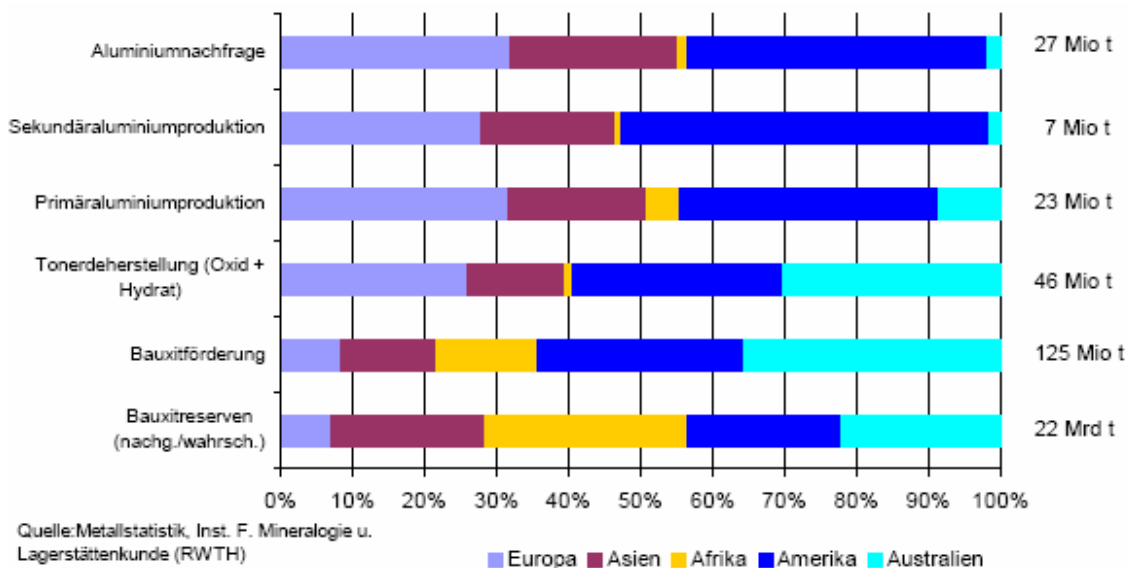


Abb. 5.15: Weltweite Verflechtung des Aluminiumstoffstroms im Jahr 1998 (SFB 525, 2002)

Während die Aluminiumhütten bereits seit Jahren an den Kapazitätsgrenzen arbeiten, steigt der Aluminiumverbrauch weltweit kontinuierlich an. Grund hierfür ist nicht zuletzt das Wirtschaftswachstum in China. Allein hier hat sich innerhalb der letzten vier Jahre der Aluminiumverbrauch vervierfacht (Kramer, 2005).

Deutschland belegte bisher bei der Erzeugung von Primäraluminium Platz zehn auf dem Weltmarkt und war EU-weit sogar führend. Ob diese Positionen zu halten sind, ist jedoch trotz wachsendem Aluminiumbedarf fraglich. Die verbleibenden Aluminiumhütten nähern sich trotz effizienter Produktion auf hohem technischem Niveau stetig dem Bankrott (vgl. Tab. 5.6). Dies ist auf das begrenzte Stromangebot, die steigenden Energiepreise, die hohen Lohnkosten, die staatlichen Belastungen (z. B. Ökosteuer, Energiesteuer) und die zunehmenden Umweltgesetze (z. B. Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG), Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) etc.) zurückzuführen.

Tab. 5.6: Standorte und Kapazitäten der deutschen Primäraluminiumerzeugung

Aluminiumhütte	Standort	Kapazität	Aktueller Stand
Hydro	Norf	221000 t	Produktion
Hydro	Stade	70000 t	Schließung Ende 2006
Hamburger Aluminium-Werk GmbH	Hamburg	130000 t	Schließung Ende 2005
Aluminium Trimet	Essen	154000 t	Produktion
Corus Aluminium GmbH	Voerde	89000 t	Produktion

Sowohl Umweltgesetze als auch Öko- und Energiesteuern führen somit zur Produktionsverlagerung in Länder mit großen Energieressourcen. Umweltlasten werden dadurch zwar in Deutschland reduziert doch eine Verbesserung der weltweiten ökologischen Bilanz ist zweifelhaft, da sich die Frage stellt, mit welchem Know-How, mit welcher technischen Ausstattung und insbesondere mit welcher Stromversorgung der deutsche Produktionsausfall kompensiert wird. Anders wäre die Situation bei Gesetzen und Besteuerung auf internationaler bzw. OECD-weiter Basis.

5.2 Sachbilanzen für Aluminiumbauteilen

Die in 5.1 vorgestellten Stoffströme sind in Datenbanken und Software-Tools zum Teil bereits abgebildet (vgl. hierzu Tab 2.14 in Kapitel 2). Folglich kann bzw. sollte beim Erstellen einer Ökobilanz auf fertige Datensätze zurückgegriffen werden.

5.2.1 Häufig verwendete Datenbanken in Deutschland – Inhalt und Unterschiede

EAA: Seit 1996 stellt die EAA im so genannten „Environmental Profile Report“ (EAA, 2000a) Sachbilanzdaten für ökologische Bewertungen zur Verfügung. Dabei werden umfangreiche Werte für die Herstellung von Primäraluminium, Aluminiumhalbzeuge und Sekundäraluminium gegeben. Die Daten wurden in Jahren 1995 bis 1998 in direkter Zusammenarbeit mit europäischen Unternehmen erhoben und können nach ISO 14040 ff. für die Ökobilanzierung angewandt werden. Zudem werden sie häufig als Grundlage für die Bilanzierung von Aluminium bei neutralen, kommerziellen Datenbanken wie z. B. EcoInvent und GaBi verwendet. Ein erstes Update der Umweltdaten (EAA, 2005b; EAA, 2005c) ist seit 2005 auf Anfrage gratis erhältlich. Die nächste umfassende Industriebefragung ist für 2006 geplant.

EcoInvent: Im Jahre 1998 begann das Schweizer Zentrum für Ökoinventare unter der Leitung der EMPA die bis dato in der Schweiz vorhandenen Sachbilanzdaten zusammenzuführen. Ziel des Projektes EcoInvent 2000 (EcoInvent, 2003) war die Erstellung harmonisierter Ökobilanzdaten hoher Qualität u. a. für die Bereiche Energie, Transport, Entsorgung und Bauwesen. Hierdurch sollten sowohl schweizerische als auch westeuropäische Verhältnisse abgebildet werden. Die kommerzielle Datenbank ist seit 2003 mit entsprechender Lizenz via Internet zugänglich. Bereits im Jahr 2005 wurden die Daten mit der Version 1.2 das zweite Mal aktualisiert.

Für Aluminium sind in der EcoInvent-Datenbank ausführliche Daten von der Herstellung über Beschichtungsprozesse, Fügeverfahren bis hin zum Recyclingvorgang enthalten. Die EAA liefert dabei einen großen Teil des Dateninputs.

GEMIS: Das „Globale Emissions-Modell Integrierter Systeme“ wurde in den Jahren 1987 bis 1989 vom Öko-Institut in Freiburg und der Gesamtschule Kassel im Auftrag der Hessischen Landesregierung entwickelt. Die Software (GEMIS, 2004) umfasst eine Datenbank mit Bilanzierungs- und Analysemöglichkeiten sowohl von Produkten als auch von Energie-, Stoff- und Transportprozessen während eines definierten Lebenszyklus. Mittlerweile enthält die Datenbasis verstärkt Informationen zu ganzen Prozessketten. Die schon vorhandenen Daten werden in regelmäßigen Abständen verbessert und sind derzeit als Version 4.2 des Jahres 2004 im Internet frei verfügbar.

Im Hinblick auf Aluminium ist die Prozesskette für die Herstellung und das Recycling in der Datenbank enthalten.

GaBi: Die Software zur „ganzheitlichen Bilanzierung“ (GaBi) mit integrierter Datenbank wurde Anfang der 90er vom IKP Stuttgart sowie der PE Europe GmbH realisiert (GaBi, 2004, Eyerer & Reinhardt, 2000). GaBi dient als Werkzeug zur Erstellung, Analyse und Bewertung von Lebenszyklusbilanzen. Die Software kann mit Zusatzmodulen, u. a. in Verbindung mit der Datenbank EcoInvent, erworben werden. Die Daten werden dabei ständig aktualisiert. Die derzeit aktuelle Version GaBi 4 kam 2004 auf den Markt.

Im Zusatzmodul IV sind ausführliche Daten für den Aluminiumstoffstrom enthalten. Dabei ist die EAA maßgebende Bezugsquelle.

UMBERTO: Das Programm UMBERTO wurde 1994 vom Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH (ifu) und dem Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) aufgebaut und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt (Umberto, 2003). Mit der kommerziellen Software können Stoff-, Energie- und Kostenströme sowohl auf Betriebs-, Produkt-, als auch Prozessebene berechnet und dargestellt werden. Entsprechende Prozessdaten sind in den extra erhältlichen Modulbibliotheken enthalten.

In der aktuellen „Umberto 5 Bibliothek“ werden sowohl Primär- als auch Sekundäraluminium behandelt.

Obwohl die Datenbanken ähnliche Prozesse enthalten und teilweise auf der gleichen Datengrundlage basieren (EcoInvent und GaBi verwenden beispielsweise beide als Bezugsquelle die EAA) kommt es bei den Ergebnissen oftmals zu signifikanten Abweichungen. In Tabelle 5.7 und 5.8 werden diese Unterschiede beispielhaft anhand der Wirkkategorien Primärenergie und Treibhauspotenzial sowie mit Hilfe des Ecoindikators (vgl. Kapitel 2.4.2.5.2) aufgezeigt.

Tab. 5.7: Vergleich von Wirkkategorien für die Herstellung von 1 kg Primäraluminium nach EcoInvent und GaBi (vgl. Fußnote Nr. 27)

	EcoInvent/GaBi
Primärenergie	1,161
Treibhauspotenzial	1,00
Ecoindikator 95	6,029
Ecoindikator 99	2,354

Tab. 5.8: Vergleich des Treibhauspotenzials für die Herstellung von 1 m² Aluminiumblech nach Umberto, GEMIS und GaBi (Hillenbrand et al., 2004)

	Absolute Werte [kg CO₂-Äq]			Relative Werte [%]		
	Umberto	GEMIS	GaBi	Umberto	GEMIS	GaBi
Aluminium	45,4	39,0	40,2	113	97	100

Die in obigen Tabellen angedeuteten Unterschiede verdeutlichen die Notwendigkeit, die Datengrundlage bei ökologischen Bewertungen sorgfältig zu prüfen.

Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt ein ausführlicher Vergleich von Sachbilanzdaten im Hinblick auf Aluminiumbauteile durchgeführt. Zu diesem Zweck werden die Daten der EAA (EAA, 2000a) dem Inhalt zweier von der Aluminiumindustrie unabhängigen Datenbanken gegenübergestellt. Dies ist zum einen die kommerzielle Software EcoInvent 1.1 und zum anderen das im Internet frei verfügbare Programm GEMIS 4.2.

5.2.2 Vergleich der Datenbanken EAA, EcoInvent 1.1 und GEMIS 4.2

5.2.2.1 Quantität und Qualität der Prozesse

Tabelle 5.9 enthält eine Übersicht über die in den Datenbanken jeweils enthaltenen Prozesse zur Beschreibung des Lebenszyklus eines Aluminiumbauteils. Diese beruhen sowohl auf primären, sekundären als auch geschätzten Daten.

Tab. 5.9: Prozesse mit jeweiliger Datenqualität in EAA, EcoInvent und GEMIS

Produkte und Prozesse	EAA	EcoInvent	GEMIS
Herstellung Primäraluminium			
1. Rohstoff - Aluminiumoxid	■	■	■/□
2. Elektrolyse - Primäraluminium	□	□	■
Fertigung Strangpressprofile	□	□	---
Fertigung Bleche	□	□	---
Eloxieren	---	■	---
Pulverbeschichten	---	■	---
Lichtbogenschweißen	---	□	---
Prozessschrottreycling	□	□	---
Herstellung Sekundäraluminium			
1. Transport von Altschrott	---	□	□
2. Aufbereitung von Altschrott	□	□	---
3. Umschmelzen von Altschrott	□	□	■
Produktionsinfrastruktur	---	■	---

□ Primäre Daten (Ergebnisse von direkten Erhebungen aus der Industrie)

■ Sekundäre Daten (Literatur oder abgeleitet aus anderen Datenquellen)

□ Schätzungen

Die **EAA** stellt vorwiegend Primärdaten aus der Industrie zur Verfügung. Folglich beinhalten die Datensätze den aktuellen Stand der Technik und können für Europa als repräsentativ betrachtet werden. Prozesse, in denen die Aluminiumindustrie nicht direkt involviert ist, zum Beispiel beim Rohstoffabbau oder bei der Herstellung von Hilfsstoffen, sind durch sekundäre Daten aus der Literatur abgedeckt. Die gesamte Datensammlung bzw. -zusammenstellung wurde durch einen externen LCA-Experten³⁹ auf Plausibilität überprüft.

EcoInvent greift auf die Daten von der EAA zurück und ergänzt diese sowohl durch Werte aus der Literatur als auch durch eigene Modelle und Schätzungen. Letztere basieren zum Teil wiederum auf primären Daten. Im Vergleich zu den anderen Datenbanken ist in EcoInvent die größte Anzahl an Prozessen enthalten. Die Qualität der Datensätze ist dabei ausführlich dokumentiert. Für jeden Einheitsprozess sind der Zeitraum der Datenerhebung, die Quelle und die Standardabweichung erfasst. Darüber hinaus sind Unsicherheitsfaktoren im Hinblick Zuverlässigkeit, Vollständigkeit, Probengröße sowie zeitliche, geographische und technologische Korrelation dargestellt. Wenn vorhanden, ist zusätzlich die Repräsentativität der jeweiligen Daten gegeben.

³⁹ Dr. Ian Boustead, 2 Black Cottages, West Grinstead, Horsham West Sussex RH13 7BD, UK.

GEMIS beinhaltet hauptsächlich sekundäre Daten aus der Literatur und aus Schätzungen. Für alle Datensätze sind dabei die jeweiligen Referenzen gegeben. Die Datenqualität wird je nach Herkunft in Form von sehr gut, gut, mittel, einfache Schätzung oder vorläufig bewertet. Um ganze Prozessketten zu beurteilen, ist jeder Subprozess einzeln aufzurufen und zu überprüfen. Im Vergleich zu EAA und EcoInvent sind die GEMIS Datensätze daher schwieriger zu handhaben und weisen - zumindest bei den Aluminiumdaten - geringere Qualität auf.

5.2.2.2 Bezugsraum

Bei **EAA** und **EcoInvent** wird das in Europa verwendete Aluminium bilanziert. **GEMIS** bezieht sich hingegen auf Aluminium, welches in Deutschland im Umlauf ist. Für die Rohstoffgewinnung und die Produktion von Aluminiumoxid verwenden jedoch alle Datenbanken einen globalen Bezugsraum.

5.2.2.3 Charakteristik der Sachbilanzdaten

Die Sachbilanzdaten der **EAA** bestehen aus Material- und Energieinputs der Produktionsprozesse, aus entstehenden Nebenprodukten sowie aus Emissionen in Luft, Wasser und Boden (vgl. Abb. 2.4 in Kapitel 2).

In **EcoInvent** umfassen Sachbilanzdaten ebenfalls sämtliche Inputs und Outputs aller enthaltenen Prozesse. Im Gegensatz zur EAA und zu GEMIS berücksichtigt EcoInvent die Produktionsinfrastruktur. Dabei wird der Aufwand für notwendige Gebäude, Maschinen, Rekultivierungsmaßnahmen, Recycling, Wiederverwertung etc. abgebildet. Wenn hierzu keine direkten Daten vorhanden sind, werden oftmals die Verhältnisse einzelner Länder oder Unternehmen angewandt. Des Weiteren enthält EcoInvent als einzige der drei Datenbanken vorberechnete Werte für die Wirkungsabschätzung nach gängigen Methoden wie z. B. CML 2001, Ecoindikator 99, UBP'97 und KEA (vgl. Kapitel 2.4.2.5.3).

GEMIS stellt analog zu EcoInvent ebenfalls Inputs und Outputs für Prozesse bzw. Prozessketten zur Verfügung. Im Gegensatz zu den anderen Datenbanken arbeitet GEMIS mit deutlich weniger Emissionsarten. Des Weiteren verfügt GEMIS über sog. „Globalschalter“ – dies sind integrierte Möglichkeiten zur Verrechnung von Materialvorleistungen, Transporten, Gutschriften für Nebenprodukte (z. B. Biomasse), Variation der Nutzungsgrade von Ressourcenentnahmen sowie verschiedene Methoden der Entsorgung. Dadurch bietet GEMIS die Möglichkeit eigene Szenarien zu erstellen, bzw. Vorgänge individuell zu definieren. Im Folgenden wird der vom Programm vorgegebene Standardmodus untersucht.

5.2.2.4 Transport

Die Handhabung von Transportleistungen erfolgt in den Datenbanken unterschiedlich. Die Daten der **EAA** basieren auf Entfernungen und Transportmitteln, die durch eigene Datenerhebungen ermittelt wurden. **EcoInvent** übernimmt zum Teil die Daten der EAA, kombiniert diese dann aber mit so genannten Standardannahmen (Frischknecht & Jungbluth, 2004a), welche aus den aktuellen Marktverhältnissen abgeleitet werden. In **GEMIS** werden im Standardmodus alle relevanten vorgegebenen mobilen Gütertransporte berücksichtigt. Eigene Szenarien für den Transport können zusätzlich definiert werden.

5.2.2.5 Energiemodell

Die **EAA** berechnet den Primärenergieaufwand für die Elektrolyse auf Grundlage des eigens hierfür entwickelten Energiemodells (vgl. 5.1.1.3.6) und der für den Bezugsraum charakteristischen Kraftwerkstechnologien. Für alle anderen Vorgänge als die Elektrolyse wird das UCTPE⁴⁰ Energiemodell (vgl. 5.1.1.3.2) von 1994 basierend auf SAEFL (1998) als Berechnungsgrundlage verwendet.

In **EcoInvent** sind die von der EAA zu Verfügung gestellten Modelle für die Verteilung der Energieträger bei der Hüttenstromerzeugung integriert. Dabei werden jedoch abweichend zur EAA die jeweiligen Kraftwerkstechnologien mit eigenen Daten aus den durchschnittlichen Kraftwerken des UCTE-Verbundnetzes angenähert. Ausnahmen bildet zum einen die Wasserkraft, für die wegen fehlenden europäischen Durchschnitts der Datensatz für Frankreich verwendet wird. Weitere Ausnahme ist das Heizöl, für welches der Datensatz des italienischen ölthermischen Kraftwerkes eingesetzt wird. Für den Abbau von Bauxit werden die von der EAA abweichenden Daten von Mori & Adelhardt (1998) verwendet.

In **GEMIS** wird der Strombedarf der Elektrolyse aus deutschem Grundlaststrom (vgl. 5.1.1.3.5) gedeckt. Für Prozesse außerhalb von Deutschland (z. B. Karibik und Australien) wird Strom sowohl aus Dieselmotorkraftwerken als auch aus dem jeweiligen nationalen Netzstrommix verwendet. Die Daten hierfür sind geschätzt.

5.2.2.6 Quantitative Unterschiede bei ausgewählten Wirkkategorien

Um die Unterschiede in den drei Datenbanken quantitativ darzustellen, werden im Folgenden für die Herstellung von Primäraluminium, Strangpressprofilen und Sekundäraluminium jeweils die in Kapitel 2.4.2.6 ausgewählten Wirkkategorien GWP₁₀₀, NP, AP und TOPP sowie die verschiedenen Kategorien des KEA berechnet. Die Berechnung der jeweiligen Wirkkategorie erfolgt dabei für die Daten der **EAA** und **GEMIS** nach Ekkerlein (2004). Bei **EcoInvent** wird auf die enthaltenen Werte zurückgegriffen. Diese berücksichtigen deutlich mehr Emissionswerte. Die jeweiligen Definitionen sind in Tabelle 5.10 dargestellt.

Tab. 5.10: Zusammensetzung der berechneten Wirkkategorien

	EAA/ GEMIS (Ekkerlein, 2004)	EcoInvent*
GWP100	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , CF ₄ , C ₂ F ₆	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , CF ₄ , C ₂ F ₆ + Halon-1301, HFC-23, HFC-134a
NP	NO _x , NH ₃ , CSB, N	NO _x , NH ₃ , CSB, N + NO ₃ ⁻ , (PO ₄) ³⁻ , P
AP	SO ₂ , NO _x , NH ₃ , HCl, HF, H ₂ S	SO ₂ , NO _x , NH ₃ , HCl, HF, H ₂ S + H ₃ PO ₄ , SO ₃
TOPP	NMVOC**, NO _x , CO, CH ₄	NMVOC, NO _x , CO, CH ₄

* für EcoInvent werden lediglich die Hauptemissionen aufgelistet. Die vollständige Definition ist in Althaus (2005) enthalten.

**Die EAA definiert keine NMVOC Emissionen.

Die Kategorien des KEA werden innerhalb jeder Datenbank explizit definiert. Dabei kommt es zu deutlichen Abweichungen bei den definierten Energiequellen (vgl. Tab. 5.11).

⁴⁰ Vorgängerorganisation der UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) vgl. hierzu 5.1.1.3.2.

Tab. 5.11: Definitionen der KEA-Kategorien gemäß EAA, EcoInvent und GEMIS

	EAA	EcoInvent	GEMIS
KEA_e*	Wasser	Wasser, Sonne, Wind, Erdwärme, Biomasse	Wasser, Wind, Erdwärme, Biomasse
KEA_{ne}	Braun-, Steinkohle, Erdgas, Erdöl, Uran	Braun-, Steinkohle, Erdgas, Erdöl, Uran, Torf ⁴¹	Braun-, Steinkohle, Erdgas, Erdöl, Uran
KEA_a	-----	-----	Müll, Sekundärrohstoffe
KEA_{ges}	KEA _e + KEA _{ne}	KEA _e + KEA _{ne}	KEA _e + KEA _{ne} + KEA _a

*Indizes: e= erneuerbar, ne= nicht erneuerbar, a= andere

Zur Berechnung der einzelnen KEA-Werte werden die Energieinhalte der verbrauchten Energieträger aufsummiert. Der Energieinhalt der fossilen Brennstoffe kann dabei mit dem Heizwert oder dem Brennwert dargestellt werden. Die beiden Werte unterscheiden sich lediglich im Hinblick auf die Verdampfungsenthalpie des enthaltenen Wasseranteils. Diese wird beim Brennwert berücksichtigt, jedoch beim Heizwert außer Acht gelassen.

Die laut **EAA** und **EcoInvent** definieren Brennwerte zur Berechnung des KEA werden im Folgenden gegenübergestellt (vgl. Tab. 5.12).

Tab. 5.12: Kennwerte zur Berechnung des (KEA) fossiler Energieträger

Energieträger	Brennwerte	
	EcoInvent (Frischknecht & Jungbluth, 2004b)	EAA⁴²
Braunkohle	9,9 MJ/ kg	10,0 MJ/ kg
Steinkohle	19,1 MJ/ kg	29,3 MJ/ kg
Erdgas (Kohleabbau)	39,8 MJ/Nm ^{3*}	-----
Erdgas (natürlich)	40,3 MJ/Nm ³	46,0 MJ/Nm ³
Erdöl	45,8 MJ/kg	42,4 MJ/ kg
Torf	9,9	-----

* Nm³ = Gas im Normalzustand

In **GEMIS** wird der KEA auf Grundlage der Heizwerte ermittelt. Diese werden für feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe mit Hilfe von vorgegebenen Algorithmen berechnet (GEMIS, 2004).

⁴¹ Torf wird dabei als „nicht erneuerbar“ bilanziert, da innerhalb absehbarer Zeit keine Erneuerung gegeben ist.

⁴² Aussage per Telefon von Dr. Leroy Metallurgist (European Aluminium Association) am 14.09.2004.

5.2.2.6.1 Produktion von Primäraluminium

Die Herstellung von Primäraluminium wird von allen drei Datenbanken erfasst. Die Prozesskette umfasst dabei die Rohstoffgewinnung, die Produktion von Aluminiumoxid, die Elektrolyse, die Hüttengießerei und sämtliche Transportvorgänge.

Da die Datensätze bei der **EAA** für den Bauxitabbau und der Tonerde auf Literaturangaben beruhen, sind sie für den Anwender nicht unmittelbar nachvollziehbar. Die anschließende Elektrolyse wird zu 61% in Europa, zu 19% in Russland sowie zu 20% in der Westlichen Welt (ohne Europa) modelliert. Hierbei wird zudem die jeweils eingesetzte Technologie berücksichtigt. Der Prozess wird bei der EAA mit folgenden Transportaufwendungen verknüpft (vgl. Tab. 5.13).

Tab. 5.13: Transportaufwendungen pro Tonne Primäraluminium in der EAA-Datenbank

	Bauxit	Tonerde
Überseefrachtschiff	7106 km	3737 km
Binnenschiff	2 km	204 km
Straße	334 km	15 km
Zug	11 km	42 km

EcoInvent verwendet für Primäraluminium hauptsächlich die Daten der EAA. Zur zusätzlichen Darstellung der Produktionsinfrastruktur werden weltweite Technologien für Tagebau, Mineninfrastruktur und Rekultivierung auf den Bauxitabbau extrapoliert. Die Infrastruktur bei der Tonerdeproduktion wird mit einem Werk in Deutschland und bei der Elektrolyse mit einem Werk in Norwegen abgebildet. Der Transport von Bauxit und Tonerde wird mit den gegebenen Daten der EAA modelliert.

In den Prozessketten von **GEMIS** findet der Bauxitabbau zu 75% in der Karibik und zu 25% in Australien statt. Die Tonerde wird zu 20% in der Karibik und zu 80% aus Importbauxit in Deutschland hergestellt. Die Elektrolyse findet in Deutschland statt. Den einzelnen Vorgängen liegen folgende Transportleistungen zugrunde (vgl. Tab. 5.14).

Tab. 5.14: Transportaufwendungen pro Tonne Primäraluminium in der GEMIS-Datenbank

	Bauxit aus Karibik	Bauxit aus Australien	Tonerde aus Karibik
Schiff	9000 km	21000 km	9000 km
Dieselszug	100 km	500 km	100 km
Elektrischer Zug	200 km	200 km	200 km

In Abbildung 5.16 sind die KEA-Werte basierend auf den Definitionen in Tabelle 5.11 je nach Datenbank für die Herstellung von Primäraluminium dargestellt.

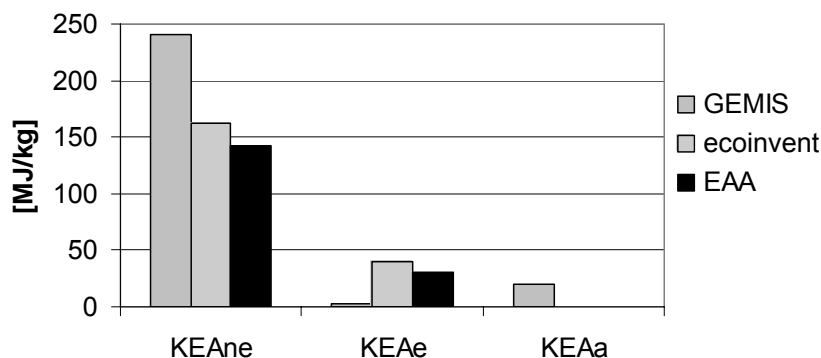


Abb. 5.16: KEA-Werte für die Herstellung von 1 kg Primäraluminium

Bei **GEMIS** wird der Stromverbrauch der Elektrolyse mit der deutschen Grundlaststromerzeugung berechnet. Dabei wird nur ein geringer Wasserkraftanteil berücksichtigt. Hierdurch sind die deutlich höheren Werte insbesondere beim Verbrauch der nicht erneuerbaren Energie zu erklären. Die KEA_{ne}-Werte von **EcoInvent** und **EAA** werden mit dem Energiemodell der EAA, d. h. mit 52% Wasserkraftanteil, modelliert und sind deutlich niedriger. Obwohl EcoInvent auf den Daten der EAA basiert, gibt es deutliche Abweichungen innerhalb der KEA-Resultate. Die höheren Werte von EcoInvent sind dabei durch die Mitberücksichtigung der Produktionsinfrastruktur zu erklären.

In Abbildung 5.17 sind die Ergebnisse der weiteren Wirkkategorien GWP100, AP, TOPP und NP für die Produktion von 1 kg Primäraluminium dargestellt.

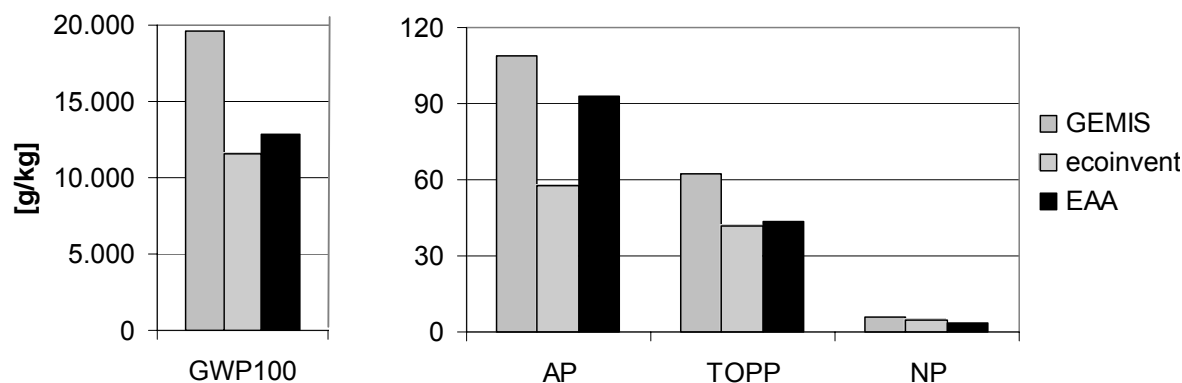


Abb. 5.17: Wirkkategorien für die Herstellung von 1 kg Primäraluminium

GEMIS kalkuliert die höchsten Werte für jede Wirkkategorie. Gründe hierfür sind zum einen der größere Anteil an nicht erneuerbaren Energieträgern bei der Energieerzeugung und zum anderen die langen Transportstrecken (vgl. Tab. 5.13 und Tab. 5.14). **EcoInvent** erzielt für GWP100, AP und TOPP die niedrigsten Ergebnisse. Und das, obwohl hier sowohl die Prozessinfrastruktur als auch die Umweltwirkung zusätzlicher chemischer Verbindungen integriert sind. Eine Erklärung hierfür sind die von der EAA abweichenden Kraftwerkstechnologien zur Energieerzeugung. EcoInvent verwendet Durchschnittswerte der UCTE und setzt für Wasserkraft und Öl einzelne europäische Kraftwerke zur Modellierung an. Die **EAA** berücksichtigt hingegen durchwegs die lokalen Charakteristiken des jeweiligen Bezugsraums, u. a. die Kraftwerkstechnologien der russischen Steinkohleverstromung. Die Standards dieser Kraftwerke sind im Hinblick auf Emissionsminimierung und Abgasreinigung nicht mit europäischen Anforderungen kompatibel. Da der Anteil dieser russischen Kraftwerke bei der EAA immerhin ca. 15,3% der Energiebereitstellung durch Steinkohle beträgt, macht sich der Einfluss bei den Emissionswerten GWP100, AP und TOPP entsprechend bemerkbar.

Darüber hinaus wird bei EcoInvent und GEMIS die Kohlendioxidbindung während des Biomassenanbaus in Form einer Reduzierung der CO₂-Emission berücksichtigt, während die EAA diesen Energieträger nicht kalkuliert. Der im Vergleich zur EAA erhöhte NP-Wert von EcoInvent kommt durch die energetische Nutzung von Biomasse bzw. Müll zustande. Hierdurch kommt es bei EcoInvent und GEMIS zur Erhöhung des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) und folglich trotz geringster NO_x-Emission zum größeren Eutrophierungspotenzial.

5.2.2.6.2 Produktion von Sekundäraluminium

Bei der Herstellung von Sekundäraluminium verwendet die **EAA** zur Abbildung der Aufbereitung den Durchschnitt von sechs unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden in Europa. Beim Umschmelzen wird mit Werten, welche aus vier europäischen Ofentypen gemittelt wurden, gerechnet und zudem der Vorgang des Legierens berücksichtigt. Der Transport von Altschrott wird nicht bilanziert.

EcoInvent verwendet zur Beschreibung der Aufbereitung und des Umschmelzens die Datensätze der EAA. Für den Vorgang Sammeln und Aufbereitung werden basierend auf Standardannahmen 123 km LkW- und 246 km Zugtransport angesetzt. Für das Umschmelzen beträgt der Transportumfang 115 km per LkW und 239 km per Zug. Zur Abbildung der Produktionsinfrastruktur dienen die Daten einer mittelgroßen Gießhalle in Norwegen.

GEMIS berücksichtigt hingegen lediglich den Vorgang des Umschmelzens und legt hierfür 200 km LkW-Transport des Schrotts zugrunde.

Die nach Tabelle 5.11 berechneten KEA-Werte sind in Abbildung 5.18 enthalten.

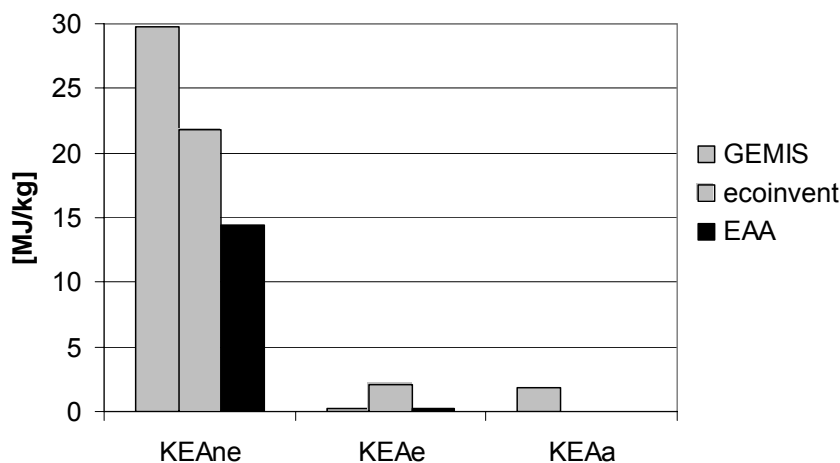


Abb. 5.18: KEA-Werte für die Produktion von 1 kg Sekundäraluminium

Ungefähr 50% des hohen KEA_{ne}-Werts von **GEMIS** ergibt sich durch die Bilanzierung von 6,6% Primäraluminiuminput beim Recycling, bzw. dem damit verbundenen Stromaufwand aus vorwiegend nichterneuerbaren Quellen. Ein Großteil des KEA_a stammt ebenfalls aus der Anrechnung des Primäraluminiums. Die höheren KEA-Ergebnisse von **EcoInvent** kommen erneut durch die Bilanzierung der Prozessinfrastruktur und der größeren Transportleistungen zustande. Die niedrigen Ergebnisse der **EAA** sind auf die Nichtberücksichtigung der Transportvorgänge zurückzuführen.

Abbildung 5.19 zeigt die Ergebnisse für die restlichen Wirkkategorien.

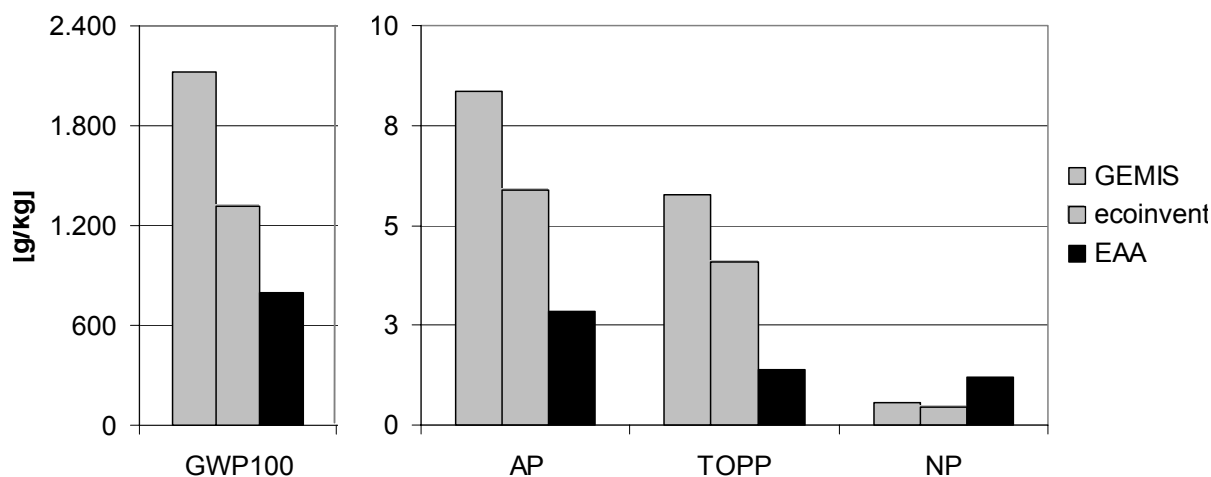


Abb. 5.19: Wirkkategorien für die Produktion von 1 kg Sekundäraluminium

Aufgrund der Bilanzierung von Primäraluminium als Materialinput erzielt **GEMIS** auch in den Wirkkategorien GWP100, AP und TOPP deutlich die höchsten Werte. Die Ergebnisse von **EcoInvent** liegen an zweiter Position, was sich erneut durch die Berücksichtigung der Produktionsinfrastruktur, der längeren Transportwege und der größeren Anzahl an Emissionswerten erklären lässt. Die **EAA** ergibt wegen der fehlenden Transportleistungen wiederum die niedrigsten Werte. Eine Ausnahme dieser Ergebnisreihenfolge bildet allerdings das Eutrophierungspotenzial NP: Hier bilanziert GEMIS als Spülgas zur Schmelzreinigung ausschließlich Cl_2 während die EAA auch N_2 berücksichtigt. Die resultierende hohe Stickstoffemission führt zu den hohen NP-Werten bei der EAA. Da EcoInvent die Luftemission von Stickstoff nicht bilanziert, sind die NP-Werte folglich am geringsten.

5.2.2.6.3 Zusammenfassung des Datenbankvergleichs

Die vorherigen Abschnitte zeigen deutliche Differenzen zwischen den einzelnen Datenbanken. Die abweichenden Werte sind in erster Linie auf unterschiedliche Annahmen bei der Modellierung des Aluminiumstoffstroms (z. B. Bezugsraum, Transport), verschiedene Allokationsverfahren (z. B. mit und ohne Prozessinfrastruktur), nicht übereinstimmende Energiemodelle und Kraftwerkstechnologien sowie die nicht konforme Herkunft und Aktualität der Daten zurückzuführen. Erschwerend hinzu kommt die ungleiche Zusammensetzung der Wirkkategorien. Dies ist zum einen Folge abweichender Definitionen und zum anderen durch den unterschiedlichen Umfang und Inhalt (z. B. Anzahl und Art der Emissionen) der einzelnen Datenbanken zu erklären.

Die trotz gleicher Datenbasis signifikanten Abweichungen zwischen EcoInvent und der EAA sind hauptsächlich auf die Modellierung der Produktionsinfrastruktur und auf die eigenen Technologiemodelle für die Energieerzeugung zurückzuführen.

Basierend auf obigen Ergebnissen wird im Rahmen dieser Arbeit das neutrale Ökoinventar EcoInvent verwendet. Im Vergleich zu den EAA-Daten und der GEMIS-Datenbank bietet EcoInvent mehr Prozesse, eine ausführlich dokumentierte Datenqualität und berücksichtigt zusätzlich die Produktionsinfrastruktur. Zudem sind viele Annahmen bei den prozessbedingten Material- bzw. Energieströmen (z. B. das Energiemodell) mit denen der Aluminiumindustrie konform.

5.3 Dokumentation ökologischer Studien von Aluminiumbauteilen

Im Folgenden werden die Prinzipien sowie die Ergebnisse ausgesuchter Ökobilanzen von Aluminiumbauteilen dargestellt und im Anschluss diskutiert.

5.3.1 Vergleich von Fensterkonstruktionen (EMPA, 1996; Richter, 1996)

Innerhalb dieses Forschungsprojekts wurden sieben unterschiedliche Fensterkonstruktionen (1,60 x 1,3 m²) aus Aluminium, Stahl, Edelstahl, Buntmetall, Holz, PVC sowie Holz-Aluminium mit 30 Jahren Nutzungsdauer im Hinblick auf den ganzen Lebenszyklus ökologisch bewertet. Die Verglasung sowie der Montage- und Demontageaufwand wurden dabei nicht berücksichtigt. Für den Aluminiumrahmen wurden die k-Werte 1,9 und 2,3 MJ/m²/K sowie unterschiedliche Beschichtungsvarianten angesetzt. Zudem wurde mit zwei Szenarien im Hinblick auf die Materialzusammensetzung gerechnet und eine wartungsfreie Nutzungsphase angenommen. Der Materialinput für das Ist-Szenario setzte sich aus 65% Primär- und 35% Sekundäraluminium zusammen. Der zukünftige Input betrug 15% Primäraluminium und 85% Sekundäraluminium. Die Sachbilanzen wurden mit den Ausgangsdaten (Stand 1995 bzw. 1996) des Ökoinventars EcoInvent erstellt.

Für Aluminiumfenster ergeben sich die ungünstigsten Ergebnisse für einen k-Wert von 2,3. Dies ist bedingt durch die entsprechend hohen Wärmeverluste in der Nutzungsphase. Im Hinblick auf die Beschichtung zeigt die Anodisierung bessere Bilanzwerte als die Pulverbeschichtung. Darüber hinaus sind die Umweltbelastungen beim Einsatz von 85% Sekundäraluminium um mehr als die Hälfte geringer als beim Ist-Szenario.

5.3.2 Vergleich von Fenster- und Fassadenkonstruktionen (IKP, 1998)

Innerhalb dieser Studie des Instituts für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde wurden unterschiedliche Fenstertypen (1,0 x 1,2 m²; 1,23 x 1,48 m²; 1,5 x 2,0 m²) aus PVC, Holz, Holz-Aluminium und Aluminium sowie zwei Fassadenkonstruktionen (6,0 x 3,6 m²) aus Stahl-Aluminium und Aluminium mit einer Nutzungsdauer von je 40 Jahren untersucht. Die Aufwendungen für Reinigung während der Nutzung wurden in der Studie ausgeklammert. Für Aluminiumfenster und -fassaden wurden im Hinblick auf die Materialzusammensetzung zwei Szenarien definiert: In Szenario 1 ging man von 70% Primär- und 30% Sekundäraluminium aus. In Szenario 2 wurde mit 30% Primär- und 70% Sekundäraluminium gerechnet. Zur Erstellung der Sachbilanzen wurden die damaligen Daten der GaBi-Software verwendet. Für Szenario 1 wurde das in GaBi enthaltene Energiemodell des deutschen Aluminiumimportmix mit durchschnittlicher Produktionstechnologie angesetzt. In Szenario 2 kam das Best-Available-Technique-Energiemodell, d. h. unter Annahme der fortschrittlichsten Produktionsmethoden, zum Einsatz.

Bei der Wirkungsabschätzung der Fenster weisen die Systeme aus Aluminium das deutlich niedrigste Ökotoxizitätspotenzial auf. Zudem kommt es zu einem geringen Aufkommen an Sondermüll. Beides ist auf die nahezu lösungsmittelfreie Beschichtung über Voranodisation und Pulverlack zurückzuführen. Als bemerkenswert wird in der Studie außerdem die hohe Steifigkeit des Aluminiumrahmens sowie die gute Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse beurteilt. Während der Nutzungsdauer sind für die Aluminiumbauteile beispielsweise keine Wartungsaufwendungen, z. B. in Form von neuen Anstrichen, erforderlich. Da die Witterungsbeständigkeit von Aluminium zusammen mit der guten Wärmedämmung von Holz in effektive Konstruktionen mit hervorragenden Bilanzwerten resultiert, wird diese Materialkombination insbesondere bei Fenstern äußerst positiv bewertet.

Bei der Wirkungsabschätzung der Fassaden liegen die Ergebnisse beider Varianten in einem Intervall von 10% Abweichung (vgl. Beispiel in Abb. 5.20). Das Gewicht der Aluminiumfassade beträgt lediglich die Hälfte der Stahl-Aluminium-Konstruktion. Zudem sind durch die variablen Profilformen der Aluminiumbauteile die Dichtprofile kleiner und effektiver dimensioniert.

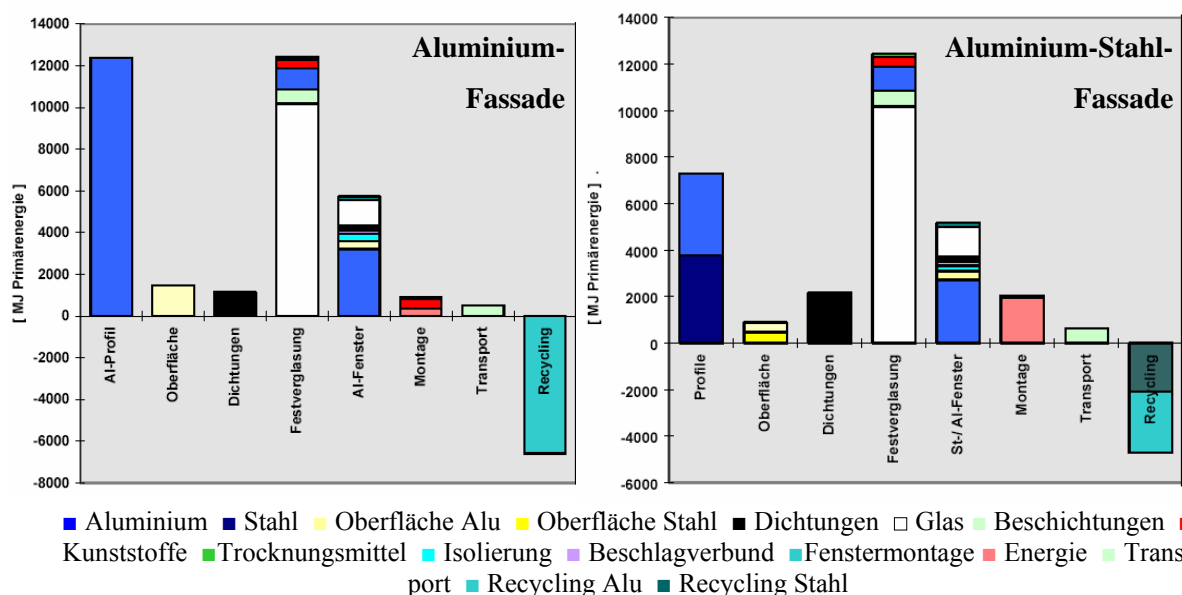


Abb. 5.20: Nicht erneuerbarer Primärenergieverbrauch zweier Fassadenvarianten während des gesamten Lebenszyklus (IKP, 1998)

Die in der Studie untersuchten Konstruktionen zeigen keine deutlichen Vor- bzw. Nachteile untereinander. Nach Auffassung der Autoren sind daher Materialverbote und konkrete Materialempfehlungen in keinem Fall geeignet, um ökologische Verbesserungen im Fenster- und Fassadenbereich zu erreichen.

5.3.3 Vergleich von Außenwandkonstruktionen (Ryberg & Eriksson, 1999)

In dieser Fallstudie wurde ein komplettes Bürogebäude mit unterschiedlichen Außenwandkonstruktionen während des gesamten Lebenszyklus inklusive der Unterhaltsaufwendungen untersucht. Aluminium war hier sowohl in den Fenstern (27% des Gesamtgewichts) als auch in den Lüftungs- bzw. Heizanlagen (7,5% des Gesamtgewichts) enthalten. Mittels Szenarien wurden mehrere Lebensdauern der Fenster (25 und 50 Jahre) und der Anlagentechnik (25 und 10 Jahre) sowie verschiedene Heizmöglichkeiten modelliert und deren Einfluss auf den Treibhauseffekt des Gesamtgebäudes abgeschätzt. Aluminium wurde dabei mit den Daten der EAA abgebildet. Die verwendete Recyclingrate wurde in der Studie nicht angegeben.

Mit den Ergebnissen wird die maßgebliche Bedeutung der Nutzungsphase bei ökologischen Betrachtungen aufgezeigt. Allein der Verbrauch an elektrischer Energie ist während der Nutzungsdauer 75-mal höher als für die Erstellung des gesamten Gebäudes. Die Bedeutung der Aluminiumproduktion ist dadurch bezogen auf die ökologische Gesamtbilanz des Gebäudes entsprechend gering.

Um sowohl Energiebedarf als auch Emissionen zu minimieren wird die Anwendung der „Best Available Technique“ (BAT) und einer Integrierten Produkt Politik (IPP) empfohlen. Zudem wird eine effektive Nutzungsphase von Gebäuden angeregt. Letzteres kann u. a. durch ausreichende Sonnenschutzmaßnahmen und Wärmetauscher erreicht werden. Gerade für diese Anwendungsgebiete empfiehlt die Studie die Verwendung von Aluminium. Als

Gründe hierfür werden die hervorragende Energieabsorption, die gute Wärmeleitfähigkeit, das optimale Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht und die natürliche Korrosionsresistenz angegeben. Den Autoren zufolge absorbiert 1 m² Aluminiumsonnenschutz pro Jahr 400 kWh und kann ohne Wartungsaufwand 30 bis 50 Jahre genutzt werden. Bei einem freistehenden "normalen Haus" mit Sonnenschutzflächen von 10 bis 15 m² werden so 4000 bis 6000 kWh/a gesammelt, wodurch ein Drittel des Energiebedarfs pro Jahr gedeckt wird.

5.3.4 Aluminiumanwendungen in Gebäuden (SINTEF 2001a, 2001b)

In diesem Bericht wurden mehrere bis 2001 durchgeführte Ökobilanzen von Aluminiumbauteilen zusammengefasst und bewertet. Als Sachbilanzdaten wurden u. a. die Daten von Eco-Invent sowie der EAA verwendet. Kernpunkt der Untersuchungen stellen Aluminiumfenster- und -fassaden sowie Solarkollektoren und Photovoltaiksysteme dar.

Verglichen mit den entsprechenden Varianten aus Kupfer und Stahl erzielt Aluminium die besten ökologischen Bewertungen - insbesondere im Hinblick auf Human- und Ökotoxizität. Als größte Optimierungspotenziale werden die zunehmende Anwendung natürlicher Energiequellen bei der Produktion von Primäraluminium, die Verbesserung des Recyclingvorgangs sowie die Erhöhung der Recyclingquoten definiert.

5.3.5 Energiewerte verschiedener Aluminiumbauteile (EMPA, 2004)

Ausgangspunkt dieser Studie waren vom Verein Eco-Devis⁴³ veröffentlichte ökologische Bewertungen von verschiedenen Gebäudebauteilen aus Aluminium. Da dabei die Recyclingeigenschaften von Aluminium weitgehend ausklammert wurden, war der Indikator „Graue Energie“ für Aluminium entsprechend hoch. Daraufhin wurde im Jahr 2004 die Eidgenössische Materialprüfanstalt (EMPA) vom schweizerischen Aluminium-Verband beauftragt, eine Neuberechnung dieser Werte unter Berücksichtigung des Recyclingpotenzials der jeweiligen Aluminiumprodukte durchzuführen. Als Grundlage für diese Gegenrechnung dienten die Daten von EcoInvent. Kernpunkt der Bilanzierung war die Produktion und der Recyclingvorgang. Die Nutzungsphase wurde in beiden Studien nicht berücksichtigt. Zur Abbildung des Recyclings wurde die wertkorrigierte Substitution mit baueilspezifischen Recyclingraten eingesetzt. Anstelle der Grauen Energie wurde der kumulierte Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren und erneuerbaren Quellen gebildet.

In Tabelle 5.15 sind einige der Ergebnisse zusammen mit den Werten von Eco-Devis dargestellt. Es zeigt sich, dass die Nicht-Berücksichtigung des Recyclings bei der Studie von Eco Devis zu einem 2- bis 4-mal größeren Energiebedarf führt als bei den Ergebnissen der EMPA welche das Recycling berücksichtigt. Die ökologische Bewertung unvollständiger Lebenszyklen führt folglich zu unrealistischen Ergebnissen und ist daher nicht zu rechtfertigen.

⁴³ Eco Devis: Trägerverband zur ökologischen Kennzeichnung von Bauleistungen und Baustoffen.

Tab. 5.15: Ergebnisse von EMPA vs. Eco Devis (in Anlehnung an Gerber, 2004)

Aluminiumbauteil	EMPA		Eco Devis
	Nicht erneuerbare Energie [MJ/m ²]	Erneuerbare Energie [MJ/m ²]	Graue Energie ohne Recycling [MJ/m ²]
Fassadenunterkonstruktion mit T-Profilen	107	20	286
Paneele aus Aluminiumblech	64	11	274
Rollladen, Hand/Motor reguliert	1174	65	2453
Abdeckblech (1,0 mm)	107	19	565
Fensterrahmen mit Aluminiumprofil	610	108	2353

5.3.6 Vergleich unterschiedlicher Fassadenelemente (Buxmann, 2004b)

In dieser Veröffentlichung wurden unterschiedliche Platten für eine Fassadenfläche von 557 m² verglichen. Zu diesem Zweck wurden massive Aluminiumplatten mit und ohne Antidröhnbeschichtung, Aluminiumverbundplatten mit Polyäthylen sowie Faserzementplatten untersucht. Beim Recycling des Verbundwerkstoffs wurden unterschiedliche Aufbereitungsverfahren (Abschweilen und stoffliches Recycling) sowie zwei verschiedene Recyclingraten angesetzt. Für Faserzement wurde in einem ersten Szenario die gleiche Lebensdauer wie für die Aluminiumplatten und im zweiten Szenario ein kompletter Plattenaustausch während der Nutzung angenommen. Dabei wurden alle wesentlichen Prozesse, welche die Fassadenplatten betreffen, über den gesamten Lebenszyklus bilanziert. Die verwendeten Datensätze stammen zum Teil direkt aus den Betrieben bzw. von der EAA (z. B. Aluminiumherstellung) und aus der GaBi-Software (z. B. Energieversorgung).

Die Aluminiumplatte ohne Antidröhn erzielt bei den Wirkkategorien Energieverbrauch und Treibhauspotenzial die günstigsten Ergebnisse. Die Verbundplatte mit der „worst case“-Recyclingrate von 0% sowie die Faserzementplatte mit der kürzeren Lebensdauer ergeben die ungünstigsten Resultate. Die Wirkkategorien aller weiteren untersuchten Varianten zeigen die gleiche Tendenz. Die Antidröhnbeschichtung der Aluminiumplatte wirkt sich somit beim Recycling auf bestimmte Wirkkategorien negativ aus. Bei der Verbundplatte ist festzustellen, dass stoffliches Recycling ökologisch bessere Werte zur Folge hat als das Abschweilen.

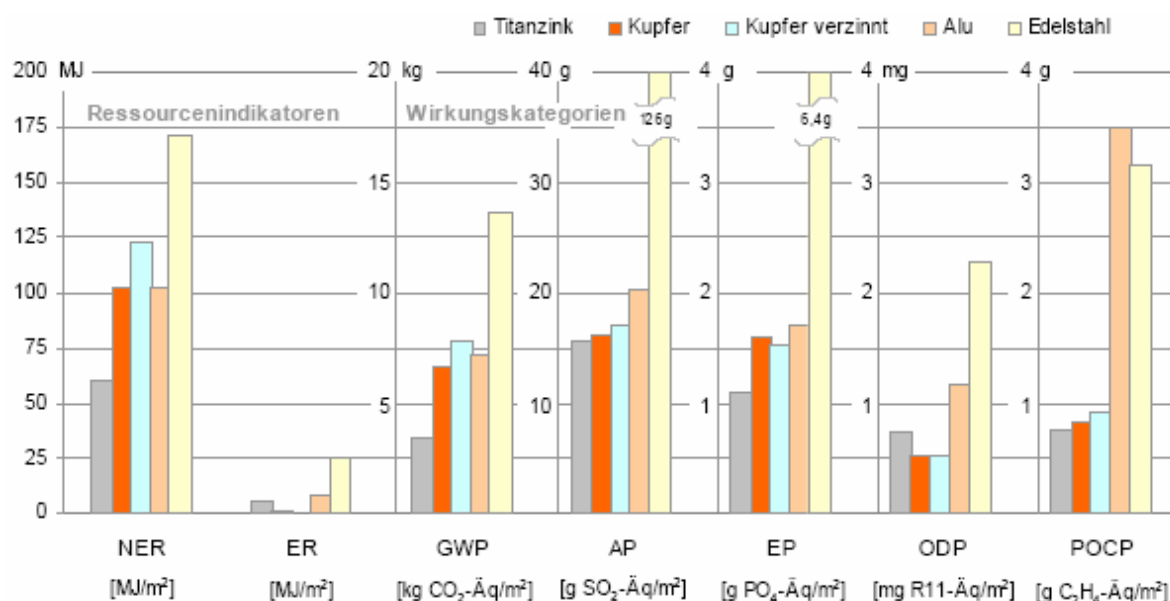
Da sich die Vorteile und Nachteile aller betrachteten Fassadenplatten letztlich die Waage halten, kann keiner Variante der Vorzug in ökologischer Sicht gegeben werden. In der Studie wird vielmehr zu einer neutralen Betrachtungsweise der unterschiedlichen Baustoffe und zu einem Einsatz je nach vorliegenden Randbedingungen aufgerufen.

5.3.7 Dachbleche und Fassadenflächen (Hillenbrand et al., 2004)

Innerhalb dieses Projekts wurden unterschiedliche Anwendungen von Blechen (1 m²) aus Titanzink, Kupfer, Aluminium, Stahl und Edelstahl miteinander verglichen. Aluminium wurde hierbei vorwiegend in Form von Well-, Trapez-, Kassetten- und Stehfalzprofilen eingesetzt. Die Lebensdauer wurde für die verschiedenen Varianten gleichgesetzt. Der Fokus der Studie lag folglich auf den Phasen Produktion und Recycling. Die Berechnungen wurden mit der GaBi-Software und dem Energiemodell des Aluminiumimportmix ausgeführt. Beim Recycling wurden zwei Szenarien unterschieden. Das „worst-case-Szenario“ setzte 100% Pri-

märaluminium an, wobei lediglich ein Anteil von 30% Prozessschrott berücksichtigt wurde. Für das zweite Szenario wurde eine Recyclingrate von ca. 90% zugrunde gelegt.

Die Ergebnisse der Wirkkategorien sind für Aluminium zwar meistens niedriger als die Werte von Edelstahl, doch deutlich ungünstiger als die Resultate der restlichen Materialien. Die Bilanz von Aluminiumblechen ohne Beschichtung ist dabei besser als von beschichteten Bauteilen (vgl. Abb. 5.21). Zudem ist anzumerken, dass bei Aluminium im Gegensatz zu Kupfer Zink und Blei keine nennenswerten Emissionen durch Abschwemmungen während der Nutzungsphase hervorgerufen werden.



NER= Nicht-erneuerbare Energie; ER= erneuerbare Energie

Abb. 5.21: Produktion und Recycling von Dachblechen (Hillenbrand et al., 2004)

Die ungünstigen Ergebnisse für Aluminium sind auf die niedrigen Recyclingraten zurückzuführen. Für Stahl wird hier beispielsweise eine höhere Materialgutschrift angesetzt als für Aluminium.

Die Vorteile von Aluminium in oben genannten Anwendungen liegen daher den Autoren zufolge nicht im ökologischen Bereich, sondern in der schnellen und Kosten sparenden Verarbeitung. Bei der Montage müssen die Profile bzw. Bleche lediglich zugeschnitten bzw. die Stehfalzprofile zusammengeklemt werden. Bei komplizierten Flächen, z. B. bei gewölbten Dachflächen, können aus verarbeitungstechnischen Gründen grundsätzlich nur Aluminiumbleche angewendet werden. Darüber hinaus kann unbeschichtetes Aluminium bei Verarbeitungsfehlern vor Ort rasch geändert werden. Bei Stahl und Edelstahl sind kurzfristige Anpassungen mit deutlich höheren Aufwendungen verbunden. Nachträglich bearbeitete Stahlkanten benötigen beispielsweise erneuten Korrosionsschutz.

5.3.8 Transparente Aluminium-Glas-Fassaden (Wicona, 2005)

Im Zuge des Rahmenprojekts „Visionen Bauen“ von Wicona wurde vom Fraunhofer Institut für Bauphysik in Stuttgart der Verbrauch an Grauer Energie eines viergeschossigen Bürogebäudes mit einer 2900 m² großen Aluminium-Glas-Fassadenfläche untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass lediglich ein Anteil von 8% des für die Gebäudeherstellung benötigten Energieverbrauchs auf Aluminium zurückzuführen ist. Die meiste Energie wird für die Tragstruktur (42%) und die Beton-Innenwände bzw. -Decken (37%) verwendet.

5.3.9 Diskussion der dargestellten Studien

In vielen der zuvor analysierten Studien werden für die betrachteten Konstruktionen Nutzungsdauern von 30 bis 50 Jahren untersucht. Die Lebensdauer der Aluminiumbauteile wird dabei meistens länger als die Nutzungsdauer der Konstruktion angesetzt. Folglich werden für Aluminium keine Instandsetzungsmaßnahmen bilanziert. Diese Annahme ist durch die Witterungsbeständigkeit und die minimale Abschwemmrate (z. B. bei Dachblechen) der Aluminiumbauteile gerechtfertigt. Die erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen, z. B. regelmäßige Reinigungen, sind bei Bauteilvergleichen in der Regel für alle Varianten gleich. Folglich haben diese Maßnahmen keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis und werden mehrfach außer Acht gelassen. Für Aluminiumbauteile werden somit oftmals nur die Produktion sowie der Recyclingvorgang bilanziert. Diese Minimierung des Lebenszyklus ist unter der Voraussetzung einer transparenten Begründung legitim. Die alleinige Betrachtung der Herstellphase ist jedoch nicht mit EN ISO 14040 ff. zu vereinbaren und führt zu falschen Ergebnissen (vgl. EMPA, 2004).

Der Ansatz des Recyclingmodells ist in den oben betrachteten Arbeiten unterschiedlich. Frühere Studien wie z. B. EMPA (1996) und IKP (1998) setzen einen bestimmten Anteil an Sekundärmaterial auf der Inputseite eines Aluminiumprodukts an und vergeben keine Gutschriften am Ende des Lebenszyklus. Die Angabe des Anteils an Sekundäraluminium in einem bestimmten Produkt ist jedoch aus den in 5.1.2.3 genannten Gründen kaum möglich. Dieser Ansatz ist daher kritisch zu bewerten. Neuere Studien, wie z. B. EMPA (2004) und Hillenbrand et al. (2004) definieren konkrete Recyclingraten und verteilen Materialgutschriften auf der Outputseite. Dieses Vorgehen wird den Recycleigenschaften von Aluminium eher gerecht.

Die Bandbreite der gewählten funktionellen Einheiten geht von 1 m² Blech über vorgegebene Fensterabmessungen und Fassadenflächen bis hin zu ganzen Gebäuden. Die Dokumentation von Auswahl und Eigenschaften dieser Einheit fällt allerdings in allen dargestellten Studien ziemlich knapp aus. Bei den Fassaden gemäß IKP (1998) werden beispielsweise keine Angaben über die Tragfähigkeit der Stahl-, Aluminium- und Aluminiumvariante gemacht. Auch bei Ryberg & Eriksson (1999) fehlen Details für den Wärmeschutz der entsprechenden Außenwandkonstruktionen. Insbesondere beim Vergleich unterschiedlicher Materialien ist jedoch auf die Transparenz und Repräsentativität dieser funktionellen Einheit unbedingt zu achten. So ist es oftmals nicht nur erforderlich die Abmessungen bzw. das Gewicht abzustimmen sondern auch Eigenschaften wie die Tragfähigkeit und den Wärmedurchgangskoeffizienten etc. zu berücksichtigen.

Für die Erstellung der Sachbilanzen wurden die Ökoinventare GaBi und EcoInvent, sowie die Daten der EAA am häufigsten angewandt. All diese Datenbanken wurden im Lauf der letzten Jahre ständig ergänzt und weiterentwickelt und dem jeweiligen Stand der Technik angepasst. Es ist folglich davon auszugehen, dass die Sachbilanzen, welche mit den aktuellsten Versionen der Datenbanken erstellt wurden, die Wirklichkeit besser abbilden. Die Ergebnisse älterer Arbeiten sollten daher unter Vorbehalt gehandhabt werden.

Bei der Wirkungsabschätzung werden in manchen Arbeiten lediglich einzelne Kategorien, wie z. B. der Energieverbrauch bei EMPA (2004) und das Treibhauspotenzial bei Ryberg & Eriksson (1999) betrachtet. Diese Reduzierung der Wirkkategorien auf eine Größe ist nicht im Sinne von EN ISO 14040 und sollte daher vermieden werden.

5.4 Schlussfolgerung

Innerhalb dieses Kapitels wurde untersucht, welche Umweltwirkungen tatsächlich mit dem Einsatz von Aluminium verknüpft sind und wie eine entsprechende Ökobilanz ausgeführt werden sollte. Zu diesem Zweck wurde der Aluminiumstoffstrom untersucht, unterschiedliche Datengrundlagen verglichen und bestehende ökologische Studien von Aluminiumbauteilen analysiert.

Die Auseinandersetzung mit dem Aluminiumstoffstrom ist Grundlage jeder ökologischen Betrachtung. Die Herstellung von Primäraluminium, Sekundäraluminium und fertigen Aluminiumprodukten basiert auf weltweiten Verflechtungen. Die maßgebenden Umweltbelastungen entstehen während der Produktion von Primäraluminium. Wegen des hohen Strom- bzw. Energieverbrauchs beeinflusst insbesondere die Elektrolyse sämtliche ökologische Kennwerte. Ein wichtiger Punkt bei der Abbildung des Aluminiumstoffstroms ist somit der Ansatz eines passenden Energiemodells für die Stromversorgung der Aluminiumhütten. Geeignet hierfür ist ein kombiniertes Energiemodell (z. B. der EAA), das je nach Importanteil die lokale Energieversorgung der einzelnen Aluminiumproduzenten berücksichtigt.

Weiterer Kernpunkt innerhalb des Aluminiumstoffstroms ist der Recyclingvorgang. Fertige Aluminiumprodukte werden nach der Nutzung nicht entsorgt, sondern zu Sekundäraluminium weiterverarbeitet. Dieses ist im Hinblick auf Energieverbrauch, Emissionen und Reststoffe deutlich günstiger als die Primärherstellung. Die Modellierung des Recyclings sollte dabei mit Materialgutschriften gemäß der (wertbereinigten) Substitutionsmethode erfolgen.

Bei der Durchführung von Ökobilanzen hat die Datengrundlage großen Einfluss auf die Ergebnisse. Der Vergleich der Industriedaten (EAA) mit den Ökoinventaren EcoInvent und GEMIS offenbart signifikante Unterschiede zwischen den Datensätzen. Bei der Auswahl der Datenbasis sollten daher folgende Faktoren hinterfragt werden:

- Umfang der vorhandenen Prozesse
- Aktualität und Qualität der Daten
- Internationaler Bezugsraum des Aluminiumstoffstroms mit kombiniertem Energiemodell
- Modellierung von Kraftwerkstechnologien, Transport und Produktionsinfrastruktur

Die Analyse der bisherigen ökologischen Studien von Aluminiumbauteilen macht die Bedeutung des gesamten Lebenszyklus deutlich. Insbesondere die Berücksichtigung des Recyclingvorgangs hat signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. Viele Arbeiten basieren dabei auf der Zuweisung eines bestimmten Sekundäraluminiumanteils. Einfacher und plausibler ist allerdings die Zuordnung von Materialgutschriften. In einigen Studien fehlt zudem die transparente Darstellung von funktioneller Einheit und Prozessketten. Oftmals ist es nicht nur erforderlich die Abmessungen bzw. das Gewicht abzustimmen sondern auch Eigenschaften wie die Tragfähigkeit und den Wärmedurchgangskoeffizienten etc. zu berücksichtigen. Außerdem ist anzumerken, dass ältere Arbeiten aufgrund der oftmals nicht mehr zeitgemäßen Datenbasis mit Vorbehalt gehandhabt werden sollten. Insgesamt ergibt die durchgeführte Analyse, dass Aluminium bei lebenszyklusorientierter Betrachtung mit angemessenen Recyclingraten keine ökologischen Nachteile im Vergleich zu anderen Materialien aufweist.

Basierend auf obigen Ergebnissen, werden in der Variantenstudie in Kapitel 7 sämtliche ökologische Bewertungen sowohl von Aluminium- als auch von Stahlkonstruktionen mit EcoInvent durchgeführt. Im Vergleich zu den EAA-Daten und der GEMIS-Datenbank bietet EcoInvent mehr Prozesse, eine ausführlich dokumentierte Datenqualität und berücksichtigt zusätzlich die Produktionsinfrastruktur. Zudem sind viele Annahmen bei den prozessbedingten Material- bzw. Energieströmen mit denen der Aluminiumindustrie konform.

6 Wirtschaftlichkeit

Wegen des Energiebedarfs bei der Herstellung sind die Materialkosten von Aluminiumkonstruktionen im Vergleich zu anderen Baustoffen relativ hoch. Angesichts der zunehmenden lebenszyklusorientierten Betrachtungsweise gilt es nun zu erforschen, welche zusätzlichen Kosten während der einzelnen Lebensphasen von Aluminiumbauanwendungen anfallen und wie sich die Kostenbilanz am Ende des Lebenszyklus gestaltet. Nachstehend werden hierzu die Einflussfaktoren der Materialkosten untersucht, aluminiumspezifische Lebenszykluskosten/-analysen erläutert, bestehende Studien diskutiert und aktuelle Entwicklungen aufgezeigt.

6.1 Materialkosten von Aluminium

6.1.1 Preisentwicklung von Primäraluminium

Aluminium wird an den weltgrößten Metallbörsen gehandelt. Hierzu gehören die COMEX in New York, die SIMEX in Singapur sowie die LME in London. An der LME (London Metal Exchange) besteht der Primäraluminiumvertrag seit 1978. Der offizielle Preis dient als Referenzgröße für deutsche und europäische Produzenten und wird jeden Tag verkündet. In Abbildung 6.1 ist die Entwicklung der Notierung seit 1998 dargestellt.

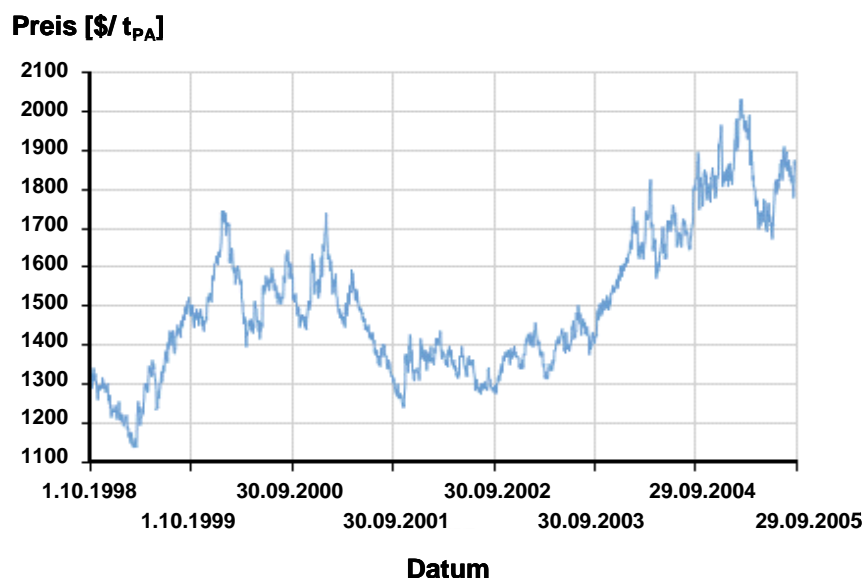


Abb. 6.1: Preis in [US \$/t] für 1 Tonne Primäraluminium seit 1998 (LME, 2005)

Der Preis für Primäraluminium stieg von 2002 bis Anfang 2005 stetig an. Dies ist durch den Wirtschaftsboom in China und dem damit verbundenen enormen Rohstoffverbrauch zu erklären. Da dort mittlerweile die Eigenproduktion erhöht wurde, kam es im Jahr 2005 zur Entspannung des Marktes. Experten zufolge sollte nun die Preisentwicklung in einem kalkulierbaren Bereich von ca. 1.800 US\$ pro Tonne stagnieren.

6.1.2 Preisentwicklung von Sekundäraluminium

Sekundäraluminium wird seit 1992 im so genannten „Aluminium Alloy Contract“ an der LME gehandelt. Ziel bei der Einführung dieses Vertrages war es, durch einen permanent verfügbaren Markt mit Einlagerungsmöglichkeiten Preisschwankungen im Bereich des Sekundäraluminiums aufzufangen und langfristige Lieferverträge zu ermöglichen.

Da Primäraluminium in vielen Fällen durch Sekundäraluminium ersetzt werden kann, sind beide Materialsorten den gleichen Wettbewerbskonditionen unterworfen. Dementsprechend korrelieren die Preise. Das Gleiche gilt theoretisch auch für die Vorstoffe. Je niedriger dabei der Legierungsgehalt der Aluminiumschrotte, desto mehr nähert sich der Preis dem des Primäraluminiums (z. B. Knetlegierungen) (Krone, 2000).

Tatsächlich wird der Schrottpreis nicht nur vom Legierungsgehalt, sondern auch von Aufbereitungsaufwand, Angebot, Nachfrage und regionalen Vorschriften beeinflusst. All diese Faktoren führen zu stark schwankenden Schrottpreisen. Die Kosten von Schrott und Sekundäraluminium bzw. Primäraluminium entwickeln sich daher in Wirklichkeit nicht immer parallel.

Bei divergierenden Preisen kann die angestrebte Kurssicherung für Sekundäraluminium durch die LME nicht mehr gewährleistet werden. Darüber hinaus ist in Zeiten der Unterversorgung mit Aluminiumlegierungen die Wunschqualität der Käufer an der Metallbörse trotz der Lagerhaltung oftmals nicht verfügbar, bzw. mit zusätzlichen Prämien an den Broker verbunden. Aus diesen Gründen wird die LME-Notierung für Sekundäraluminium von der Industrie nur geringfügig akzeptiert und genutzt (Krone, 2000). Um auf die unterschiedliche Schrottverfügbarkeit rasch reagieren zu können, werden daher in der Praxis nach wie vor hauptsächlich Lieferverträge mit kurzen Laufzeiten geschlossen,

Da sich in der LME-Notierung des Sekundäraluminiums dennoch die Marktentwicklung widerspiegelt, ist ihr Einfluss als Referenzgröße auf die Preisbildung trotzdem gegeben. Die Entwicklung des Sekundäraluminiumvertrags seit 1998 ist im Folgenden dargestellt (vgl. Abb. 6.2).

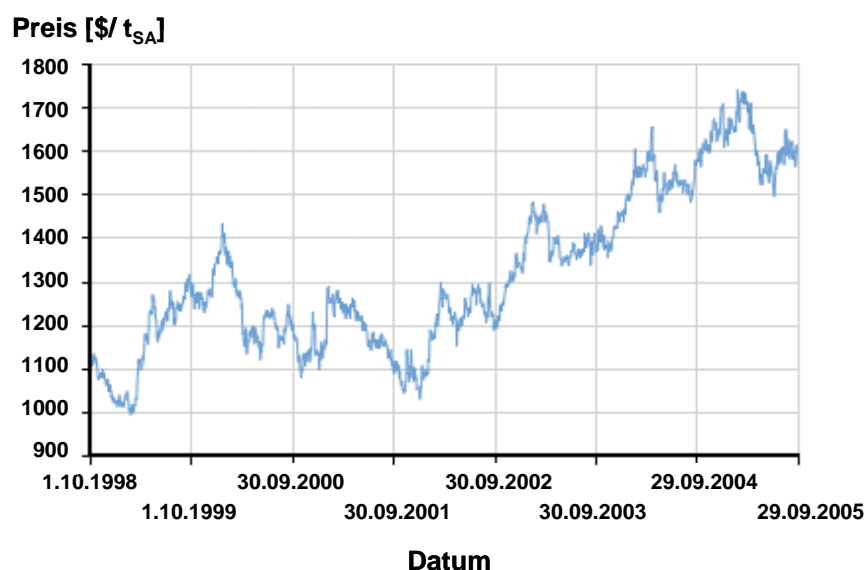


Abb. 6.2: Preis in [US \$/t] für 1 Tonne Sekundäraluminium seit 1998 (LME, 2005)

Der Preis für Sekundäraluminium beträgt derzeit ca. 90% des Werts von Primäraluminium, d. h. ca. 1.600 US\$ pro Tonne. Dieses Preisverhältnis von 0,9 wird in der Praxis oftmals als

Faustregel zur Bestimmung des Werts von Sekundäraluminium mit durchschnittlichem Legierungsgehalt verwendet.

6.1.3 Kosten von Aluminium- und Stahlprodukten

Wie in 6.1.1 bereits erwähnt war die Entwicklung der Kosten für Aluminium und allen anderen Metallen in den letzten Jahren durch einen rasanten Anstieg geprägt. Zwar hat sich die Lage mittlerweile entspannt, doch die Hoffnung auf einen Preisrückgang zum ursprünglichen Niveau ist nicht gegeben⁴⁴.

Zur Verdeutlichung sind die Veränderungen der Indizes der Erzeugerpreise⁴⁵ für einige vom statistischen Bundesamt erfassten Aluminium- und Stahlprodukte in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tab. 6.1: Änderung der Erzeugerpreise von 01/1995- 09/2005 (Statistisches Bundesamt, 2005)

Produkte gemäß des statistischen Bundesamts	Preisänderung [%]
Stahl und Leichtmetallbauerzeugnisse	13,3
Stahl- und Leichtmetallbaukonstruktionen	13,6
Aluminium in Rohform, Aluminiumlegierungen	22,0
Rohstahl, Walzstahl	37,5
Aluminiumhalbzeug	6,9
Halbzeug aus unlegiertem Qualitätsstahl	51,9

Gemäß obiger Tabelle stiegen die Preise für Metallerzeugnisse und –konstruktionen seit 1995 um durchschnittlich 13%. Die Preiserhöhung für Rohaluminium war mit 22% noch deutlich geringer als die Zunahme der Rohstahlpreise mit knapp 38%. Beim Halbzeug liegt der Anstieg bei ca. 7% für Aluminium und bei fast 52% für Stahl. Der herkömmliche Materialkostenunterschied zwischen den beiden Metallen hat sich aufgrund dieser Entwicklungen merklich verringert.

Die Kosten fertiger Metallprodukte werden allerdings nicht nur vom Materialpreis beeinflusst, sondern zusätzlich von der Art des Halbzeugs (z. B. Profile oder Bleche), von Frachtkosten und Zöllen, von der Komplexität der Querschnitte sowie von der Oberflächenbehandlung. Darüber hinaus spielen das Profil des Käufers, z. B. Einzelkunde oder Großabnehmer, und die Verhältnisse des Anbieters eine Rolle. Ein Produzent mit großen Ausbringungsmengen verfügt beispielsweise über eingespielte Betriebsabläufe, braucht weniger Rücklagen, hat teilweise amortisierte Kosten für eigene Anlagen und besitzt zudem wertvolle Kundenreferenzen. Die Produkte können somit günstiger angeboten werden als von einem neuen bzw. kleineren Anbieter. Als Folge davon weichen die Preise für ähnliche Metallprodukte bzw. Leistungen teilweise stark voneinander ab und können nur bedingt verallgemeinert werden.

⁴⁴ Aussage von Herr H. Hauser (Geschäftsführer BAUEN MIT STAHL e.V.) am 14.10.2004 auf der Pressekonferenz des Deutschen Stahlbautags in Berlin.

⁴⁵ Der Index der Erzeugerpreise misst auf repräsentativer Grundlage die Entwicklung der Preise für die vom Bergbau und Verarbeitenden Gewerbe sowie der Energie- und Wasserwirtschaft in Deutschland erzeugten und im Inland verkauften Produkte.

6.2 Kostenfaktoren während des Lebenszyklus von Aluminiumbauteilen

Der Lebenszyklus von Bauwerken bzw. -konstruktionen beginnt mit der Planung und der Herstellung, umschließt die Nutzung und endet beim Rückbau und der Entsorgung bzw. Wiederverwertung (vgl. Kapitel 1, Abb. 1.2). Basierend auf GEFMA (2004) werden die einzelnen Lebensphasen in mehrere Kostengruppen eingeteilt. Im Folgenden werden für jede relevante Kostengruppe die materialspezifischen Charakteristiken von Aluminiumbauteilen, ggf. im Vergleich zu Stahl, dargestellt. Kostenfaktoren, die vom Baumaterial unbeeinflusst sind, werden dabei nicht behandelt.

6.2.1 Planung

Innerhalb der Planungsphase hat die Ausführungsplanung maßgebenden Stellenwert. Hier wird die Statik für das Bauwerk erstellt und das Konzept der technischen Ausstattung entwickelt. Gemäß Blanchard & Fabrycky (1998) und Herzog (2003) werden dadurch bereits 60% der gesamten Lebenszykluskosten festgelegt.

Beim Einsatz von Aluminiumbauteilen können insbesondere die statischen Berechnungen mit Schwierigkeiten behaftet sein. Gründe hierfür sind die wenigen Ausbildungs- und Weiterbildungsmöglichkeiten für die Bemessung⁴⁶, die begrenzte Anzahl von einschlägiger Literatur sowie konkreten Anwendungsbeispielen⁴⁷ und das oftmalige Fehlen von Aluminiumtools in Statikprogrammen. Als Folge davon sind die Erstellung und Prüfung einer Aluminiumstatik häufig mit mehr zeitlichem Aufwand verbunden als für Standardmaterialien, wie z. B. Stahl und Holz. Die Kosten der Planungsphase werden infolgedessen durch entsprechend höhere Ingenieurhonorare beeinflusst. Zudem steigt bei geringer Erfahrung und begrenztem Informationsfluss die Fehlerhäufigkeit. Gemäß Erdell (2005) sind 15% der Kosten bei der Baurealisierung auf Fehler zurückzuführen. In 56% der Fälle entstehen die Fehler bereits in der Planungsphase (vgl. Abb. 6.3).

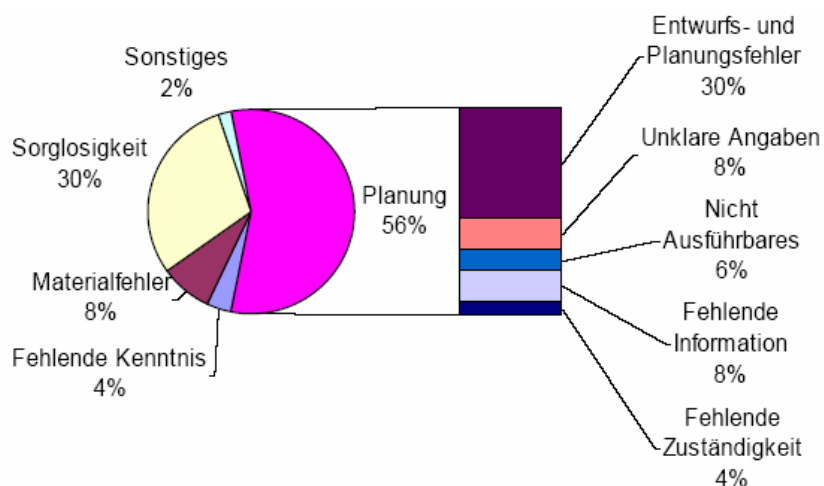


Abb. 6.3: Anteil der Planungsphase an den Fehlern bei Baurealisierungen (Erdell, 2005)

⁴⁶ Das Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung der TU München ist deutschlandweit die einzige Institution, welche Vorlesungen über die Bemessung von Aluminiumkonstruktionen anbietet sowie entsprechende Studien- und Forschungsarbeiten durchführt.

⁴⁷ Im Vergleich zum Stahlbau und Massivbau ist die verfügbare Literatur über Aluminiumkonstruktionen äußerst knapp.

6.2.2 Herstellung

Bedingt durch den Energieaufwand während der Primärherstellung (vgl. Kapitel 5.1.1.2) sind die Herstellkosten für den Baustoff Aluminium höher als für andere Baumaterialien. Die Kosten für blankes Aluminiumhalbzeug sind je nach Querschnitt ca. 3- bis 7-mal höher pro kg als für entsprechendes Stahlhalbzeug.

Optimierte Aluminiumbauteile weisen allerdings nur ca. 50% des Gewichts entsprechender Stahlkonstruktionen auf – folglich halbiert sich der Anschaffungspreis entsprechend. Berücksichtigt man zudem die Oberflächenbeschichtung, welche beim Stahl unter Witterungseinfluss aus Korrosionsgründen zwingend erforderlich ist, und beim Aluminium oftmals entfallen kann, so verringert sich bei vielen Objekten oben genannter Preisunterschied bereits auf das ca. 1,2- bis 2,5-fache. Ein weiteres wirtschaftliches Einsparpotenzial im Vergleich zu Stahl stellt die gute Formbarkeit von Aluminium dar. Die Konstruktion komplexer und gleichzeitig effektiver Profile durch Strangpressen ermöglicht eine direkte Anpassung der Querschnitte an die Belastung, wodurch eine erhebliche Menge an Material eingespart werden kann. Stahlprofile werden demgegenüber mit relativ einfachen Querschnitten gefertigt. Dadurch sind oft zusätzliche Schweißungen bzw. mechanische Verbindungen etc. erforderlich.

Auch bei Transport und Montage lassen sich bedingt durch das geringe Gewicht deutliche Ersparnisse bei fertigen Aluminiumkonstruktionen erzielen. Dies ist auf den hohen Vorfertigungsgrad und den minimalen Aufwand für Transportmittel, Hubvorrichtungen, Personal sowie ggf. für Verkehrsumleitungen zurückzuführen.

Oben genannte Faktoren führen dazu, dass die Verarbeitungskosten (für Transport, Montage, Verbindungen, Anstriche etc.) verglichen mit den Halbzeugkosten (für Material, Formarbeit etc.) bei Aluminium bedeutend niedriger sind als bei Stahl (vgl. hierzu Tab. 6.2).

Tab. 6.2: Kosten für Aluminiumkonstruktionen der Legierung 6xxx (Meyer-Sternberg, 2003)

	Halbzeugkosten [€/kg]	Verarbeitung [€/kg]	Gesamt [€/kg]
Bleche	2- 2,5	2- 3	4- 5,5
Einfache Profile	2,5- 3	2- 2,5	4,5- 5,5
Komplexe Profile	3,5- 4,5	2- 2,5	5,5- 7

Gemäß obiger Tabelle beträgt der Kostenanteil für die Verarbeitung von einfachen Aluminiumprofilen 45% des gesamten Aluminiumprodukts. Bei komplexen Profilen sinkt dieser Anteil auf ca. 36%. Bei Blechen ist der Aufwand für die Halbzeugherstellung geringer. Als Folge davon ist der Verarbeitungsaufwand mit ca. 52% des Gesamtaufwands höher. Bei Stahl umfasst hingegen allein der Aufwand für ausreichenden Korrosionsschutz ca. 30 bis 45% des Gesamtpreises einer Baukonstruktion.

Die Kosten einer montierten Aluminiumkonstruktion mit einfachen Querschnitten sind folglich durchschnittlich nur noch ca. 1,2- bis 2-mal höher als bei einer entsprechenden Stahlkonstruktion. Für fertig eingebaute, geschweißte Sonderkonstruktion aus Aluminium und Stahl wird in PIB (1999) ein Preisverhältnis von 1,2: 1 angegeben. Bei komplexen Querschnitten, wie es z. B. im Hoch- bzw. Fassadenbau häufig der Fall ist, oder bei signifikanten Gewichtsersparnissen, sind die Kosten fertig errichteter Aluminiumkonstruktionen teilweise sogar niedriger als von einer vergleichbaren Stahlkonstruktion (vgl. Kapitel 7 und 8).

6.2.3 Nutzung

Die Nutzungsdauer ist in der Regel der maßgebende Kostenfaktor während des Lebenszyklus eines Bauwerks. Aluminiumkonstruktionen sind in dieser Hinsicht aufgrund der natürlichen Korrosionsresistenz und der Dauerhaftigkeit sehr effizient. Voraussetzung hierfür ist ein ausreichender Wärmeschutz bei Anwendungen in der Gebäudehülle (vgl. Kapitel 7).

Die Instandhaltung von Aluminiumbauteilen erfordert neben der Reinigung lediglich regelmäßige Inspektionen. Die Instandsetzungsmaßnahmen umfassen ggf. Beschichtungserneuerungen. Das Eloxieren von Aluminium ist in dieser Hinsicht am günstigsten, da es unter normalen Umweltbedingungen keiner Erneuerung bedarf. Für alle anderen Beschichtungsmethoden von Aluminium fallen je nach Einwirkung alle 20 bis 40 Jahre Erneuerungskosten an.

Bei korrosiven Baumaterialien, welche für Anwendungen unter Witterungseinfluss eingesetzt werden, stellen hingegen neue Anstriche, bzw. die regelmäßige Erneuerung des Korrosionsschutzes, einen erheblichen Kostenpunkt während der Nutzung dar. Bei diesen Konstruktionen wird die Wirtschaftlichkeit maßgeblich durch den Aufwand zur Instandsetzung der Beschichtung bestimmt (Radlbeck et al., 2005b).

6.2.4 Rückbau und Recycling

Nach der Nutzung lassen sich ausgediente Aluminiumkonstruktionen einfach demontieren und zum nächsten Erfassungssystem abtransportieren. Dabei können ähnliche Kostenersparnisse wie bei der Montage erreicht werden. Zudem ist der Schrottwert für gebrauchte Aluminiumteile im Gegensatz zu anderen Baustoffen sehr hoch. Beispielsweise erzielt Aluminiumschrott auf dem Altmetallmarkt ungefähr das 7- bis 10-fache von Stahlschrott. Sortierte Aluminiumprofile werden beispielsweise mit ca. 750 €/t gehandelt während entsprechender Stahlschrott zu ca. 60 €/t⁴⁸ erworben werden kann. Damit besteht bei Aluminiumbauteilen vielmehr die Gefahr des Diebstahls als der teureren Entsorgung bzw. Deponierung.

Während Sekundäraluminium aufgrund der hohen Qualität mit ca. 90% des Preises von Primäraluminium gehandelt wird, kommt es beim Recycling von Stahlprodukten zum Downcycling und somit zum Wertverlust. Gemäß Volkshausen (2003) erzielen Stahlprofile aus Umschmelzwerken nur ca. 63% des Marktpreises von Flachstahlerzeugnissen primärer Herkunft. Dieser Qualitätsverlust ist auf den häufig aufwändigen und verlustreichen Sortierungs- bzw. Aufbereitungsverfahren zurückzuführen. Im Gegensatz zu Aluminium liegen allerdings für Stahl keine offiziellen Angaben über die durchschnittlichen Recyclingraten vor.

⁴⁸ Durchschnittliche Preise inkl. Sammelcontainer und Abholung aus München (Stadtmitte) gemäß Angaben der im Münchner Branchenbuch registrierten Schrotthändler. Vgl. hierzu auch www.euro.recycle.net [Stand 04.08.2005]

6.3 Lebenszykluskostenanalyse (LCCA)

Wie bereits in Kapitel 2.4.3 beschrieben, werden bei der Lebenszykluskostenanalyse alle durch das Bauobjekt verursachten Ausgaben bzw. Einnahmen während des gesamten Lebenszyklus ermittelt und je nach eingesetztem Verfahren der Investitionskostenrechnung mit bzw. ohne Berücksichtigung eines Kalkulationszins aufsummiert. Im Folgenden werden die Vorgehensweise und die Bestimmung der notwendigen Parameter für die Anwendung der Kapitalwertmethode erläutert.

6.3.1 Kapitalwertmethode

Bei der Kapitalwertmethode werden die Kostendaten mit Hilfe einer Diskontierungsrate auf einen gemeinsamen Bezugszeitpunkt abgezinst und anschließend aufsummiert. Das Ergebnis ist der Kapitalwert des betrachteten Bauobjekts bezogen auf dessen gesamten Lebenszyklus:

$$KW = \sum_{t=0}^n \frac{K_t}{(1 + D)^t} \quad (6-1)$$

KW: Kapitalwert in € abgezinst auf den Zeitpunkt der Bauwerkserstellung $t=0$

K_t : Kosten bzw. Erlös in € zum Zeitpunkt t

n : Lebensdauer des Bauwerks in Jahren

D : Diskontierung bzw. Kalkulationszins

Die relevanten Kostenströme K_t werden pro Jahr zusammengefasst. Die Aufstellung und Zuordnung der Ausgaben bzw. Einnahmen sind in der Praxis häufig mit Schwierigkeiten verbunden. Dabei ist insbesondere die Prognose zukünftiger Zahlungsströme problembehaftet. So sind bei einem Bauobjekt Lebensdauer und Wartungsintervalle maßgeblich abhängig von Umgebungsbedingungen, Nutzerverhalten und Ausführung der Konstruktion. Die Bestimmung von pauschalen Wartungszeitpunkten und damit verbundenen Kosten ist damit an viele Annahmen geknüpft und kann nur geschätzt werden.

6.3.2 Festsetzung des Kalkulationszins

Die Lebenszykluskosten und folglich die Rentabilität einer Investition sind entscheidend von der Höhe des Kalkulationszins abhängig⁴⁹. Dies ist in der Regel ein inflationsbereinigter Zinssatz, der eine Kapitalverzinsung der Investitionssumme beinhaltet:

$$D = n - i \quad (6-2)$$

n : Kapitalverzinsung

i : Inflationsrate

Die Kapitalverzinsung und die Inflationsrate werden für den gesamten Lebenszyklus der betrachteten Investition als konstant angesetzt. In Wirklichkeit sind allerdings beide Zinssätze erheblichen Schwankungen unterworfen (vgl. Abb. 6.4 und Abb. 6.5).

⁴⁹ Der maßgebliche Einfluss des Kalkulationszins auf das Ergebnis von LCCAs wurde auch auf dem "International Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems" in Florida vom 8.-11. Mai 2005 betont.

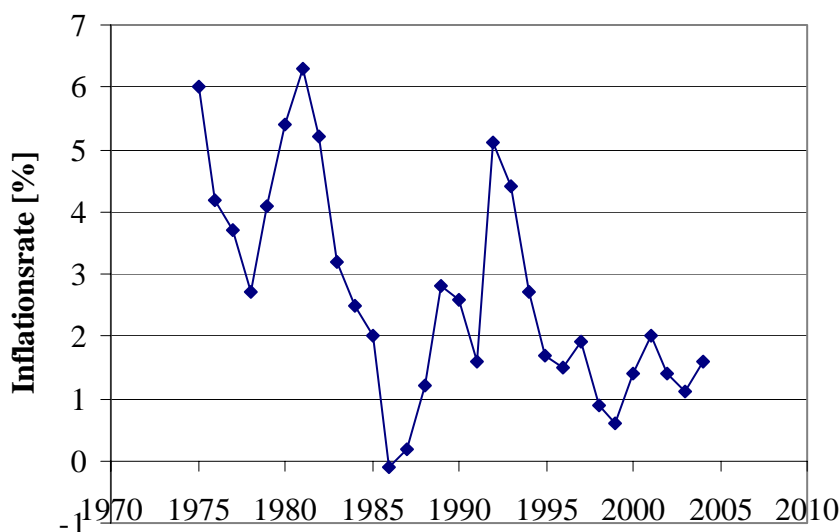


Abb. 6.4: Inflationsraten in Deutschland seit 1975 (Statistisches Bundesamt, 2005a)

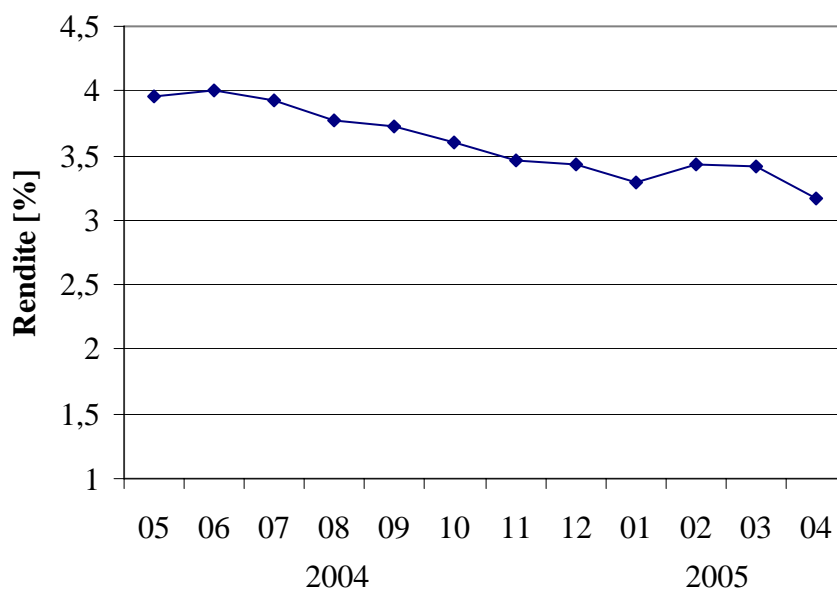


Abb. 6.5: Durchschnittsrendite börsennotierter Bundeswertpapiere von Mai 2004 bis April 2005 mit 10jähriger Laufzeit (Deutsche Bundesbank, 2005)

Die aktuelle Inflationsrate liegt bei ca. 2,2%⁵⁰. Zusammen mit einer aktuellen Kapitalverzinsung von ca. 3 bis 4% ergibt sich so ein Kalkulationszins im Bereich von 1 bis 2%. Diese beispielhaften Zinssätze werden üblicherweise für eine Laufzeit von 10 Jahren ausgehandelt. Bei längeren Laufzeiten wird der Kalkulationszins in der Regel höher angesetzt um etwaige Schwankungen während der Laufzeit auszugleichen.

Um der langen Lebensdauer von Bauobjekten Rechnung zu tragen, empfiehlt daher das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen für öffentliche Bauwerke die Anwendung eines Kalkulationszinses von 3% (BMVBW, 2004b). Das „National Institut of

⁵⁰ Stand Dezember 2005

Standards and Technology“ (NIST) in den USA kalkuliert bei öffentlichen Bauwerken sogar mit einer niedrigeren Diskontierung von 2,5% (Ehlen, 1999).

Für private Bauvorhaben wird seitens der Bauwirtschaft und der Forschung⁵¹ ein Kalkulationszins im selben Bereich, d. h. zwischen 2,5 und 3%, angesetzt.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass wegen der mathematischen Formulierung die Auswirkung auf den Endpreis mit abnehmendem Kalkulationszins steigt. Zur Verdeutlichung ist in Tabelle 6.3 der Endpreis einer Aluminiumkonstruktion in Abhängigkeit des angewandten Zinssatzes dargestellt.

Tab. 6.3: Auswirkung des Kalkulationszins auf den Endpreis (Karrer, 2005)

Kalkulationszins [%]	12	9	6	3	0
Preis in [%]	38	39	43	55	100

6.4 Dokumentation ökonomischer Studien von Aluminiumkonstruktionen

Die Durchführung von Lebenszykluskostenanalysen ist im Bauwesen noch nicht üblich. Der Fokus liegt nach wie vor auf den Ausgaben für Planung und Herstellung und nicht auf den Kosten während der gesamten Lebensdauer eines Bauwerks. Dementsprechend ist die Anzahl an verfügbaren Arbeiten und Studien in diesem Bereich gering. Den Aussagen vieler Unternehmer zufolge werden zwar betriebsintern viele Kostenanalysen und Vergleichsrechnungen inklusive Nutzung und Rückbau durchgeführt, diese aber zwecks ständig wechselnder Preise und Marktgegebenheiten nicht veröffentlicht. Zudem werden viele Kostenwerte zurückgehalten um sich gegenüber konkurrierenden Firmen bedeckt zu halten. Die Aluminiumindustrie hat sich darüber hinaus von der vergleichenden Werbung distanziert und vermeidet direkte Gegenüberstellungen mit anderen Materialien, wie z. B.

Stahl. Einzig und allein Aluminiumbrücken waren in der Vergangenheit Kernpunkt wirtschaftlicher Analysen. Die Methodik und Ergebnisse dieser Arbeiten, welche hauptsächlich an Forschungsinstituten entstanden, werden nachstehend aufgezeigt.

6.4.1 Herstellungskosten von Aluminium- und Stahlbrücken

In Sharp (1973) wurde die Aluminium- und Stahlausführung einer Fachwerkbrücke mit 376 m Spannweite untersucht. Für die Herstellung der Aluminiumvariante ergeben sich durch die Reduzierung des Eigengewichts und der damit möglichen Einsparungen von lastabtragenden Elementen ca. 10% niedrigere Kosten als für die Stahlbrücke.

In einer weiteren Studie von Herzog (1982) wurden die Anfangskosten einer Aluminium- und einer Stahlbrücke über die Straße von Messina untersucht. Auch hier kommt es durch den Aluminiemeinsatz zur erheblichen Reduktion des Eigengewichts und somit zu deutlichen Einsparungen bei Seilen, Pylonen und Verankerungen. Dadurch kann allein bei der Herstellung eine Kostenreduzierung von ca. 30% gegenüber der Stahlvariante erreicht werden.

⁵¹ Z. B. telefonische Aussage von Herrn Prof. E. Mayer, Fachgebiet Projektmanagement und Baurecht, TU München, am 26.08.2005.

6.4.2 LCCA von Fußgängerbrücken (Bentrup, 2000)

Innerhalb einer Diplomarbeit wurden drei Brückenkonstruktionen aus Stahl, Aluminium und Holz während einer Nutzungsdauer von 60 Jahren verglichen. Jede Brücke hatte eine Spannweite von 30 m und eine lichte Breite von 3 m. Bei den Untersuchungen lag der Fokus auf den Errichtungs- und Wartungskosten. Kosten für den Abbruch des Bauwerks und die Wiederverwertung der Bauelemente wurden nicht berücksichtigt. In Tabelle 6.4 sind die eingehenden Rahmenparameter aller drei Varianten dargestellt.

Tab. 6.4: Rahmenparameter der drei untersuchten Fußgängerbrücken (Bentrup, 2000)

Variante	Stahl	Aluminium	Holz
Statisches System	Einfeldträger		
Spannweite	30 m		
Breite	3 m		
Belastung	4,0 kN/m ²		
Nutzungsdauer	60 Jahre		
Lastabtragung	Orthotrope Platte	Hohlfachplatte	Kreuzverband
Werkstoff	St 37	AlMgSi1 F32	Fichte, BSH 1
Verbindungen	Geschweißt	Geschraubt, Genietet	Verleimt, Bolzen
Witterungsschutz	Korrosionsanstrich	---	Abdeckung, Anstrich
Gewicht [t]	11,5	5	Keine Angabe

Als Wartungskosten wurden alle Aufwendungen angesetzt, die nach DIN 1076 erforderlich sind um die angesetzte Nutzungsdauer des Bauwerks zu erreichen. Hierzu gehören die definierten Aufwendungen für die Instandhaltung (vgl. Tab. 6.5) und die Instandsetzung (vgl. Tab. 6.6).

Tab. 6.5: Instandhaltungsmaßnahmen nach DIN 1076

Variante	Stahl	Aluminium	Holz
Hauptprüfung (HP)	alle 6 Jahre	alle 6 Jahre	alle 6 Jahre
Einfache Prüfung	3 Jahre nach HP	3 Jahre nach HP	jährlich

Tab. 6.6: Instandsetzungsmaßnahmen gemäß Vollrath & Tathoff (2002)

Stahl	1. Standardausbesserung Korrosionsschutz nach 15 Jahren 1. Teilerneuerung Korrosionsschutz nach 25 Jahren Vollerneuerung Korrosionsschutz nach 45 Jahren 2. Standardausbesserung Korrosionsschutz nach 60 Jahren
Aluminium	---
Holz	Erneuerung des Holzschutzanstriches alle 7 Jahre

Die Lebenszykluskosten wurden mit Hilfe der Kapitalwertmethode errechnet. Dabei wurden eine Inflationsrate von 2% und ein Nominalzins von 5,2% angenommen. Es ergibt sich folglich ein Kalkulationszins von 3,2%. Der Verlauf der Lebenszykluskosten ist für die drei Fußgängerbrücken in Abbildung 6.6 dargestellt.

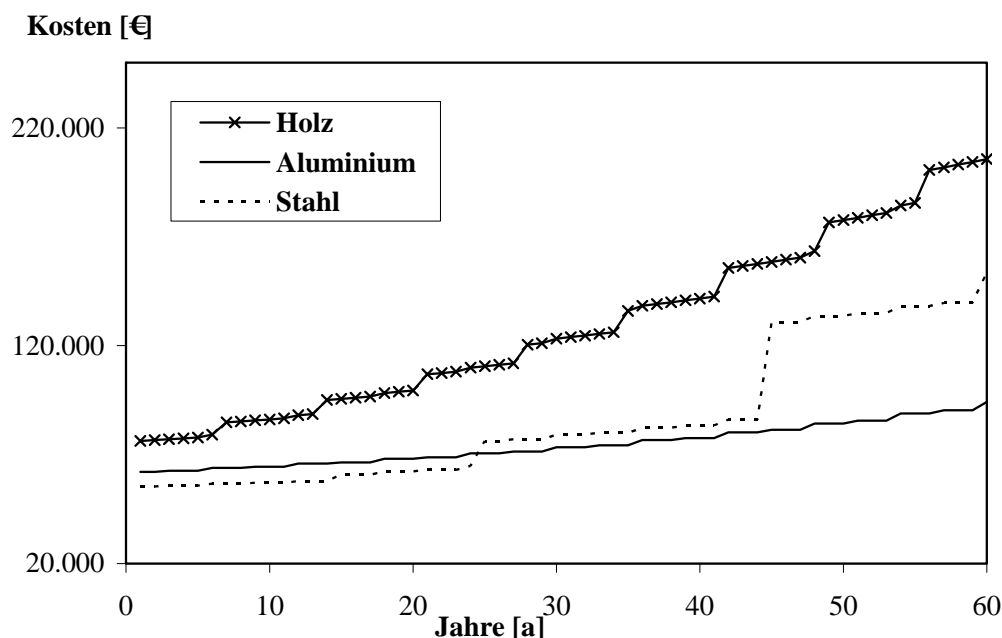


Abb. 6.6: Verlauf der Lebenszykluskosten der Fußgängerbrücken (Bentrup, 2000)

Es zeigt sich, dass die Wartungsarbeiten der Stahlkonstruktion ungefähr den doppelten Betrag der Errichtungskosten benötigen. Bei der Aluminiumvariante betragen hingegen die Wartungskosten lediglich die Hälfte der Aufwendungen für die Herstellung. Der Break-Even-Point der Aluminium- und Stahlvariante wird dadurch nach 24 Jahren erreicht. Ab diesem Zeitpunkt ist die Aluminiumkonstruktion kostengünstiger. Die Holzkonstruktion ist bereits bei der Errichtung um ca. 50% teurer als die Stahlbrücke. Zusätzlich verursacht diese Variante durch die jährliche Überprüfung und dem häufig benötigten Neuanstrich die umfangreichsten Nutzungskosten.

In Kostea & Meyer-Sternberg (2000) wurden obige Beispiele anstatt mit dem Kalkulationszins lediglich mit einer Inflationsrate von 2% beaufschlagt. Da der Wertzuwachs folglich nicht berücksichtigt wird, sind die Kosten für die Wartung höher, wodurch der Break-Even-Point zwischen der Aluminium- und Stahlkonstruktion bereits nach 14 Jahren erreicht wird.

6.4.3 LCCA einer Aluminiumbrücke (Höfle, 2004)

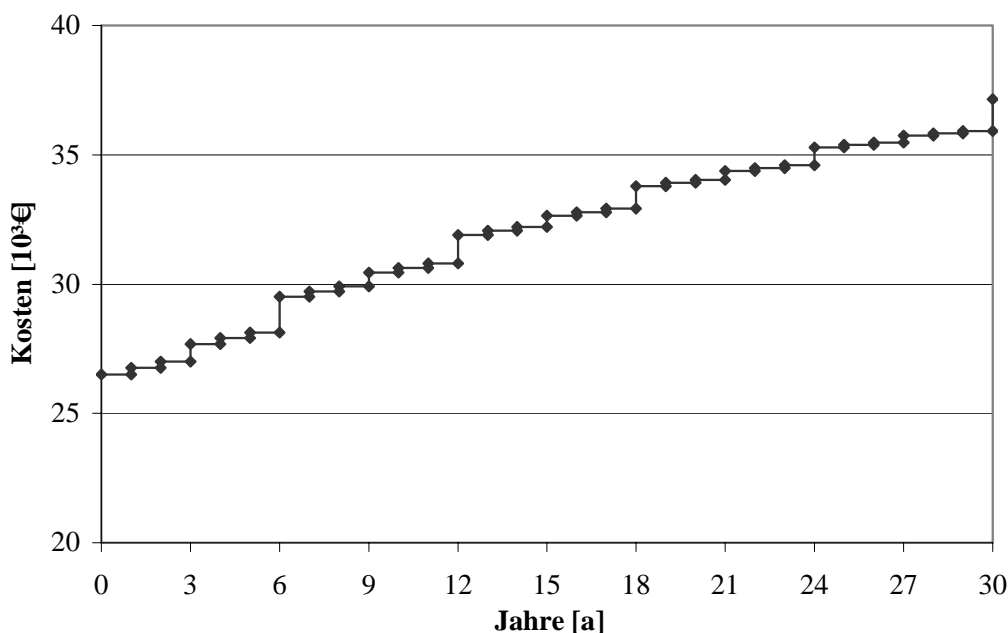
Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde der Verlauf der Lebenszykluskosten einer Aluminiumbrücke während einer Lebensdauer von 30 Jahren analysiert. Die untersuchte Brücke wird durch folgende Daten charakterisiert (vgl. Tab. 6.7).

Tab. 6.7: Charakteristische Daten der untersuchten Aluminiumbrücke (Höfle, 2004)

Statisches System	Einfeldträger
Spannweite	8,64 m
Breite	2,60 m
Belastung	5,0 kN/m ²
Nutzungsdauer	30 Jahre
Lastabtragung	Hohlfachplatte
Werkstoff	EN AW 6082 T6
Verbindungen	Geschweißt, geschraubt
Witterungsschutz	----
Gewicht [t]	1

Als Wartungsaufwendungen wurden die Überwachungen nach DIN 1076 (vgl. 6.4.2) und eine Pauschale für Ausbesserungsarbeiten angesetzt. Diese beträgt 1% der Herstellungskosten. Der Erlös aus dem Rohstoffverkauf wurde gemäß den Angaben eines Schrotthändlers zu 1,5 €/kg angesetzt.

Der notwendige Kapitaleinsatz wurde auch hier mit Hilfe der Kapitalwertmethode berechnet. Zu diesem Zweck wurden eine Inflationsrate von 2% und ein Nominalzins von 6% definiert. Der angewandte Kalkulationszins betrug dementsprechend 4%. Der Kostenverlauf während der Lebensdauer ist in Abbildung 6.7 zu finden.

**Abb. 6.7: Verlauf der Lebenszykluskosten der untersuchten Aluminiumbrücke (Höfle, 2004)**

Bei der untersuchten Brücke stellen die Herstellungskosten mit 71% (bei 0 Jahren) deutlich den größten Anteil am gesamten Kapitalwert (bei 30 Jahren) dar. Demgegenüber sind die Aufwendungen für Wartung (zwischen 0 und 30 Jahren) mit 25% Anteil und Rückbau (ca. 1.500 € bei 30 Jahren) mit 4% Anteil gering.

6.4.4 LCCA einer Aluminium- und einer Stahlbrücke (PML, 2005)

Auf einer Firmenwebsite wird zu Werbezwecken eine Lebenszykluskostenanalyse zweier Fußgängerbrücken dargestellt. Dies sind eine von der Firma angebotene Brücke aus Aluminium und eine Vergleichsbrücke aus Stahl. Letztere hat die gleichen Abmessungen und erfüllt identische Funktionen. Bei der LCCA werden sowohl die Herstellung als auch die Nutzung betrachtet. Die Phasen Rückbau und Entsorgung bzw. Weiterverwertung sind nicht Bestandteil der Analyse. Zur Methode der Investitionsrechnung und zum Kalkulationszins werden keine Angaben gemacht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.8 dargestellt.

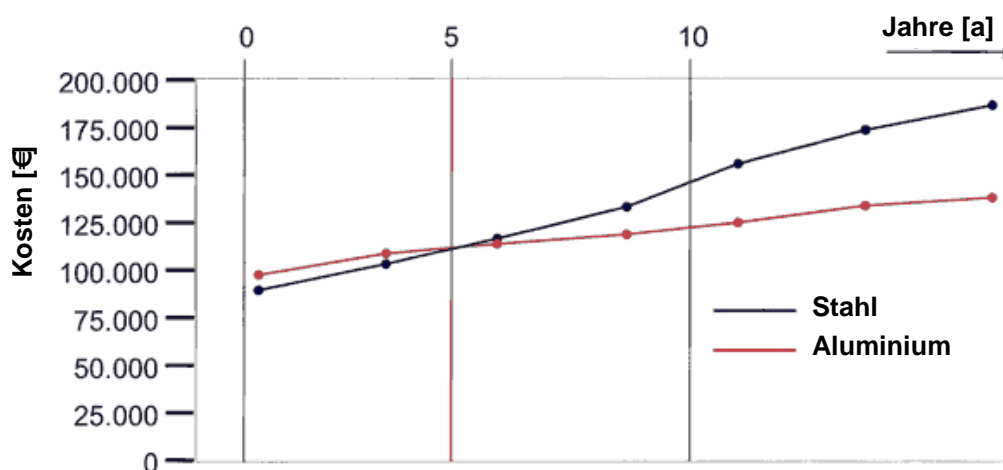


Abb. 6.8: Lebenszykluskosten einer Aluminium- und Stahlfußgängerbrücke (PML, 2005)

Der Break-Even-Point der Aluminium- und Stahlkonstruktion wird in diesem Beispiel bereits nach fünf Jahren erreicht. Der Verlauf der Kosten während der Nutzung ist bei Aluminium durch einen flachen und bei Stahl durch einen steileren Anstieg charakterisiert.

6.4.5 Diskussion der dargestellten Studien

In oben dargestellten Studien wird die Rentabilitätsgrenze von Aluminiumkonstruktionen deutlich vor der Hälfte der Nutzungsdauer erreicht. Die höheren Anfangskosten von Aluminium werden dabei durch die effektive Nutzungsphase kompensiert, wodurch letztlich ein vorteilhafter Kapitalwert entsteht. Die anfangs niedrigeren Kosten für Stahlkonstruktionen werden dagegen im Lauf der Nutzungsphase durch den umfangreichen Wartungsaufwand eingeholt.

In allen oben dargestellten Beispielen kommt die Kapitalwertmethode zum Einsatz. Mit Ausnahme von PML (2005) werden die Zinssätze angegeben. Die zugrunde liegenden Annahmen werden aber in keiner Studie dokumentiert, bzw. durch Quellen unterlegt. Kritisch zu bewerten sind Untersuchungen, in denen zwar die Inflation, nicht aber das Kapitalguthaben zum Einsatz kommt. Dies kann zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen.

Der gesamte Lebenszyklus der Konstruktionen wird lediglich von Höfle (2004) untersucht. In Sharp (1973) und Herzog (1982) liegt der Schwerpunkt auf der Herstellung, während bei den übrigen Studien zusätzlich die Nutzung aber kein Rückbau analysiert wird. Die einzelnen Kostenströme werden dabei insbesondere von Bentrup (2000), Kostas & Meyer-Sternberg, (2000) und Höfle (2004) ausführlich beschrieben. Bei PML (2005) fehlt hierzu jegliche Angabe. Da in der PML-Studie viele notwendige Informationen nicht gegeben sind, können die erzielten Ergebnisse nicht nachvollzogen werden.

6.5 Trends bei Finanzierung und Kapitalvergabe

Leere Staatskassen und hohe Verluste der Banken durch Immobilienkredite führen zur haushaltsschonenden Finanzierung bzw. zur Risikovorsorge bei der Kapitalvergabe. Staat und Banken forcieren daher zunehmend eine lebenszyklusorientierte Bewertung der zu finanzierenden Bauobjekte.

Da die wirtschaftliche Rentabilität von Aluminium häufig erst bei einer Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus offensichtlich wird, stellen diese Trends eine Chance für Aluminiumanwendungen im Baubereich dar. Zur Veranschaulichung werden im Folgenden eine Methode der Projektfinanzierung seitens des Staates und die neuen Eigenkapitalvorschriften der EU-Mitgliedsländer erläutert.

6.5.1 Betreibermodelle (BOT, BOO)

Im Rahmen eines „Build-Operate-Transfer-Modells“ (BOT) werden Planung und Bau einer öffentlichen Einrichtung, i. d. R. Infrastrukturprojekte, durch einen oder mehrere Investoren durchgeführt. Zu diesem Zweck überträgt die öffentliche Hand das Grundstückseigentum, bzw. das Erbbaurecht, an eine Einzelfirma. Anschließend wird es für eine bestimmte Zeit von dem Investor betrieben, wobei die Erträge aus dem Projekt den Investoren zufließen. Bei Ablauf des Vertrags, ca. 20 bis 30 Jahre nach der Errichtung, wird das Bauobjekt gegen ein abschließendes Entgelt wieder an den öffentlichen Träger zurückgegeben. Demgegenüber ist beim so genannten „Build-Operate-Own-Modell“ (BOO) kein Transfer des Projekts vorgesehen.

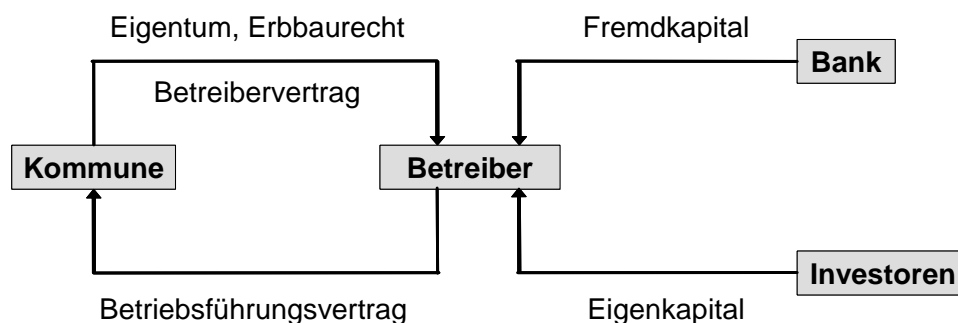


Abb. 6.9: Grundstruktur des Betreibermodells

In mehreren Regionen Europas wurde die Errichtung und Verwaltung des Straßennetzes teilweise bereits an private Unternehmen übertragen. Diese sind zuständig für Herstellung und Wartung und erheben im Gegenzug Mauten auf den entsprechenden Straßenabschnitten. Andere bekannte Betreibermodelle für Infrastrukturprojekte sind der Eurotunnel zwischen Frankreich und England und die Rion-Antirion-Brücke in Griechenland. In Großbritannien werden seit einigen Jahren sogar öffentliche Gebäude, wie z. B. Schulen und Krankenhäuser, im Rahmen eines Betreibermodells erstellt und genutzt.

Ziel der Investoren ist es, die Lebenszykluskosten zu optimieren und dadurch die Gesamtkosten zu reduzieren. Dementsprechend sind bereits vor Beginn der Investition lebenszyklusorientierte Konzepte erforderlich, welche u. a. möglichst effektive Baukonstruktionen und Baustoffe beinhalten. Aluminiumanwendungen bieten durch die effektive Nutzungsphase, der Dauerhaftigkeit und der dadurch geringen Lebenszykluskosten in dieser Hinsicht optimale Voraussetzungen.

6.5.2 Basel II

Die im Juni 2004 im Basler Ausschuss für Bankaufsicht vereinbarten „Neuen Eigenkapitalvorschriften für Kreditinstitute und Wertpapierfirmen“ (BASEL II) sollen ab 2007 in allen EU-Mitgliedsländern gelten. Basel II strebt eine risikogerechtere Formulierung der Eigenkapitalanforderungen an, die sich in den Kreditpreisen entsprechend niederschlagen soll. Externe und bankinterne Ratings bilden dabei den Schwerpunkt der Neuregelungen. Die alleinige Berücksichtigung der Risiken der Kreditnachfrager und deren Engagement sind folglich nicht mehr ausreichend.

Die neuen Eigenkapitalvorschriften haben voraussichtlich großen Einfluss auf die Finanzierung von Bauprojekten. Eine attraktive Projektidee wird in Zukunft nicht mehr ausreichen um eine Finanzierungszusage zu erhalten. Vielmehr steht die mittelfristige Verkäuflichkeit zu einem angemessenen Preis im Vordergrund. Maßgebend hierbei ist die Ratingklasse des Bauprojekts.

Das Ratingkonzept sieht sowohl die Bewertung des Objekts, der Bonität und der Rentabilität vor. Das Objektrating umfasst dabei gemäß Link (2003) folgende Kriterien:

- Standort- und Grundstücksfaktoren
- Gebäudekonzept
- Nutzungskonzeption und Drittverwendung
- Vermietung und Vermarktung
- Bauausführung

Für obige Bewertungskriterien ist eine lebenszyklusorientierte Betrachtung des Bauobjekts erforderlich. Folglich laufen die Bestrebungen des Kreditnachfragers dahingehend, ein funktionales Bauobjekt mit optimalem Kosten-Nutzen-Verhältnis während der gesamten Lebensdauer zu erstellen. Von den eingesetzten Baustoffen wird dementsprechend Funktionalität, Flexibilität, Langlebigkeit und minimaler Wartungsaufwand verlangt. Da Aluminium alle diese Anforderungen erfüllt, könnte das Objektrating innerhalb BASEL II eine weitere Chance für häufigere Anwendungen sein.

6.6 Schlussfolgerung

Der Fokus dieses Kapitels war die Erforschung und Bewertung wirtschaftlicher Charakteristiken von Aluminiumkonstruktionen während des Lebenszyklus. Um hierzu Aussagen abzuleiten wurden zunächst die Materialkosten untersucht und die Kostenfaktoren in den einzelnen Lebensphasen eines Bauteils ermittelt. Darüber hinaus wurde die Methode der Lebenszykluskostenanalyse aufgezeigt, bestehende Studien diskutiert und aktuelle Entwicklungen dargestellt.

Primär- und Sekundäraluminium werden an der Börse gehandelt. Der Kurs ist dabei maßgeblich von den Energiepreisen abhängig. Die Notierung für Primäraluminium wird allgemein anerkannt und genutzt. Im Gegensatz dazu wird der Vertrag für Sekundäraluminium lediglich geringfügig akzeptiert. Grund hierfür sind oftmalige Kurschwankungen aufgrund der unbeständigen Schrottpreise. Zudem gestaltet sich die Lagerhaltung für die vielen unterschiedlichen Aluminiumlegierungen als äußerst schwierig. Trotz dieser Störfaktoren, liegt das Preisverhältnis von Primär- zu Sekundäraluminium im Durchschnitt bei 0,9.

Die Materialkosten von Aluminium sind deutlich höher als von anderen Baumaterialien, wie z. B. von Stahl. Allerdings hat sich der Preisunterschied von Aluminium und Stahl im Laufe der letzten Jahre verringert. Dies ist auf das Wirtschaftswachstum in China und den hierdurch hervorgerufenen rasanten Preisanstieg von Metallen, insbesondere bei Stahl, zurückzuführen.

Bei den Lebenszykluskosten sind die Anfangskosten von Aluminiumanwendungen verglichen mit anderen Baumaterialien häufig relativ hoch. Dies ist Folge des erhöhten Energieaufwands für die Herstellung von Primäraluminium. Im Laufe des Lebenszyklus bietet Aluminium allerdings signifikante Einsparpotenziale, wodurch die ungünstigen Ausgangsbedingungen kompensiert werden können. Im Vergleich zu Stahl werden für Aluminium beispielsweise niedrigere Kosten durch geringes Gewicht, gute Form- und Handhabbarkeit, den natürlichen Korrosionswiderstand sowie die Langlebigkeit und Effizienz während der Nutzungsphase erreicht. Nach der Nutzung müssen Aluminiumbauteile nicht kostenintensiv entsorgt bzw. deponiert werden, sondern erzielen aufgrund des Schrottwerts und der hervorragenden Recyclingeigenschaften beachtliche Erträge.

Die einzelnen Kostenangaben von Herstellern und Literatur weichen teilweise stark voneinander ab. Dies ist mit den vielen Einflussfaktoren, wie z. B. Art des Halbzeugs, Frachtkosten, Zölle, Querschnitt, Oberflächenbehandlung, Anbieter- und Nachfragerprofil etc. zu erklären. Bei wirtschaftlichen Betrachtungen ist es daher erforderlich, die Kosten entweder direkt vom Hersteller zu ermitteln, die Quellen der Kostendaten transparent zu dokumentieren oder einen Kostenbereich mit oberer und unterer Grenze anzugeben.

Die Bewertung der Kosten während der gesamten Lebensdauer erfolgt mit Hilfe von Lebenszykluskostenanalysen. Diese werden innerhalb der vorliegenden Arbeit mit der Kapitalwertmethode, ein in der Praxis häufig verwendetes Verfahren, durchgeführt. Dabei werden alle Ein- und Ausgaben einer Investition abgezinst und anschließend aufsummiert. Maßgebend ist dabei die Wahl eines geeigneten Kalkulationszinssatzes. Dieser ergibt sich aus der Differenz von Kapitalverzinsung und Inflation und beträgt derzeit in der Baupraxis ca. 2,5 bis 3%. Die Wahl der entsprechenden Zinssätze sollte in jeder wirtschaftlichen Betrachtung dokumentiert bzw. unterlegt werden. Zudem ist auf eine transparente Darstellung und zeitlich exakte Zuordnung der Kostenströme zu achten.

Bei der Kapitalwertmethode ist anzumerken, dass die Annahme eines vollkommenen Kapitalmarktes mit identischen Kredit- und Guthabenzinsen nicht der Realität entspricht und folglich eine starke Vereinfachung darstellt. Zudem ist der Ansatz einer konstanten Diskontie-

rung für den gesamten Lebenszyklus, insbesondere bei langlebigen Bauobjekten, mit Unsicherheiten verknüpft, die beachtet werden sollten.

Die Analyse von bestehenden wirtschaftlichen Studien zeigt, dass Aluminiumanwendungen oftmals bereits im ersten Drittel der Nutzungsdauer kostengünstiger sind als andere, anfänglich „billigere“ Materialien. Dieses Ergebnis kommt durch die effektive Nutzungsphase von Aluminiumbauteilen zustande. Studien mit unrealistischen Zinssätzen und ohne klar definierte Kostenströme und Nutzungszyklen führen hingegen zu verfälschten Ergebnissen.

Neue Methoden der staatlichen Finanzierung (z. B. BOT, BOO) und die zunehmende Risikoversorge bei Kapitalvergaben (z. B. Basel II) forcieren eine lebenszyklusorientierte Betrachtung von Bauinvestitionen und Immobilien. Der Grund hierfür liegt im großen Anteil der Folge- und Nutzungskosten an den Gesamtkosten eines Bauobjekts. Um Nutzungskosten zu senken und den Wert einer Bauinvestition langfristig zu erhalten, ist daher eine präzise Vorhersage der Lebensdauer, des Wartungsaufwands und der potenziellen Schwachstellen eines Bauteils erforderlich. Aluminium bietet hierfür zwecks der Dauerhaftigkeit und des minimalen Wartungsaufwands optimale Voraussetzungen. Diese Entwicklungen könnten eine Chance für eine weitere Verbreitung von Aluminiumanwendungen darstellen.

D Ganzheitliche Bewertung von Aluminiumbauteilen

Im Folgenden werden die Informationen und Ergebnisse von Kapitel 2 bis 6 anhand von Praxisbeispielen konkret angewandt. Zu diesem Zweck werden innerhalb einer Variantenstudie drei unterschiedliche Aluminiumanwendungen mit tragender Funktion erstmalig sowohl unter bemessungstechnischen, ökologischen als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Es handelt sich dabei um Pfosten-Riegel-Fassaden, Schilderbrücken und Dachkonstruktionen. Zur Bewertung des Stellenwerts von Aluminium gegenüber Stahl werden obige Anwendungen jeweils mit Ausführungen aus Stahl verglichen.

Die Fassaden- und Dachkonstruktionen sind dabei Teil des geplanten Umbaus des „Alten Hofs“ in München am Marienhof. Dieses Bauvorhaben wurde im Rahmen des BayFOR-REST Verbundforschungsprojekts „Stoffflussmanagement Bauwerke“ (F 268) als Demonstrationsobjekt zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden Analysen wurden mit Planungsunterlagen vom August 2004 durchgeführt. Die Untersuchungen der Schilderbrücken basieren auf Werkszeichnungen vom Hersteller.

Die Lebensdauer der Konstruktionen wurde entsprechend den Vorgaben des Verbundforschungsprojekts (F 268) zu 80 Jahren angesetzt. Für ökologische Betrachtungen wurden die in Kapitel 2.4.2.6 ausgewählten Wirkkategorien berechnet. Aufgrund der Ergebnisse des Datenbankvergleichs in Kapitel 5.2.2 wurden hierzu die Sachbilanzdaten des Ökoinventars Eco-Invent verwendet. Da in der Baupraxis der Energieverbrauch häufig als Bewertungsindikator herangezogen wird, liegt bei den folgenden ökologischen Ergebnissen der Fokus auf dem nicht erneuerbaren Energieaufwand (KEA_{ne}). Die Ermittlung der Lebenszykluskosten erfolgte für jedes Beispiel mit der Kapitalwertmethode und mit einem Kalkulationszins von 3% gemäß BMVBW (2004).

7 Pfosten-Riegel-Fassaden

Im Zuge der Umbaumaßnahmen des Alten Hofes ist für die Rückseite des "Lorenzistocks" eine transparente Pfosten-Riegel-Fassadenkonstruktion geplant (vgl. Abb. 7.1). Die Fassade ist 16,00 m breit und 18,80 m hoch. Die Höhe wird durch die Stockwerksdecken in vier Abschnitte zu jeweils 4,70 m unterteilt.

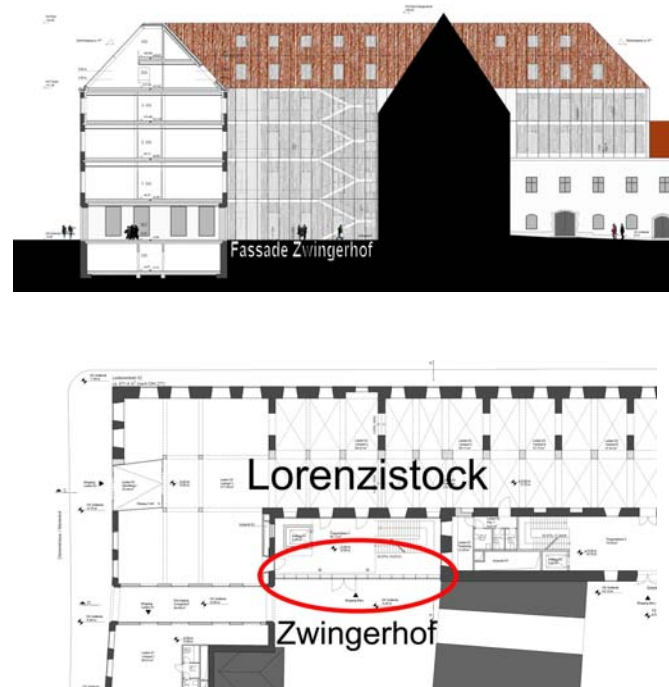


Abb. 7.1: Ansicht und Grundriss der geplanten Pfosten-Riegelfassade hin zum Zwingerhof

7.1 Varianten

Das vom Bauherren ursprünglich vorgesehene System (Fassade A) ist eine äußerst transparente Konstruktion mit einem Pfostenabstand von 1 m und einem Riegelabstand von 4,70 m (Abb. 7.2). Die Glasscheiben sind auf Adapterrahmen geklebt, welche in die an den Pfostenprofilen befestigten Halteplatten eingehängt werden. Die Breite der Strangpressprofile auf der Fassadeninnenseite beträgt 11 cm. Die Abdichtung der Aluminiumprofile erfolgt über EPDM- und Silikondichtungsprofile.

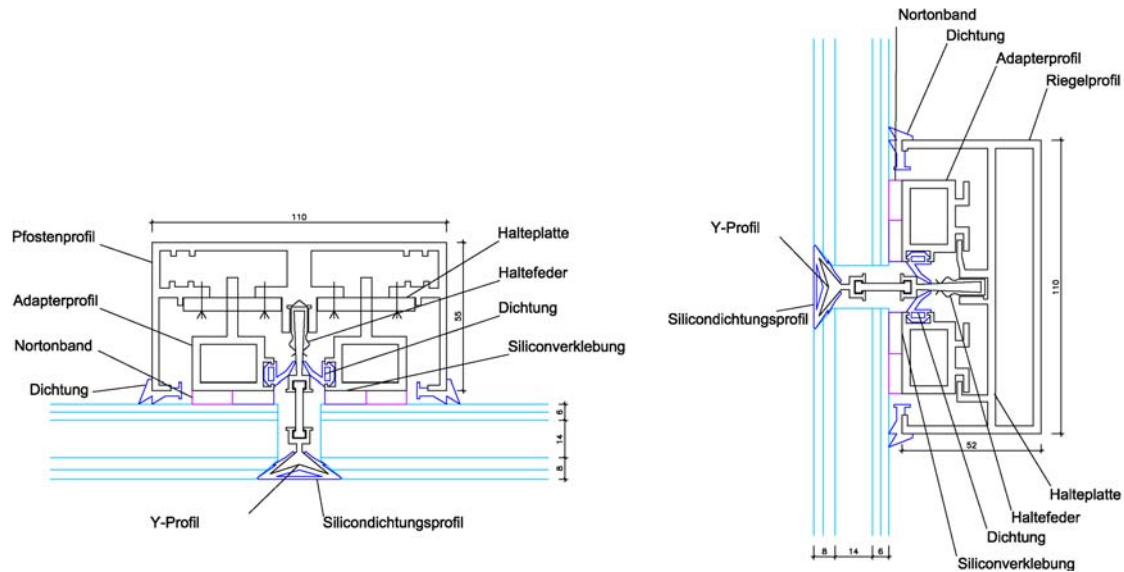


Abb. 7.2: Aluminiumpfosten und -riegel von Fassade A, Maße in [mm]

Für die weiteren Analysen wurden auf Grundlage von obigem System A drei zusätzliche klassische Pfosten-Riegel-Konstruktionen entworfen. Es handelt sich dabei um zwei Aluminiumsysteme (Fassade B und C) und eine Stahlausführung (Fassade D):

Fassade B (vgl. Abb. 7.3) besteht aus Pfosten und Riegeln mit einer Breite von jeweils 5 cm. Die Querschnitte sind auf Biegung senkrecht zur Fassadenebene ausgelegt. Die Glasscheiben werden mit Andruckprofilen, welche mit den Pfosten verschraubt sind, eingeklemmt. Die äußere Abdeckung der Pfosten und Riegel erfolgt durch Klipsprofile. Als Dichtung fungieren EPS- und EPDM-Profile sowie EPDM-Dichtungsfugen.

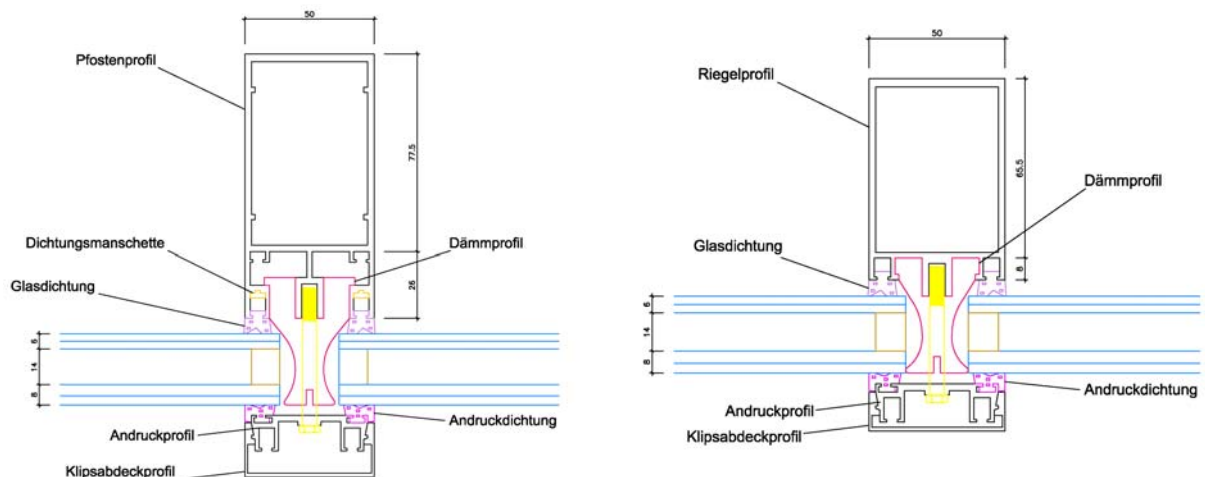


Abb. 7.3: Aluminiumpfosten und -riegel von Fassade B, Maße in [mm]

Das System von Fassade C (vgl. Abb. 7.4) ist ähnlich ausgelegt wie Fassade B. Auch hier werden stranggepresste Profile für Pfosten und Riegel mit einer Breite von 5 cm verwendet. Die Querschnitte sind erneut auf den Tragwiderstand gegen Biegung senkrecht zur Fassaden-ebene orientiert. Die Befestigung der Glasscheiben funktioniert über ein verschraubtes Andruckprofil. Dieses ist durch ein Abdeckprofil vor äußeren Witterungseinflüssen geschützt. Die Dichtung wird durch EPDM- und EPS-Profile gewährleistet.

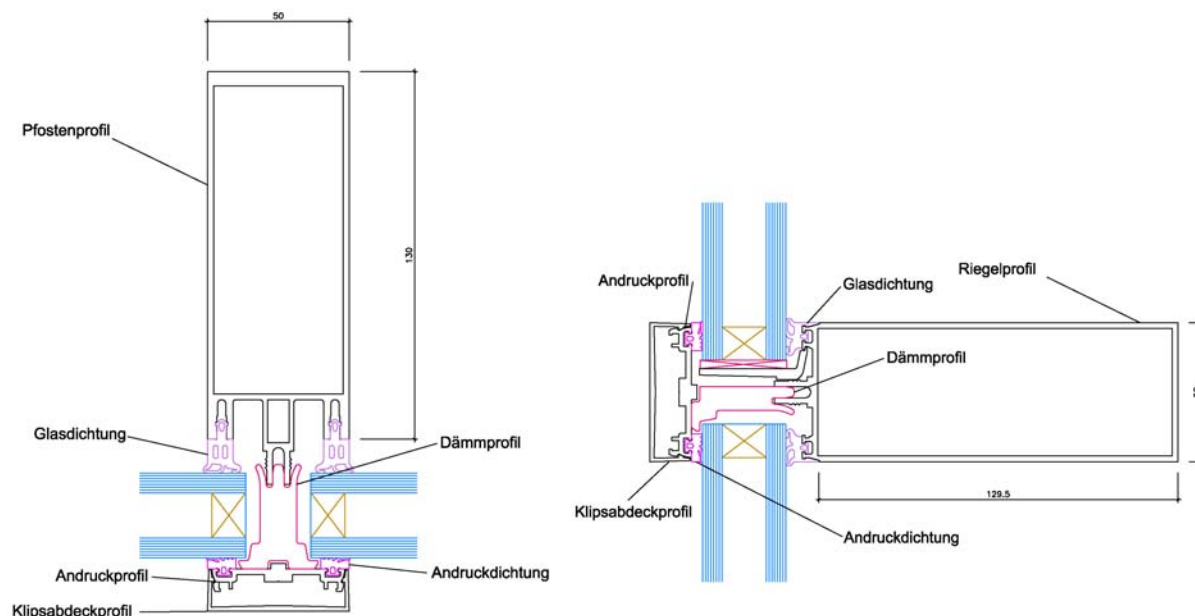


Abb. 7.4: Aluminiumpfosten und -riegel von Fassade C

Die Stahlfassade D (vgl. Abb. 7.5) besteht aus Pfosten und Riegeln mit einer Ansichtsbreite von 4,5 cm. Die Stahlprofile sind warmgewalzt und im Vergleich zu den Aluminiumprofilen sehr einfach gestaltet, d. h. ohne zusätzliche Steifen und Haken. Die Glasscheiben werden mit Klemmleisten, die mit dem Pfosten verschraubt sind, befestigt. Die Verbindungen von Glas und Tragkonstruktion werden mit Deckschalen abgedeckt. Die Dichtung der Pfosten und Riegel erfolgt über innen- und aussenliegende EPDM-Dichtungsprofile.

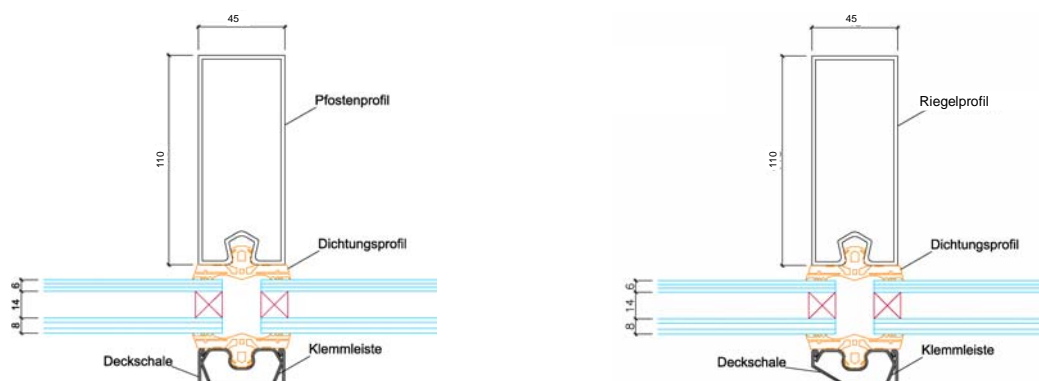


Abb. 7.5: Stahlpfosten und -riegel von Fassade D

7.2 Bemessungstechnische Aspekte

7.2.1 Parameterstudie

Mit den vier Fassadensystemen (A, B, C, D) wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Die Lasten, d. h. Eigengewicht und Wind nach DIN 1055, sowie die Glasscheibendicke von 14 mm wurden dabei als konstant angenommen. Die Variationsparameter sind im Folgenden aufgelistet:

- **Material:** für Aluminium wurden die im Hochbau gängigen Legierungen AW 6060 T66 (EN) und AW 6082 T6 (EN) ausgewählt. Bei Stahl wurden die Sorten S235 (St 37) und S355 (St 52) untersucht.
- **Statisches System:** die Riegel leiten das Eigengewicht als Einfeldträger in die Pfosten. Diese tragen die Gesamlast aus Eigengewicht und Wind ab. Die Decken der jeweiligen Stockwerke fungieren als horizontale Auflager. Das statische System des Pfostens wurde sowohl als Durchlaufträger als auch als Gerberträger berechnet. Beim Gerberträger erfolgt in Stockwerk eins bis drei ein Stoß der Profile in 1 m Höhe über der Decke, d. h. das Gelenk liegt nicht beim horizontalen Auflager sondern in 1 m Entfernung Richtung Feldmitte.
- **Pfostenabstand:** da der ursprünglich geplante Pfostenabstand von 1 m bei Fassade A nach Rücksprache mit mehreren Metallbauunternehmen nicht mehr gängig ist, wurden zusätzlich Abstände von 1,6 m und 2 m untersucht.
- **Querschnitte:** ausgehend von den gegebenen Querschnitten der Fassade A wurden bei den Fassadensystemen C und D sowohl Flächen als auch Trägheitsmomente von Pfosten (C1 bis C4, D1 bis D3) und Riegeln (c1 bis c4, d1 bis d2) variiert (siehe Tab. 7.1). Jeder Querschnitt wurde als Aluminium- und Stahlausführung berechnet. Da allerdings Aluminiumquerschnitte aufgrund der Vielfältigkeit in der Regel nicht 1:1 aus Stahl gefertigt werden können, ist dies eine theoretische Annahme und dient lediglich zur Abschätzung der statischen Unterschiede.

Tab. 7.1: Pfosten- und Riegelquerschnitte je Fassadensystem für Parameterstudie

Pfosten*				Riegel*			
	A [cm ²]	I _y [cm ⁴]	I _z [cm ⁴]		A [cm ²]	I _y [cm ⁴]	I _z [cm ⁴]
A	14,34	137,77	166,03	a	9,93	17,71	148,52
B	9,17	131,21	32,51	b	6,88	51,18	27,40
C1	10,89	286,92	39,82	c1	7,96	192,10	35,03
C2	7,96	192,10	35,03	c2	6,36	82,10	25,81
C3	9,00	207,26	41,04	c3	9,00	207,26	41,04
C4	10,34	234,27	40,72	c4	4,76	22,855	16,59
D1	7,36	156,81	26,82	d1	5,25	57,49	17,49
D2	6,56	103,39	23,12	d2	6,56	103,39	23,12
D3	11,02	260,26	43,08				

* A/a= Pfosten/Riegel von Fassade A, B/b= Pfosten/Riegel von Fassade B, Ci/ci= Pfosten/Riegel von Fassade C, Di/di= Pfosten/Riegel von Fassade D

- **Massen:** je nach gewähltem Querschnitt und Pfostenabstand wurde der Einfluss auf die Masse der jeweiligen Pfosten und Riegel analysiert.
 - **Gebrauchstauglichkeit:** für jedes System wurde die Gebrauchstauglichkeit überprüft. Der Grenzwert war hierbei $l/200 = 2,35$ cm, welches ein gängiges Maß im Fassadenbau darstellt.
 - **Statische Nachweise bzw. Vergleich von DIN 4113 mit EC 9:** für Aluminium wurden die Normen DIN 4113 und EC 9 angewandt, während die Stahlprofile nach DIN 18800 berechnet wurden. Die Ergebnisse der Aluminiumrichtlinien wurden zudem miteinander verglichen und im Hinblick auf ihre Ausnutzungsgrade untersucht.
- Die Ergebnisse der Parameterstudie sind nachstehend dargestellt (vgl. Tab. 7.2 und Tab. 7.3).

Tab. 7.2: Ergebnisse der Parameterstudie für die Riegel bezogen auf die gesamte Fassade

	Aluminium						Stahl					
Stat. System	Durchlaufträger/Gerberträger*											
Pfosten-Abstand	1 m		1,6 m		2 m		1 m		1,6 m		2 m	
Material	A1	A2	A1	A2	A1	A2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Riegel a	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	x	x	x	x	x	x
m_{ra} [kg]	410,5						783,9					
Riegel b	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	x	x	x	x	x	x
m_{rb} [kg]	196,7						580,4					
Riegel c1	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	x	x	x	x	x	x
m_{rc1} [kg]	283,4						652,8					
Riegel c2	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	x	x	x	x	x	x
m_{rc2} [kg]	246,7						546,1					
Riegel c3	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	x	x	x	x	x	x
m_{rc3} [kg]	307,3						722,2					
Riegel c4	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	x	x	x	x	x	x
m_{rc4} [kg]	210,0						439,3					
Riegel d1	d/e	d/e	d/e	d/e	-/e	d/e	x	x	x	x	x	x
m_{rd1} [kg]	221,2						471,9					
Riegel d2	d/e	d/e	d/-	d/e	d/e	d/e	x	x	x	x	x	x
m_{rd2} [kg]	251,3						559,4					

* A1= AW 6060 T66; AW 6082 T6; S1= S235 (St 37); S2= S355 (St 52); e= Tragfähigkeit nach EC 9 erfüllt; d= Tragfähigkeit nach DIN 4113 erfüllt; x= Tragfähigkeit nach DIN 18800 erfüllt; -= Tragfähigkeit nicht erfüllt; ■ =Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfüllt ($f \leq l/200$), m_{pr} [kg]= Aluminium-/Stahlmasse der Riegel mit Zubehör bezogen auf die Fassadenfläche $16 \times 18,80$ m².

Tab. 7.3: Ergebnisse der Parameterstudie für die Pfosten bezogen auf die gesamte Fassade

Stat. System	Aluminium												Stahl											
	Durchlaufträger*						Gerberträger*						Durchlaufträger*						Gerberträger*					
	1 m		1,6 m		2 m		1 m		1,6 m		2 m		1 m		1,6 m		2 m		1 m		1,6 m		2 m	
Material	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Pfosten A	d/-	d/e	-	-	-	-	d/e	d/e	-	-/e	-	-/e	x	x	-	x	-	x	x	x	x	x	-	x
m _{pfA} [kg]	2269,8		1468,7		1201,6		2269,8		1468,7		1201,6		4108,5		2658,4		2175,1		4108,5		2658,4		2175,1	
Pfosten B	d/-	d/e	-	-	-	-	d/e	d/e	-/e	-	-	-	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x
m _{pfB} [kg]	1102,7		713,5		583,8		1102,7		713,5		583,8		2811,9		1819,5		1488,7		2811,9		1819,5		1488,7	
Pfosten C1	d/e	d/e	d/e	d/-	-	-	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
m _{pfC1} [kg]	1176,9		761,5		623,1		1176,9		761,5		623,1		3242,7		2098,2		1716,7		3242,7		2098,2		1716,7	
Pfosten C2	d/e	d/e	-	d/-	-	-	d/e	d/e	-/e	d/e	-	-/e	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x
m _{pfC2} [kg]	924,0		597,9		489,2		924,0		597,9		489,2		2507,6		1622,6		1327,5		2507,6		1622,6		1327,5	
Pfosten C3	d/e	d/e	-	d/e	-	d/-	d/e	d/e	d/e	d/e	-	-/e	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
m _{pfC3} [kg]	1013,8		656,0		536,7		1013,8		656,0		536,7		2768,5		1791,4		1465,7		2768,5		1791,4		1465,7	
Pfosten C4	d/e	d/e	-	d/e	-	d/e	d/e	d/e	d/e	-/e	d/e	-/e	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
m _{pfC4} [kg]	1129,4		730,8		597,9		1129,4		730,8		597,9		3104,7		2008,9		1643,7		3104,7		2008,9		1643,7	
Pfosten D1	d/-	d/e	-	d/-	-	-	d/e	d/e	-	-/e	-	-/e	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x
m _{pfD1} [kg]	872,4		564,5		461,8		872,4		564,5		461,8		2357,3		1525,3		1248,0		2357,3		1525,3		1248,0	
D2	-/	d/-	-	-	-	-	-/e	d/e	-	-	-	-	x	x	-	x	-	x	x	x	x	x	-	x
m _{pfD2} [kg]	803,2		519,7		425,24		803,2		519,7		425,24		2156,3		1395,3		1141,6		2156,3		1395,3		1141,6	
D3	d/e	d/e	d/-	d/e	-	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	d/e	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
m _{pfD3} [kg]	1188,1		768,8		629,0		1188,1		768,8		629,0		3275,3		2119,3		1734,0		3275,3		2119,3		1734,0	

* A1= AW 6060 T66; AW 6082 T6; S1= S235 (St 37); S2= S355 (St 52); e= Tragfähigkeit nach EC 9 erfüllt; d= Tragfähigkeit nach DIN 4113 erfüllt; x= Tragfähigkeit nach DIN 18800 erfüllt; -= Tragfähigkeit nicht erfüllt; ■= Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfüllt ($f \leq l/200$), m_{pf} [kg]= Aluminium-/Stahlmasse der Pfosten mit Zubehör bezogen auf die Fassadenfläche 16 x 18,80 m².

Der Einfluss der unterschiedlichen **Materialien** richtet sich nach den Festigkeitseigenschaften. Somit ist die Tragfähigkeit der Legierung AW 6082 T6 entsprechend höher als von Legierung AW 6060 T66 während bei Stahl die Tragfähigkeit von S355 deutlich über den Werten von S235 liegt.

Bei den **statischen Systemen** hat der Gerberträger eine Reduzierung der maximalen Biegemomente von 8 bis 31% je nach betrachtetem Feld zur Folge. Die Ausnutzung beim Gerberträger ist daher insbesondere beim Biege- und Knicknachweis grundsätzlich niedriger als beim Durchlaufträger. Darüber hinaus sind die Pfostendurchbiegungen beim Gerberträger geringer.

Durch die Verbreiterung des **Pfostenabstands** von 1 m auf 1,6 m und 2 m werden die Einflussfläche der Windlasten sowie die Lasten aus Eigengewicht entsprechend größer. Als Folge davon werden die Tragfähigkeitsnachweise bei zunehmendem Pfostenabstand nur noch von Querschnitten mit entsprechend großer Fläche und Biegesteifigkeit erfüllt.

Trotz der erforderlichen größeren Querschnitte können mit einem Pfostenabstand von 1,6 m bis zu 35% und von 2 m Abstand bis zu 47% **Metallmasse** gegenüber dem gleichen System mit 1 m Pfostenabstand eingespart werden.

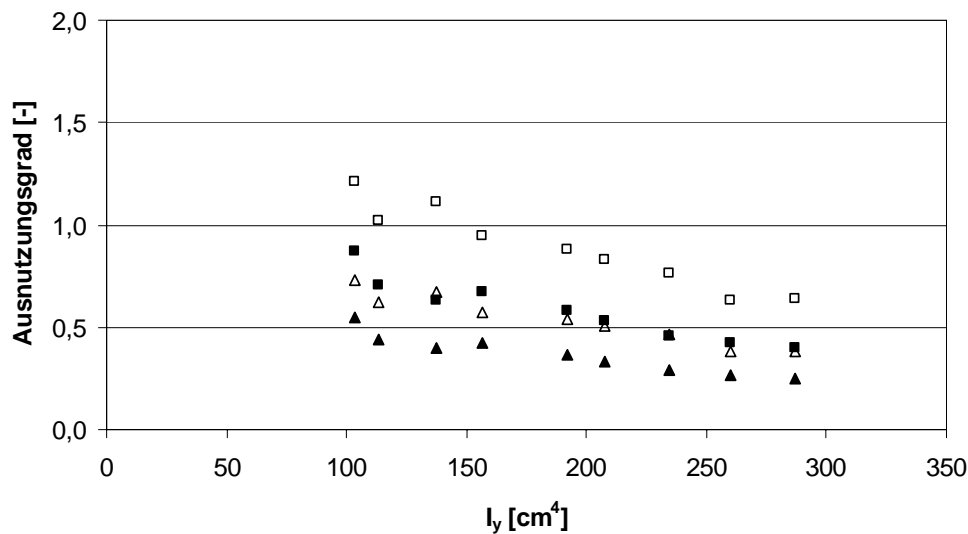
Bei den **Querschnitten** erzielen diejenigen mit großen Trägheitsmomenten um die maßgebende Achse die günstigsten Ergebnisse. Die Pfosten und Riegel von Fassade A sind in dieser Hinsicht am geringsten optimiert. Durch die kompakte Form beträgt das Verhältnis der Trägheitsmomente $J_y/I_z = 0,82$, während bei den anderen Querschnitten von Fassade B, C und D das Verhältnis $J_y/I_z \gg 1$ ist. Die Querschnittsfläche des Riegels bzw. das resultierende Eigengewicht bewirken lediglich eine minimale Laststeigerung und haben so geringen Einfluss auf die Ausnutzung der Pfosten. Bei einer Variation der Riegelflächen von 1 bis 10 cm² konnte beispielsweise lediglich eine Erhöhung/Reduzierung von +/-2% der Ausnutzungsgrade der Pfosten festgestellt werden.

Beim Nachweis der **Gebrauchstauglichkeit** sind die Ergebnisse für Stahlkonstruktionen aufgrund des dreifach größeren E-Moduls deutlich besser als für die Aluminiumkonstruktionen. Überraschend ist, dass die für den Alten Hof ursprünglich geplante Fassade A die zulässigen Durchbiegungen im Bereich der Pfosten nicht erfüllt. Dies könnte damit erklärt werden, dass wegen der Lage zum Innenhof abgeminderte Windlasten angesetzt wurden. Eine entsprechende Annahme sollte allerdings durch Versuche oder ein Windgutachten belegt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher mit den vollen Windlasten gerechnet.

7.2.2 Vergleich DIN 4113 – EC 9

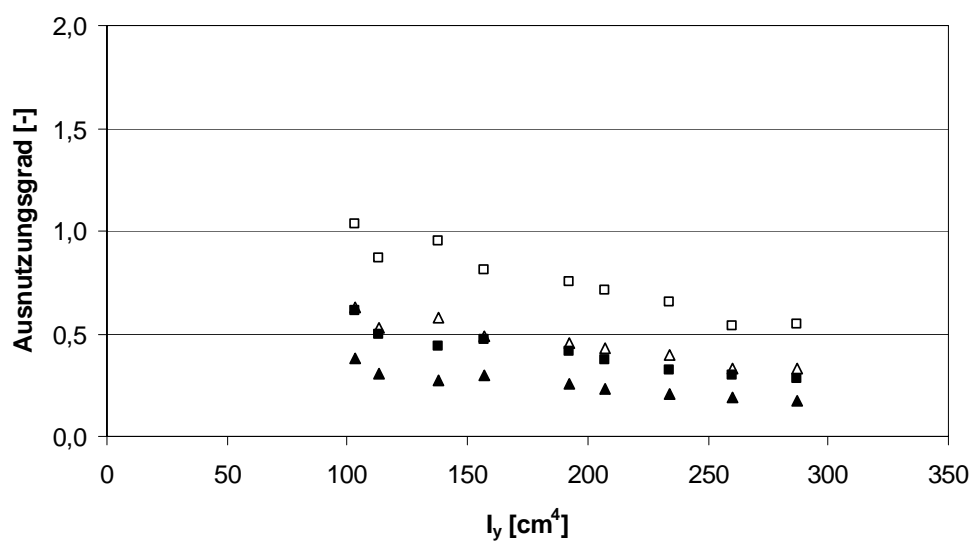
Die maßgebenden Lasten sind die Glaseigenlast sowie die Windbelastung. Dadurch sind bei den Fassadensystemen die statischen Nachweise für Normalkraft mit Biegung sowie für Knicken maßgebend. Im Folgenden sind für die Aluminiumpfosten mit 1 m Abstand die Ergebnisse des Biegenachweises (vgl. Abb. 7.6 und Abb. 7.7) und der dazugehörigen Knicknachweise (vgl. Abb. 7.8 und Abb. 7.9) dargestellt.

Für DIN 4113 werden zu diesem Zweck die Ausnutzungsgrade des Lastfalls H betrachtet (vgl. Kapitel 4.2.1.4). Bei den Rechengängen I und II des Knicknachweises wird dabei jeweils das günstigere Ergebnis dargestellt. Beim EC 9 sind die Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsfaktoren der entsprechenden Lastfälle enthalten. Die Klassifizierung gemäß EC 9 (vgl. Kapitel 4.2.2.1) ergibt für alle Querschnitte eine Einstufung in die Klassen 1 bis 3. Somit sind keine Abminderungen von Klasse 4-Elementen erforderlich und die Resultate können ohne Einschränkung mit den DIN-Ergebnissen verglichen werden.



□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. 7.6: Biegung und Normalkraft bei Durchlaufträger mit 1 m Pfostenabstand

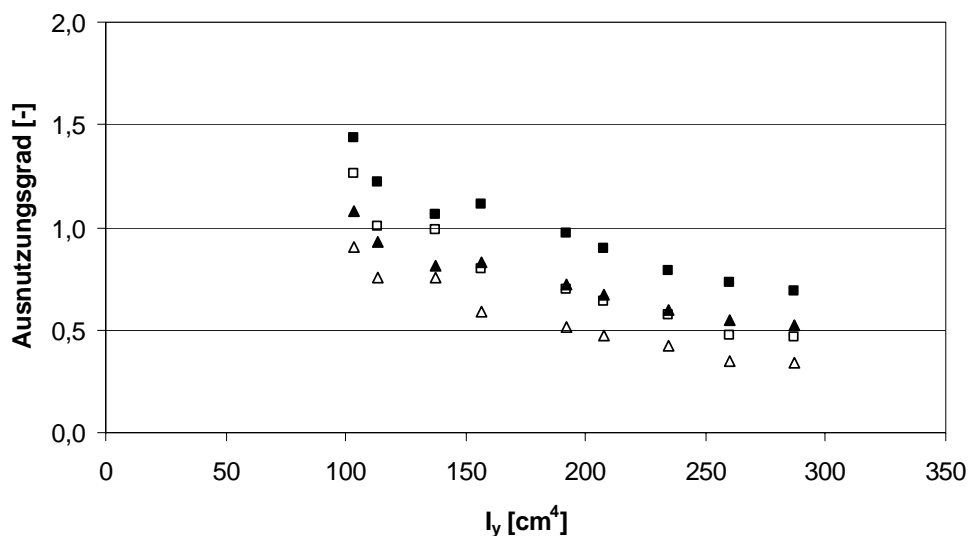


□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. 7.7: Biegung und Normalkraft bei Gerberträger mit 1 m Pfostenabstand

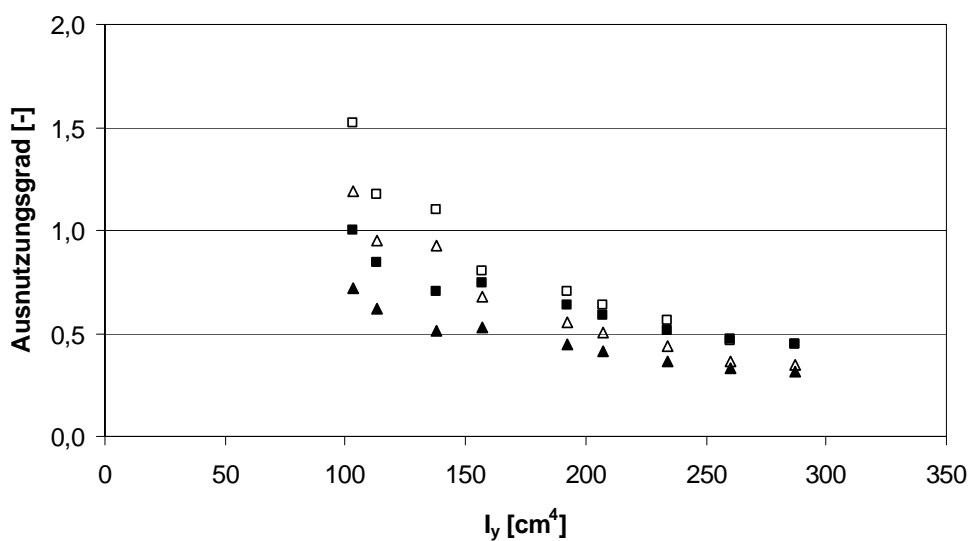
Die Legierung AW 6082 T6 mit den Nachweisen gemäß EC 9 erzielt die niedrigsten Ausnutzungsgrade. Danach folgen die Werte für AW 6060 T66 gemäß EC 9 und für AW 6082 T6 gemäß DIN 4113. Diese liegen alle im gleichen Bereich. Die DIN 4113-Ergebnisse für AW 6060 T66 weisen hingegen die deutlich größte Ausnutzung auf. Beim Gerberträger liegen die Resultate von DIN 4113 deutlich höher als beim EC 9.

Die Tendenz obiger Ergebnisse für 1 m Pfostenabstand lässt sich auch bei den größeren Abständen von 1,6 m und 2 m beobachten (vgl. Anhang B.1).



□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. 7.8: Knicken bei Durchlaufträger mit 1 m Pfostenabstand



□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. 7.9: Knicken bei Gerberträger mit 1 m Pfostenabstand

Bei den Knicknachweisen des Durchlaufträgers ist die Anwendung von DIN 4113 deutlich günstiger. AW 6082 T6 erzielt dabei gefolgt von AW 6060 T66 die niedrigsten Ausnutzungsgrade. Die größte Ausnutzung der Querschnitte wird für die Legierung AW 6060 T66 mit dem EC 9 berechnet. Beim Gerberträger dreht sich die eben abgeleitete Ergebnisreihenfolge um und es sind erneut die Werte des EC 9 günstiger. Mit zunehmendem Trägheitsmoment wird der Unterschied der einzelnen Richtlinien allerdings geringer.

Auch hier setzen sich die beobachteten Trends bei den größeren Pfostenabständen fort (vgl. Anhang B.1). Zudem ist ein stabilerer Verlauf der EC 9 Ergebnisse bei niedrigen Trägheitsmomenten zu erkennen. Bei DIN 4113 werden hingegen die Resultate beim Gerberträger mit 2 m Pfostenabstand unregelmäßig.

Die Unterschiede der beiden Berechnungsnormen DIN 4113 und EC 9 werden bei der direkten Gegenüberstellung noch offensichtlicher. In Abbildung 7.10 sind zur Veranschaulichung die durchschnittlichen Ausnutzungsgrade je nach statischem System, Nachweis und Legierung dargestellt.

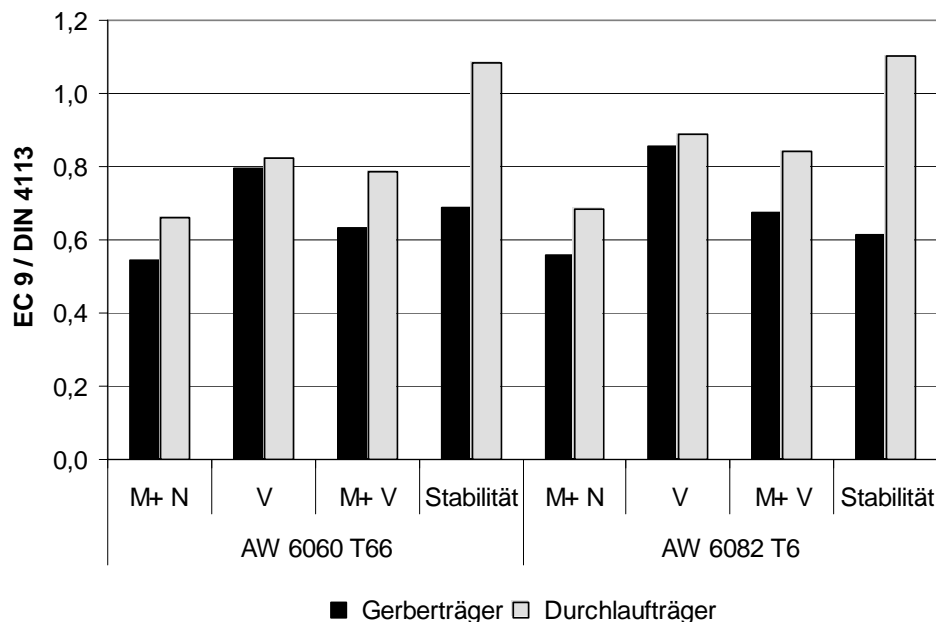


Abb. 7.10: Verhältnis der Ausnutzungsgrade von EC 9 zu DIN 4113

Die Ausnutzung unter Biege- und Normalkraftbeanspruchung (M+ N) ist nach EC 9 durchschnittlich 40% niedriger als nach DIN 4113. Auch bei Schubbeanspruchungen (V) erzielt der EC 9 im Mittel um ca. 16% wirtschaftlichere Ergebnisse. Verglichen mit dem Biege-Normalkraft-Nachweis (M+ N) sind die EC 9-Werte bei Biegung und Schub (M+ V) um lediglich 27% günstiger. Hier macht sich die erhöhte zulässige Vergleichsspannung nach DIN 4113 bemerkbar (vgl. Kapitel 4.2.2.2.4). Die unterschiedlichen Ergebnisse von DIN 4113 und EC 9 bei den Spannungsnachweisen lassen sich durch die jeweiligen Bemessungskonzepte erklären. Während bei DIN 4113 die elastische Grenzlast maßgebend wird, basieren die Nachweise des EC 9 für die vorhandenen Querschnittsklassen 1 bis 3 auf der plastischen Grenzlast.

Wie bereits erwähnt, ändert sich die Tendenz der Ergebnisse bei den Stabilitätsnachweisen. Hier liefert DIN 4113 für den Durchlaufträger um ca. 10% niedrigere Ausnutzungsgrade, während für den Gerberträger erneut der EC 9 um ca. 35% günstigere Ergebnisse liefert. Grund hierfür sind die Stabendmomente des Gerberträgers, die in den Nachweisen nach EC 9 als deutlich entlastend gewertet werden. Die Wahl der Berechnungsnorm hat folglich direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Konstruktion.

7.3 Ökologische Bewertung

7.3.1 Auswahl der Systeme und funktionelle Einheit

Für die ökologischen Vergleiche wurden aus den oben untersuchten Fassadenkonstruktionen A, B, C1-C4, D1-D3 (vgl. Tab. 7.1) sechs Systeme herausgegriffen. Bei der Auswahl waren sowohl der Ausnutzungsgrad von Pfosten und Riegel als auch die Durchbiegung ausschlaggebend. Insgesamt wurden so für 1 m Pfostenabstand zwei Aluminiumfassaden (Fassade 1

und 2) sowie ein Stahlsystem (Fassade 3) und für 2 m Pfostenabstand ebenfalls zwei Aluminiumkonstruktionen (Fassade 3 und 4) und eine Stahlausführung (Fassade 6) gegenübergestellt. Um die ursprünglich geplante Fassade A mit einem passenden Aluminiumsystem vergleichen zu können, wurde aus oben genannten Gründen der Gebrauchstauglichkeit (vgl. 7.2.1) ein Aluminiumsystem mit etwa der gleichen Durchbiegung ausgesucht. Die Fassadensysteme sind mit ihren Auswahlkriterien in Tabelle 7.4 dargestellt.

Tab. 7.4: Ausgewählte Fassadensysteme für ökologische Betrachtungen

	Material	Stat. System*	Pfostenabstand [m]	Querschnitte	Max. Ausnutzung Pfosten**	Max. Ausnutzung Riegel**	Max. Verformung [cm]	Masse [t] ***
1	AW 6060 T66	D	1 m	Aa	0,98	0,08	3,8	2,70
2	AW 6060 T66	D	1 m	Bb	0,76	0,19	4,0	1,30
3	S235 (St 37)	D	1 m	D2d1	0,76	0,13	1,69	2,63
4	AW 6060 T66	G	2 m	C1c2	0,95	0,72	2,15	0,87
5	AW 6060 T66	G	2 m	D3d2	0,94	0,82	2,35	0,88
6	S235 (St 37)	G	2 m	D1d1	0,97	0,68	1,31	1,72

* D= Durchlaufträger, G= Gerberträger

** Die Auswahl der Systeme erfolgte nach DIN 4113 und DIN 18800

*** Die Masse umschließt Pfosten, Riegel und Zubehör, jedoch keine Dichtungen und Gläser

Die Massenverteilung obiger sechs Konstruktionen ist je nach Bauteil (z. B. Pfosten, Riegel, Abdeckprofil etc.) im Anhang B.2 dargestellt. Im Durchschnitt beträgt der Anteil der Tragkonstruktionen, d. h. Pfosten und Riegel, am Gesamtsystem knapp 60%. Die restlichen 40% Masse sind auf die zugehörigen Komponenten, wie z. B. Andruckprofile, Adapterprofile, Klemmleisten und Deckschalen etc. zurückzuführen.

Als funktionelle Einheit für die folgenden ökologischen Betrachtungen wurde jeweils ein Quadratmeter der oben ausgewählten Fassadensysteme, d. h. nur der Metallanteil ohne Dichtungen und Verglasung, definiert.

7.3.2 Modellierung

Bei den Vergleichen wurden die Oberflächenbeschichtungen und dementsprechend die Recyclingraten variiert. Für Aluminium wurden blanke, eloxierte und pulverbeschichtete (80 µm) Profile bilanziert. Die jeweiligen Lebensdauern wurden basierend auf GFÖB (2005) kalkuliert. Für blanke sowie eloxierte Profile wurden somit 80 Jahre und für die Pulverbeschichtung 30 Jahre Haltbarkeit angesetzt.

Für Stahl wurde die Feuerverzinkung (65 µm), die Pulverbeschichtung (80 µm) sowie beides kombiniert als Duplexsystem (145 µm) berücksichtigt. Die Schichtdicken entsprechen dabei den Standardwerten gemäß DIN EN 1461 und DIN EN 12944.

Die Lebensdauern der Stahlbeschichtungen wurden mit Hilfe von DIN EN 12944 und GFÖB (2005) ermittelt. Für verzinkte Stahlbauteile ergeben sich so 40 Jahre Haltbarkeit, für Pulverbeschichtungen 30 Jahre und für die Duplexbeschichtung 50 Jahre. Da unbeschichteter Stahl unter Witterungseinfluss korrodiert, wurden blanke Stahlprofile innerhalb der folgenden Ökobilanzierung nicht berücksichtigt.

Instandsetzungsmaßnahmen in Form von Beschichtungserneuerungen wurden sowohl für Aluminium als auch Stahl lediglich für die Oberflächen unter Witterungseinfluss angesetzt. Die für eine Lebensdauer von 80 Jahren angesetzten Erneuerungen sind in Tabelle 7.5 dargestellt.

Die Recyclingraten zur Anwendung der wertbereinigten Substitutionsmethode wurden für beide Metalle entsprechend ihrer Beschichtung anhand Tabelle 5.5 in Kapitel 5 ermittelt. Dabei ist anzumerken, dass die Recyclingraten von Stahlkonstruktionen in der Regel niedriger sind als von Aluminiumkonstruktionen (vgl. Kapitel 6.2.4). Da allerdings hierzu bis dato keine konkreten Daten zur Verfügung stehen, wird im Rahmen dieser Arbeit Stahl analog zu Aluminium behandelt (Tab. 7.5).

Tab. 7.5: Modellierung der Nutzungsphase und des Recyclings der Fassadensysteme

Oberflächenbehandlung	Erneuerung	Recyclingrate [R]
Aluminium blank	---	$94,6\% = 98\% \cdot 98,5\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Aluminium eloxiert	---	$94,6\% = 98\% \cdot 98,5\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Aluminium pulverbeschichtet	nach 30 und 60 Jahren	$89,6\% = 98\% \cdot 93,25\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Stahl verzinkt	nach 40 Jahren	$92\% = 98\% \cdot 95,75\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Stahl pulverbeschichtet	nach 30 und 60 Jahren	$89,6\% = 98\% \cdot 93,25\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Stahl Duplexbeschichtung	nach 50 Jahren	$89,6\% = 98\% \cdot 93,25\% \cdot 98\% \cdot 100\%$

7.3.3 Wirkungsabschätzung und Bewertung

Die Ergebnisse für die reinen Metallkonstruktionen, d. h. ohne Verglasung und Dichtungen, sind in Tabelle 7.6 enthalten. Die ursprünglich geplante Fassade 1 hat dabei in jedem Fall die höchsten Bilanzwerte. Da die Querschnitte an die Belastung nicht effektiv angepasst sind, ergeben sich für dieses System große Massen und folglich die entsprechend ungünstigen Wirkkategorien. Die Ergebnisse von Aluminiumfassade 2 sind in jeder Wirkkategorie günstiger als die Stahlfassade 3. Auch beim Vergleich der Fassaden 4, 5 und 6 erzielen die Aluminiumkonstruktionen in allen analysierten Wirkkategorien die besseren Werte.

Bei der Oberflächenbehandlung von Aluminium ist bei der Herstellung die Pulverbeschichtung zwischen 10% (KEA_{ne}) und 81% (GWP100) umweltverträglicher als das Eloxieren (vgl. EcoInvent, 2003). Aufgrund der daraus resultierenden Recyclingraten sind jedoch die eloxierten Bauteile am Lebenszyklusende effizienter (vgl. Tab. 7.6). Bei Stahl sind die Bilanzwerte für das Verzinken grundsätzlich etwas günstiger als für das Pulverbeschichten. Das Duplexverfahren erzielt hingegen die deutlich höchsten Werte in den jeweiligen Wirkkategorien.

In Abbildung 7.11 sind die Ergebnisse der Wirkkategorien für die gesamte Fassade, d. h. mit Dichtungen und Gläser, veranschaulicht. Hierbei liegt der Fokus auf eloxierten Aluminiumprofilen und verzinkten Stahlprofilen. Der Anteil der Verglasung ist in den betrachteten Wirkkategorien deutlich am Höchsten. Dies kann durch den größeren Flächenanteil erklärt werden. Die Bilanzwerte der Dichtungen sind sowohl von der Masse als auch von dem verwendeten Material abhängig. Bei den betrachteten Fassaden 1, 2, und 4 ist z. B. die Dichtungsmasse nahezu doppelt so groß wie bei der Stahlfassade. Offensichtlich wird hierdurch die geringere Wärmedämmung von Aluminium ausgeglichen. Insgesamt wirkt sich Silikon als Dichtungsmaterial deutlich günstiger aus als EPDM und insbesondere EPS.

Tab. 7.6: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung je nach Fassadensystem und Beschichtung für eine Lebensdauer von 80 Jahren

Fassadensystem (hier nur Metallkonstruktion ohne Verglasung und Dichtung) mit Beschichtung		KEAne	KEAe	GWP100	AP	NP	TOPP
		[MJ/m ²]	[MJ/m ²]	[kg CO ₂ äq/m ²]	[kg SO ₂ äq/m ²]	[10 ⁻² kg PO ₄ äq/m ²]	[10 ⁻¹ kg NMVOCäq/m ²]
1	Aluminium blank	273,397	38,479	17,338	0,079	0,626	0,563
	Aluminium eloxiert	281,962	38,479	17,338	0,079	0,626	0,563
	Aluminium pulverbeschichtet	351,475	54,815	22,621	0,103	0,839	0,743
2	Aluminium blank	131,806	18,551	8,359	0,038	0,302	0,272
	Aluminium eloxiert	138,195	19,305	8,763	0,040	0,315	0,283
	Aluminium pulverbeschichtet	182,631	27,328	11,753	0,052	0,433	0,381
3	Stahl verzinkt	212,471	15,510	10,450	0,064	0,737	0,593
	Stahl beschichtet	219,154	13,624	10,705	0,070	0,721	0,581
	Stahl duplex	230,106	16,207	11,426	0,076	0,788	0,626
4	Aluminium blank	88,169	12,409	5,591	0,025	0,202	0,182
	Aluminium eloxiert	91,959	12,702	5,784	0,026	0,208	0,187
	Aluminium pulverbeschichtet	120,677	17,915	7,686	0,034	0,283	0,249
5	Aluminium blank	89,292	12,567	5,663	0,026	0,204	0,184
	Aluminium eloxiert	93,743	12,911	5,889	0,027	0,212	0,190
	Aluminium pulverbeschichtet	122,590	18,155	7,804	0,035	0,287	0,253
6	Stahl verzinkt	138,804	10,110	6,824	0,042	0,481	0,387
	Stahl beschichtet	142,993	8,903	6,984	0,046	0,471	0,380
	Stahl duplex	150,068	9,972	7,176	0,046	0,498	0,396

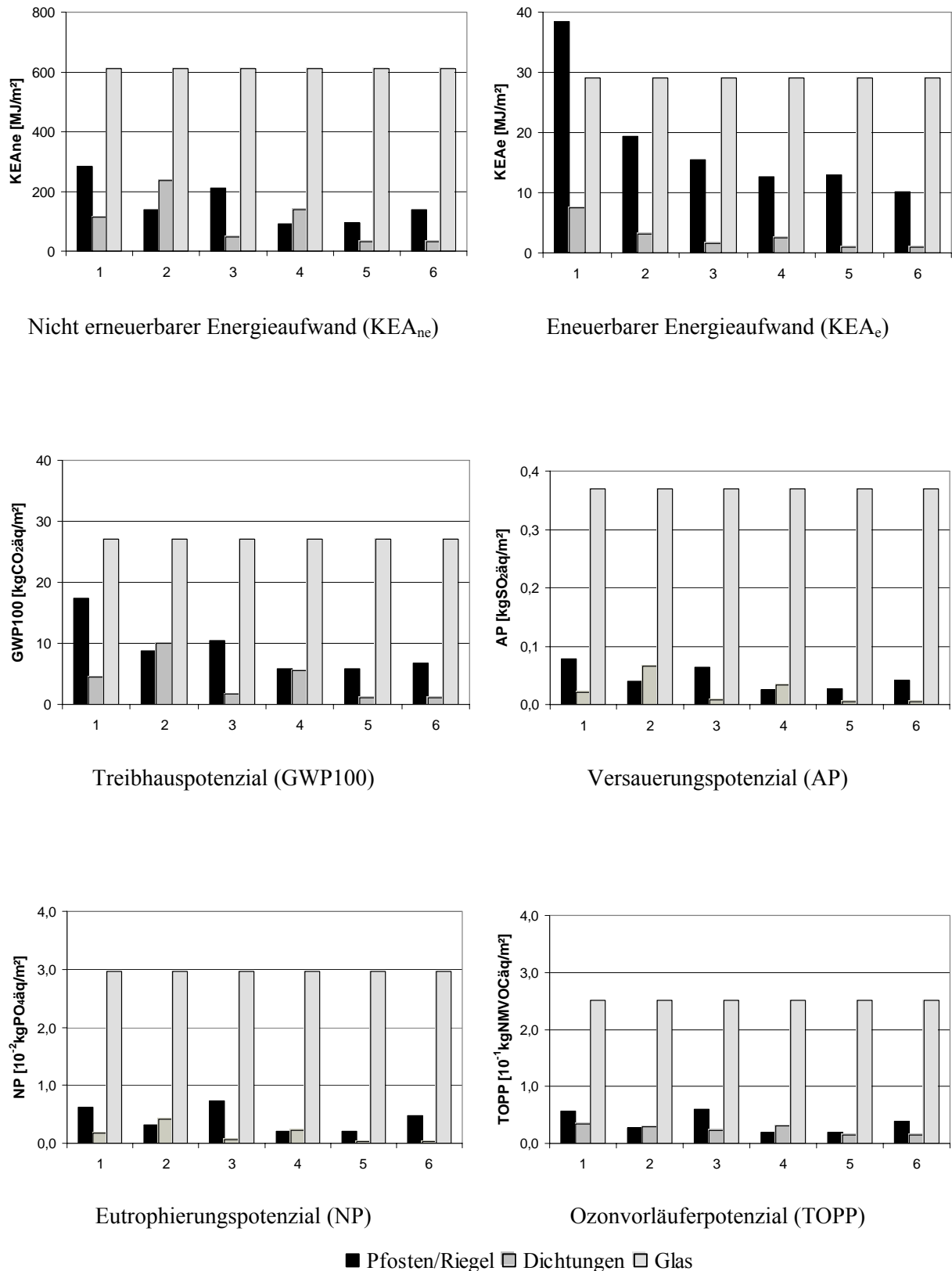


Abb. 7.11: Ergebnisse der Wirkkategorien pro m² Fassadesystem mit Glas und Dichtungen (vgl. System 1 bis 6 von Tab. 7.4 mit eloxiertem Aluminium und verzinktem Stahl)

Um die Bedeutung des Recyclingvorgangs zu veranschaulichen, wird nachstehend der nicht erneuerbare Energieaufwand (KEA_{ne}) der Fassaden in Abhängigkeit der Recyclingrate dargestellt (vgl. Abb. 7.12 bis Abb. 7.15). Bestandteil des Vergleichs sind jeweils eine Stahl- und eine Aluminiumfassade mit gleichem Pfostenabstand. Die Aufwendungen während der Nutzungsphase werden dabei zunächst vernachlässigt.

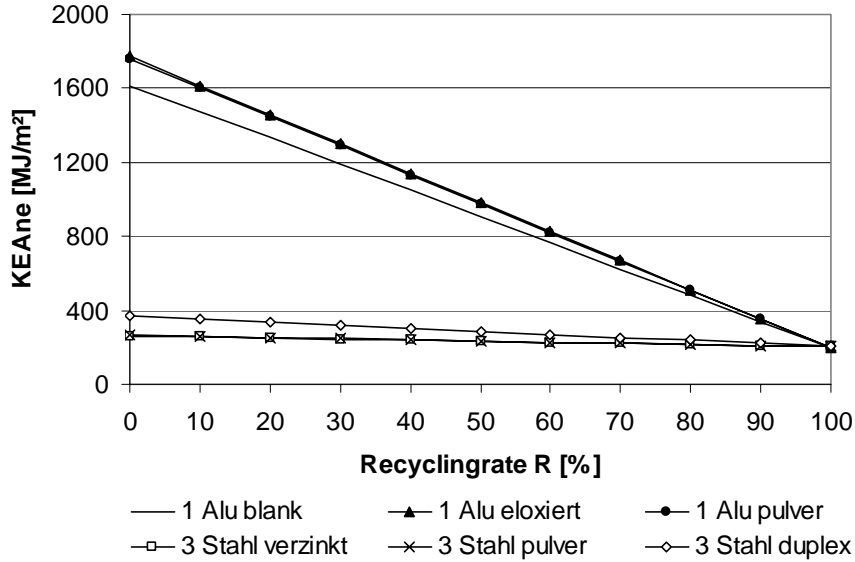


Abb. 7.12: Vergleich des KEA_{ne} von Fassade 1 und 3 in Abhängigkeit der Recyclingrate

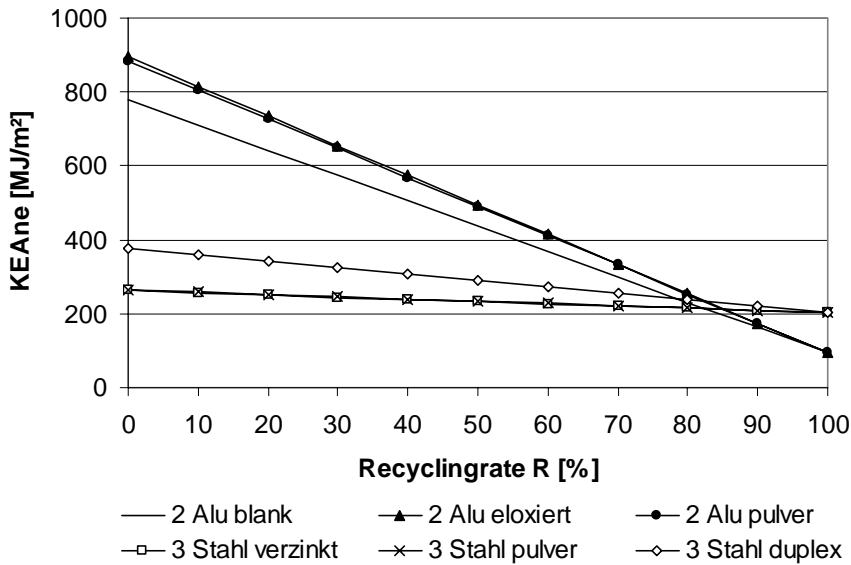


Abb. 7.13: Vergleich des KEA_{ne} von Fassade 2 und 3 in Abhängigkeit der Recyclingrate

Beim Vergleich von Fassade 1 mit Fassade 3 ist ein Ausgleich von Aluminium und Stahl in energetischer Hinsicht erst bei einer Recyclingrate von ca. 100% möglich. Dies ist allerdings in der Praxis nicht realisierbar. Fassade 2 und 3 haben hingegen bereits ab einer Recyclingrate von ca. 80 bis 85% für beide Materialien die gleiche Energiebilanz. Es zeigt sich erneut, dass die Aluminiumquerschnitte von Fassade 2 im Gegensatz zu Fassade 1 belastungsorientiert und dadurch deutlich wirtschaftlicher ausgelegt sind.

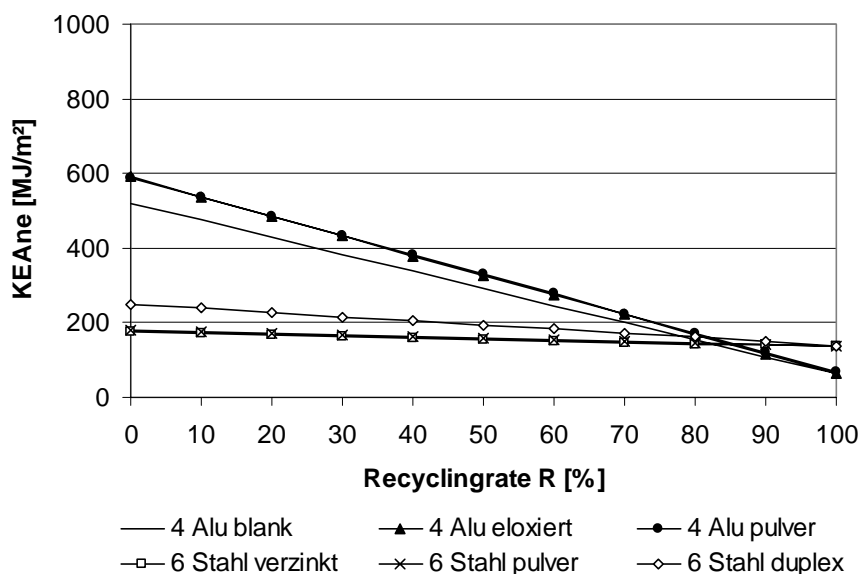


Abb. 7.14: Vergleich des KEA_{ne} von Fassade 4 und 6 in Abhängigkeit der Recyclingrate

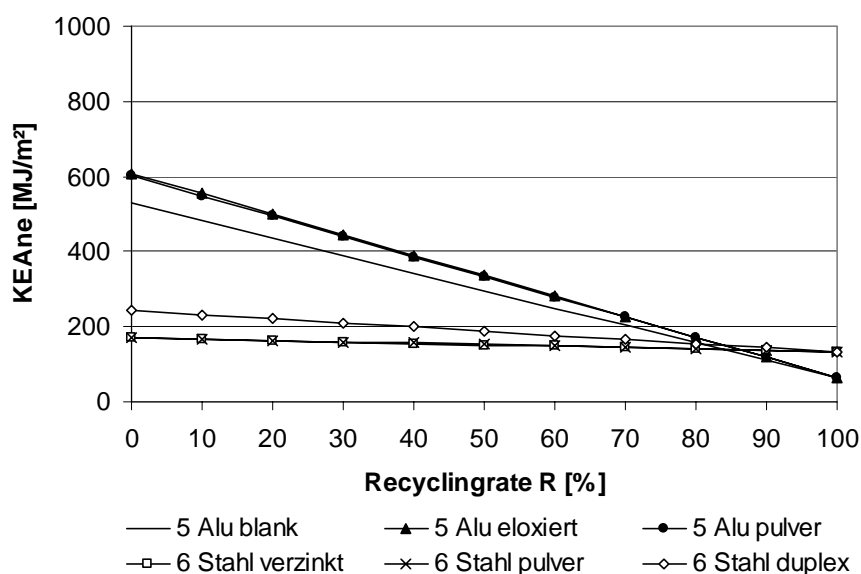


Abb. 7.15: Vergleich des KEA_{ne} von Fassade 5 und 6 in Abhängigkeit der Recyclingrate

Bei den Fassaden 4 bis 6 ist die Tendenz ähnlich wie bei Fassade 2 und 3. Auch hier haben die Aluminiumkonstruktionen ab Recyclingraten von ca. 80% einen niedrigeren Energieverbrauch als die Stahlkonstruktionen.

Im Anhang B.3 sind die oben dargestellten Ergebnisse inklusive der Nutzungsphase gegeben. Es zeigt sich dass die Wartungsaufwendungen keinen erkennbaren Einfluss auf den Kurvenverlauf bzw. den jeweiligen „Break-Even-Point“ haben.

7.4 Anwendung der EnEV

Um die Bedeutung der Nutzungsphase und den Einfluss der Metallkonstruktion weiter zu untersuchen wurden obige Fassadensysteme gemäß EnEV berechnet und ausgewertet. Zu diesem Zweck wurde der jährliche Heizwärmebedarf für die Räume hinter den Fassaden ermittelt. Die verbrauchte Heizwärme ist dabei maßgeblich von den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte), z. B. U_w -Wert für Fenster und U_{cw} -Wert für Fassaden, abhängig. Diese werden von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Abmessungen und Flächenanteil der Verglasung
- Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung U_g (Nennwert)
- Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient im Übergangsbereich zwischen Glas und Rahmen Ψ_g
- Abmessungen und U-Wert des Rahmens U_f

Mit Hilfe obiger Angaben kann der U_{cw} -Wert für Fassadenkonstruktionen nach DIN EN 13947-1 bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurde aus den vorhandenen Plänen des Alten Hofs ein hinter der Fassade liegendes Gebäudevolumen von 959 m³ ermittelt. Damit wurden die U-Werte und der benötigte Heizwärmebedarf für das definierte Raumvolumen je nach Fassadentyp, d. h. die Aluminiumkonstruktionen A, B, C und die Stahlkonstruktion D von 7.1, berechnet (vgl. Tab. 7.7)

Tab. 7.7: U-Werte und Heizwärmebedarf für Raumvolumen je nach Fassadentyp

Fassadentyp	U_g -Wert [W/m ² K]	U_f -Wert [W/m ² K]	U_{cw} -Wert [W/m ² K]	Heizwärmebedarf [kWh/a]	Heizwärmebedarf [%]
A (1 m)*	1,1	2,8	1,44	17356	100
B (1 m)*	1,1	1,1	1,3	15245	88
C (2 m)*	1,1	1,1	1,2	15394	89
D (1 m)*	1,1	2,2	1,36	16145	93

*Pfostenabstand

Fassade A weist den höchsten U_{cw} -Wert und folglich den höchsten Heizwärmebedarf. Dies ist auf die transparente Systemgestaltung und die dadurch geringe Masse der Dichtprofile zu erklären. Im Gegensatz dazu erzielen die Systeme B, C und D einen ca. 10% geringeren Heizwärmeverbrauch. Bei Fassade D sind die Ansichtsflächen von Pfosten und Riegel um 0,5 cm kleiner als bei den Systemen B und C. Trotzdem ergibt sich aufgrund des höheren U_f -Werts der Rahmen ein ungünstiger U_{cw} -Wert für Fassade D. Verglichen mit Fassade B und C führt dies zu einem 4% höheren Heizwärmebedarf. Demzufolge verbrauchen die Aluminiumsysteme B und C hier am wenigsten Heizenergie.

Auf Grundlage der oben dargestellten Berechnungen kann gefolgert werden, dass sowohl das Rahmenmaterial als auch die Ansichtsbreite des Profils nur geringen Einfluss auf die U_{cw} -Wert-Berechnung von Fassadensystemen ausübt. Maßgebliche Bedeutung hat vielmehr die Verglasung und die Ausführung der Wärmedämmung. Folglich gilt es thermisch optimierte Profilsysteme, d. h. mit geringem U-Wert, einzusetzen. Bei Aluminiumfassaden können beispielsweise gute U_f -Werte durch das Einbringen von Dämmprofilen zwischen Pressleisten und Strangpressprofilen der Unterkonstruktion erzielt werden. Bei den Stahlkonstruktionen ist dieses Verfahren wegen der begrenzten Profilgeometrie nur bedingt anwendbar.

Vergleicht man nun den Heizwärmebedarf während der angenommenen Lebensdauer von 80 Jahren mit dem KEA_{ne} für Erstellung, Wartung und Entsorgung bzw. Recycling der Fassadensysteme, so wird der Stellenwert des Aluminium- bzw. Stahleinsatzes angesichts der Auswirkungen der Nutzungsphase klar ersichtlich (vgl. Abb. 7.19).

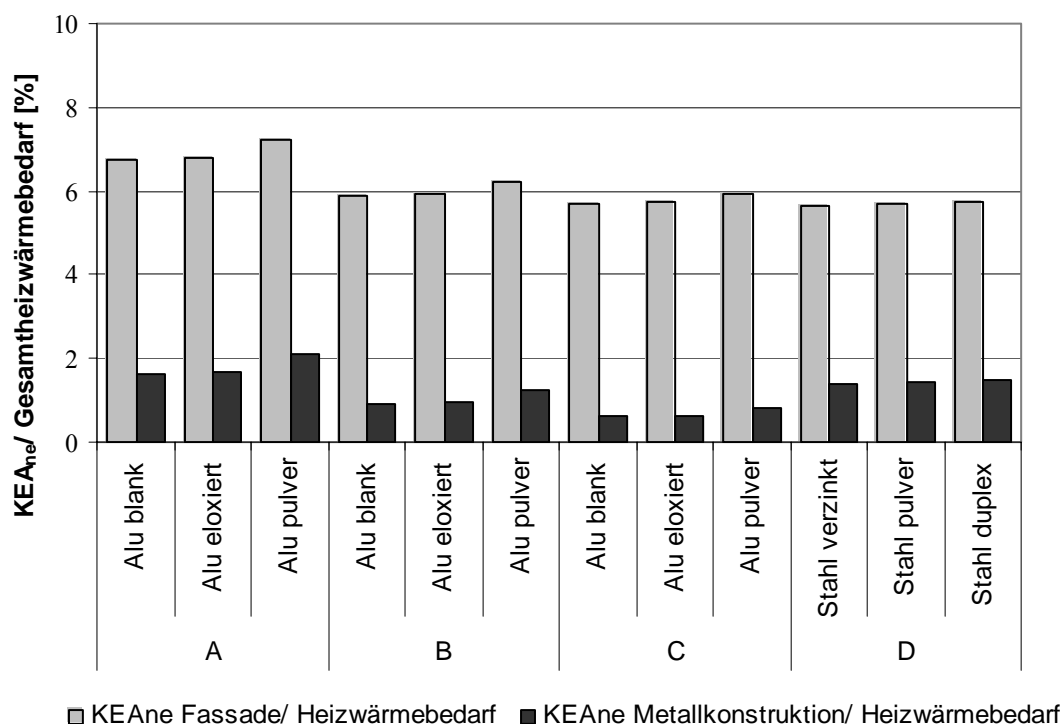


Abb. 7.16: Anteil des KEA_{ne} für Erstellung, Wartung und Entsorgung bzw. Recycling der Fassadensysteme verglichen mit dem jeweiligen Heizwärmebedarf (Lebensdauer 80 Jahre)

Der KEA_{ne} der Fassadensysteme beträgt während der 80jährigen Lebensdauer lediglich 6 bis 7% des jeweiligen Verbrauchs an Heizenergie. Der Anteil der Metallkonstruktion ist mit 0,6 bis 2% noch geringer. Auch in obiger Abbildung zeigt sich zum einen die unwirtschaftliche Ausrichtung der Profile in Fassade A mit einem maximalen Anteil von ca. 2,1% (A Alu pulver) und zum anderen der Einfluss der einzelnen Beschichtungsvarianten. Insgesamt ist die ökologische Bedeutung von Errichtung, Wartung und Entsorgung der Fassadenkonstruktion angesichts des Energieverbrauchs für die Heizung während der Nutzungsphase äußerst gering. Zudem ist anzumerken, dass die ggf. benötigte Kühlenergie nicht berücksichtigt ist.

7.5 Lebenszykluskostenanalyse

7.5.1 Systeme, Kostendaten und Modellierung

Bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten für die in 7.3.1 ausgewählten sechs Fassadensysteme wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit die Verglasungen und die Dichtungen nicht berücksichtigt. Als Oberflächenbehandlungen wurden die in Tabelle 7.5 definierten Systeme berechnet.

Die verwendeten Kostendaten basieren auf direkten Informationen von Metallbauunternehmen, Baumärkten, Herstellern sowie Monteuren und spiegeln damit die aktuellen Marktverhältnisse wider.

Für die Montage wurde angenommen, dass der Innenhof des Alten Hofes für Lagerungen und Arbeiten vor Ort genutzt werden kann. Somit entfallen die Kosten für Verkehrsumleitungen

bzw. für Flächenanmietungen. Übrig bleiben die Aufwendungen für Arbeitskräfte, Maschinen (z. B. Kran) und Gerüst. Die Reinigung – inkl. des Einsatzes eines Hubsteigers – erfolgt im Rahmen der jährlichen Gesamtreinigung für alle Fassaden in gleicher Art und Weise. Als Instandsetzungsintervalle wurden wie in 7.3 bei der Pulverbeschichtung 30 Jahre, bei der Feuerverzinkung 40 Jahre und bei der Duplexbeschichtung 50 Jahre angesetzt. Für die eloxierten Fassaden wurde lediglich die Reinigung beachtet. Analog zur Ökobilanzierung wurden für die Erneuerungen die Ansichtsflächen angerechnet. Der Rückbau wurde gemäß Angaben der Hersteller für beide Materialien mit 46% der Montagekosten für Personal und 75% für Maschinen kalkuliert. Der Schrottwert der gebrauchten Metallteile ging schließlich als Ertrag in die Lebenszykluskosten mit ein.

7.5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Fassadenkonstruktionen sind im Folgenden dargestellt (vgl. Abb. 7.17 und Abb. 7.18).

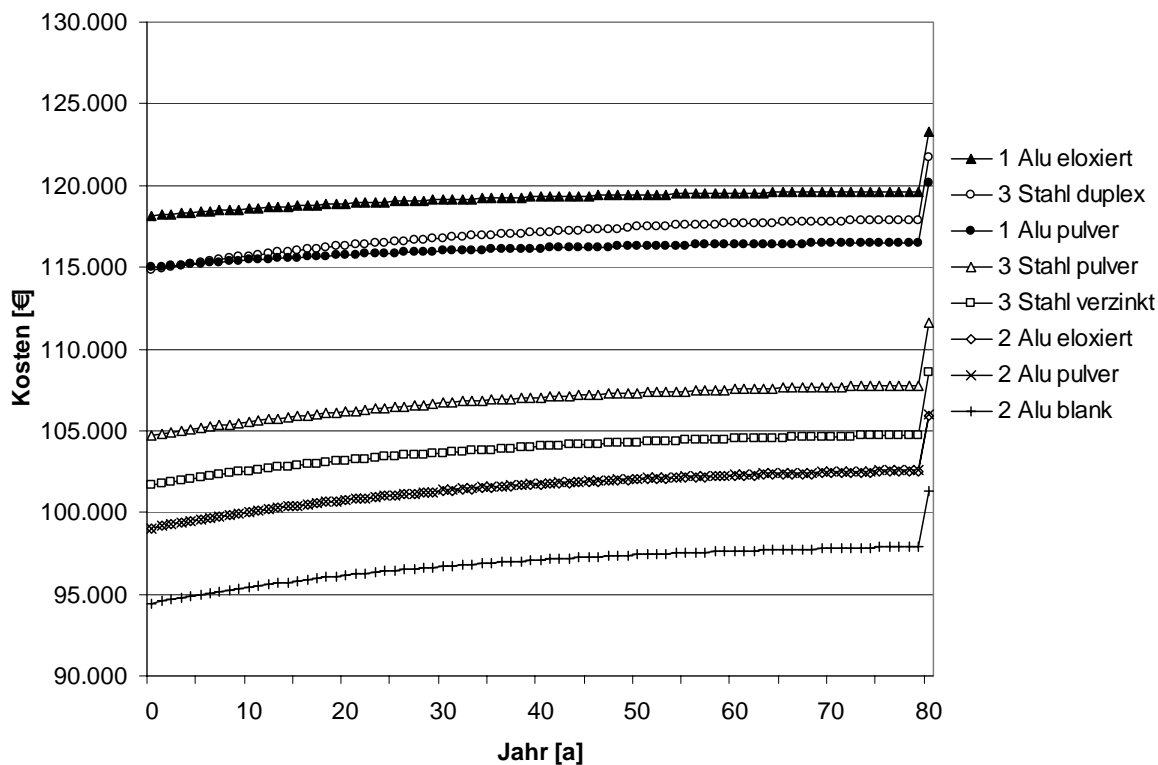


Abb. 7.17: Kapitalwert der kumulierten Lebenszykluskosten der Fassadenkonstruktionen (Metall ohne Glas und Dichtungen) bei 1 m Pfostenabstand

Bei den Fassaden mit 1 m Pfostenabstand verursacht die eloxierte Variante von Fassade 1 die höchsten Kosten. Diese sind auf die Verwendung nicht-optimierter und gleichzeitig komplexer Querschnitte mit hohen Profilpreisen zurückzuführen.

Danach folgen die günstigeren duplexbeschichtete Stahlfassade 3 und die pulverbeschichtete Fassade 1. Beim Vergleich dieser Varianten, wird die effektive Nutzungsphase von Fassade 1 (Alu pulver) und der deutliche größerer Wartungsaufwand für das System 3 (Stahl duplex) offensichtlich. Grund hierfür ist, dass Fassade 1 durch die Befestigung der Glasscheiben mit isolierten y-Profilen keine Metallaußenflächen hat. D. h. hier sind neben den Reinigungsaufwendungen keinerlei Wartungsarbeiten, z. B. in Form eines neuen Anstrichs, erforderlich.

Die unwirtschaftlichen Querschnitte von Fassade 1 werden beim Vergleich mit Fassade 2 erneut deutlich. Letztere verbraucht 50% weniger Material und ist somit entsprechend günstiger. Die blanke Aluminiumfassade 2 liegt insgesamt im niedrigsten Preisbereich.

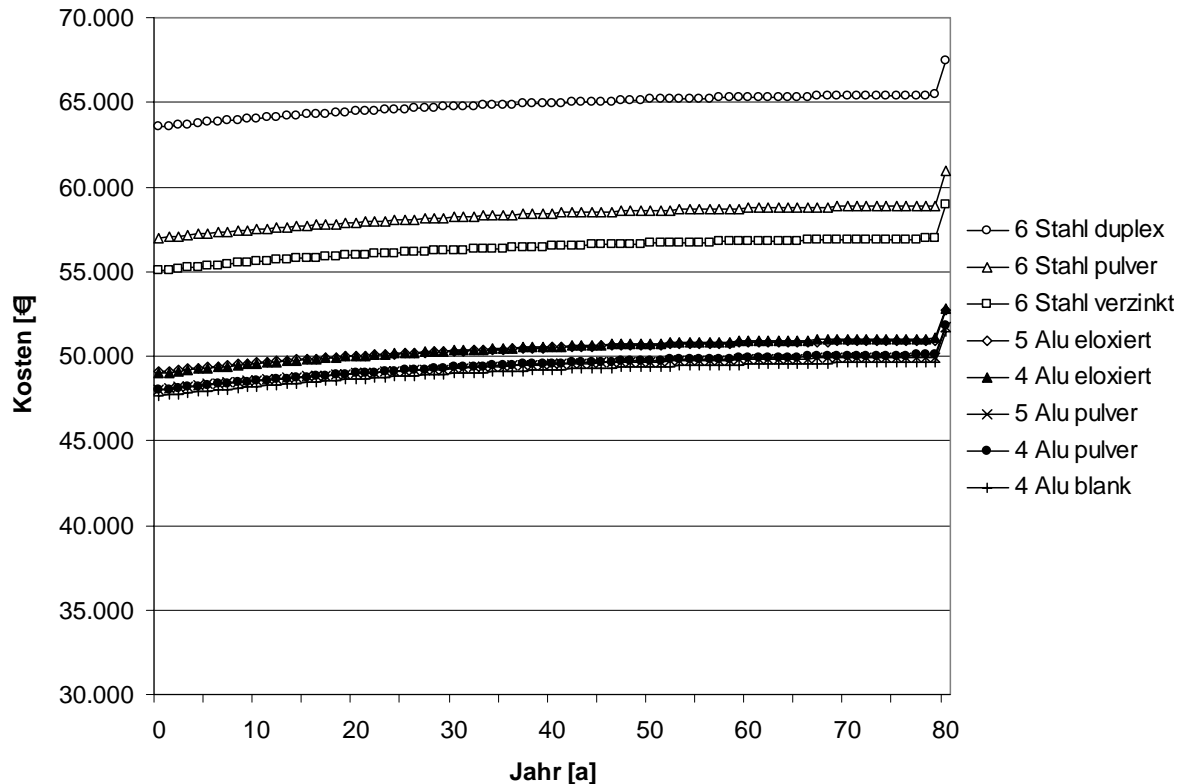


Abb. 7.18: Kapitalwert der kumulierten Lebenszykluskosten der Fassadenkonstruktionen (Metall ohne Glas und Dichtungen) bei 2 m Pfostenabstand

Der Vergleich der Fassadensysteme 4, 5 und 6 zeigt von Anfang an höhere Kosten für die Stahlfassade. Dies ist auf die nahezu doppelt so große Masse und die notwendige Oberflächenbehandlung des Stahlsystems zurückzuführen.

Die im Vergleich zu Fassade 4 bis 6 generell höheren Kosten von Fassade 1 bis 3 sind auf den höheren Material- und Montageaufwand aufgrund des kleineren Pfostenabstands zurückzuführen. Die hohen Anfangskosten für Stahl kommen durch die Anwendung nicht-standardisierter Profile und den gewichtsbedingten Mehraufwand bei der Errichtung zustande. Bei den Beschichtungen ist die Feuerverzinkung von Stahl grundsätzlich am günstigsten und die Duplexbeschichtung mit den deutlich höchsten Kosten verbunden. Die Kosten für die Pulverbeschichtung von Aluminium bzw. von Stahl und für die Eloxierung sind höher als die Verzinkung und nehmen in der aufgezählten Reihenfolge zu.

7.6 Wertung des Softwarekonzepts von Ekkerlein & Neuberg (2004)

Die Fassadenkonstruktion sollte ursprünglich mit dem in Kapitel 2.4.6 beschriebenen Softwaretool bilanziert werden. Ziel war es, die implementierte Datenbank sowohl mit ökologischen als auch mit wirtschaftlichen Kennwerten zu erweitern und eine ganzheitliche Bewertung von Metallkonstruktionen zu ermöglichen.

Zu diesem Zweck wurden die Fassadensysteme zunächst im Architectural Desktop (ADT) modelliert und durch die Belegung mit Materialeigenschaften in ein Produktmodell umgewandelt (vgl. Abb. 7.19).

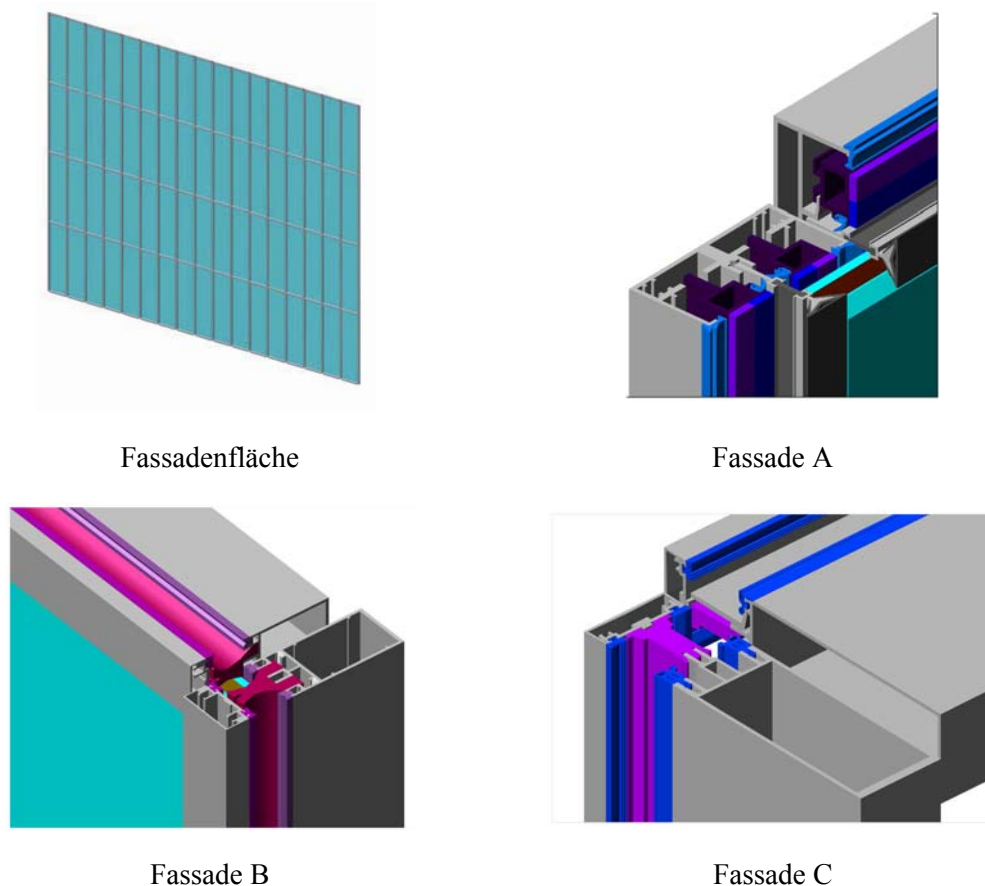


Abb. 7.19: Modellierung der Fassadensysteme als Produktmodelle im ADT

Die Datenmengen der Produktmodelle "Fassade" waren allerdings letztlich so groß, dass sie mit der Rechenleistung der verfügbaren Workstations kaum zu bewältigen war. Die Folge davon waren langwierige und instabile Rechenläufe.

Große Detailtreue sowie umfangreiche Produktmodelle, wie bei obigen Fassadenkonstruktionen der Fall, machen einen Einsatz des ADT aufgrund der damit verbundenen Rechenzeit offensichtlich unpraktikabel. Insofern wurde auf eine weitere Anwendung innerhalb der vorliegenden Arbeit verzichtet.

Angesichts der Möglichkeiten der Software wäre es allerdings wünschenswert die vorhandenen Tools weiterzuentwickeln und in der Praxis umzusetzen. Voraussichtlich würde bereits die Anpassung der Tools an ein 3-D-orientiertes Zeichenprogramm eine Verbesserung bewirken.

7.7 Schlussfolgerung

Die Ausgangssituation bei den Fassadensystemen war durch ein konkretes Bauvorhaben gegeben. Hierbei war für ca. 300 m² Fassadenfläche eine möglichst transparente Pfosten-Riegel-Konstruktion zu wählen. Da für diese Randbedingungen jede Menge Standardsysteme mit unterschiedlichen Querschnitten, Abmessungen, Dichtungen etc. zur Verfügung stehen, stellt sich die Frage, welche Konstruktion für den Einsatz am besten geeignet ist.

In statischer bzw. **bemessungstechnischer** Hinsicht ist festzustellen, dass der Ersatz von Durchlaufträgern mit Gerberträgern eine Reduzierung der Biegemomente um 8 bis 31% zur Folge hat. Somit wird die Anwendung kleinerer Querschnitte ermöglicht, wodurch signifikante Materialeinsparungen gegeben sind. Bei der Vergrößerung der Pfostenabstände werden aufgrund der höheren Belastung zwar größere Querschnitte benötigt, dennoch kann der Materialverbrauch deutlich reduziert werden. Verglichen mit einem 1 m-Pfostenabstand benötigen Fassadensysteme mit 1,6 m-Pfostenabstand beispielsweise 35% und mit 2 m-Pfostenabstand sogar 47% weniger Metallmasse. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Wahl der Berechnungsnorm maßgeblichen Einfluss auf die Gestaltung der Aluminiumkonstruktion ausübt. Mit Ausnahme der Knicknachweise beim Durchlaufträger erzielt der EC 9 durchschnittlich 28% niedrigere Ausnutzungsgrade als DIN 4113. Die Tragfähigkeitsnachweise des EC 9 resultieren somit in einen geringeren Materialverbrauch. Gleichzeitig ist allerdings der signifikante Einfluss des Gebrauchstauglichkeitsnachweises zu beobachten. Ist der statische Nachweis beispielsweise knapp erbracht, so ist oftmals die zulässige Durchbiegung überschritten und ein entsprechend größeres Profil wird benötigt. Optimal sind somit Querschnitte mit einem minimalen Verhältnis von Fläche zu Trägheitsmoment.

Für die **ökologische** Bewertung wurden sechs Aluminium- und Stahlssysteme in Abhängigkeit der statischen Ausnutzung und der Durchbiegung ausgewählt. Bei diesen Systemen wurde der Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten und verschiedenen Beschichtungen analysiert.

Es ist zu beobachten, dass die Aluminiumfassaden ab einer gewährleisteten Recyclingrate von ca. 80% umweltfreundlicher sind als die Stahlkonstruktionen. Einzige Ausnahme bildet Fassadensystem 1, dessen Aluminiumquerschnitte nicht an die Belastung angepasst wurden. Die besseren Resultate der Aluminiumfassaden kommen durch das geringe Gewicht (ca. 50% der Stahlfassaden) und den effizienten Recyclingvorgang zustande. Im Hinblick auf die Oberflächenbehandlung wirkt sich bei Aluminium das Eloxieren vorteilhafter aus als das Pulverbeschichten. Dies ist auf die jeweiligen Recyclingraten zurückzuführen. Bei Stahl ist das Duplexsystem ökologisch ungünstiger als das Pulverbeschichten und das Feuerverzinken. Letzteres stellt die umweltfreundlichste Beschichtungsmethode dar.

Da die Nutzungsdauer an viele Annahmen geknüpft ist und nur auf Grundlage von Literaturangaben zu modellieren ist, wurde auch deren Auswirkungen innerhalb des gesamten Lebenszyklus untersucht. Es zeigt sich, dass die Aufwendungen für Wartungsarbeiten aufgrund der geringen Erneuerungsflächen der Metallkonstruktion keinen erkennbaren Einfluss auf die Gesamtbilanz ausüben.

Bei der Berechnung gemäß **EnEV** lässt sich feststellen, dass der Heizwärmebedarf für die hinter der Fassade liegenden Räume nur geringfügig von Rahmenmaterial und Ansichtsbreite beeinflusst wird. Maßgebend ist vielmehr die Ausführung der Wärmedämmung. Zudem hat der Energieverbrauch für Herstellung, Wartung und Recycling der Metallkonstruktion mit 0,6 bis 2% Anteil an der für die Lebensdauer benötigten Heizwärme nur sekundäre Bedeutung.

Die Ermittlung der **Lebenszykluskosten** zeigt, dass die Aluminiumfassaden bei belastungsorientierter Gestaltung kostengünstiger sind, als die Stahlfassaden. Die hohen Kosten der Stahlfassaden sind mit der Verwendung nicht-standardisierter Profile, den zwecks Korrosionsschutzes benötigten Beschichtungen und den gewichtsbedingten Mehraufwendungen bei Transport und Montage zu begründen. Im Hinblick auf die Oberflächenbehandlungen von Aluminium verursacht die Pulverbeschichtung etwas geringere Kosten als das Eloxieren. Bei den Stahlbeschichtungen ist die Verzinkung gefolgt von der Pulverbeschichtung am günstigsten, während das Duplexsystem die teuerste Variante darstellt. Der Anteil der Nutzungsphasen an den Gesamtkosten beträgt aufgrund der geringen Erneuerungsflächen weniger als 5%.

Die ganzheitliche Bewertung der Fassaden mit Hilfe des **ADT-Softwaretools** von Ekkerlein (2003) und Neuberg (2003) scheiterte an der Detailtreue der Metallkonstruktion. Der hierdurch entstehende Umfang der Datenmenge machte den Einsatz des ADT-Zeichenprogramms aufgrund der damit verbundenen Rechenzeiten unpraktikabel.

Aufgrund der Ergebnisse kann für die 300 m² Fassadenfläche eine blanke oder eloxierte Aluminiumausführung mit 2 m Pfostenabstand empfohlen werden. Aluminium ist bei dieser Anwendung aufgrund der multifunktionalen Profilgestaltung, der hohen Recyclingraten und der effektiven Nutzung sowohl in bemessungstechnischer, ökologischer als auch wirtschaftlicher Hinsicht vorteilhafter.

8 Schilderbrücken

Schilderbrücken dienen zur Befestigung von Verkehrsschildern, Wegweisern, Beleuchtungsmitteln, Kontrollsystemen sowie Leitsystemen und kommen vorwiegend bei Autobahnen zum Einsatz. Die Konstruktionen werden sowohl aus Aluminium als auch Stahl mit unterschiedlichen statischen Systemen und verschiedenen Spannweiten gefertigt. Aufgrund der ständigen Belastung durch Abgase und Tausalz etc., ist dabei ein ausreichender Korrosionsschutz unablässig. Für derartige Randbedingungen bietet somit das korrosionsresistente Aluminium optimale Voraussetzungen. Um dies zu quantifizieren, werden im Folgenden zwei unterschiedliche Aluminiumschilderbrücken analysiert.

8.1 Varianten

Kernpunkt der Untersuchungen sind eine vorgegebene Kragarm- und eine Rahmenkonstruktion. Beim **Kragarm** bestehen Riegel und Stiel aus zwei gekanteten Schalen, die mit einer Längsstumpfnah an den beiden schmaleren Seiten verbunden sind. Zur Aussteifung werden Querschotte und Längssteifen angeschweißt. (vgl. Abb. 8.1).

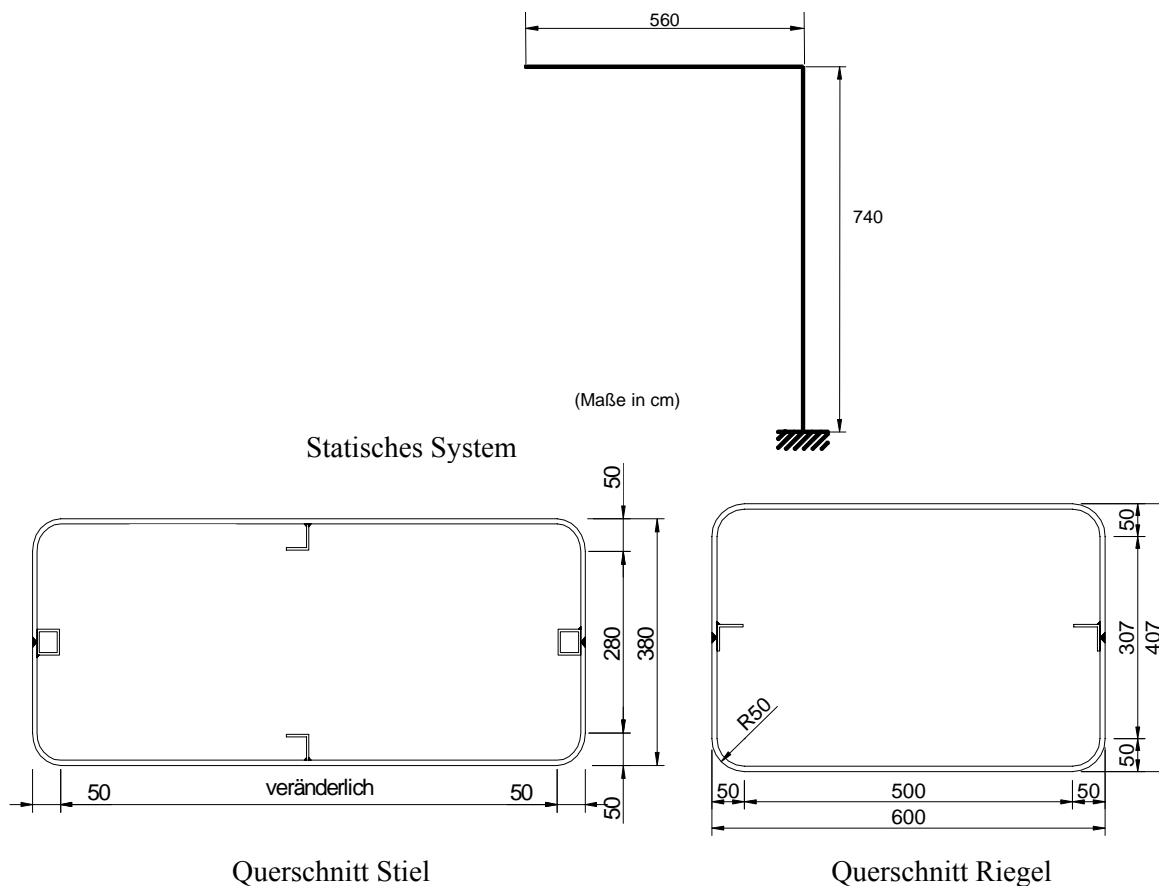


Abb. 8.1: Statisches System und Querschnitte des Kragarms

Der Querschnitt des Riegels ist über die Riegellänge konstant. Der Stiel ist gevoutet, wobei die schmalere Querschnittseite konstant bleibt und die breitere Seite mit zunehmender Höhe abnimmt. Die Bleche werden aus der Legierung AW 5083 O/H111 (EN) gefertigt, während bei den Profilen das Material AW 6082 T6 (EN) zum Einsatz kommt. Als Schweißzusatzwerkstoff wird AW 5183 (EN) verwendet.

Beim **Rahmen** bestehen Riegel und Stiel aus zwei Strangpressprofilen, die mit zwei Blechen verschweißt sind. Zur Aussteifung und Lasteinleitung werden zum einen Querschotte eingebaut und zum anderen Längssteifen in Form von Rechteckprofilen an die Bleche angeschweißt. Die Abmessungen der Querschnitte sind, wie bei der Kragarmkonstruktion, im Riegel konstant und im Stiel veränderlich (vgl. Abb. 8.2).

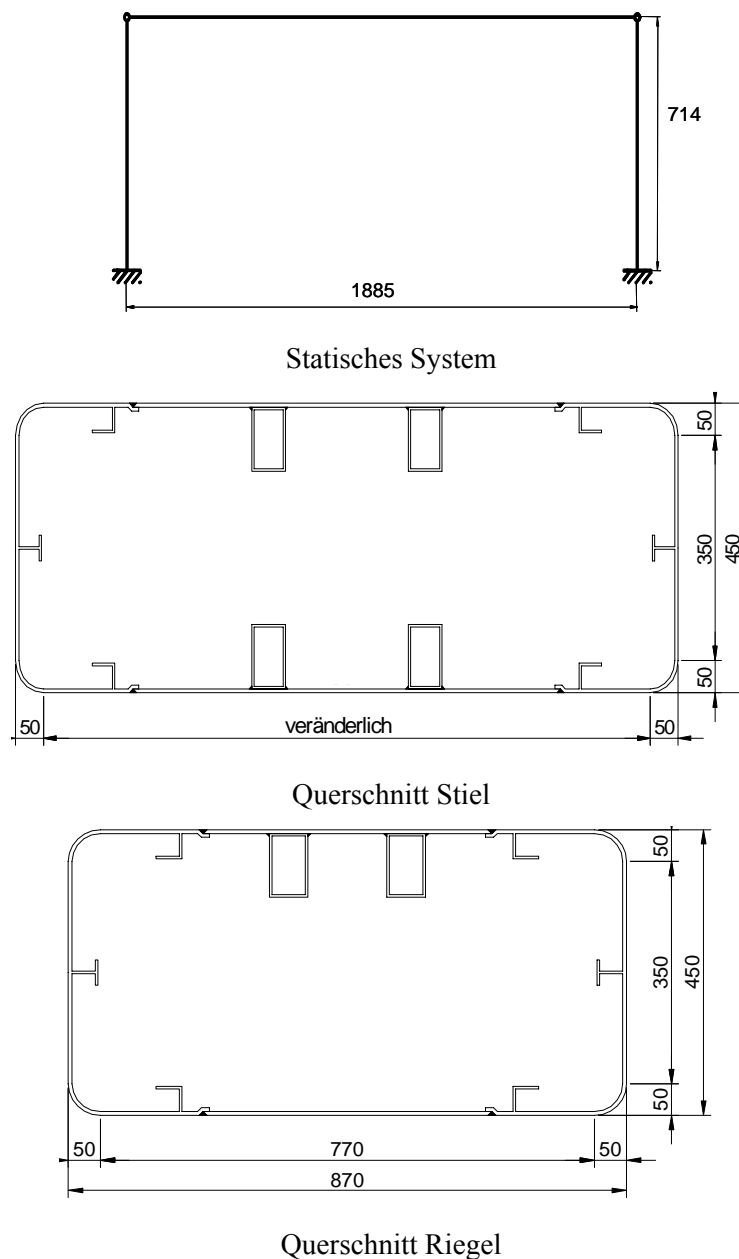


Abb. 8.2: Statisches System und Querschnitte des Rahmens

8.2 Bemessungstechnische Aspekte

8.2.1 Definition relevanter Lastfälle

Die Lasten, welche die Schilderbrücken abzutragen haben, sind von der Funktion sowie von den Umgebungsbedingungen des Einsatzortes abhängig. Eine einheitliche Bestimmung ist folglich nicht möglich. Seitens des Herstellers werden daher für jede Konstruktion charakteristische Lastfälle in Parameterform definiert.

Bei der Kragarmkonstruktion werden die vertikalen Lasten X_1 bis X_4 mit jeweils unterschiedlichen Lastangriffspunkt angesetzt. Diese reflektieren das Eigengewicht, Schnee und die Einwirkungen bei Inspektion und Reinigung (vgl. Abb. 8.3).

Beim Rahmen werden zum einen die Lastfälle X_1 bis X_3 bestimmt. Die vertikalen Lasten stehen dabei wie beim Kragarm für Eigenwicht und Wartungsarbeiten, während die horizontalen Einwirkungen Windlasten darstellen. Der Rahmenstiel wird zudem mit verschiedenen Kombinationen der Lastfälle X_{4i} und X_{5i} belastet. Hierdurch sollen unterschiedliche Stabilitätsfälle dargestellt werden (vgl. Abb. 8.3 und Abb. 8.4).

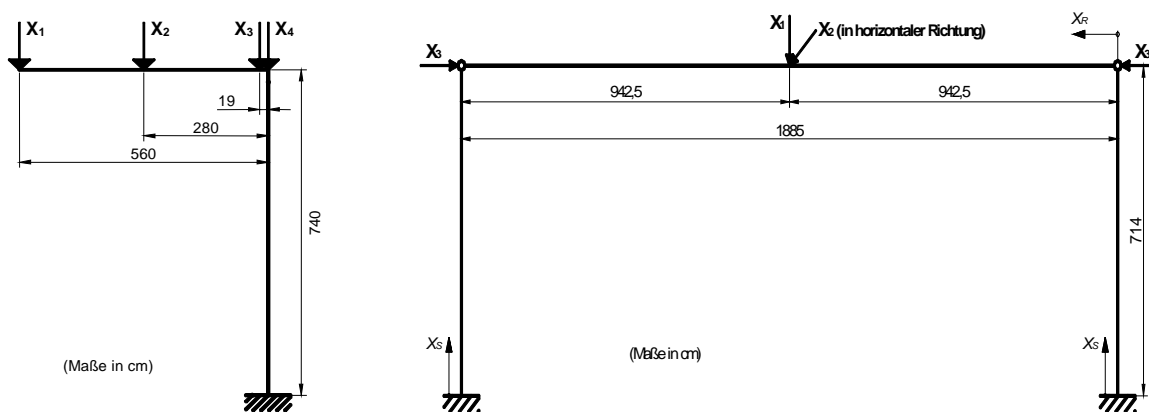


Abb. 8.3: Definierte Lastfälle des Kragarms und des Rahmens

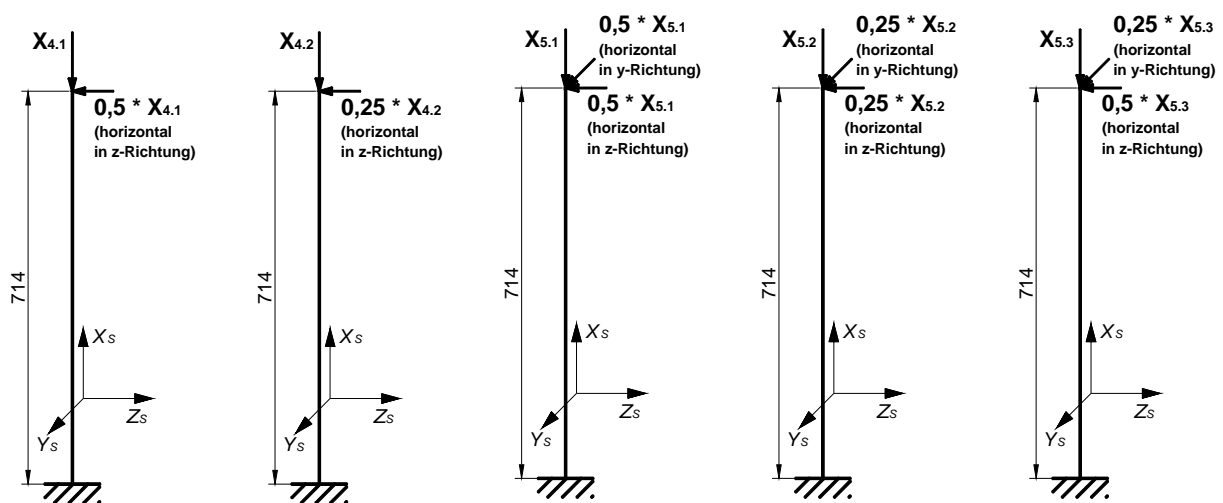


Abb. 8.4: Zusätzliche Lastfallkombination für die Rahmenstiele

8.2.2 Vergleich DIN 4113 - EC 9

Im Folgenden werden für jeden Lastfall X_i bzw. für die jeweils erforderlichen Nachweise die maximal möglichen Ausnutzungsgrade nach DIN 4113 und EC 9 miteinander verglichen. Hierzu werden die EC 9-Nachweise für die Lastfälle Eigengewicht ($\gamma_F = 1,35$) und Verkehrsbelastung ($\gamma_F = 1,5$) dargestellt und den Ergebnissen des Lastfalls H in DIN 4113 gegenübergestellt. In nachstehenden Abbildungen ist das Verhältnis der EC 9-Ergebnisse zu den DIN 4113-Werten enthalten. Von den Rechengängen I und II der Stabilitätsnachweise in DIN 4113 wurden die jeweils günstigeren Resultate aufgenommen.

Gemäß der Querschnittsklassifizierung des EC 9 sind alle Querschnitte der Beispielkonstruktionen in Klasse 4 einzustufen (vgl. Kapitel 4.2.2.1). Um die Gefahr des lokalen Beulens zu berücksichtigen ist daher eine entsprechende Abminderung der Blechdicken unter Druckbelastung erforderlich. Diese Reduzierung macht sich bei den Resultaten der Spannungs- und Stabilitätsnachweise deutlich bemerkbar. Dies ist beim Vergleich mit den DIN-Ergebnissen zu beachten.

8.2.2.1 Allgemeine Spannungsnachweise

In Abbildung 8.5 sind die Ergebnisse für **reine Druck- bzw. reine Biegebelastung** dargestellt.

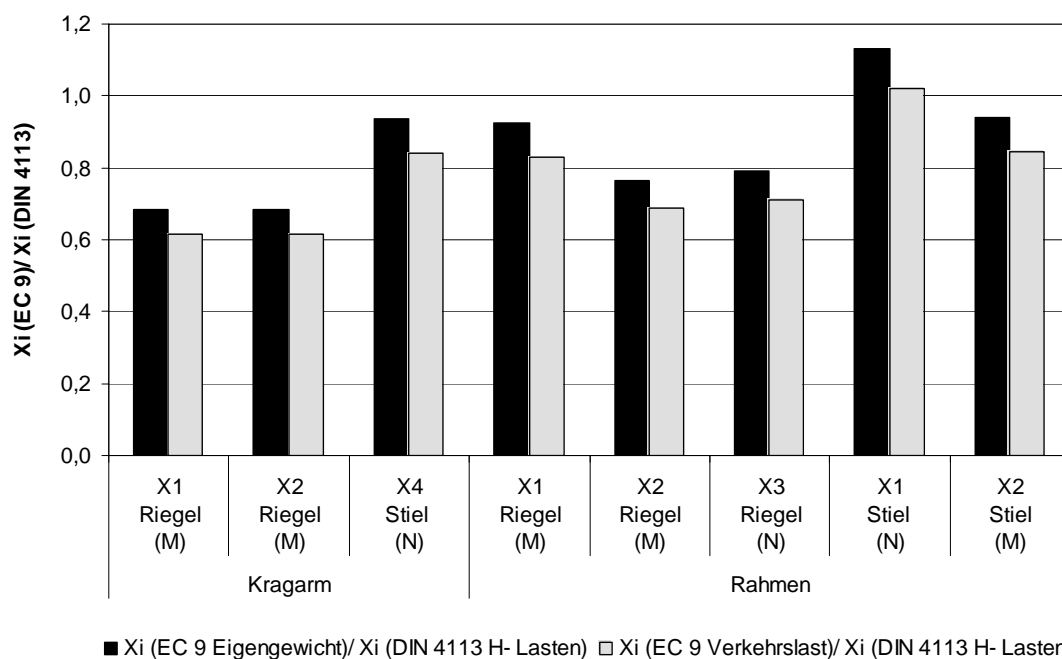


Abb. 8.5: Verhältnis der Kräfte X_i unter Druck bzw. Biegung nach EC 9 und DIN 4113

Die Ergebnisse von DIN 4113 sind bei fast allen betrachteten Belastungen höher als die Werte des EC 9. Wie oben bereits erwähnt ist dies mit den reduzierten Querschnitten gemäß Klasse 4 zu begründen. Bei „X1 Stiel (N)“ ist der Abminderungsfaktor ρ_c infolge lokalen Beulens beim gesamten Querschnitt größer als der Reduktionsfaktor $\rho_{0,haz}$ für die Wärmeeinflusszone. Da beim Biegenachweis immer der kleinere Wert von ρ_c bzw. $\rho_{0,haz}$ für die Querschnittsabminderung anzuwenden ist, wird somit hier lokales Beulen nicht maßgebend. Als Folge davon sind die EC 9-Werte bei „X1 Stiel (N)“ höher.

Für kombinierte Beanspruchung durch **Biegung und Druck** ist beim EC 9 der allgemeine Spannungsnachweis bereits im Stabilitätsnachweis enthalten (prEN 1999-1-1:2005, 6.3.3 Anmerkung 3). Insofern kann für diese Lastkombination keine Gegenüberstellung der beiden Richtlinien erfolgen.

Die Resultate des Nachweises auf **Schub und Biegung** sind in Abbildung 8.6 aufgezeigt.

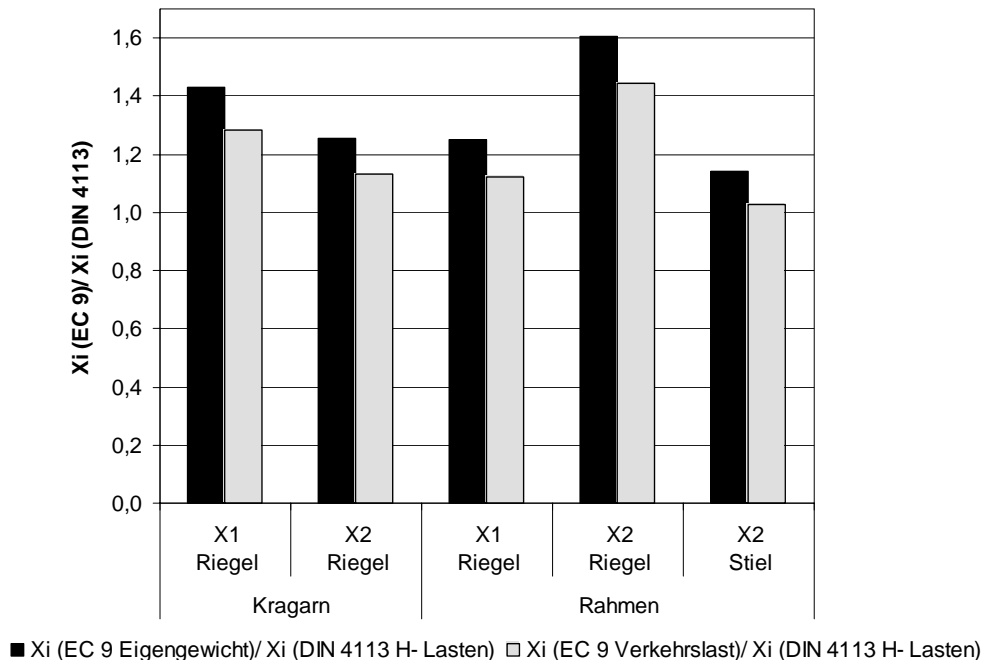


Abb. 8.6: Verhältnis der Kräfte Xi bei Biegung und Schub nach EC 9 und DIN 4113

Obwohl auch hier Beulen durch abgeminderte Blechdicken berücksichtigt wird, kann die Konstruktion bei Berechnung nach EC 9 stärker belastet werden als nach DIN 4113. Gemäß EC 9 ist ein Interaktionsnachweis von Biegung und Schub zu führen. Dabei wird die plastische Grenzlast berücksichtigt. Der Vergleichspannungsnachweis nach DIN 4113 beschränkt sich hingegen auf den elastischen Bereich und erzielt aus diesem Grund die niedrigeren Ergebnisse.

8.2.2.2 Stabilitätsnachweise

Die Ergebnisse des **Biegeknicknachweis** sind in Abbildung 8.7 enthalten.

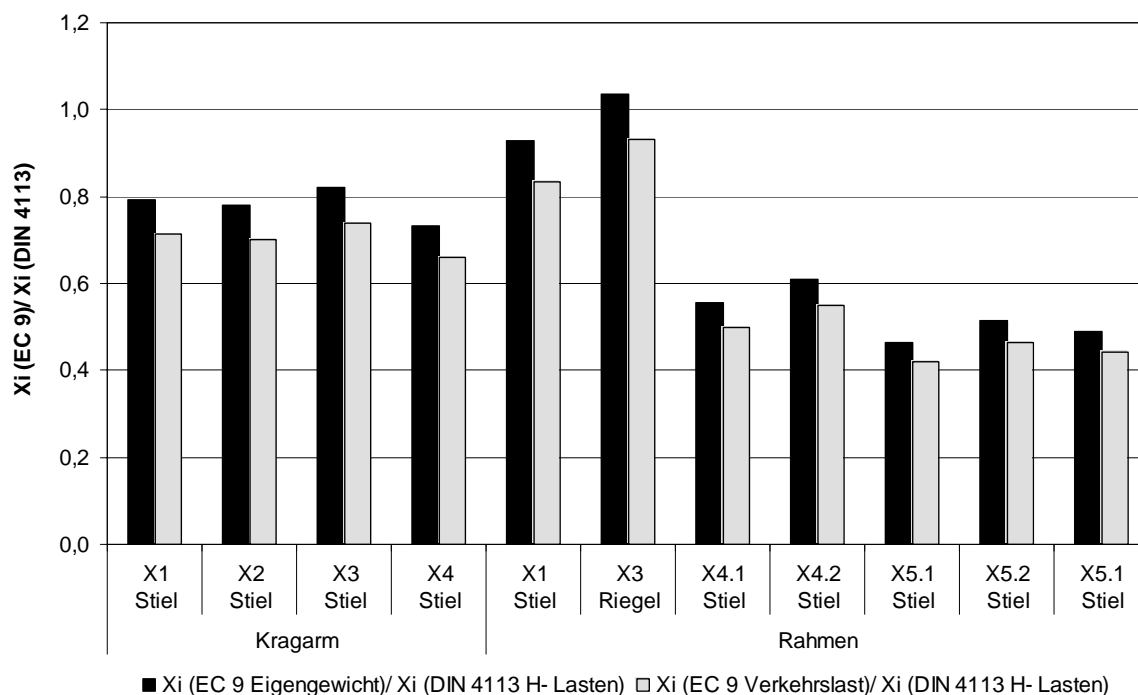


Abb. 8.7: Verhältnis der Kräfte Xi bei Druck und Biegung nach EC 9 und DIN 4113

Da beim EC 9 erneut die Abminderungen zwecks lokalen Beulens in den Nachweisen enthalten sind, erzielt DIN 4113 mit Ausnahme von Lastfall X3 beim Rahmen erneut die höheren Ergebnisse. Beim Kragarm ist dabei für X1 bis X3 Rechengang II und für X4 Rechengang I für Längsnähte günstiger. Beim Rahmen liefert für X1 und X3 wiederum Rechengang II die besseren Ergebnisse. Alle anderen Ergebnisse, d. h. für X4.1 bis X5.1, sind auf Nachweise gemäß Rechengang I zurückzuführen. Bei letzteren Lastfällen ist anzumerken, dass hier die Anwendung von Rechengang II für Quernähte aufgrund der unterschrittenen Grenzschlankheit und der Lage der Naht bezüglich des Momentennullpunktes nicht zulässig ist. Insgesamt kann hierbei festgestellt werden, dass Rechengang I von DIN 4113, trotz des innovativeren Verfahrens, nicht immer ein wirtschaftlicheres Ergebnis als Rechengang II erzielt.

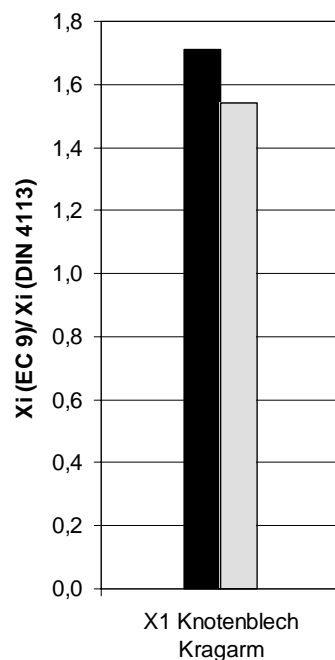
Der Stabilitätsnachweis des Rahmenriegels (X3) ist der einzige Fall, bei dem der EC 9 bessere Ergebnisse liefert als DIN 4113. Der Riegel ist aufgrund von mehreren eingeschweißten Schotten stark wärmebeeinflusst. Offensichtlich werden die hierdurch auftretenden Entfestigungen gemäß EC 9 wesentlich wirtschaftlicher berücksichtigt.

Für **Biegedrillknicken** ist in DIN 4113 bei Hohlquerschnitten grundsätzlich kein Nachweis erforderlich. Auch laut EC 9 kann der Biegedrillknicknachweis aufgrund der geringen bezogenen Schlankheit λ_{LT} für die Schilderbrücken entfallen.

Beulen wird gemäß EC 9 bei den Schilderbrücken in den meisten Fällen durch die Abminderung der Blechdicken abgedeckt. Ein Vergleich mit den Ergebnissen des extra zu führenden Beulnachweises in DIN 4113 ist somit nicht möglich.

Einzigste Ausnahme bildet das Knoteneckblech des Kragarms. Hier ist gemäß EC 9 ein zusätzlicher Nachweis auf Plattenbeulen zu führen. Dies ist der Fall, da hier die angreifenden Lasten gemäß Petersen (1988) auf eine Schubbelastung des Blechs umzurechnen sind.

In DIN 4113 ist hingegen der Beulnachweis grundsätzlich zu führen. Die Ergebnisse des Nachweises auf Plattenbeulen gemäß EC 9 und des Beulens gemäß DIN 4113 sind für den maßgebenden Lastfall X1 in Abbildung 8.8 gegenübergestellt.



■ Xi (EC 9 Eigengewicht) / Xi (DIN 4113 H- Lasten) □ Xi (EC 9 Verkehrslast) / Xi (DIN 4113 H- Lasten)

Abb. 8.8: Verhältnis der Kräfte Xi beim Beulnachweis des Knotenblechs des Kragarms nach EC 9 und DIN 4113

Der Nachweis gemäß EC 9 hat hierbei deutlich günstigere Ergebnisse zur Folge als der Beulnachweis nach DIN 4113 bzw. DIN 4114. Offensichtlich bringt das innovativere Verfahren des EC 9 eine deutlich größere Querschnittsausnutzung mit sich als die herkömmlichen Methoden der DIN 4113.

8.2.2.3 Schweißnähte

In Abbildung 8.9 sind exemplarisch die Ergebnisse für die Kopf- bzw. Fußplatten dargestellt. Hierbei handelt es sich mit Ausnahme einer Kehlnaht (Rahmen X1) um lauter Stumpfnähte. Da diese Nachweise nicht von der Querschnittsklassifizierung des EC 9 beeinflusst werden, können die Ergebnisse der einzelnen Richtlinien ohne Einschränkung miteinander verglichen werden.

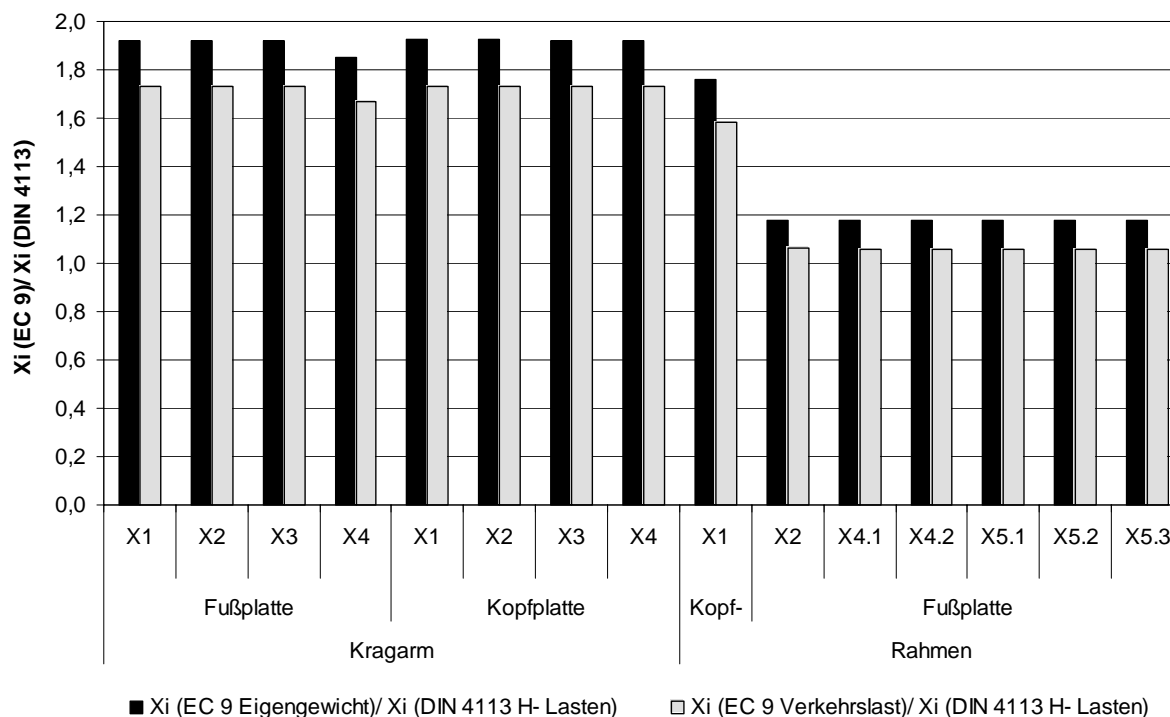


Abb. 8.9: Verhältnis der Kräfte Xi bei den Schweißnähten der Kopf- und Fußplatten nach EC 9 und DIN 4113

Die günstigeren Werte des EC 9 sind auf die höheren zugewiesenen Festigkeitswerte zurückzuführen (vgl. Kapitel 4, Tab. 4.6). Beim Lastfall X1 des Rahmens wirkt sich zudem der fortschrittliche Kehlnahtnachweis des EC 9 positiv auf die Ergebnisse aus. Die generell sehr unterschiedlichen Resultate des Kragarms und des Rahmens kommen durch die verwendeten Legierungen zustande. Die Festigkeit des Materials der Kragarmkonstruktion wird beispielsweise durch Schweißungen nicht beeinträchtigt, wodurch hier der Nachweis der Schweißnahtspannungen maßgebend wird. Bei der Legierung der Rahmenkonstruktion kommt es hingegen beim Schweißen zur deutlichen Festigkeitsreduzierung. Aus diesem Grund ist der Nachweis in der Wärmeeinflusszone zu führen. Die zulässigen Spannungen sind hierfür allerdings kleiner als in der Schweißnaht.

Die etwas höheren Ergebnisse von DIN 4113 beim Lastfall X4 für die Fußplatte des Kragarms sind mit dem gleichzeitigen Ansatz von Kehl- und Stumpfnähten zu erklären. Dieses Vorgehen ist hier wirtschaftlicher als der Ansatz von reinen Stumpfnähten.

8.2.2.4 Maßgebende Nachweise von Kragarm und Rahmen

Da der Ergebnisvergleich der Spannungs- und Stabilitätsnachweise aufgrund der Klasse 4-Abminderungen im EC 9 nur beschränkte Aussagekraft liefert, werden im Folgenden für jede Schilderbrücke die niedrigsten Resultate je nach Lastfall aufgelistet. Für den Kragarm sind diese Nachweise in Tabelle 8.1 und die dazugehörigen Werte in Abbildung 8.10 enthalten.

Tab. 8.1: Maßgebende Nachweise des Kragarmes

	DIN 4113	EC 9
X1 Riegel (M)	Beulen Knoteneckblech	Fließen Knoteneckblech
X2 Riegel (M)	Beulen Knoteneckblech	Fließen Knoteneckblech
X1 Stiel (N+M)	Beulen	Biegeknicken
X2 Stiel (N+M)	Beulen	Biegeknicken
X3 Stiel (N+M)	Biegeknicken	Biegeknicken
X4 Stiel (N)	Knicken	Knicken

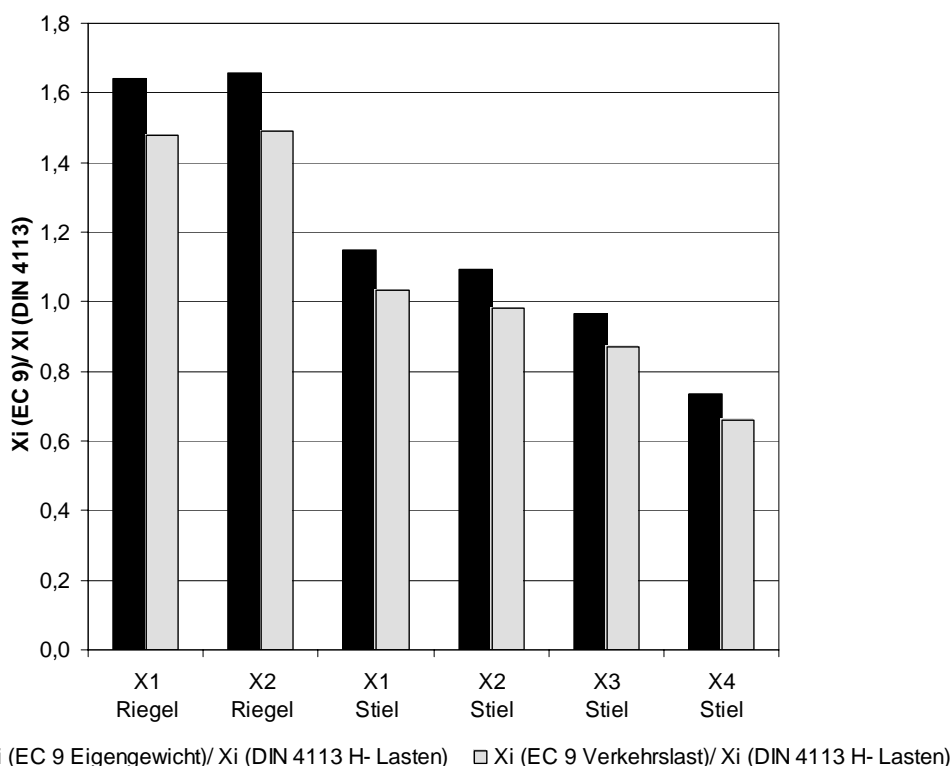


Abb. 8.10: Verhältnis der Kräfte Xi der maßgebenden Nachweise beim Kragarm

Es zeigt sich, dass gemäß DIN 4113 der Beulnachweis eine signifikante Rolle spielt und mit Ausnahme der Lastfälle X3 und X4 für die Bemessung des Kragarms entscheidend ist. Die DIN-Ergebnisse sind dabei deutlich niedriger. Bei den Lastfällen X3 und X4 ist bei beiden Richtlinien der Nachweis auf Biege-/Knicken maßgebend. Hier sind die Werte gemäß DIN 4113 vorteilhafter. Insgesamt erzielt der EC 9 trotzdem durchschnittlich 21% (Eigengewicht) bzw. 9% (Verkehrslast) günstigere Ergebnisse als DIN 4113. Darüber hinaus ist zu beobachten, dass die Anwendung des EC 9 mit zunehmender Biegebelastung günstiger wird.

In Tabelle 8.2 und Abbildung 8.11 sind die relevanten Ergebnisse des Rahmens aufgelistet.

Tab. 8.2: Maßgebende Nachweise des Rahmens

	DIN 4113	EC 9
X1 Riegel (M)	Beulen	Spannungsnachweis
X2 Riegel (M)	Beulen	Spannungsnachweis
X3 Riegel (N)	Beulen	Knicken
X1 Stiel (N)	Beulen	Knicken
X2 Stiel (M)	Beulen	Spannungsnachweis
X4.1 Stiel (N+M)	Beulen	Biegeknicken
X4.2 Stiel (N+M)	Beulen	Biegeknicken
X5.1 Stiel (N+M)	Beulen	Biegeknicken
X5.2 Stiel (N+M)	Beulen	Biegeknicken
X5.3 Stiel (N+M)	Beulen	Biegeknicken

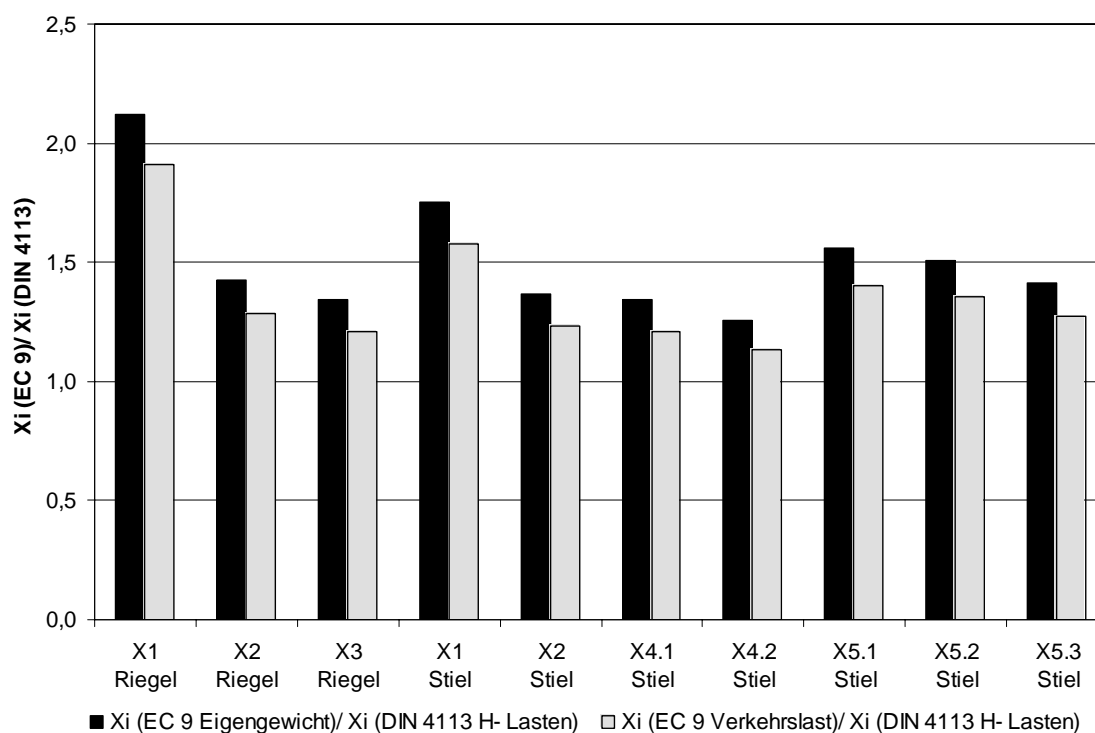


Abb. 8.11: Verhältnis der Kräfte Xi der maßgebenden Nachweise beim Rahmen

Bei der Rahmenkonstruktion ist die Berechnung nach EC 9 für jeden Lastfall günstiger als die Berechnung mit DIN 4113. Grund hierfür sind die niedrigen Ergebnisse des Beulnachweises, der bei den Berechnungen nach DIN 4113 für jeden Lastfall maßgebend wird. Im Durchschnitt sind die Resultate des EC 9 36% (Eigengewicht) bzw. 51% (Verkehrslast) höher als von DIN 4113. Auch hier ist die Tendenz erkennbar, dass der EC 9 mit zunehmendem Anteil der Biegebelastung und fallendem Anteil der Drucknormalkraft bessere Werte erzielt.

8.3 Ökologische Bewertung

8.3.1 Auswahl der Systeme und funktionelle Einheit

Schilderbrücken werden in der Praxis sowohl aus Aluminium als auch aus Stahl gefertigt. Da die Stahlkonstruktion allerdings eine höhere Festigkeit und ein geringeres Verformungsverhalten aufweist, können damit in der Regel höhere Lasten abgetragen werden. Ein ökologischer Vergleich des gleichen Systems zum einen aus Aluminium und zum anderen aus Stahl hat folglich keine Aussagekraft.

In der Praxis beträgt die Masse einer Aluminiumkonstruktion in der Regel die Hälfte einer vergleichbaren Stahlkonstruktion. Aus diesem Grund wird im Folgenden zunächst der Fokus auf ein Gewichtsverhältnis von Aluminium- zu Stahlschilderbrücke von 1:2, bzw. 0,5, gelegt. Im nächsten Schritt werden diese Massenverhältnisse zwischen 0,2 und 1 variiert und deren Einfluss auf die Wirkkategorien analysiert. Die Kragarm- und die Rahmenkonstruktion aus Aluminium dienen hierfür als Ausgangssysteme.

Als funktionelle Einheit wurde somit jeweils die komplette Aluminium- und die Stahlschilderbrücke unter Berücksichtigung der Massenverhältnisse betrachtet.

8.3.2 Modellierung

Da bei den Schilderbrücken die ästhetischen Anforderungen hinter der Funktionalität zurückstehen, wurden die Oberflächen von Aluminium zum einen blank und zum anderen eloxiert angesetzt. Laut GFÖB (2005) und den Korrosionsvorschriften des EC 9 sind damit keine neuen Anstriche erforderlich.

Für Stahl wurden die Feuerverzinkung (100 μm) und das Duplexverfahren (260 μm) angesetzt. Die Schichtdicken zum Erreichen des erforderlichen Korrosionsschutzes wurden auf Grundlage von DIN EN ISO 1461 und des Instituts Feuerverzinken GmbH (1997) bestimmt. Die Lebensdauer für die Verzinkung wurde gemäß DIN EN 12944-1 mit Hilfe der Abtragungsrate von 2 bis 4 mm pro Jahr in der Korrosionsklasse C4 zu 33 Jahren berechnet. Die Lebensdauer der Duplexbeschichtung ergab sich gemäß GFÖB (2005) für starke Belastung zu 40 Jahren. Sowohl bei Aluminium als auch Stahl wird zum Schutz gegen Spritzwasser und Tausalz ein zusätzlicher Anstrich bis zu einer Höhe von 2 m angebracht.

Die Instandsetzungsarbeiten in der Nutzungsphase wurden in einem ersten Szenario (1) mit obigen Annahmen und in einem zweiten Szenario (L) gemäß den Vorschriften der Brückeninstandhaltung nach Vollrath & Tathoff (2002) modelliert (vgl. Tab. 8.3). Für die Erneuerungsarbeiten wurden bei beiden Szenarien lediglich die Oberflächen unter Witterungseinfluss beachtet.

Die Recyclingraten wurden analog zu Kapitel 5, Tabelle 5.5 entsprechend ihrer Beschichtung bestimmt. Der Spritzwasserschutz übt hier maßgeblichen Einfluss auf die Recyclingfähigkeit der Materialien aus. Daher werden die Recyclingraten zunächst getrennt für die jeweilige Oberflächenbehandlung und dann als Durchschnittswert bestimmt. Die berechneten Werte sind in Tabelle 8.3 zu finden.

Tab. 8.3: Modellierung der Nutzungsphase und des Recyclings der Schilderbrücken

Oberflächenbehandlung	Szenario 1 gemäßDIN EN 12944-1 und GFÖB (2005)	Szenario L gemäß Vollrath & Tathoff (2002)	Recyclingrate [R]
Aluminium blank	---	nach 15 Jahren 7%	$92,1\% = (94,6\% + 89,6\%) / 2$
Aluminium eloxiert	---	nach 25 Jahren 10%	$92,1\% = (94,6\% + 89,6\%) / 2$
Stahl verzinkt	nach 33 Jahren 100%	nach 45 Jahren 100%	$90,8\% = (92\% + 89,6\%) / 2$
Stahl Duplex	nach 40 Jahren 100%	nach 60 Jahren 7%	$89,6\% = (89,6\% + 89,6\%) / 2$
		nach 70 Jahren 10%	

8.3.3 Wirkungsabschätzung und Bewertung

8.3.3.1 Kragarm

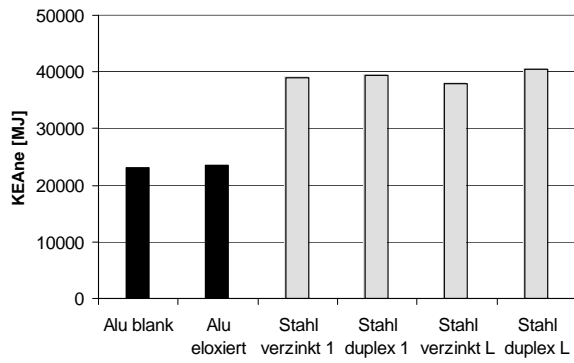
In Abbildung 8.12 sind die Ergebnisse der einzelnen Wirkkategorien für den Kragarm dargestellt. Das Gewichtsverhältnis von Aluminium- zu Stahlbrücke beträgt dabei 1:2.

Die Variante mit blankem Aluminium erzielt in jeder betrachteten Wirkkategorie die günstigsten Werte. Die Eloxalbeschichtung führt lediglich zu einer geringfügigen Erhöhung der einzelnen Ergebnisse.

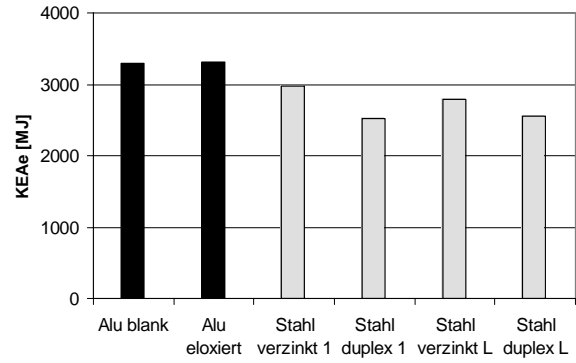
Die Stahlbrücke weist hingegen die höchsten Umweltbelastungen auf. Bei den Beschichtungen liegt die Feuerverzinkung etwas günstiger als die Duplexbeschichtung. Verglichen mit Szenario 1 bewirkt der Ansatz „L“ bei der Verzinkung verminderte und bei der Duplexbeschichtung erhöhte Ergebnisse.

Dies ist insofern zu erklären dass bei Szenario 1 lediglich ein neuer Anstrich von 100% der duplexbeschichteten Fläche erforderlich wird. Bei Szenario L sind hingegen mehrere Teilanstriche des Duplex-Systems nötig. Diese ergeben insgesamt eine Beschichtungsfläche von 134%. Bei der Verzinkung gemäß Szenario 1 werden mit zwei erforderlichen Anstrichen insgesamt 200% der Fläche beschichtet. Demgegenüber kommt es bei Szenario L mit 134% zu beschichtender Fläche zur Reduzierung, wodurch die Abminderung in den einzelnen Wirkkategorien zustande kommt

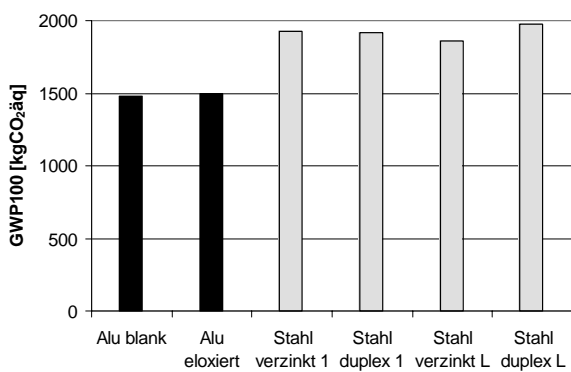
Der im Vergleich zu den Fassaden (vgl. Kapitel 7.3.3) hier signifikante Unterschied zwischen Stahl und Aluminium ist durch den hohen Anteil der Bleche zu erklären. Bei den Fassaden kommen durchgehend Profile zur Anwendung. Beim Kragarm beträgt der Anteil der Bleche hingegen 94% der Gesamtmasse. Betrachtet man nun die Wirkkategorien für die Herstellung von 1 kg Profil so sind die Werte für Aluminium ca. 10-mal höher als für Stahl. Bei der Herstellung von 1 m² Blech betragen hingegen die Bilanzwerte von Aluminium lediglich das 3,5-fache von Stahl (vgl. EcoInvent, 2003). Grund hierfür ist die ausgeprägte Formbarkeit von Aluminium, die sich besonders beim Walzprozess der Bleche positiv auswirkt.



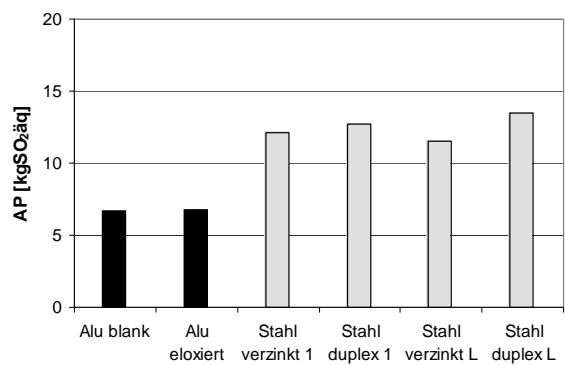
Nicht erneuerbarer Energieaufwand (KEA_{ne})



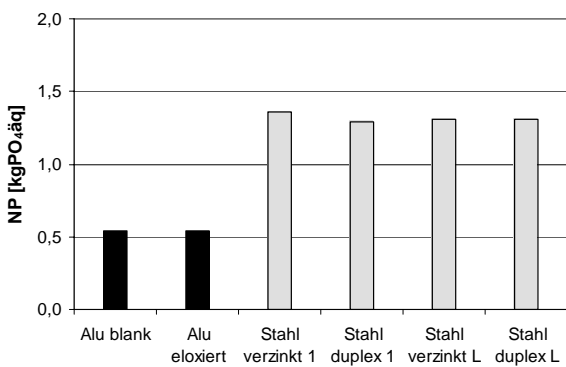
Eneuerbarer Energieaufwand (KEA_e)



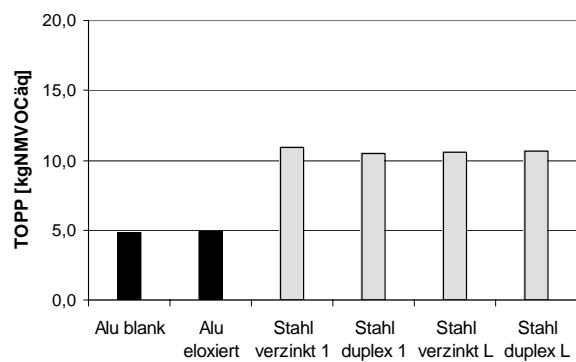
Treibhauspotenzial (GWP100)



Versauerungspotenzial (AP)



Eutrophierungspotenzial (NP)



Ozonvorläuferpotenzial (TOPP)

■ Aluminium ■ Stahl

Abb. 8.12: Ergebnisse der Wirkkategorien für den Kragarm ($m_{\text{Alu}} : m_{\text{Stahl}} = 1 : 2$)

Um den Einfluss der Wiederverwertung darzustellen, werden im Folgenden der nicht erneuerbare Energieverbrauch (KEA_{ne}) des Aluminium- und Stahlkragarms in Abhängigkeit der Recyclingraten gegenübergestellt. Das Massenverhältnis von Aluminium zu Stahl beträgt auch hier 1:2. Die Bilanzierung erfolgt sowohl ohne Nutzungsphase (vgl. Abb. 8.13) als auch mit Erneuerungen gemäß Szenario 1 (vgl. Abb. 8.14).

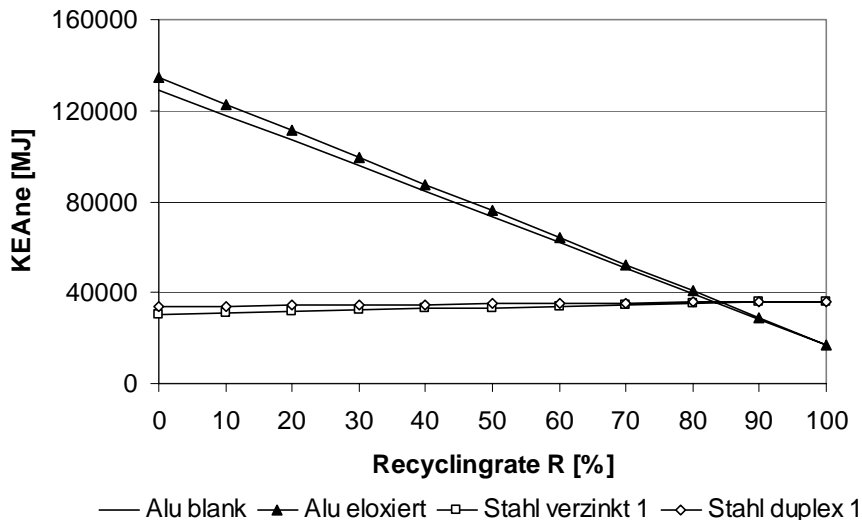


Abb. 8.13: Vergleich des KEA_{ne} der Kragarmvarianten ohne Nutzungsphase in Abhängigkeit der Recyclingrate ($m_{Alu}: m_{Stahl}= 1:2$)

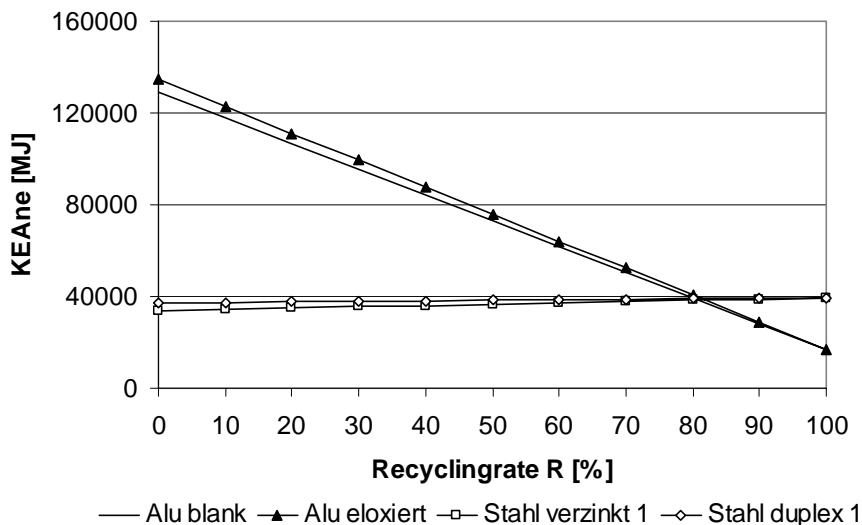


Abb. 8.14: Vergleich des KEA_{ne} der Kragarmvarianten mit Nutzungsphase (Szenario 1) in Abhängigkeit der Recyclingrate ($m_{Alu}: m_{Stahl}= 1:2$)

Der Ausgleich zwischen dem Energieverbrauch der Aluminium- und der Stahlvariante erfolgt ohne Berücksichtigung der Nutzungsphase bei einer Recyclingrate von ca. 83% und mit Beachtung der Erneuerungen bereits bei 80%. Die Nutzungsphase hat hier folglich erkennbaren Einfluss auf die Energiebilanzen der betrachteten Varianten.

Nachstehend wird anhand der Kragarmvarianten der Einfluss des Massenverhältnisses von Aluminium- zu Stahlausführung auf die Umweltbelastungen während des Lebenszyklus analysiert. Zu diesem Zweck wird erneut die Wirkkategorie KEA_{ne} betrachtet (vgl. Abb. 8.15).

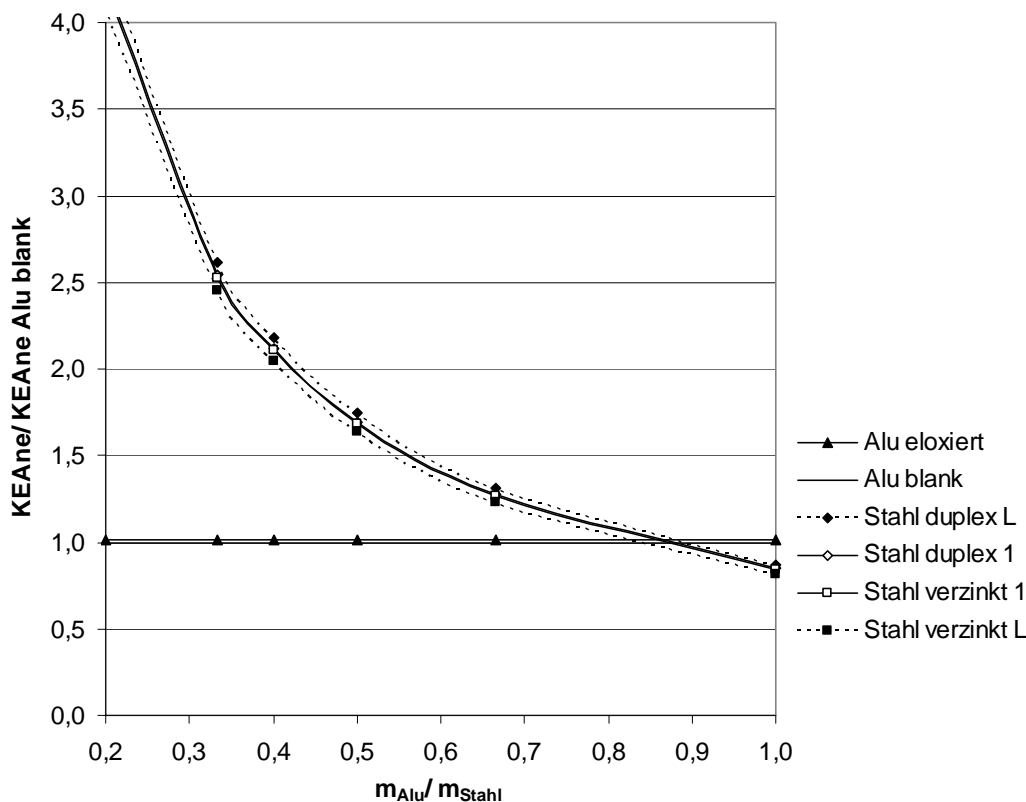
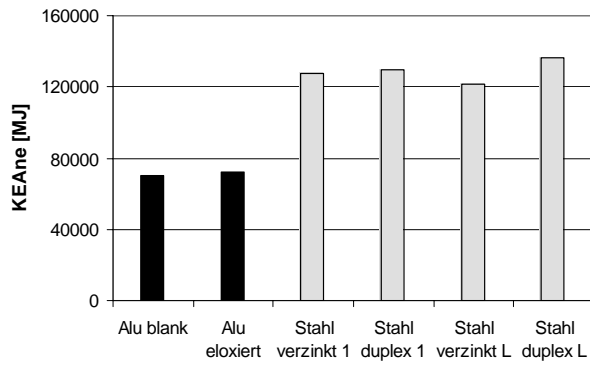


Abb. 8.15: KEA_{ne} der einzelnen Kragarmvarianten bezogen auf die Ausführung mit blankem Aluminium in Abhängigkeit der Massenverhältnisse von Aluminium zu Stahl

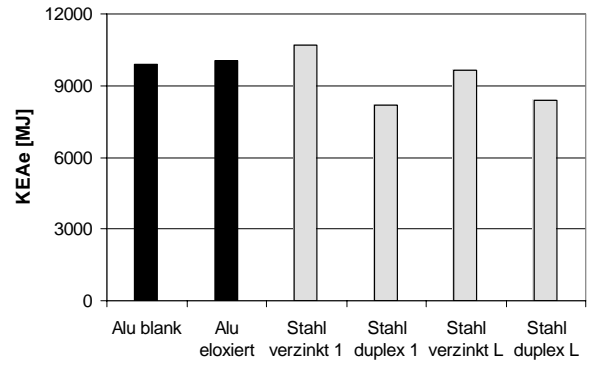
Die Masse der Aluminiumsysteme bleibt bei den Vergleichen konstant. Dies zeigt sich durch den horizontalen Verlauf der blanken und eloxierten Variante. Der geringfügig höhere Energieverbrauch bei der Eloxalbeschichtung wird aus dem leichten Versatz der beiden Aluminiumkurven ersichtlich. Die KEA_{ne} -Werte der Stahlbrücken sind bis zu einem Massenverhältnis von 0,85 bis 0,87 deutlich höher als von Aluminium. Es zeigt sich erneut der ungünstige Einfluss der Duplexbeschichtung bei Szenario L für die Nutzungsphase sowie die günstigeren Resultate der Verzinkung.

8.3.3.2 Rahmen

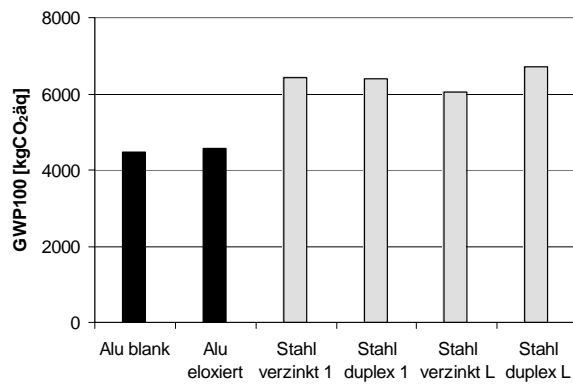
Die Ergebnisse für den Rahmen sind in Abbildung 8.16 enthalten. Das Massenverhältnis von Aluminium zu Stahl beträgt bei den dargestellten Varianten erneut zunächst 1:2. Die Tendenz der Ergebnisse ist ähnlich wie beim Kragarm. Die generell sehr hohen Werte für Stahl sind wiederum auf einen signifikanten Blechanteil von ca. 42% der Konstruktionsmasse zurückzuführen. Der Unterschied zwischen Aluminium und Stahl ist hier allerdings etwas geringer als beim Kragarm. Beispielsweise ist der nicht erneuerbare Energieverbrauch (KEA_{ne}) der Stahlvariante beim Kragarm um ca. 52% und beim Rahmen um ca. 42% höher als die entsprechende Aluminiumausführung. Dies ist bedingt durch die verwendete Blechmenge, welche hier beim Rahmen mit 42% Masseanteil deutlich weniger beträgt als beim Kragarm mit 94%.



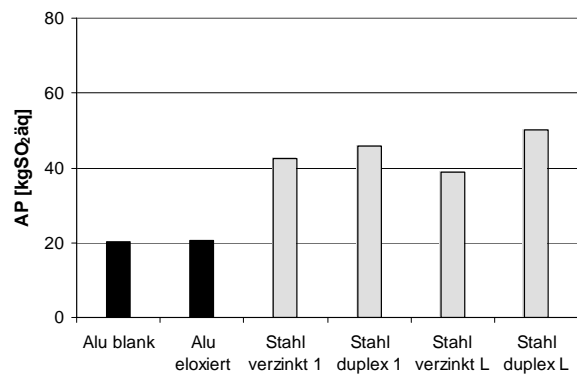
Nicht erneuerbarer Energieaufwand (KEA_{ne})



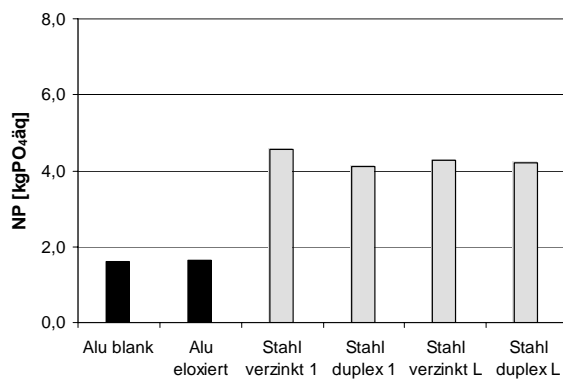
Eneuerbarer Energieaufwand (KEA_e)



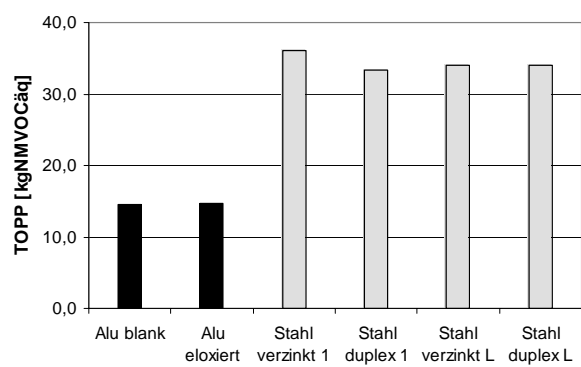
Treibhauspotenzial (GWP100)



Versauerungspotenzial (AP)



Eutrophierungspotenzial (NP)



Ozonvorläuferpotenzial (TOPP)

■ Aluminium ■ Stahl

Abb. 8.16: Ergebnisse der Wirkkategorien für den Rahmen ($m_{\text{Alu}} : m_{\text{Stahl}} = 1 : 2$)

Im Folgenden wird der Einfluss der Recyclingraten auf den nicht erneuerbare Energieaufwand (KEA_{ne}) des Rahmens bei einem 1:2-Massenverhältnis von Aluminium zu Stahl aufgezeigt. Dabei werden zunächst keine Erneuerungen (vgl. Abb. 8.17) und anschließend die Wartungsarbeiten gemäß Szenario 1 (vgl. Abb. 8.18) berücksichtigt.

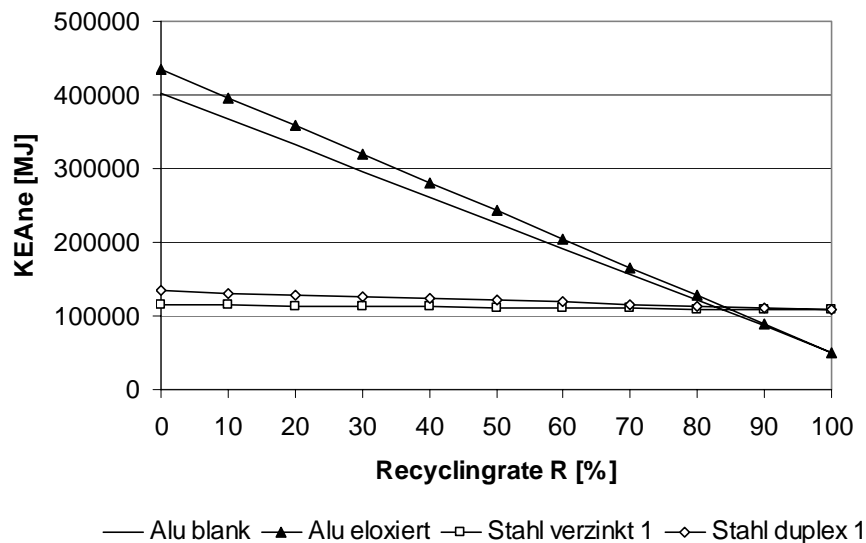


Abb. 8.17: Vergleich des KEA_{ne} der Rahmenvarianten ohne Nutzungsphase in Abhängigkeit der Recyclingrate ($m_{Alu}: m_{Stahl} = 1:2$)

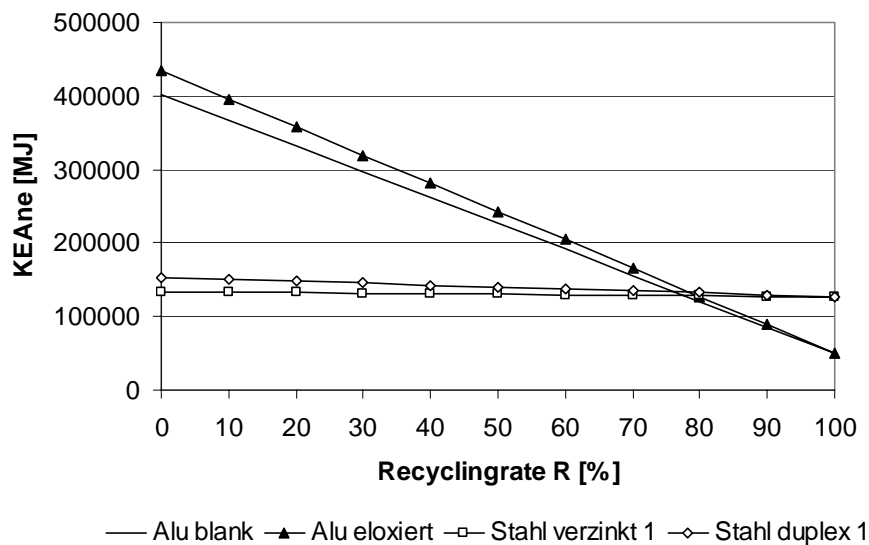


Abb. 8.18: Vergleich des KEA_{ne} der Rahmenvarianten mit Nutzungsphase (Szenario 1) in Abhängigkeit der Recyclingrate ($m_{Alu}: m_{Stahl} = 1:2$)

Wie beim Kragarm ist der Energieverbrauch der beiden Materialien ohne Nutzungsphase bei ca. 83% und mit Ansatz der Wartung gemäß Szenario 1 bei ca. 80% ausgeglichen.

In Abbildung 8.19 wird am Beispiel des KEA_{ne} , der Einfluss der Massenverhältnisse auf die Umweltwirkungen der Rahmenkonstruktion veranschaulicht.

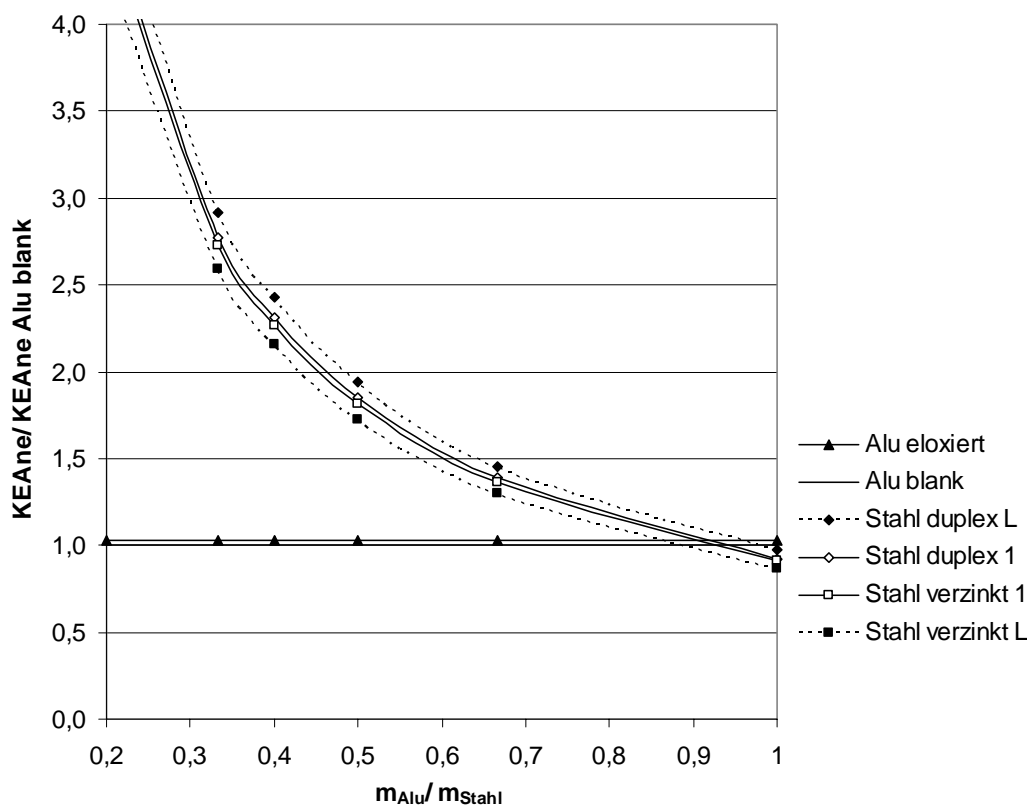


Abb. 8.19: KEA_{ne} der einzelnen Rahmenvarianten im Verhältnis zur Ausführung mit blankem Aluminium in Abhängigkeit der Massenverhältnisse von Aluminium zu Stahl

Der Ausgleich mit den KEA_{ne} -Werten der Aluminiumvarianten erfolgt für die verzinkte Stahlkonstruktion (Szenario L) bei einem Massenverhältnis von 0,87 und für die duplexbeschichtete Stahlbrücke (Szenario L) bei 0,94. Die im Vergleich zum Kragarm hier höheren Massenverhältnisse sind beim break-even-point durch den flacheren Kurvenverlauf zu erklären. Grund hierfür ist die größere Beschichtungsfläche beim Stahlrahmen, die entsprechend höhere Nutzungsaufwendungen zur Folge haben und durch die Aufsummierung schließlich zu obigem Funktionsverlauf führen. Für die Beschichtung und die beiden Szenarien der Nutzungsphase sind die gleichen Tendenzen abzuleiten wie beim Kragarm.

8.4 Lebenszykluskostenanalyse

8.4.1 Systeme, Kostendaten und Modellierung

Die Ermittlung der Lebenszykluskosten erfolgte für den Kragarm- und die Rahmenkonstruktion mit den in Tabelle 8.3 definierten Oberflächenbehandlungen.

Die Kostendaten für die Herstellung der Aluminium- und Stahlschilderbrücken wurden auf Grundlage von Mittag (1998) bestimmt. Der Ansatz durchschnittlicher Kosten ist gerechtfertigt, da der Einsatzort der Schilderbrücken variable ist. Die Preiserhöhung für Stahl- und Leichtmetallbaukonstruktionen seit 1998 wurde mit Hilfe der Baupreisstatistik (Statistisches Bundesamt 2005) angepasst. Die vorgegebenen Preise umfassen Material, Transport, Montage und Nebenleistungen aber keine Anstriche. Die Kostendaten für die Beschichtungen stammen hingegen direkt vom Hersteller.

Da die Riegel-/Stielverbindungen der Schilderbrücken auf eine schnelle Montage ausgelegt sind, ist bei der Riegelmontage nur für wenige Minuten eine Vollsperrung der Straßen erforderlich. Entsprechende Kosten wurden für beide Varianten daher nicht berücksichtigt. Allerdings ist zur Montage ein Kran erforderlich, welcher in obigen, vorgegebenen Preisen noch nicht enthalten ist und folglich zusätzlich kalkuliert wurde. Während der Nutzung sind regelmäßige Erneuerungen gemäß Tabelle 8.3 sowie Inspektionen nach DIN 1076 erforderlich. Letztere werden entweder als einfache Prüfung oder als Hauptprüfung alternierend alle 3 Jahre fällig. Die Kosten hierfür wurden auf Grundlage von Vollrath & Tathoff (2002) ermittelt. Die Demontagekosten wurden erneut gemäß Angaben der Hersteller mit 46% der Lohn- und 75% der Maschinenkosten für die Montage angesetzt. Der Schrottwert der gebrauchten Metallteile wurde als Ertrag berücksichtigt.

8.4.2 Ergebnisse

8.4.2.1 Kragarm

Die Ergebnisse der Lebenszykluskostenanalyse für die Kragarmvarianten sind in Abbildung 8.20 dargestellt. Das Massenverhältnis von Aluminium zu Stahl beträgt dabei 1:2.

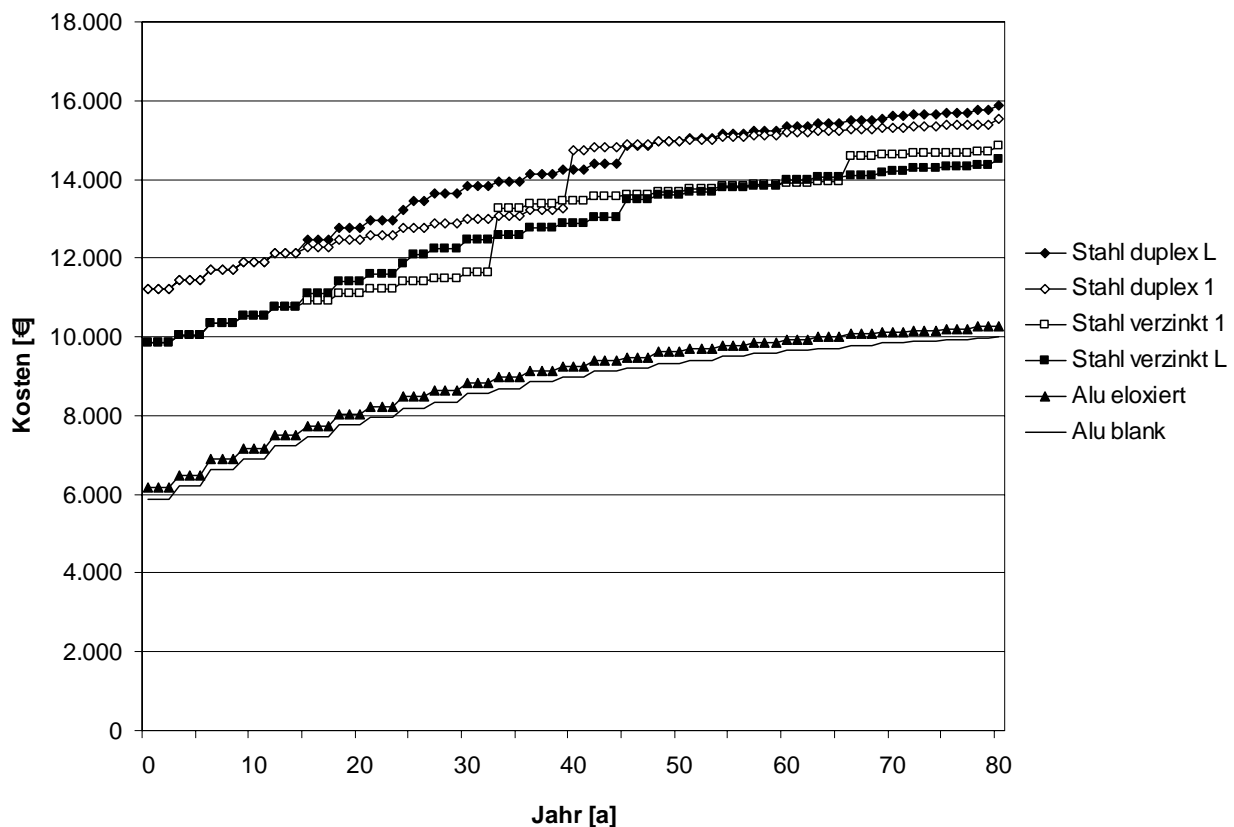


Abb. 8.20: Kapitalwert der Lebenszykluskosten der Kragarmvarianten ($m_{\text{Alu}}: m_{\text{Stahl}} = 1:2$)

Die Kosten der Aluminiumvarianten sind von Anfang an niedriger als die der Stahlvarianten. Dies ist Folge des geringeren Gewichts, der signifikanten Einsparungen bei Transport und Montage sowie des nicht erforderlichen Korrosionsschutzes. Zudem sind die Aluminiumkurven durch einen flacheren Verlauf gekennzeichnet, was auf die fehlenden Instandsetzungsmaßnahmen zurückzuführen ist. Im Hinblick auf die Oberflächenbehandlung ist die Eloxalbeschichtung kostenintensiver als die blanke Ausführung.

Die Stahlkurven weisen bedingt durch die neuen Anstriche eine größere Steigung als die Aluminiumkonstruktionen auf. Die Verzinkung ist dabei günstiger als die Duplexbeschichtung. Analog zur ökologischen Bewertung (vgl. 8.3.3) wird aufgrund der unterschiedlichen Beschichtungsflächen die Abweichung zwischen Szenario 1 und Szenario L ersichtlich. Szenario L ist dabei für die Duplexbeschichtung ungünstiger, während sie für die Verzinkung eine Kostenreduzierung zur Folge hat.

In Abbildung 8.21 ist für die Kragarmvarianten der Einfluss des Massenverhältnisses von Aluminium zu Stahl auf die Gesamtkosten, d. h. dem Kapitalwert am Ende des Lebenszyklus, dargestellt. Als Bezugssystem dient dabei die blanke Aluminiumkonstruktion.

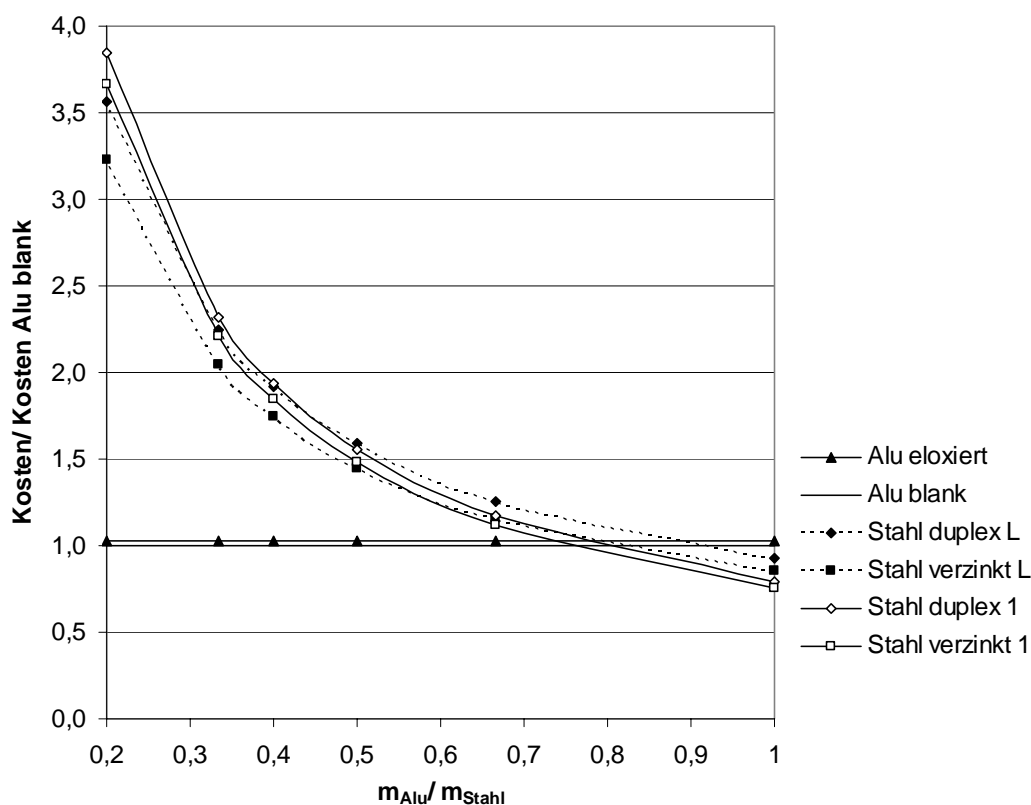


Abb. 8.21: Gesamtkosten der Kragarmvarianten im Verhältnis zur Ausführung mit blankem Aluminium in Abhängigkeit der Massenverhältnisse von Aluminium zu Stahl

Der erste Ausgleich der Gesamtkosten, d. h. des Kapitalwerts am Ende des Lebenszyklus, erfolgt bei einem Massenverhältnis von ca. 0,75 zwischen der verzinkten Stahl- (Szenario 1) und der eloxierten Aluminiumbrücke. Die Kosten der duplexbeschichteten Stahl- (Szenario L) und der eloxierten Aluminiumvariante sind erst ab einem Gewichtsverhältnis von 0,88 gleich hoch.

Deutlich zu erkennen ist zudem der Kostenunterschied der einzelnen Beschichtungsvarianten. Der Verlauf der Kurven für Szenario „L“ ist dabei durch einen flacheren Verlauf charakterisiert. Dies ist auf die dort angesetzten größeren Beschichtungsflächen zurückzuführen. Da die Nutzungskosten hier ca. 30 bis 40% der gesamten Lebenszykluskosten ausmachen (vgl. Abb. 8.20), wird der Einfluss der Flächen bereits innerhalb des Systems „Kragarm“ ersichtlich. Bei den Umweltwirkungen (vgl. Abb. 8.15 und Abb. 8.19) war hingegen der Einfluss der Nutzung auf die Gesamtbilanz grundsätzlich geringer, und folglich nur bei den größeren Flächen des Rahmens erkennbar.

8.4.2.2 Rahmen

Die Resultate der Lebenszykluskostenberechnung für den Rahmen sind nachfolgend dargestellt (vgl. Abb. 8.22). Auch hier wurden die Kosten für ein 1:2-Massenverhältnis von Aluminium zu Stahl ermittelt.

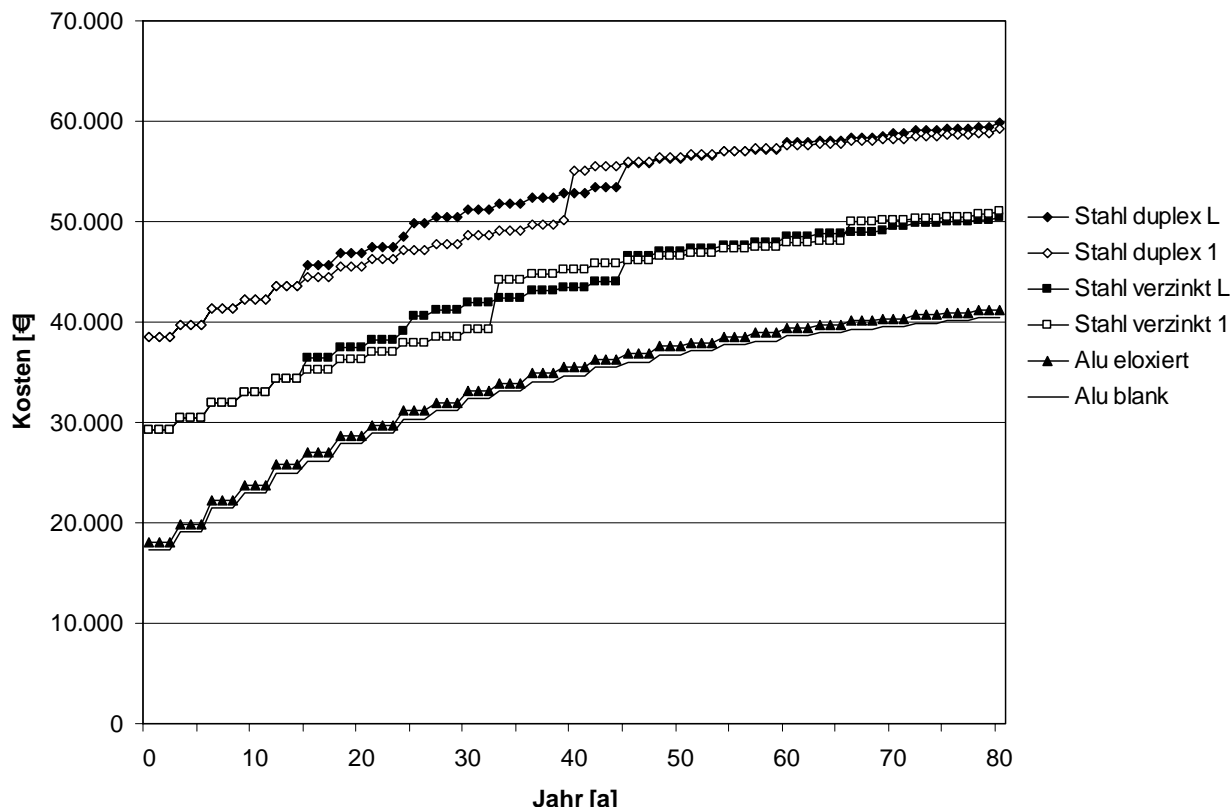


Abb. 8.22: Kapitalwert der Lebenszykluskosten der Rahmenvarianten ($m_{\text{Alu}}: m_{\text{Stahl}} = 1:2$)

Die Aluminiumkonstruktionen sind erneut am günstigsten und der Einfluss der Beschichtungsvarianten sowie der Nutzungsszenarien deutlich ersichtlich. Auffällig ist allerdings der steile Verlauf bei den Aluminiumkurven. Dies ist mit den Inspektionskosten, welche pro Flächeneinheit berechnet werden, zu erklären. Zwar sind die Stahlprofile doppelt so schwer, doch aufgrund der dreifachen Dichte sind die Profile bzw. Bleche in der Regel kleiner als die Aluminiumausführungen. Folglich sind die Aluminiumflächen größer. Da der Rahmen verglichen mit dem Kragarm die sechsfache Fläche besitzt, wird der Einfluss der zu inspizierenden Flächen hier umso offensichtlicher.

Die Auswirkungen des Massenverhältnisses von Aluminium zu Stahl auf die Gesamtkosten, bzw. den Kapitalwert am Ende des Lebenszyklus, sind in Abbildung 8.23 dargestellt.

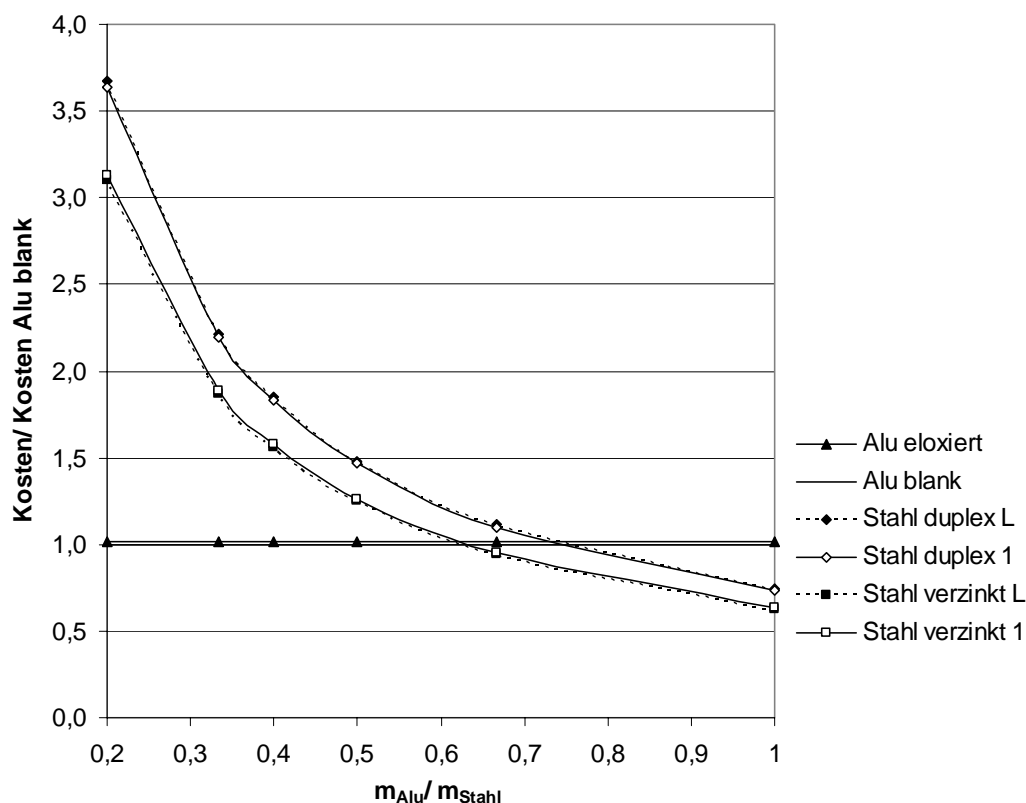


Abb. 8.23: Gesamtkosten der einzelnen Rahmenvarianten im Verhältnis zur Ausführung mit blankem Aluminium in Abhängigkeit der Massenverhältnisse von Aluminium zu Stahl

Der Kostenausgleich zwischen den betrachteten Materialien erfolgt hier bereits bei einem Massenverhältnis von 0,65. Dies ist auf die relativ großen Aluminiumflächen und die dadurch erhöhten Inspektionskosten zurückzuführen.

Der Verlauf der Stahlkurven kommt zum einen durch den maßgeblichen Anteil der Nutzungskosten an den Gesamtkosten (ca. 40 bis 55%, vgl. Abb. 8.22) und zum anderen durch den Einfluss der betrachteten Flächen zustande. Aufgrund des hier großen Flächenanteils werden die Nutzungskosten von den Inspektionskosten dominiert. Folglich ist der Kurvenverlauf der Stahlvarianten von den neuen Anstrichen und dem entsprechenden Nutzungsszenario unbeeinflusst. Somit ergeben sich nahezu identische Kurven für Szenario 1 und Szenario L.

8.5 Schlussfolgerung

Bei den Schilderbrücken handelt es sich um seriell gefertigte Aluminium- und Stahlssysteme, die je nach Anforderungen und Einsatzort an die entsprechenden Umgebungsbedingungen angepasst werden.

Durch den vom Hersteller vorgegebenen Aluminiumkragarm und -rahmen ergab sich die Möglichkeit, die nationale und europäische **Bemessungsnorm** ausführlich miteinander zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurden für jeden Lastfall die jeweiligen Ausnutzungsgrade gemäß DIN 4113 und EC 9 berechnet und gegenübergestellt.

Bei den einzelnen Spannungs- und Stabilitätsnachweisen liefert DIN 4113 deutlich bessere Ergebnisse. Grund hierfür ist die Querschnittklassifizierung gemäß EC 9. Demnach werden alle Querschnitte in Klasse 4 eingestuft, wodurch aufgrund der Gefahr des lokalen Beulens bei Druckbelastung eine Dickenabminderung der entsprechenden Querschnittselemente erforderlich wird. Diese Reduktion beeinflusst alle Spannungs- und Stabilitätsnachweise und führt somit zu den entsprechend niedrigeren Ergebnissen. Vergleicht man allerdings die jeweils maßgebenden Nachweise der Konstruktionen, so ist gemäß DIN 4113 in den meisten Fällen der Beulnachweis maßgebend. Dieser ist innerhalb von DIN 4113 nicht in den anderen Nachweisen integriert, sondern extra zu führen und erzielt verglichen mit den EC 9-Werten deutlich geringere Resultate. Dadurch sind die Resultate des EC 9 beim Kragarm unter Eigengewicht letztlich um durchschnittlich 21% und unter Verkehrslasten um 9% günstiger. Beim Rahmen sind die EC 9-Resultate unter Eigengewicht sogar um durchschnittlich 51% und bei Verkehrslasten um 36% vorteilhafter. Darüber hinaus ist die Tendenz erkennbar, dass der EC 9 mit zunehmendem Anteil der Biegebelastung bessere Werte ergibt. Auch bei den Schweißverbindungen ist der EC 9 um ca. 45% bei Stumpfnähten und 63% bei Kehlnähten wirtschaftlicher.

Bei den ökologischen und wirtschaftlichen Vergleichen dienten Aluminiumkragarm- und Rahmen als Ausgangssysteme, während die Masse der Stahlvarianten variiert wurde.

Bei einem konstanten Massenverhältnis von 0,5 sind die Aluminiumkonstruktionen **ökologisch** deutlich günstiger als die Stahlkonstruktionen. Der im Vergleich zu den Fassaden hier signifikante Unterschied zwischen Stahl und Aluminium ist durch den hohen Anteil von Blechen an den Konstruktionen (94% der Gesamtmasse) zu erklären. Da die ausgeprägte Formbarkeit von Aluminium den Walzprozess vereinfacht, ergeben sich verglichen zu Stahl weniger hohe Bilanzwerte. Zudem macht sich bei den Stahlkonstruktionen der Einfluss der Wartungsarbeiten deutlich bemerkbar. Dies ist auf die großen Beschichtungsflächen zurückzuführen. Ohne Nutzungsphase sind die Aluminiumsysteme beispielsweise ab Recyclingraten von 83% günstiger und mit Berücksichtigung der Nutzung bereits ab 80%. Der durchschnittliche Anteil der Nutzungsphase an den Umweltwirkungen beträgt beim Kragarm zwischen 11% (KEA_{ne}) und 24% (AP) und beim Rahmen zwischen 20% (KEA_{ne}) und 43% (AP). Für die Wartungsarbeiten wurden zwei verschiedene Szenarien definiert. Dabei ist der Einfluss auf die Wirkkategorien umso vorteilhafter, je weniger Flächen zu erneuern sind.

Die Variation der Stahlmassen zeigt, dass die ökologischen Kennwerte bis zu einem Aluminium-Stahl-Gewichtsverhältnis von ca. 0,85 beim Kragarm und 0,87 beim Rahmen für die Aluminiumbrücken günstiger sind. Das größere Massenverhältnis von 0,87 beim Rahmen kommt durch die dort größeren Erneuerungsflächen zustande.

Die **Lebenszykluskosten** sind bei einem konstanten Massenverhältnis von 0,5 für die Aluminiumkonstruktionen deutlich niedriger als für die Stahlvarianten. Dies ist hauptsächlich auf das geringere Gewicht und den bei Stahl erforderlichen Korrosionsschutz

zurückzuführen. Der Einfluss der beiden Nutzungsszenarien auf die Lebenszykluskosten ist dabei deutlich erkennbar. Je nach Größe der während der Lebensdauer zu erneuernden Fläche kommt es zur Kostenerhöhung bzw. -reduktion. Insgesamt ist der Anteil der Nutzungsphase an den Gesamtkosten beim Kragarm mit ca. 50% und beim Rahmen mit ca. 80% deutlich höher als bei den Umweltwirkungen.

Bei der Variation der Stahlmassen sind die Gesamtkosten am Ende des Lebenszyklus für den Kragarm bis zu einem Aluminium-Stahl-Massenverhältnis von 0,75 und für den Rahmen bis zu einem Verhältnis von 0,65 für Aluminium günstiger. Der niedrigere Wert bei der Rahmenkonstruktion ist mit dem Inspektionsaufwand zu erklären. Grund hierfür ist die sechsfache Fläche des Rahmens verglichen zum Kragarm. Als Folge davon dominieren während der Nutzungsphase nicht die Erneuerungs- sondern die Inspektionskosten, welche für Aluminium und Stahl in gleicher Höhe anfallen. Die Kosten von Aluminium und Stahl sind somit bei kleineren Gewichtsverhältnissen ausgeglichen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Rahmen- und Kragarmkonstruktionen für den Aluminiumeinsatz bemessungstechnisch nicht optimal gestaltet sind. Dies zeigt sich bereits bei der Querschnittsklassifizierung, wonach alle Querschnitt als „beulanfällig“ einstufen werden. Weniger schlanke Stege und eine kompaktere Querschnittsgestaltung wären bei diesen Konstruktionen bedeutend vorteilhafter. In ökologischer und wirtschaftlicher Hinsicht sind die Aluminiumbrücken aufgrund des Recyclingpotenzials und dem minimalen Unterhaltsaufwand eindeutig effizienter als die Stahlausführungen. Dies gilt bis zu einem Massenverhältnis der Aluminium- zu Stahlkonstruktion von ca. 0,65.

9 Dachkonstruktionen

Im Zuge der Umbaumaßnahmen des Alten Hofes soll das ursprüngliche Holztragwerk des Lorenzistocks (vgl. Abb. 9.1) durch eine transparente Stahl-Glaskonstruktion komplett ersetzt werden (vgl. Abb. 9.2). Um zu prüfen, ob anstelle einer Stahl- auch eine Aluminiumtragkonstruktion ausführbar ist, und welche Vor- und Nachteile der jeweilige Einsatz mit sich bringt, werden im Folgenden alternative Dachsysteme untersucht.

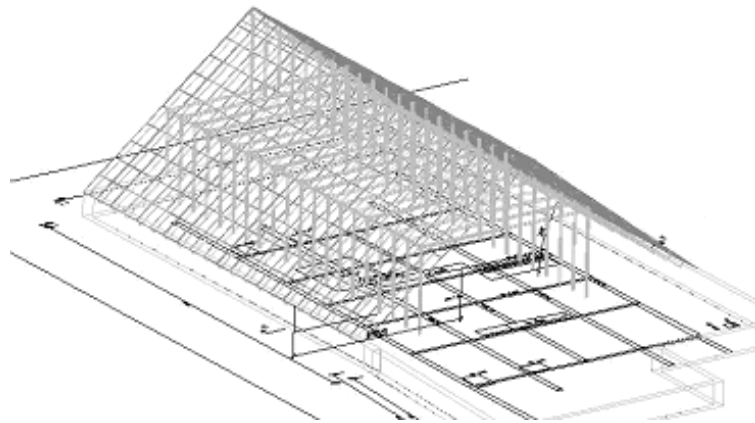


Abb. 9.1: Ursprüngliche Holzkonstruktion des Lorenzistocks im Alten Hof



Abb. 9.2: Geplante Stahl-Glas-Konstruktion des Alten Hofes

9.1 Varianten

Für die Planung des neuen Dachs besteht seitens des Denkmalschutzes die Auflage, das System so dezent wie möglich zu gestalten. Aus diesem Grund ist der Dachteil in Richtung Innenhof in massiver Bauweise für Büroräume geplant, während der Ansichtsbereich als transparente Konstruktion gestaltet werden soll. Im Sommer 2004 befanden sich die entsprechenden Entwürfe noch im Anfangsstadium.

Die zu diesem Zeitpunkt vom Architekten gelieferten Unterlagen enthielten daher noch keine konkreten Angaben im Hinblick auf Trägerabstand, Querschnittswerte oder Positionierung des Trägerfußpunkts.

Für die folgenden Analysen wurden daher Tragwerke aus geschweißten Aluminium- und Stahlsparren entworfen. Diese sind am Fußpunkt eingespannt und auf der massiven Konstruktion der Büroräume gelenkig gelagert. Die Glasscheiben werden von den Sparren getragen und bedecken die komplette Ansichtfläche (siehe Abb. 9.3).

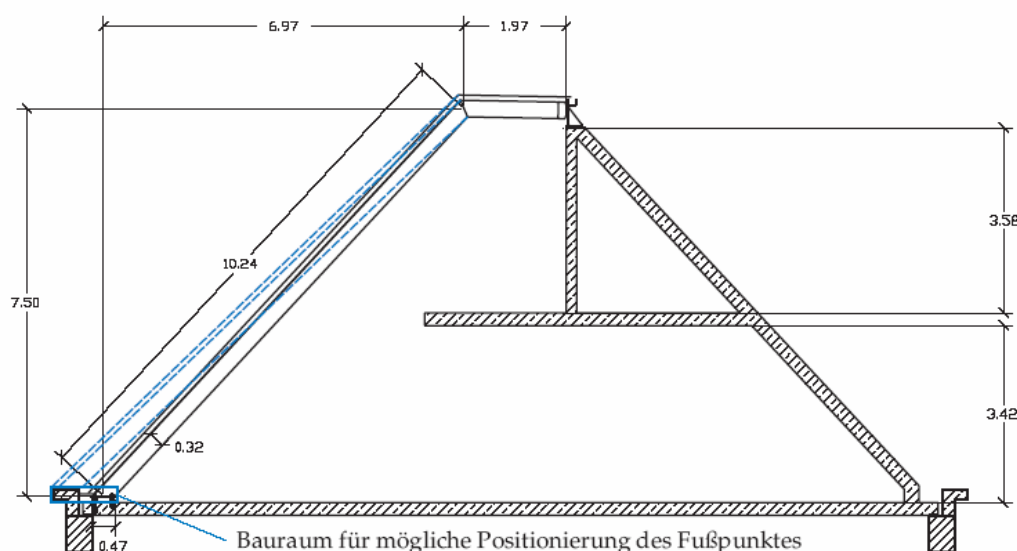


Abb. 9.3: Alternative Dachkonstruktion aus geschweißten Aluminium- bzw. Stahlsparren

Der Sparrenabstand wurde bei allen Entwurfsvarianten konstant zu 1,50 m angesetzt. Als Trägermaterial wurden die EN-Aluminiumlegierungen AW 6060 T66 und AW 6082 T6 sowie die Stahlsorten S235 (St 37) und S355 (St 52) verwendet.

9.2 Bemessungstechnische Aspekte

9.2.1 Entwurf und Optimierung

Sowohl für die Aluminium- als auch die Stahlsparren wurden optimierte Querschnitte in Abhängigkeit der Trägerhöhe entworfen. Maßgebendes Kriterium war dabei ein minimales Verhältnis von Fläche (A) zu Trägheitsmoment (I_y). Bei den Aluminiumsparren wurde zudem die Zugehörigkeit zu den Querschnittsklassen 1 bis 3 gemäß den Beulvorschriften des EC 9 angestrebt. Der Aluminiumquerschnitt sowie der Zusammenhang von A zu I_y sind in Abhängigkeit der Trägerhöhe in Abbildung 9.4 dargestellt. Der Vergleichsträger aus Stahl wurde als geschweißtes I-Profil modelliert, wobei die Querschnittsabmessungen je nach Trägerhöhe linear extrapoliert wurden.

Zur Optimierung des Tragwerks wurde in Kooperation mit Jurecka & Bletzinger (2005) eine Robustheitsanalyse durchgeführt. Robust Design bezeichnet einen Entwurf, der die Auswirkungen von kontrollierbaren Eingangsgrößen und nicht kontrollierbaren Störgrößen auf das betroffene Produkt, wie z. B. hier das Tragwerk, minimiert. Ein System gilt als robust, wenn es möglichst wenig auf Änderungen der Störgrößen reagiert, und somit die entsprechenden Sensitivitäten möglichst klein ausfallen. Folglich wird ein Entwurf angestrebt, der unter allen möglichen Veränderungen ein optimales Funktionieren des Tragwerks garantiert.

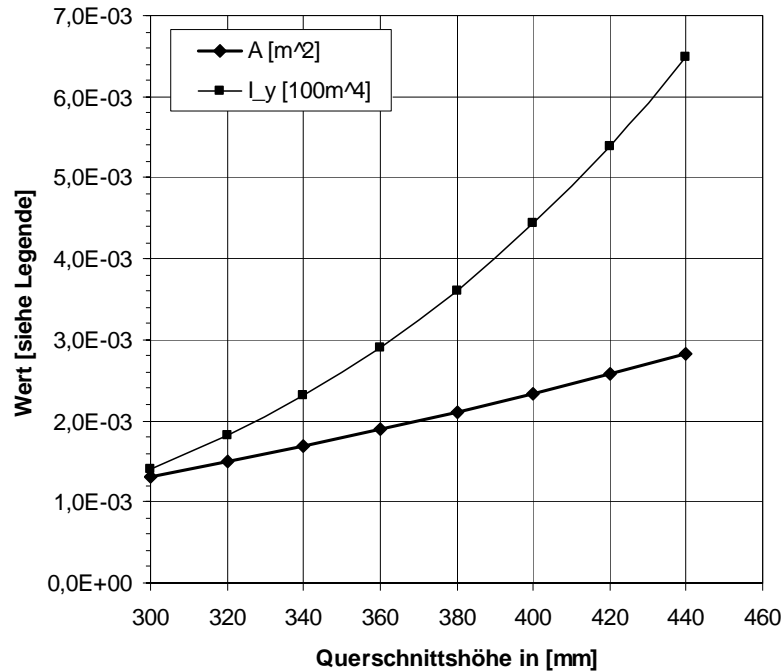


Abb. 9.4: Optimierte Querschnittswerte des angewandten Spektrums für Aluminium

Im vorliegenden Fall war die Konstruktion mit minimalem Materialeinsatz gesucht. Gleichzeitig sollte sowohl die Tragsicherheit als auch die Gebrauchstauglichkeit in Form einer maximal zulässigen Durchbiegung von $1/200$ gewährleistet werden. Für Aluminium waren hierzu die Nachweise nach EC 9 und für Stahl nach DIN 18800 ausschlaggebend. DIN 4113 wurde aufgrund der Ergebnisse bei den Fassaden (vgl. Kapitel 7) und Schilderbrücken (vgl. Kapitel 8) in diesem Beispiel nicht berücksichtigt. Der Entfestigung durch Schweißen bei Aluminium wurde durch eine entsprechende Vergrößerung der Auslastungsgrade in den Wärmeeinflusszonen Rechnung getragen.

Bei der Robustheitsanalyse wurde somit die Gewichtsminimierung der Sparren als Optimierungsziel definiert. Diese hat aufgrund der vorgegebenen Systemlinien eine Minimierung der Trägerhöhe zur Folge. Als Nebenbedingungen war die Einhaltung der maximalen Spannungen und Verschiebungen der verschiedenen Lastfallkombinationen gefordert. Als erste Designvariable wurde die Trägerhöhe definiert. Da aufgrund der ausgeprägten Spannweite von überhöhten Sparren ausgegangen wurde, diente als zweite Designvariable die Auflagerverdrehung. Störgrößen dieses Problems sind die veränderlichen Koordinaten des Fußpunktes.

9.2.2 Ergebnisse der Tragwerksoptimierung

Die Variation der Störgrößen führte in obigem Beispiel zu unterschiedlichen Trägerlängen. Die „worst case-Konstellation“ für die Zielfunktion ergibt sich für die äußerste Positionierung des Fußpunktes. Ähnliches gilt für die Nebenbedingungen. Dabei hat die zunehmende Stützweite einen Anstieg der auftretenden Biegemomente zur Folge, wodurch sich sowohl die Durchbiegung als auch die Spannungen erhöhen. Der Einfluss der sich ändernden Steigung des Sparrens und des sich damit ändernden Momenten- und Normalkraftverlaufs fällt hingegen kaum ins Gewicht.

Die Ergebnisse der optimierten Dachsparren sind in Tabelle 9.1 enthalten. Die dazugehörigen Auslastungsgrade sind in Abbildung 9.5 dargestellt.

Tab. 9.1: Ergebnisse der Robustheitsanalyse

	Material	Fläche [cm ²]	Sparrenmasse [kg]	Auflagerverdrehung [rad]
1	AW 6060 T66	23,4	76,5	0,009
2	AW 6082 T6	21,1	69,1	0,009
3	S235 (St 37)	16,7	158,5	0,009
4	S355 (St 52)	12,2	116,5	0,009

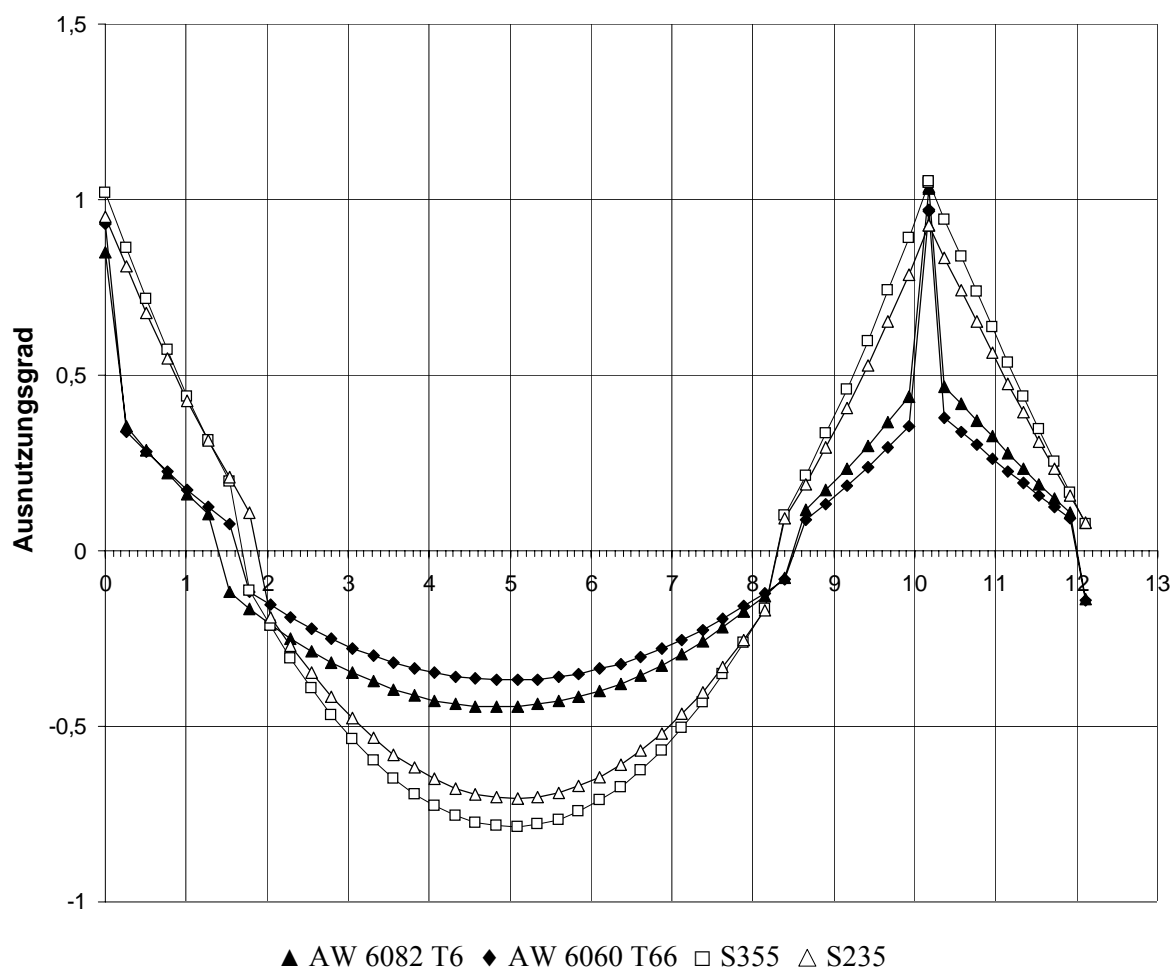


Abb. 9.5: Auslastung der per Robustheitsanalyse optimierten Sparrensysteme

Verglichen mit Stahl, ist die durchschnittliche Ausnutzung der Aluminiumträger niedriger. Durch die Wärmeeinflusszone im Bereich der Schweißnähte am Fußpunkt und am Knick werden diese Punkte voll ausgelastet, während im unbeeinflussten Material des restlichen Trägers die Auslastung weniger als 50% beträgt. Der Kurvenverlauf weist somit deutlich Sprünge auf. Positiver Nebeneffekt ist die unproblematische Erfüllung des Gebrauchstauglichkeitsnachweises.

Bei Stahl wird die Festigkeit durch Schweißen hingegen nicht beeinflusst. Folglich ist der Verlauf der Ausnutzungsgrade sowohl durch eine größere Stetigkeit als auch durch ein insgesamt deutlich höheres Niveau gekennzeichnet.

9.3 Ökologische Bewertung

9.3.1 Auswahl der Systeme und funktionelle Einheit

Bei den ökologischen Analysen wurden die optimierten Systeme 1 bis 4 von Tabelle 9.1 betrachtet. Als funktionelle Einheit diente dabei jeweils ein Dachsparren.

9.3.2 Modellierung

Da die Metallkonstruktion durch die Glasscheiben vor jeglichem Witterungseinfluss geschützt ist und es sich bei den Innenräumen um gut klimatisierte Büro- und Aufenthaltsräume handelt, ist bei dieser Anwendung kein Korrosionsschutz erforderlich. Aus diesem Grund wurden sowohl für die Aluminium- als auch die Stahlsparren keinerlei Wartungsarbeiten (vgl. Tab. 9.2) angesetzt. Die Oberflächenbehandlung der Sparren wurde somit aus rein ästhetischen Gesichtspunkten gewählt. Für Aluminium wurden daher blanke, eloxierte und pulverbeschichtete (80 µm) Varianten bilanziert während für Stahl blanke und pulverbeschichtete (80 µm) Träger zum Einsatz kommen. Die Dicken der Beschichtungen entsprechen den Standardwerten gemäß EcoInvent (2003), DIN EN 1461 und DIN EN 12944. Die Recyclingraten wurden auf Grundlage von Kapitel 5, Tabelle 5.5 errechnet und sind nachstehend aufgelistet (vgl. Tab. 9.2).

Tab. 9.2: Modellierung der Nutzungsphase und des Recyclings der Dachsparren

Oberflächenbehandlung	Erneuerung	Recyclingrate [R]
Aluminium blank	---	$94,6\% = 98\% \cdot 98,5\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Aluminium eloxiert	---	$94,6\% = 98\% \cdot 98,5\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Aluminium pulverbeschichtet	---	$89,6\% = 98\% \cdot 93,25\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Stahl blank	---	$94,6\% = 98\% \cdot 98,5\% \cdot 98\% \cdot 100\%$
Stahl pulverbeschichtet	---	$89,6\% = 98\% \cdot 93,25\% \cdot 98\% \cdot 100\%$

9.3.3 Wirkungsabschätzung und Bewertung

In Abbildung 9.6 bis Abbildung 9.11 sind die berechneten Wirkkategorien der optimierten Sparrenvarianten 1 bis 4 (vgl. Tab. 9.1) mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen dargestellt.

Die Ergebnisse spiegeln sowohl die Masseverteilung als auch den Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen wider. Mit ca. 11% mehr Masse erzielt beispielsweise der Sparren mit der Legierung AW 6060 T66 entsprechend ungünstigere Ergebnisse als die Variante mit AW 6082 T6. Dasselbe gilt für den Sparren mit S235, welcher 36% mehr Gewicht hat als der Träger aus S355.

Bei den Oberflächenbehandlungen sind die blanken Konstruktionen deutlich effektiver als die beschichteten. Bei Aluminium wirkt sich zudem das Eloxieren positiver aus als die Pulverbeschichtung. Generell erzielen auch bei diesem Beispiel die Aluminiumvarianten in fast allen Wirkkategorien die günstigeren Ergebnisse. Einzige Ausnahme stellt das Treibhauspotenzial dar. Hierbei ist nur beim blanken Aluminiumsparren das CO₂-Äquivalent niedriger als bei den Stahlvarianten.

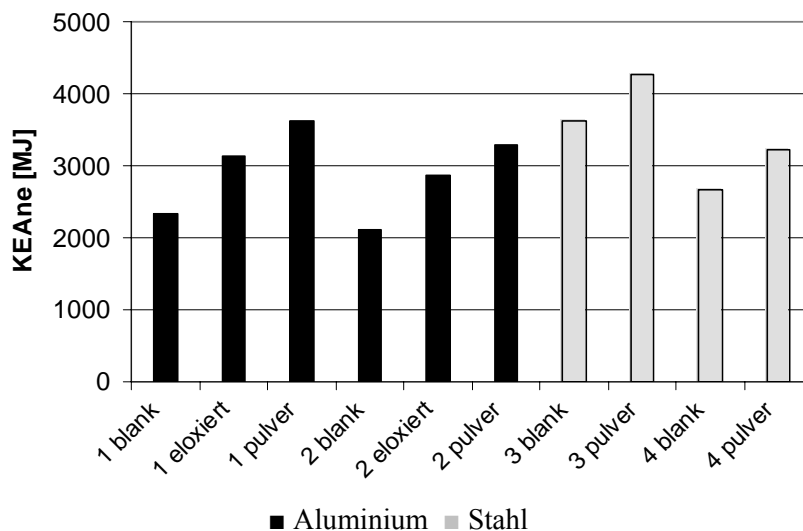


Abb. 9.6: Nicht erneuerbarer Energieaufwand (KEA_{ne}) je Dachsparren

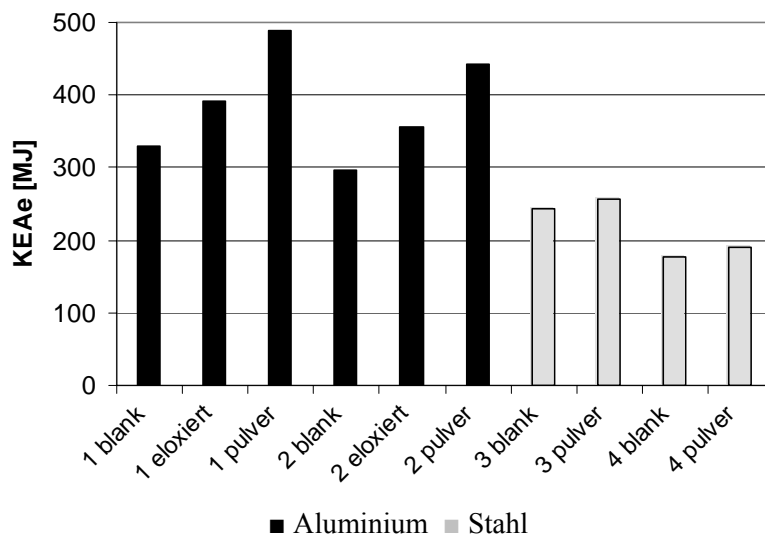


Abb. 9.7: Erneuerbarer Energieaufwand (KEA_e) je Dachsparren

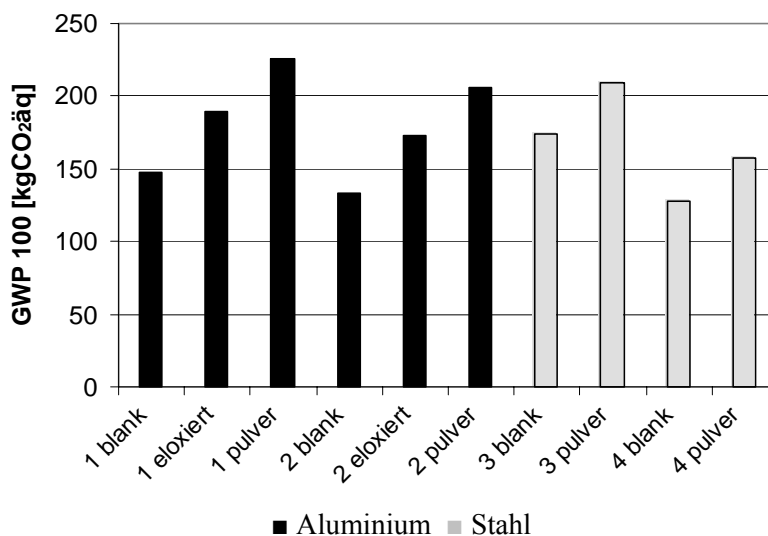


Abb. 9.8: Treibhauspotenzial (GWP₁₀₀) je Dachsparren

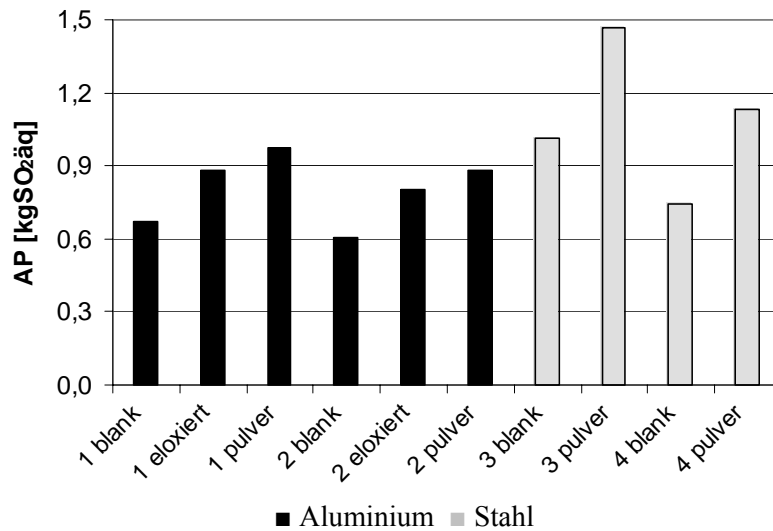


Abb. 9.9: Versauerungspotenzial (AP) je Dachsparren

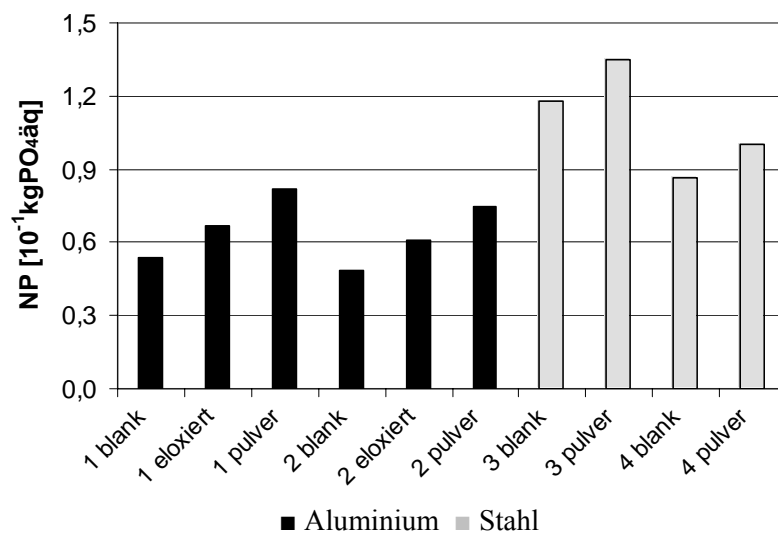


Abb. 9.10: Eutrophierungspotenzial (NP) je Dachsparren

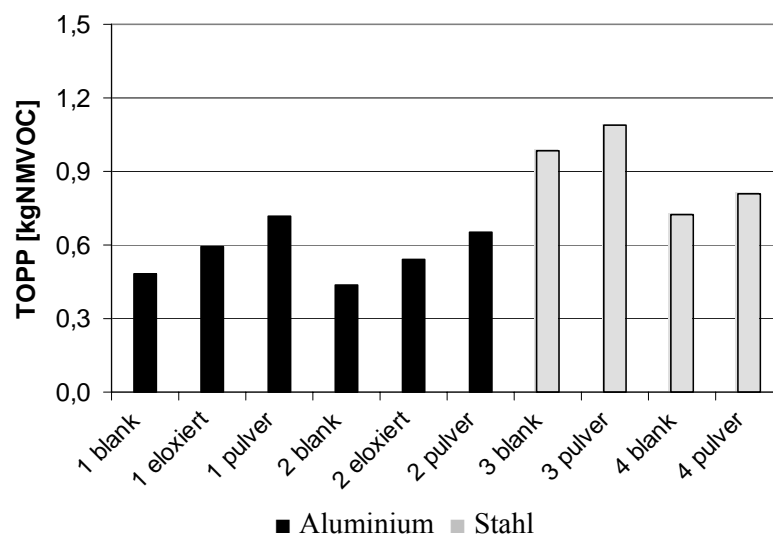


Abb. 9.11: Ozonvorläuferpotenzial (TOPP) je Dachsparren

Nachfolgend wird der nicht erneuerbare Energieaufwand (KEA_{ne}) der einzelnen Dachsparren in Abhängigkeit der Recyclingrate betrachtet (vgl. Abb. 9.12 und Abb. 9.13).

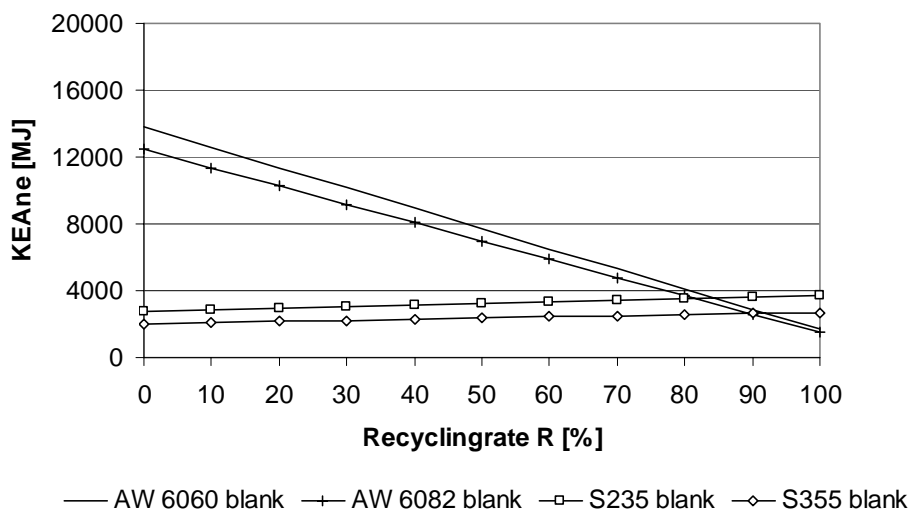


Abb. 9.12: Vergleich des KEA_{ne} der blanken Sparren in Abhängigkeit der Recyclingrate

Aufgrund der Massenverteilung erfolgt der energetische Ausgleich bei den blanken Varianten zunächst zwischen der Legierung AW 6082 und S235. Dies ist der Fall bei einer Recyclingrate von ca. 81%. Der Energiebedarf von Legierung AW 6060 T66 und S355 ist hingegen erst ab einer Recyclingrate von ca. 91% ausgewogen.

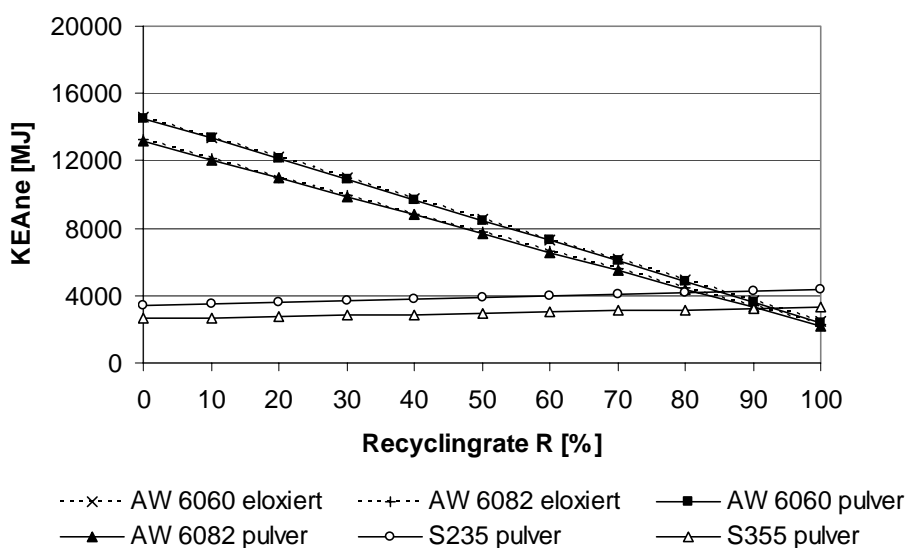


Abb. 9.13: Vergleich des KEA_{ne} der beschichteten Sparren in Abhängigkeit der Recyclingrate

Die Ergebniskurven der beschichteten Varianten verlaufen auf etwas höherem Niveau als bei den blanken Sparren. Allerdings ist der Unterschied zwischen der Pulverbeschichtung und dem Eloxieren bei Aluminium kaum erkennbar. Bei einer Recyclingrate von 81% ist zunächst der Energieverbrauch der beschichteten Sparren aus AW 6082 und aus S235 gleich hoch. Der Ausgleich der Träger mit der Legierung AW 6060 und S355 erfolgt bei einer Recyclingrate von ca. 91%. Damit sind die für einen energetischen Ausgleich maßgebenden Recyclingraten identisch zu den blanken Sparren. Der Energieverbrauch wird somit von der Masseverteilung dominiert, während die Beschichtung keinen erkennbaren Einfluss ausübt.

Da die Ergebnisse des Treibhauspotenzials für Aluminium nur bei den blanken Ausführungen niedriger sind als bei den Stahlträgern, wird nachstehend zusätzlich das CO₂-Äquivalent (GWP100) in Abhängigkeit der Recyclingraten betrachtet (vgl. Abb. 9.14 und Abb. 9.15).

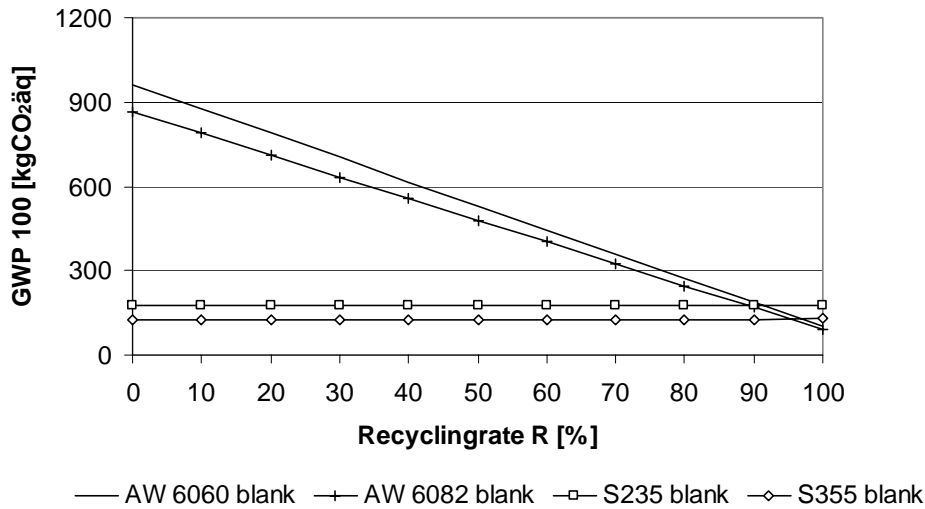


Abb. 9.14: Vergleich des GWP100 der blanken Sparren in Abhängigkeit der Recyclingrate

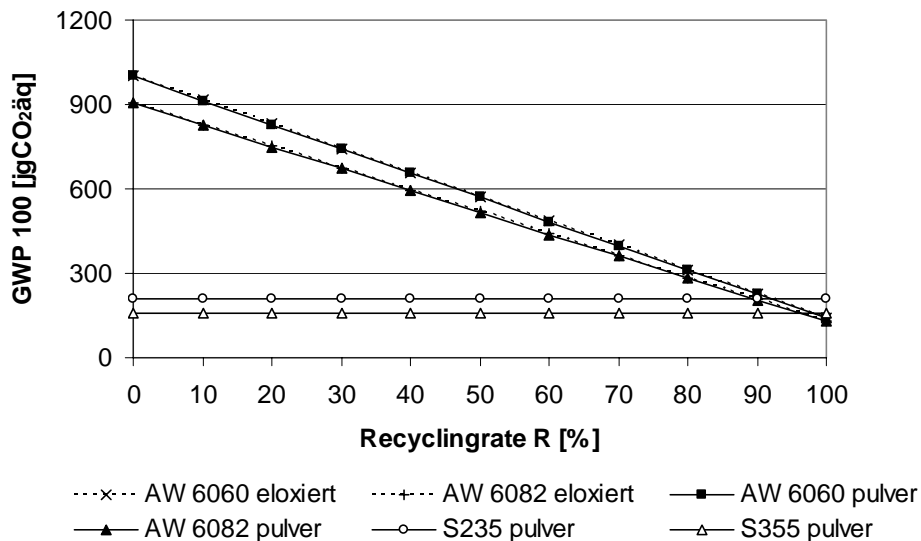


Abb. 9.15: Vergleich des GWP100 der beschichteten Sparren in Abhängigkeit der Recyclingrate

In obigen Abbildungen sind die gleichen Tendenzen wie beim Verbrauch an nicht erneuerbarer Energie (vgl. Abb. 9.12 und Abb. 9.13) zu beobachten. Auch hier machen sich die unterschiedliche Gewichtsverteilung und die Oberflächenbeschichtung der optimierten Sparren bemerkbar. Auffällig ist hier allerdings der nahezu waagerechte Verlauf der Stahlkurven. Hierdurch relativiert sich der CO₂-Ausstoß der Varianten aus AW 6082 und S235 erst ab ca. 90%. Der Ausgleich zwischen AW 6060 und S355 erfolgt letztlich ab ca. 96%.

Beim Treibhauspotenzial sind folglich höhere Recyclingraten notwendig um für Aluminium- und Stahlträger den gleichen Emissionsausstoß zu erzielen.

9.4 Lebenszykluskostenanalyse

9.4.1 Modellierung bzw. Annahmen

Für die Analyse der Lebenszykluskosten wurde ein Dachtragwerk bestehend aus 20 Sparren angesetzt. Da die Abnahmemenge die Preise der Metallprofile erheblich beeinflusst, konnte somit eine praxisnähere Kostenermittlung erfolgen. Zudem wurde die Bestimmung der oftmals flächenbezogenen Montagekosten erleichtert. Analog zu Tabelle 9.2 wurden für Aluminium sowohl blanke, eloxierte als auch pulverbeschichtete Träger analysiert während für Stahl blanke und pulverbeschichtete Sparren berechnet wurden.

Die Preise für Material, Transport, Montage und Beschichtung der Aluminiumkonstruktion wurde mit Hilfe von Herstellerangaben ermittelt. Für Stahl kamen hingegen durchschnittliche Kostenwerte für eine komplett montierte, blanke Stahlkonstruktion aus Mittag (1998) zur Anwendung. Die Preiserhöhung bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurde wie bei den Schilderbrücken in Kapitel 8 auf Grundlage der Baupreisstatistik (Statistisches Bundesamt, 2005) berücksichtigt. Die Modellierung der Pulverbeschichtung von Stahl erfolgte mit Daten von Metallbauunternehmen.

Für die Montage wurde bei beiden Materialien der Einsatz eines Krans berücksichtigt. Da das Gewicht der Aluminium- und Stahlsparren verglichen zur Kranleistung sehr gering ist, wurde hierbei der Massenunterschied der einzelnen optimierten Sparren nicht beachtet. Die Aufwendungen für den Kran sind somit für alle betrachteten Varianten gleich. Wie bei der ökologischen Bewertung wurden aufgrund der Anwendung in gut klimatisierten Innenräumen für alle betrachteten Systeme keine Wartungsarbeiten angesetzt.

Die Demontage wurde wie bei den vorherigen Beispielen mit einem prozentualen Anteil der Montagekosten berechnet. Diese betragen 46% der Lohn- und 75% der Maschinenaufwendungen. Der Schrottwert wurde nach einer Lebensdauer von 80 Jahren unter Berücksichtigung des Kalkulationszins von 3% als Ertrag mitberechnet.

9.4.2 Ergebnisse

Da die Lebenszykluskosten von den Anfangskosten und den Aufwendungen bzw. Erträgen beim Rückbau und Ertrag dominiert werden, sind die folgenden Ergebnisse zunächst in Tabellenform dargestellt (vgl. Tab 9.3). Es handelt sich hierbei um die Gesamtkosten, bzw. dem Kapitalwert der Lebenszykluskosten am Ende der 80jährigen Lebensdauer.

Tab 9.3: Gesamtkosten der optimierten Dachkonstruktionen (nur Metallanteil) mit 20 Sparren und einer Lebensdauer von 80 Jahren

Oberflächen	blank	pulverbeschichtet	eloxiert
AW 6060 T6	24.904 €	25.485 €	27.276 €
AW 6082	23.579 €	24.104 €	25.720 €
S235 (St 37)	15.295 €	16.709 €	---
S355 (St 55)	12.698 €	13.912 €	---

Die Kosten für die Aluminiumkonstruktionen sind in diesem Beispiel deutlich höher als für die Stahltragwerke. Dies ist Folge der Querschnittsgestaltung. Für die Stahlsparren kommt ein einfaches Standardprofil zum Einsatz, während für Aluminium ein äußerst komplexes und gegen lokales Beulen optimiertes Profil extra angefertigt werden muss. Der Materialpreis ist dadurch für Aluminium wesentlich höher als für Stahl. Aufgrund der Innenraumlage kommen zudem keine großen Aufwendungen während der Nutzung hinzu. Die Dauerhaftigkeit von Aluminium kann sich hier somit nicht zu dessen Vorteil auswirken.

Da bei obigen Berechnungen die Preise der Stahlkonstruktionen auf Literaturangaben basieren, während die Kosten für Aluminium direkt vom Hersteller stammen, wird im Folgenden der Einfluss der Materialkosten näher untersucht. Zu diesem Zweck wird eine Sensitivitätsanalyse der Gesamtkosten in Abhängigkeit der Kostenverhältnisse von Stahl- zu Aluminiumprofilen durchgeführt. Variiert werden dabei die Stahlpreise, während die Aluminiumpreise konstant gehalten werden. Die Ergebnisse sind für die blanken Dachsparren in Abbildung 9.16 und für die beschichteten Sparren in Abbildung 9.17 enthalten.

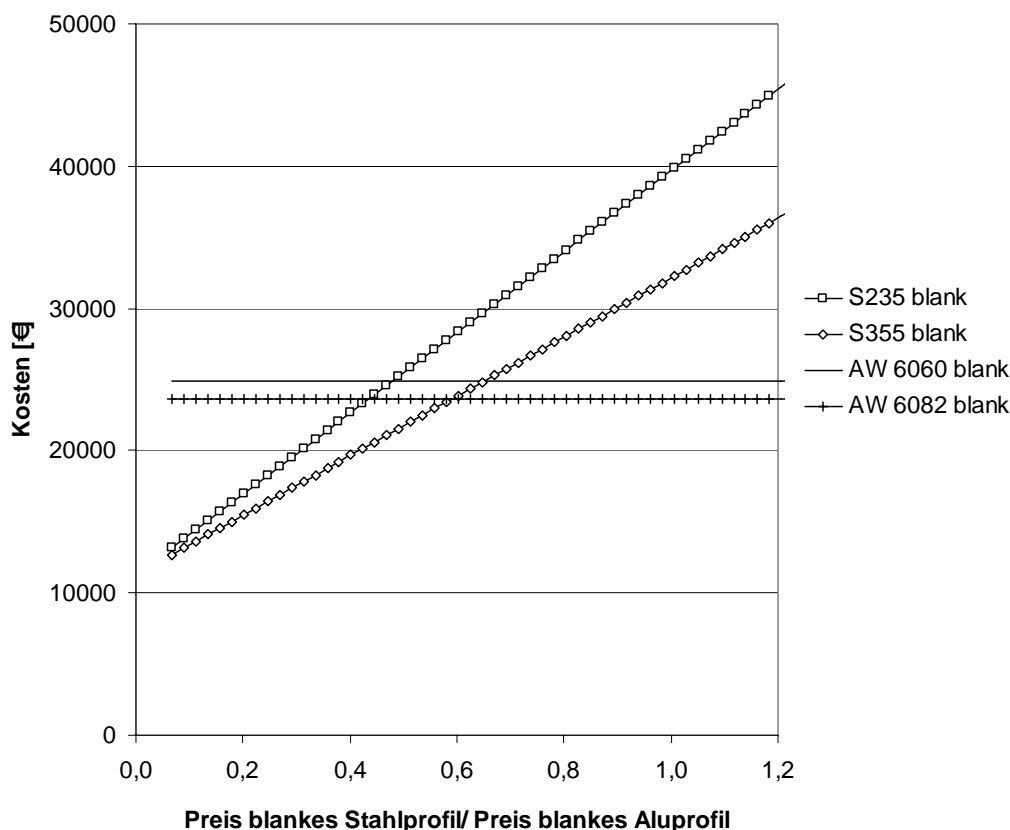


Abb. 9.16: Gesamtkosten der blanken Dachkonstruktionen in Abhängigkeit des Materialpreisverhältnis von Stahl zu Aluminium

Die Lebenszykluskosten der blanken AW 6082- und der S235-Träger sind bereits ab einem Kostenverhältnis von ca. 0,44 der Metallprofile ausgeglichen. Beim Vergleich des Dachtragwerks aus AW 6060 und S355 relativiert sich der Unterschied erst bei einem Kostenverhältnis von ca. 0,64. Würde folglich der Materialpreis von Stahl mehr als 44% bzw. 64% des Aluminiumpreises betragen, so wäre das Dach mit Aluminiumträgern günstiger. Auch hier macht sich der Massenunterschied der einzelnen optimierten Dachsparren bemerkbar.

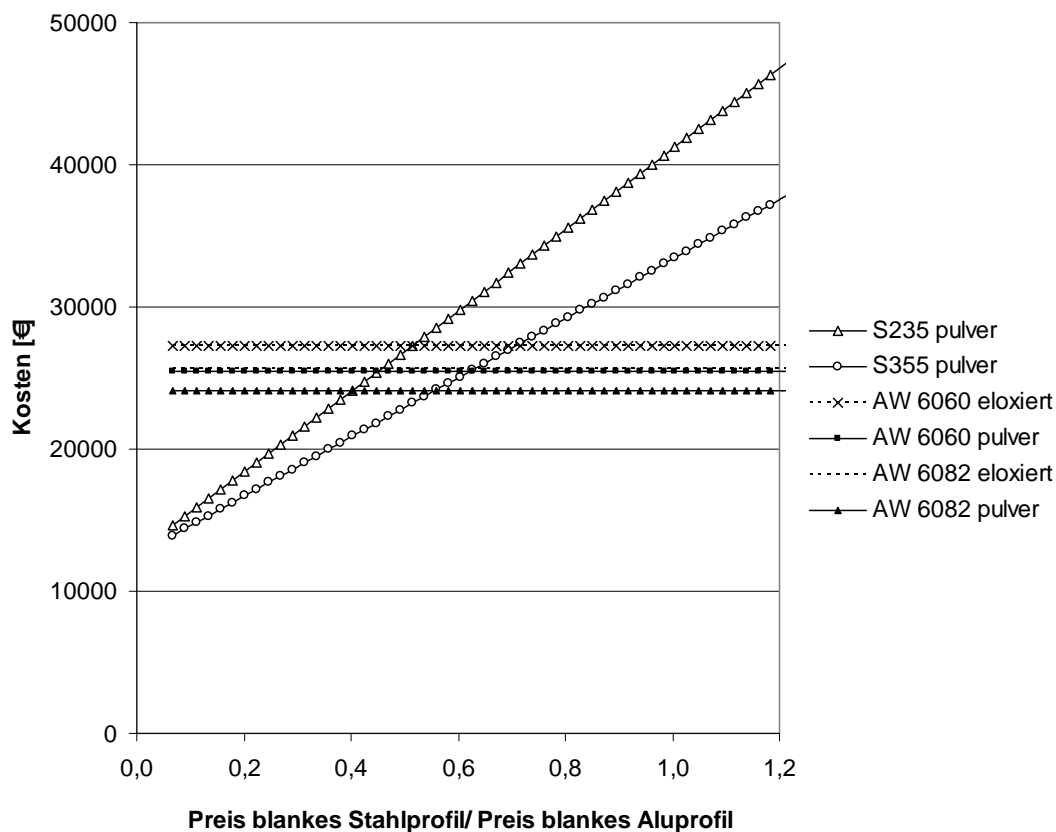


Abb. 9.17: Gesamtkosten der beschichteten Dachkonstruktionen in Abhängigkeit des Materialpreisverhältnis von Stahl zu Aluminium

Bei den beschichteten Dachsparren kommt es bei einem Stahlpreis von 40% des Aluminiums zum ersten Ausgleich der Lebenszykluskosten. Dieser erfolgt zwischen den pulverbeschichteten AW 6082- und S235-Varianten. Die Pulverbeschichtung ist bei Stahl etwas kostenintensiver als bei Aluminium. Dementsprechend wird der Kostenausgleich verglichen mit den blanken Systemen hier bei niedrigeren Preisverhältnissen erzielt. Erreicht der Stahlpreis 71% der Materialkosten von Aluminium, so haben die pulverbeschichtete S355-Variante und der eloxiert Träger aus AW 6060 die gleichen Lebenszykluskosten. Da die Preise für das Eloxieren höher sind als für die Pulverbeschichtung, ist der Kostenausgleich bei den blanken Trägern erst bei einem größeren Preisverhältnis ausgeglichen.

9.5 Schlussfolgerung

Verglichen mit den Fassaden und den Schilderbrücken ist die neu zu entwerfende Dachkonstruktion ein Einzelobjekt. Da hierfür keine Standardsysteme zur Verfügung stehen, gilt es sowohl Tragwerk als auch Querschnitte an die vorhandenen Randbedingungen optimal anzupassen.

Aufgrund der großen Spannweiten ist der Aluminiumeinsatz nur mit Querschnitten möglich, die **bemessungstechnisch** optimiert werden. Um den Materialverbrauch so effizient wie möglich zu gestalten, sollte zu diesem Zweck ein minimales Verhältnis von Fläche zu Trägheitsmoment und eine möglichst niedrige EC 9-Querschnittsklasse (zwischen 1 und 3) zur Vermeidung lokalen Beulens angestrebt werden. Für die Optimierung des Tragwerks bietet sich die Durchführung einer Robustheitsanalyse nach Jurecka & Bletzinger (2005) an. Mit den vorgegebenen Randbedingungen sowie den maximalen Materialfestigkeiten ergaben sich so zwei Aluminium- und Stahlvarianten. Der Massenunterschied zwischen den beiden unterschiedlichen Stahlträgern beträgt dabei 36%. Die beiden Aluminiumsparren sind um 34% (AW6060) bzw. 41% (AW 6082) leichter als der Stahlträger mit geringstem Gewicht (S355). Aufgrund der Entfestigung bei den Schweißnähten sind die Aluminiumquerschnitte nur zur Hälfte ausgelastet. Gleichzeitig wird jedoch trotz ausgeprägter Spannweite die zulässige Durchbiegung problemlos erfüllt.

In **ökologischer** Hinsicht sind erneut die Aluminiumsparren günstiger, Dies ist der Fall ab Recyclingraten von 81% bzw. 91% (je nach Variante). Ausnahme hierbei ist das Treibhauspotenzial. Dieses ist bei den Dachsparren erst ab Recyclingraten von 90% bzw. 96% ausgeglichen. Die Beschichtung spielt bei obigen Ergebnissen keine Rolle.

Da die Dachsparren von den Glasscheiben vollkommen überdeckt sind, haben die Metallkonstruktionen keinerlei Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Insofern erübrigt sich die Anwendung der **EnEV**.

Die **wirtschaftlichen** Analysen machen deutlich, dass die Aluminiumkonstruktionen mit deutlich mehr Kosten verbunden sind als die Stahlkonstruktionen. Dies ist mit den Standardprofilen für Stahl einerseits und den komplexen, gegen lokales Beulen optimierten Aluminiumquerschnitten andererseits zu erklären. Hierdurch kommt es zu gravierenden Unterschieden bei den Materialpreisen. Der Ausgleich der Gesamtkosten erfolgt bei den blanken Trägern erst ab einem Preisverhältnis der Stahl- zu den Aluminiumprofilen von 0,44 bzw. 0,64 (je nach Variante). Würde folglich der Materialpreis von Stahl mehr als 44% bzw. 64% des Aluminiumpreises betragen, so wäre das Dach mit Aluminiumträgern günstiger. Bei den beschichteten Trägern ist der Ausgleich bei stahl-Aluminium-Preisverhältnissen von 0,4 bzw. 0,71 in Abhängigkeit der Beschichtungskosten gegeben.

Insgesamt ist der Aluminiumeinsatz bei den Dachkonstruktionen kritisch zu bewerten. Aufgrund der hohen Lasten und der großen Spannweiten ist ein effizienter Aluminiumeinsatz in bemessungstechnischer Hinsicht nur mit großem Optimierungsaufwand möglich. Gleichzeitig sind die Aluminiumsparren wirtschaftlich deutlich ungünstiger als alternative Stahlträger. Auch bei den Umweltwirkungen ist Aluminium erst ab hohen Recyclingraten vorteilhafter als Stahl.

E Folgerungen

10 Fazit und Ausblick

10.1 Wissenschaftliches Fazit

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen lassen sich für tragende Aluminiumkonstruktionen folgende Schlüsse ziehen:

Bemessungstechnisch

In bemessungstechnischer Hinsicht liefert die europäische Berechnungsnorm EC 9 verglichen mit der nationalen Richtlinie DIN 4113 deutlich wirtschaftlichere Ergebnisse. Dies gilt insbesondere für Schub, Stabilität und Schweißverbindungen. Vorteilhaft ist zudem, dass die Gefahr des lokalen Beulens im EC 9 durch die Querschnittsklassifizierung abgedeckt wird. In DIN 4113 ist hier ein zusätzlicher Nachweis erforderlich, dessen Ergebnisse häufig stark auf der sicheren Seite liegen. Da die Nachweise und Verfahren im EC 9 allerdings oftmals sehr vielschichtig und umfangreich gestaltet sind, bleibt abzuwarten ob nach der offiziellen Einführung des EC 9 dem enormen Bemessungsaufwand oder den wirtschaftlichen Ergebnissen mehr Bedeutung beigemessen wird.

Bei tragenden Aluminiumkonstruktionen ist zudem nicht immer die Tragfähigkeit sondern die Gebrauchstauglichkeit entscheidend. Für eine effiziente Konstruktion sind folglich optimierte Querschnitte mit minimalem A/I-Verhältnis gefordert, die gleichzeitig eine ausreichende Sicherheit gegen lokales Beulen gewährleisten. Letzteres kann beispielsweise durch die Zugehörigkeit zur Klasse 1 bis 3 der Querschnittsklassifizierung des EC 9 erfüllt werden.

Ökologisch

Die ökologischen Bewertungen mit Hilfe der Ökobilanzierung zeigen, dass Aluminium ab gewährleisteten Recyclingraten von ca. 80% günstigere Werte liefert als Stahl. Ausnahmen hierbei sind Aluminiumkonstruktionen, welche nur mit gewissem Optimierungsaufwand auszuführen sind. Bei den Dachkonstruktionen in Kapitel 9 liefert Aluminium beispielsweise erst ab Recyclingraten von ca. 90% umweltfreundlichere Ergebnisse als Stahl.

Bezogen auf die Masse sind die Aluminiumwerte ab einem Gewichtsverhältnis von Aluminium zu Stahl von ca. 0,5 ökologisch vorteilhafter. Verglichen mit Stahlkonstruktionen, welche aufwändige Wartungsarbeiten erfordern, kann sich dieser Wert auf bis zu 0,87 (vgl. Rahmenbrücke in Kapitel 8) erhöhen.

Die Umweltwirkungen werden im Allgemeinen von der Herstellung und dem Recyclingprozess bestimmt. Der Einfluss der Nutzungsphase ist von sekundärer Bedeutung. Dies zeigen auch die Berechnungen gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) bei Anwendungen in der Gebäudehülle. Demnach trägt der Energieverbrauch der reinen Metallkonstruktion, d. h. für Herstellung, Wartung und Recycling, lediglich ein Minimum der benötigten Heizwärme während der gesamten Lebensdauer. Bei den Fassaden in Kapitel 7 ergibt sich hierfür beispielsweise ein Anteil von maximal 2%. Die benötigte Heizwärme wird dabei weniger vom Metall, als von der Ausführung der Wärmedämmung dominiert.

Wirtschaftlich

Die durchgeführten Lebenszyklusanalysen machen deutlich, dass die Aluminiumkonstruktionen als Standardausführungen und unter Korrosionsbelastung wirtschaftlich günstiger sind als entsprechende Stahlkonstruktionen. Standardausführungen bezeichnen in diesem Zusammenhang Querschnitte, die nicht neu zu entwerfen sind, sondern auf dem Markt bereits produziert werden. Bei Anfertigung komplexer Aluminiumprofile mit lediglich geringer Abnahmemenge wird hingegen schnell ein hohes Preisniveau erreicht.

Aluminium in vielen Fällen blank bzw. eloxiert eingesetzt werden. Dies gilt auch bei Korrosionsbelastung. Stahlanwendungen benötigen hingegen bereits unter normalem Witterungseinfluss eine ausreichende Beschichtung. Die Kosten für entsprechende Oberflächenbehandlung und Erneuerungen sind dadurch in vielen Fällen entsprechend höher.

Die Bedeutung der Nutzungsphase ist bei den Kosten generell größer als bei den Umweltwirkungen. Dabei ist eine deutliche Abhängigkeit vom Umfang der angesetzten Wartungsarbeiten und von der Größe der zu erneuernden Fläche zu beobachten.

Ganzheitlich

Die ganzheitliche Betrachtung, d. h. die gleichzeitige Berücksichtigung von bemessungstechnischen, ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten, zeigt, dass Aluminium beim korrekten Einsatz bessere Resultate ergibt als Stahl. Hier zahlen sich insbesondere das geringe Gewicht, die natürliche Korrosionsresistenz, das Recyclingpotenzial und die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus aus. Eine Korrelation von Bemessung bzw. Konstruktion mit Umweltwirkungen und Kosten ist gegeben.

Die ganzheitliche Auslegung und Optimierung einer Baukonstruktion ist ein iterativer Prozess und mit enormen Aufwand und Hintergrundwissen verknüpft. Zum Einsatz in der Baupraxis ist der aktuelle Entwicklungsstand von Werkzeugen und Datengrundlagen noch nicht geeignet. Die Softwaretools von Neuberg (2004) und Ekkerlein (2004) stellen diesbezüglich einen viel versprechenden Ansatz dar. Die Modellierung von detailtreuen Metallkonstruktionen ist jedoch aufgrund der enormen Datenmengen damit nicht möglich.

Kritische Anmerkungen

Insgesamt kritisch zu bewerten ist die vom BayFORREST-Verbundprojekt (F268) vorgegebene Lebensdauer von 80 Jahren für die Variantenstudie (vgl. Kapitel 7 bis Kapitel 9). Insbesondere im Hochbau gilt es oftmals vorwiegend ästhetische Anforderungen zu erfüllen. Aus diesem Grund werden Fassaden manchmal bereits nach weniger als 20 Jahren ersetzt. Darüber hinaus ist die Lebensdauer einer Konstruktion maßgeblich von der Funktion und den Umgebungsbedingungen abhängig. Die Modellierung der Nutzungsphase ist somit an viele Unsicherheitsfaktoren geknüpft. In der vorliegenden Arbeit wurden daher die Ökobilanzen sowohl mit als auch ohne Nutzungsphase durchgeführt. Auch bei den Lebenszykluskosten wurde bei der Ergebnisdarstellung auf eine klare Zuordnung der einzelnen Phasen geachtet.

Ein weiterer kritischer Punkt ist der Ansatz der Recyclingraten. Beim Recycling von Stahlanwendungen kommt es sowohl zum Wert- als auch zum Materialverlust. Da diese Tatsache nicht offiziell dokumentiert ist, wurde innerhalb der vorliegenden Arbeit für Aluminium und Stahl mit den gleichen Recyclingraten gerechnet. Diese Modellierung ist für Aluminium konservativ und für Stahl begünstigend.

Zudem ist anzumerken, dass ökologische und wirtschaftliche Bewertung signifikant durch die Datengrundlage beeinflusst werden. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Daten wurden daher genau dokumentiert und vor der Anwendung überprüft.

10.2 Baupraktisches Fazit

In der Baupraxis sollte der Aluminiumeinsatz lebenszyklusorientiert und unter Berücksichtigung der materialspezifischen Charakteristiken, wie z. B. Verformungsanfälligkeit, Wärmeinflusszone bei Schweißnähten, etc. erfolgen. Der Materialverbrauch ist durch die Ausführung intelligenter Konstruktionen mit optimierten Querschnitten zu minimieren. Die Möglichkeiten innovativer Bemessungsnormen (z.B. des EC 9) und des Strangpressens sollten zu diesem Zweck voll ausgeschöpft werden.

Zur Gewährleistung einer effektiven Nutzungsphase sollte eine Oberflächenbehandlung mit minimalem Wartungsaufwand gewählt werden. Am besten hierfür sind blanke Ausführungen. Bei Anwendungen in der Gebäudehülle sind U-Wert-optimierte Konstruktionen einzusetzen und Wärmebrücken zu vermeiden. Maßgebend hierbei sind die Minimierung von Ansichtsweiten und der Einsatz einer ausgefeilten Wärmedämmung.

Darüber hinaus gilt es von Anfang an recyclinggerecht zu konstruieren. Möglichst hohe Recyclingraten werden beispielsweise durch die Anwendung zerstörungsfrei lösbarer Verbindungen und die Vermeidung bzw. Minimierung von organischen Anhaftungen, Zusatz- und Verbundwerkstoffen erreicht.

Zusammenfassend kann Aluminium als tragendes Innen- und Außenbauteil für folgende Anwendungsbereiche empfohlen werden:

- bei Einwirkungen in Form von Eigengewicht und geringer Zusatzlast
- bei multifunktionalen Anforderungen (z. B. Fassaden),
- bei langen Lebensdauern mit minimalem Wartungsaufwand (z. B. Dachbleche)
- bei aggressiven Umgebungsbedingungen (z. B. Meerklima)
- bei hohen Anforderung an Energieabsorption und Wärmeleitung (z. B. Solarkollektoren)
- bei schwer zugänglichen Bauteilen sowie beweglichen Elementen (z. B. Sonnenschutz)

Bei hohen Lasten und gleichzeitig großen Spannweiten sollte der Einsatz von Aluminium aufgrund der Durchbiegungen im Einzelfall abgewogen werden. Zudem sollte bei einem Gewichtsverhältnis von Aluminium- zu Stahlkonstruktion größer als ca. 0,5 die Wirtschaftlichkeit des Aluminiumeinsatzes hinterfragt werden. Das Gleiche gilt für Recyclingraten kleiner als 80%.

10.3 Ausblick

Auf Grundlage der vorliegenden Arbeit lassen sich für die **Wissenschaft** folgende Bereiche mit weiterem Arbeits- und Forschungsbedarf ableiten:

- Der Eurocode 9 liefert wirtschaftlichere Ergebnisse als die nationale Norm DIN 4113. Die umfangreichen Nachweisverfahren des Eurocodes sind allerdings nicht gerade nutzerfreundlich und sollten durch entsprechende Software so weit wie möglich automatisiert werden. Insbesondere die Querschnittklassifizierung bietet sich zur Implementierung in ein entsprechendes Programm an. Die Anwendung des EC 9 könnte so deutlich vereinfacht und beschleunigt werden.
- Minimaler Materialeinsatz bedeutet die Anwendung von Querschnitten mit minimaler Fläche und maximalem Trägheitsmoment. Hierbei sollte zudem die Gefahr des Lokalen Beulens berücksichtigt und durch entsprechende Gestaltung eliminiert werden. Der Entwurf entsprechender Aluminiumquerschnitte könnte durch die Entwicklung automatisierter Optimierungsverfahren erleichtert werden.
- Den Ergebnissen des Datenbankvergleichs in Kapitel 5 zufolge, bestehen bei den ökologischen Daten je nach Quelle signifikante Unterschiede. Um diese Differenzen zu eliminieren ist zum einen die Harmonisierung der vorhandenen Sachbilanzdaten erforderlich und zum anderen das Erstellen eines einheitlichen Konzepts zur Berechnung der Wirkkategorien.
- Die ökologischen Bilanzen von Metallkonstruktionen sind maßgeblich abhängig von der Recyclingquote. Zu diesem Zweck sollte eine Datenbank mit Recyclingraten für einschlägige Aluminiumbauteile, entsprechenden Oberflächenbehandlungen, Fügeverfahren und Kombinationsmaterialien erstellt werden. Gleiches ist für Stahl erforderlich.
- Für die Durchführung von Lebenszykluskosten sind lediglich spärliche Datensätze vorhanden. Hier gilt es eine solide Informationsbasis im Hinblick auf Materialkosten, Aufwendungen für Beschichtungen, Montagekosten, Schrottwert etc. zu erstellen.
- Bei Anwendung eines dynamischen Investitionskostenverfahrens ist die Wahl eines passenden Kalkulationszinses mit erheblichen Unsicherheiten verknüpft. Insbesondere für den Hochbau werden daher Hilfestellungen in Form von Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen benötigt.
- Die Modellierung der Nutzungsphase ist im Hinblick auf Wartungsintervalle, Umfang der Erneuerungsmaßnahmen und Lebensdauer an viele Annahmen geknüpft. Für Baukonstruktionen gilt es folglich weitere Forschungsarbeit in Richtung Lebensdauervorhersage und Charakteristiken der Nutzungsphase zu leisten.
- Schließlich sollte die Entwicklung von Softwaretools zur ganzheitlichen Bewertung von Baumaßnahmen forciert werden. Einen viel versprechenden Anfang stellt das Softwarekonzept zur „Internet-basierten Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken“ von Neuberger (2004) und Ekkerlein (2004) dar. Für die Anwendung in der Praxis sollte dieses Konzept weiterentwickelt werden und mit aktuellen ökologischen und wirtschaftlichen Kenndaten erweitert werden.

In der **Baupraxis** gilt es bei Planern und Architekten Informationsdefizite bezogen auf die Anwendungsmöglichkeiten von Aluminium zu schließen. Forschung und Aluminiumindustrie sind folglich gefordert, Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten zu verbessern.

11 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, den Stellenwert von tragenden Aluminiumkonstruktionen angesichts der Nachhaltigkeitsdiskussion ganzheitlich zu erforschen und zu bewerten. Für Aluminiumanwendungen im Bauwesen sind dabei sowohl bemessungstechnische, ökologische als auch wirtschaftliche Gesichtspunkte zu untersuchen.

Hierbei gilt es zunächst zu klären, welche Vorschriften für eine derartige Bewertung von Relevanz sind, und welche Werkzeuge zur Realisierung zur Verfügung stehen. Mit Hilfe einer Literaturrecherche in Kapitel 2 konnten entsprechende Gesetze (z. B. Energieeinsparverordnung (EnEV)), Normen (z. B. ISO TC 59, ISO TC 207) sowie sonstige Initiativen identifiziert werden. Zur baupraktischen Umsetzung sind sowohl qualitative Hilfsmittel (z. B. Gütezeichen, Positiv-/Negativlisten etc.) als auch quantitative Werkzeuge (Ökobilanz, Software-Tools etc.) vorhanden. Letztere dienen zur Beurteilung konkreter, messbarer Indikatoren. Zur Charakterisierung von tragenden Aluminiumkonstruktionen wurden die Indikatoren „Energieverbrauch“, „Emissionen“, „Kosten“, „statische Ausnutzung“ und „Durchbiegung“ definiert. Als Bewertungswerkzeuge wurden für die Umweltwirkungen die Ökobilanz und für die Kosten die Lebenszykluskostenanalyse angewandt. Bemessungstechnische Aspekte wurden durch einschlägige Normen analysiert. Mit Hilfe der Software-Tools von Neuberg (2004) und Ekkerlein (2004) wurde zudem versucht, oben genannte Indikatoren zu kombinieren.

Die Untersuchung der aktuellen, baupraktischen Situation für Aluminium (vgl. Kapitel 3) zeigt, dass dessen Einsatz nach wie vor zwiespältig betrachtet wird. Dennoch steigt die Zahl der Aluminiumanwendungen, insbesondere im Fenster und Fassadenbau, kontinuierlich an. Die Entscheidung für bzw. gegen Aluminium wird dabei maßgeblich von Planern bzw. Architekten beeinflusst. Die Befragung von Planern und Metallbauern ergab, dass dabei besonderer Wert auf Ästhetik, Funktionalität und eine effektive Nutzungsphase gelegt wird. Bedenken und Unsicherheiten sind hingegen im Hinblick auf Festigkeit, Brandschutz und Umweltbelange vorhanden. Mit Hilfe der Fragebögen konnten zudem deutliche Informationsdefizite bei den Planern aufgedeckt werden. Für die zukünftige Entwicklung sind Planer und Metallbauer zwar überzeugt, dass nachhaltige Anforderungen und Lebenszyklusorientierung an Bedeutung gewinnen, doch werden in diese Richtung noch keine konkreten Investitionen getätigt.

Die Bemessung von Aluminiumkonstruktionen kann derzeit mit nationalen (DIN 4113) oder europäischen Vorschriften (EC 9) erfolgen. Dies wirft die Frage auf, welches Regelwerk das effizientere Verfahren bzw. die günstigeren Ergebnisse liefert. In Kapitel 4 wurden daher erstmalig die jeweiligen Grundlagen und Bauteilnachweise gegenübergestellt.

Beim EC 9 handelt es sich um eine in sich geschlossene und für zahlreiche Praxisfälle ausgebaute Normengrundlage. Die Verfahren für vielfältige Lastfälle basieren weitgehend auf Traglastnachweisen und sind insgesamt als äußerst fortschrittlich zu bewerten. Gleichzeitig ziehen allerdings viele der Nachweise umfangreiche und zeitaufwändige Vorgehensweisen nach sich.

DIN 4113 enthält hingegen übersichtliche und klare Formeln, die auf dem Prinzip der zulässigen Spannungen beruhen. Dabei kommt vorwiegend die klassische Elastizitätstheorie zur Anwendung. Das Traglastverfahren ist lediglich bei Stabilitätsproblemen enthalten. Die in dieser Arbeit durchgeführten Vergleichsrechnungen ergeben überwiegend niedrigere Ausnutzungsgrade und somit günstigere Resultate für den EC 9.

Für die ökologische Bewertung von Aluminium ist ein grundsätzliches Verständnis des Stoffstroms erforderlich (vgl. Kapitel 5). Der Großteil der Umweltwirkungen ist dabei auf die Elektrolyse zurückzuführen. Da die Primärproduktion auf weltweiten Verflechtungen basiert, ist für diesen Prozess ein passendes Energiemodell zur Stromerzeugung zu wählen. Hierbei sollte die lokale Energieversorgung je nach Importanteil des jeweiligen Aluminiumproduzenten berücksichtigt werden. Die Produktion von Sekundäraluminium ist insgesamt deutlich umweltfreundlicher und benötigt lediglich einen Bruchteil der Herstellungsenergie.

Die Ergebnisse einer Ökobilanz sind maßgeblich abhängig von den berücksichtigten Lebensphasen und der Datengrundlage. So deckt der in Kapitel 5 durchgeführte Vergleich von Industriedaten mit den Datenbanken „EcoInvent“ und „GEMIS“ signifikante Unterschiede auf. Diese sind auf Abweichungen bei Umfang, Aktualität, Qualität, Bezugsraum, Energiemodelle, Nutzungsgrade, Kraftwerkstechnologien, Transport und Produktionsinfrastruktur zurückzuführen. Auf Grundlage des Vergleichs kann das Ökoinventar „EcoInvent“ für ökologische Bewertungen von Aluminiumbauteilen empfohlen werden.

Die Analyse der wirtschaftlichen Charakteristiken von Aluminiumkonstruktionen in Kapitel 6 zeigt zunächst höhere Materialkosten im Vergleich zu anderen Baumaterialien. Im Laufe des Lebenszyklus bietet Aluminium allerdings signifikante Einsparpotenziale, z. B. in Form des natürlichen Korrosionsschutzes und der effektiven Nutzungsphase. Dadurch können die ungünstigen Ausgangsbedingungen kompensiert werden. Zudem erzielen gebrauchte Aluminiumbauteile aufgrund des Schrottwerts beachtliche Erträge. Lebenszykluskostenanalysen zeigen, dass Aluminiumanwendungen oftmals bereits im ersten Drittel der Nutzungsdauer kostengünstiger sind als andere, anfänglich „billigere“, Materialien. Diese Ergebnisse werden allerdings deutlich von der Qualität der Kostendaten, der Modellierung der Wartungsarbeiten und des Kalkulationszins beeinflusst.

Neue Methoden der staatlichen Finanzierung (z. B. BOT, BOO) und die zunehmende Risikovorsorge bei Kapitalvergaben (z. B. Basel II) forcieren eine lebenszyklusorientierte Betrachtung von Bauinvestitionen und Immobilien. Diese Entwicklungen könnten folglich eine Chance für die Anwendung effektiver Aluminiumkonstruktionen darstellen.

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus Kapitel 2 bis Kapitel 6 wurden von Kapitel 7 bis Kapitel 9 schließlich konkrete Aluminiumanwendungen erstmalig ganzheitlich untersucht. Dabei wurde der Stellenwert der Aluminiumkonstruktionen gegenüber entsprechenden Stahlausführungen beurteilt. Eine weitere Neuheit war die Kombination von statischen Nachweisen mit Ökobilanzen und Lebenszykluskostenanalysen. Die funktionelle Einheit wurde beispielsweise in Abhängigkeit der statischen Ausnutzung und der zulässigen Durchbiegungen gewählt. Die Ergebnisse der Variantenstudie zeigen, dass Aluminiumbauteile bei richtigem Einsatz und korrekter Modellierung vorteilhafter sind als Stahl. Dies gilt insbesondere bei Aluminiumkonstruktionen mit normalen Spannweiten, geringen Lasten, Recyclingraten größer als 80% und Massen, die weniger als 50% einer vergleichbaren Stahlkonstruktion betragen. Grundvoraussetzung hierfür ist die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks.

Angesichts der zunehmend nachhaltigen Anforderungen konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit somit deutliche Potenziale für Aluminium abgeleitet werden. Eine pauschale Ablehnung von Aluminium für Bauanwendungen ist daher nicht gerechtfertigt.

12. Literatur

- Althaus H.-J. (2005): CML 2001 Problem oriented approach – Implementation, Assignment of Characterisation Factors to the Swiss LCI database ecoinvent, EMPA, Dübendorf, CH.
- AFI, Aluminium-Fenster-Institut (2005): Ökologische Fragen zu Aluminium, Verein zur Hebung der Information über Aluminiumfenster und –fassaden, Wien, elektronisch veröffentlicht: www.alufenster.at/show_content2.php?s2id=35 [Stand 25.04.2005].
- A/U/F, Aluminium und Umwelt im Fenster- und Fassadenbau (2004): elektronisch veröffentlicht: www.a-u-f.com, [Stand 20.08.2004].
- Aluminium now (2004): All That Glitters Is Green – Aluminium Roof Chips Reflect Heat, Reduce Ozone and Energy Bills, Building/ Construction, Sep/Oct 2004, elektronisch veröffentlicht: <http://www.aluminium.org> [Stand 24.01.2005].
- Aluminium-Zentrale e.V. (1992): Aluminium-Merkblatt O 3, Beschichten von Aluminium, 7. Auflage, Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Aluminium-Zentrale e.V. (2000): Aluminium-Merkblatt A 5, Reinigen von Aluminium im Bauwesen, 9. Auflage, Aluminium-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Annink D., C. Boonstra, J. Mak (1996): Handbook of Sustainable Building, Energy Consultants, James & James, NL.
- Bauproduktengesetz (BauPG) (2004): derzeit gültige Fassung April 1998, letzte Änderung durch Gesetz (BGBl. I S.2, 15) im Januar 2004.
- Bauproduktenrichtlinie (BPR) (2003): Richtlinie des Rates vom 21.12.1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG) (ABl. L 40 vom 11.02.1989, S. 12), geändert durch die Richtlinie 93/68/EWG des Rates vom 22.07.1993 (ABl. L 220 vom 30.08.1993, S. 1) und geändert durch die Verordnung (EG) Nr. 1882/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. September 2003 (ABl. EU Nr. L 284 vom 31.10.2003, S. 1, 25).
- Bentrop R. (2000): Marketingkonzept im Industriegütermarkt am Beispiel eines Fußgängerbrückensystems aus Aluminium, Diplomarbeit, Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung, Technische Universität München.
- Blanchard B. S., W. J. Fabrycky (1998): System Engineering and Analysis, 3rd Edition. Prentice-Hall. Inc., New Jersey, USA.
- BMVBW, Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen (2001): Leitfaden Nachhaltiges Bauen, BMVBW, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin.
- BMVBW, Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen (2004a): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Bundesministerium für Verkehr Bau und

- Wohnungswesen, elektronisch veröffentlicht: <http://www.bmvbw.de /Klimaschutz-und-Energieeinsparung-.519.htm> [Stand 24.10.2004]
- BMVBW, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2004b): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs- / Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken, RI-WI-BRÜ, Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin.
- Brandes K. (2003): Life-Cycle-Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, Stahlbau 72, Heft 7 S. 534, Berlin.
- BuildDesk (2003): BuildDesk Software, Ecotech Bauphysik & Energietechnik GmbH (Linz, Österreich), Gladbeck, elektronisch veröffentlicht: <http://www.ecotech.cc/> [Stand: 8.12.2004].
- Bundesregierung (1997): Aluminium – ökonomische, ökologische und soziale Folgen, Antwort der Bundesregierung auf die Große Anfrage der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN Drucksache 13/5247, Drucksache 13/6833, Berlin, 1997.
- II. BV, II. Berechnungsverordnung (2003): Verordnung über wohnungswirtschaftliche Berechnungen, zuletzt geändert durch Art. 3 V v. 25.11.2003, Bundesgesetzblatt, Berlin.
- BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schweizerisches Verpackungsinstitut (SVI) (1996): Ökoinventare für Verpackungen, Schriftreihe SRU Umwelt Nr.250, BUWAL, Bern.
- Buxmann K. (2004a): Ökobilanzen über Produkte der Gebäudehülle aus Aluminium, LCA-Forum, ETH Zürich, elektronisch veröffentlicht: www.texma.org/LCA-Forum/Documentation/documentation.html [Stand 18.08.2004].
- Buxmann K. (2004b): Ökobilanzen von Fassaden aus Aluminium und Alucobond, Alcan Technology & Management AG, Chippis, CH.
- Classen M., H.-J. Althaus (2004): Graue Energie von Bauprodukten aus Aluminium unter Berücksichtigung der wertkorrigierten Substitution, Studie im Auftrag des Schweizerischen Aluminium-Verbandes, Eidgenössisches Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, CH.
- Cumpan (2003): Cumpan Software, T-Systems International GmbH, Business Center Engineering Process & Data Management, Leinfelden-Echterdingen, 2003, elektronisch veröffentlicht: www.t-systems-epdem.com [Stand 8.12.2004].
- Deutsche Bundesbank (2005): Tägliche Rendite der börsennotierten Bundeswertpapiere, Deutsche Bundesbank, Frankfurt am Main, elektronisch veröffentlicht: www.bundesbank.de/presse/presse-notizen/2005 [Stand 3.5.2005].
- DIW, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (2005): Primärenergieverbrauch in Deutschland von hohen Energiepreissteigerungen und konjunktureller Belebung geprägt, Wochenbericht, 72. Jahrgang/, 22127, Berlin, 16.02.2005.
- Diederichs C. J., P. Getto, S. Streck (2003): Entwicklung eines Bewertungssystems für ökonomisches und ökologisches Bauen und gesundes Wohnen, Bauforschung für die Praxis Band 57, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- EAA, European Aluminium Association (2000a): Environmental Profile Report, EAA, Brussels, BE.

- EAA, European Aluminium Association (2000b): Key Features how to treat aluminium in LCAs, with special regard to recycling issues, EAA, Brussels, BE.
- EAA, European Aluminium Association (2004): Statistics, elektronisch veröffentlicht: www.eaa.org.net [Stand 18.08.2004].
- EAA, European Aluminium Association (2005a): Aluminium Recycling in LCA, EAA, Brussels, BE.
- EAA, European Aluminium Association (2005b): Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry, Primary Aluminium Update-Year 2002, EAA, Brussels, BE.
- EAA, European Aluminium Association (2005c): Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry, Semi-finished aluminium products and process scrap recycling Update- Year 2002, EAA, Brussels, BE.
- ECOBIS (2000): ECOBIS 2000 Software, Ökologisches Baustoffinformationssystem, Bayerische Architektenkammer, München, 2000, elektronisch veröffentlicht: www.byak.de/aktuelles/aktuelles_digpub_ecobis.html [Stand: 8.12.2004].
- EcoInvent (2003): EcoInvent 2003 Software, The Swiss National Life Cycle Inventory Database, 2003, elektronisch veröffentlicht: www.ecoinvent.org [Stand: 8.12.2004].
- Eco-Quantum (2001): Eco-Quantum Software, IVAM - Research and Consultancy on Sustainability, Amsterdam NL, 2001, elektronisch veröffentlicht: www.ivam.uva.nl/uk/ [Stand: 8.12.2004].
- EDF, Électricité de France (2004): Sixth inventory - Edition 2004, Worldwide Electricity Production from Renewable Energy sources, Stats and figures series, Systèmes Solaires, L' Observateur des Energiesrenouvelables, Paris, F.
- Ehlen M.A. (1999): Bridge LCC 1.0 Life-Cycle Costing Software for Preliminary Bridge Design, Users Manual, National Institut for Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, USA.
- Ekkerlein M. (2004): Ökologische Bilanzierung von Gebäuden in frühen Planungsphasen auf Basis der Produktmodellierung, Dissertation, Lehrstuhl für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Technische Universität München.
- EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (1996): Ökologische Bewertung von Fensterkonstruktionen verschiedener Rahmenmaterialien (ohne Verglasung), SZFF-EMPA-Forschungsbericht der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau (SZZF), Dietikon, CH.
- EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (2004): Graue Energie von Bauprodukten aus Aluminium unter Berücksichtigung der wertkorrigierten Substitution, Studie im Auftrag des Schweizerischen Aluminium-Verbandes, Dübendorf, CH.
- Energielexikon (2005): elektronisch veröffentlicht: www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/seiten/htm/1102_Strombelastungsarten_Grundlast_Mittellast_Spitzenlast.htm [Stand: 25.04.2005].
- EnEV, Energieeinsparverordnung (2004): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Bundesgesetzblatt vom 7.12.2004.

- Enquête (1998): Konzept Nachhaltigkeit, Vom Leitbild zur Umsetzung, Abschlußbericht der Enquetekommission des Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt- Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“ des 13. deutschen Bundestages, S. 250 f., 1998, Deutscher Bundestag, Bonn.
- Envest (2001): Envest software, Building Research Establishment (BRE) Garston, UK, 2001, elektronisch veröffentlicht: www.bre.co.uk [Stand 8.12.2004].
- Erdell E. (2005): Nachhaltigkeit-, Methoden-, Planungsprozess, Teilprojekt F238 Methodentransfer Bau, BayFORREST Forschungsprojekt, Workshop am 15.06.2005, Technische Universität München.
- EU-Kommission (2003a): Competitiveness of the Construction Industry, An Agenda for Sustainable Construction in Europe, Final Report, Task Group 1-3, Brussels, 20.05.2001.
- EU-Kommission (2003b): Life Cycle Costs in Construction, Final Report, Task Group 4, 3rd Tripartite Meeting Group on the Competitiveness of the Construction Industry, Brussels, BE, 29.10.2003.
- EU-Kommission (2001): Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on best available techniques in the glass manufacturing industry (IPPC), December 2001. elektronisch veröffentlicht: <http://www.umweltdaten.de/nfp-bat-e/esmonitoring-e.pdf> [Stand 24.01.2005].
- EU-Richtlinie (2002): Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 1 S. 65, Brüssel, BE.
- Eyerer P., H.-W. Reinhardt (2000): Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden – Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung, Bau Praxis, Birkhäuser-Verlag, Basel, CH.
- Frischknecht R., N. Jungbluth (2004a): Overview and Methodology, Data v1.1 (2004), ecoinvent report No. 1, Dübendorf, CH.
- Frischknecht R., N. Jungbluth (2004b): Implementation of Life Cycle Impact Assessment, Data v1.1 (2004), ecoinvent report No. 3, Dübendorf, CH.
- Fritsche R., W. Jenseit, C. Hochfeld (1999): Methodikfragen bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwands (KEA), Arbeitspapier im Rahmen des UBA- F&E Vorhabens Nr. 104 01 123, Ökoinstitut, Darmstadt.
- GAA, Gütegemeinschaft Anodisiertes Aluminium e.V. (2005): Gütegemeinschaft und Gütesicherung, Nürnberg, (GAA), elektronisch veröffentlicht: www.gaa-online.de [Stand 19.07. 2005].
- GaBi (2003): GaBi Software, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart und PE Europe GmbH, Leinfelden-Echterdingen, 2003, elektronisch veröffentlicht: www.GaBI-software.com [Stand 8.12. 2004].
- GaBiE (1999): GaBiE Software, Analyse von Energie- und Stoffströmen – Basisdaten für die ökologische Bewertung von Unternehmen, Wirtschaftsgütern und Dienstleistungen, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999, elektronisch veröffentlicht: www.ffe.de [Stand 8.12. 2004].
- GDA, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2001): Aluminium – Social Aspects, GDA, Düsseldorf.

- GDA, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2002a): Aluminium und Architektur, Ein Metall mit strahlendem Antlitz, GDA, Düsseldorf.
- GDA, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2002b): Aluminium im Bauwesen– Ökologisch und nachhaltig, GDA, Düsseldorf.
- GDA, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2002c): Aluminium – Ein nachhaltiger Werkstoff, GDA, Düsseldorf.
- GDA, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2004): Deutsche Aluminiumindustrie mit leichtem Wachstum, GDA, Düsseldorf, elektronisch veröffentlicht: www.aluinfo.de [Stand 1.04.2005].
- GDA, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2005a): Klimavorsorge, Düsseldorf (GDA), elektronisch veröffentlicht: www.aluinfo.de [Stand 7.04.2005].
- GDA, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2005b): Sekundäraluminium, Düsseldorf (GDA), elektronisch veröffentlicht: www.aluinfo.de [Stand 11.04.2005].
- GDA, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2005c): Aluminium in Zahlen, Düsseldorf (GDA), elektronisch veröffentlicht: www.aluinfo.de [Stand 11.04.2005].
- GEFMA, Deutscher Verband für Facility Management e.V (2004): Gruppe 200 - Kosten, Kostenrechnung, Kostengliederung Kostenerfassung; Kosten im Facility Management, Kostengliederungsstruktur zu GEFMA 100, Deutscher Verband für Facility Management e.V., Bonn.
- GEMIS (2004): Gemis Software, Globales Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS), Freiburg, 2004, elektronisch veröffentlicht: www.oeko.de/service/gemis/ [Stand 8.12.2004].
- Gerber, J. (2004): Energy and Sustainability of Aluminium Fabricated Products, contribution to the ALFED Conference about 'Sustainability of Aluminium Products Used in Building and Construction', 13.10.2004, London, UK.
- GFÖB, Gesellschaft für ökologische Bautechnik Berlin mbH (2005): Weiterentwicklung von Instrumenten für eine Nachhaltige Baupolitik, Teilbericht: Instrumente zur qualitätsabhängigen Abschätzung der Dauerhaftigkeit von Materialien und Konstruktionen, Teil 3: Bauteilspezifische Belastungen, Forschungsprojekt Nr. 10.06.03- 03.125, Berlin.
- Gitter R. (1998): Aluminium- Strangpresslegierungen im konstruktiven Ingenieur-, Maschinen- und Apparatebau – zur Umstellung von DIN 1748.1 auf EN 755-2-, Aluminium in der Praxis, Stahlbau 67, Sonderheft Aluminium, Herausgeber: D. Kostea, Ernst & Sohn, Berlin.
- Glimm S. (2003a): Bauxitabbau und Rekultivierung, Veröffentlichung des Gesamtverbands der Aluminiumindustrie e.V. (GDA), Düsseldorf.
- Glimm S. (2003b): Rotschlamm und Rotschlammdeponien, Veröffentlichung des Gesamtverbands der Aluminiumindustrie e.V. (GDA), Düsseldorf.
- Glimm S. (2003c): Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (CF₄ und C₂F₆), Veröffentlichung des Gesamtverbands der Aluminiumindustrie e.V. (GDA), Düsseldorf.
- Glimm S. (2003d): Vom Rezyklatgehalt zum „Aluminiumpool“, Veröffentlichung des Gesamtverbands der Aluminiumindustrie e.V. (GDA), Düsseldorf.

- Goedkoop M. (1995): The eco-indicator 95 - Weighting method for environmental effects that damage, National Reuse of Waste Research Program, Pré-consultants, NL 3811 Amerfoort, NL.
- Goetz U. (1977): Ist Gold billiger als Aluminium? Der Streit um den Erntefaktor ist müßig, ZEIT Nr. 53, WISSENSCHAFT, 23.12.1977, Hamburg.
- Graubner C. A. (2003): Ökologische und ökonomische Lebenszyklusbetrachtung von Gebäuden, Proceedings Darmstädter Nachhaltigkeitssymposium 17.-18.7.2003, Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt.
- Graubner C. A., K. Hülske (2003): Nachhaltigkeit im Bauwesen, Grundlagen - Instrumente - Beispiele, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- GSB, Gütegemeinschaft für die Stückbeschichtung von Bauteilen e.V. (2001): Güte- und Prüfbestimmungen für die Stückbeschichtung von Bauteilen aus Aluminium sowie Technische Bestimmungen für die Erteilung und Bestätigung von Materialzulassungen für die gütegesicherte Beschichtung von Bauteilen aus Aluminium, GSB, Schwäbisch Gmünd.
- Hasit Trockenmörtel GmbH (2004): Sparen im „Zwei-Liter-Haus“, Deutsches Ingenieurblatt, Berlin, 12/ 2004, elektronisch veröffentlicht: <http://www.baumedien.de/sh/fachartikel/bmshfachartikel1685446.html> [Stand 8.01.2005].
- Hasselbeck A., D. Klein, M. Rieseemann, (2004): Methoden für eine nachhaltig profitable Unternehmensführung zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von Aluminiumbauprodukten, Projektstudium, Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung (Betreuung: C. Radlbeck) und Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre - Unternehmensführung, Logistik und Produktion (Betreuung: D. Holzner), Technische Universität München.
- Heijungs, R. (1992): Environmental life cycle assessment of products – Guide and backgrounds. LCA Centrum voor Milieukunde Leiden (CML), Leiden, NL.
- Herzog, M. (1982): Das Projekt einer Hängebrücke über die Meerenge von Messina mit 3500 m Spannweite, Stahlbau 51, S. 33-36, Verlag Ernst und Sohn, Berlin.
- Herzog K. (2003): Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen, Darmstädter Nachhaltigkeitssymposium, Darmstadt.
- Hillenbrand T., D. Toussaint, E. Böhm, S. Fuchs, U. Scherer, A. Rudolohi, M. Hoffmann, J. Kreissig, C. Kotz (2005): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden – Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung in Karlsruhe, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW), Universität Karlsruhe, Gesellschaft für Ökologische Bautechnik Berlin mbH (GFÖB) in Berlin, PE-Europe in Leinfelden-Echterdingen, im Auftrag de Umweltbundesamts, Berlin.
- HOAI, Verordnung über die Honorare von für Leistungen von Architekten und Ingenieuren (1995): Honorarordnung für Architekten und Ingenieure, derzeit gültige Fassung Januar 1996, letzte Änderung durch Art. 5 im November 2001.
- Höfle R. (2004): Lebenszykluskosten von Aluminiumkonstruktionen (LCCA), Diplomarbeit, Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung, Technische Universität München.
- Houwelingen, J. van (2004): Collection of Aluminium from Buildings in Europe, contribution to the ALFED Conference about the Sustainability of Aluminium Products Used in Building and Construction, London, UK, 13. October 2004.

- Hugues W. (2001): Bauen mit Aluminium – Konstruktion und Gestaltung, Birkhäuser-Verlag, Basel, CH.
- IAI, International Aluminium Institute (2004): Third Bauxite Mine Rehabilitation Survey, Sustainable Development Series, International Aluminium Institute, London.
- IAI, International Aluminium Institute (2005): Consolidated IAI Primary Aluminium Production Reports, London, UK, 21 March 2005, elektronisch veröffentlicht: www.world-aluminium.org [Stand 7.04.2005].
- IKP, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (1998): Ganzheitliche Bilanzierung von Fenstern und Fassaden, Verbundprojekt: Ganzheitlich Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden, Verband der Fenster- und Fassadenhersteller (VFF) e.V., Stuttgart.
- Institut Feuerverzinken GmbH (1997): Arbeitsblätter Feuerverzinken, Institut Feuerverzinken GmbH, Düsseldorf.
- IPAI, International Primary Aluminium Institut (1995): Statistical Summary Report: Electrical Power used in Primary Aluminium Production, elektronisch veröffentlicht: www.world-aluminium.org, [Stand 21.04.2005].
- Jochem R. (1998): HOAI – Kommentar zur Honorarordnung für Architekten und Ingenieure, 4. Auflage, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin.
- Jurecka F., K.-U. Bletzinger (2005): Numerische Methoden für eine lebenszyklusorientierte Statik, Schlussbericht zum BayFORREST Forschungsprojekt F253, Lehrstuhl für Statik, Technische Universität München, 1.12.2005.
- Karrer K. (2005): Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) von Aluminiumkonstruktionen. Vergleich einer Fassadenkonstruktion und einer Brückenkonstruktion aus Aluminium und Stahl, Diplomarbeit, Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung, Technische Universität München.
- Kaup P., W. Lang, F. Lichtblau, S. Starzner, T. Hugues, T. Bock, H. Meden, P. Richter (2003): Building for the Future, Messe München gmbH, Bayerische Architektenkammer, Bau 2003, München.
- Klug T. (1999): Friction Stir Welding - Anwendungen im konstruktiven Ingenieurbau, Diplomarbeit, Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung, Technische Universität München.
- Koch M., J. Harnisch (2001): Climate Change and Energy Supply Systems for Primary Aluminium Smelters: Allocation of CO₂ emissions to the Electricity Consumption in Primary Aluminium Production, Final Report, Ecofys GmbH, Köln.
- Kosteas D., G. Steidl, W.-D. Strippelmann (1978): Geschweisste Aluminiumkonstruktionen, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig.
- Kosteas D. (1996): Betriebsverhalten und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen, Stahlbau Handbuch, Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, Köln.
- Kosteas D., M. Meyer-Sternberg (2000): Aluminiumbrücken – Eigenschaften und Rahmenparameter für die Anwendung von Aluminium im Brückenbau, 2. Duisburger Aluminium-Tage, SLV Duisburg GmbH und Aluminium-Zentrale e.V., Duisburg, 24.- 25.2000.
- Kramer W. (2005): Aluminium vom Persischen Golf, In Deutschland wird mehr verbraucht als produziert – Werke gefährdet, Wirtschaft, Süddeutsche Zeitung, München 27.07.2005.

- Kreissig J., M. Baitz, M. Betz, P. Eyerer (1997): Leitfaden zur Erstellung von Sachbilanzen in Betrieben der Steine-Erden-Industrie, Bundesverband Steine und Erden, Berlin.
- Krone K. (2000): Aluminiumrecycling – vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung, Vereinigung Deutscher Schmelzhütten (VDS), Aluminium-Verlag Marketing und Kommunikation GmbH, Düsseldorf.
- Kugeler K., Z. Alkan, S. Briem, R. Quinkertz, M. Dienhart (2004): Auswirkungen verschiedener Stromversorgungsstrukturen auf Stoff- und Energieströme der Energiebereitstellung, Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und –technik, RWTH Aachen, elektronisch veröffentlicht: <http://sfb525.rwth-aachen.de/modules.php?op=modload&name=postergalerie&file=index> [Stand 8.12.2004].
- Kümmel J. (2000): Ökobilanzierung von Baustoffen am Beispiel des Recyclings von Konstruktionsbeton, Dissertation am Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart.
- KWAG, Kreislaufwirtschafts-Abfallgesetz (1996): derzeit gültige Fassung 7.10.1996.
- Kyoto-Protokoll (1997): Kyoto Protocol to the united Nations Framework Convention on Climate Change, Zusatzprotokoll zur Ausgestaltung der Klima-Rahmenkonventionen der Vereinten Nationen, in Kraft seit 16. Februar 2005, elektronisch veröffentlicht: www.unfccc.int [Stand 17.12.2005].
- Landeshauptstadt München (2004): Ökologischer Kriterienkatalog der Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Stadtsanierung und Wohnungsbau, PLAN HA III/2, München, 17.03.2004.
- LEGOE (2003): LEGOE software, Edition AUM GmbH, Architekturdaten und Management, Dachau, 2003, elektronisch veröffentlicht: www.archi-soft.de/produkte1/sirados/Lego/legoe.html [Stand 8.12.2004.].
- Lingg B., S. Villinger (2002): Energy and Cost Assessment of a High Speed Ferry, Diskussionspapier, ETH Zürich, KTH Stockholm.
- Link A. (2003): Rating im Rahmen von Bauprojektfinanzierungen aus Sicht der Kreditwirtschaft, BBB- Assistententreffen 7.-9.Mai 2003, Institut für Baumanagement (IQ Bau), Bergische Universität Wuppertal.
- Lins S.: Architekten und Bauherrenstudie 2003, Aluminium-Fenster- Institut, Wien, AT.
- London Metal Exchange (LME) (2005): Data & Prices, Price Graphs, elektronisch veröffentlicht: http://www.lme.co.uk/dataprices_pricegraphs.asp [Stand 20.10.2005].
- Lützkendorf T. (1999): Methodische und praktische Fragen zur Anwendung des Bewertungskriteriums KEA im Bauwesen. KEA- Tagung, Weimar, 1.10.1999.
- Lützkendorf T. (2002): Nachhaltiges Planen, Bauen und Bewirtschaften von Bauwerken, Ziele Grundlagen, Stand und Trends Bewertungsmethoden und- hilfsmittel, Kurzstudie für das BMVBW im Auftrag des BBR, Köln, Stand Mai 2002.
- Mazzolani F. M. (1998): Bemessungsgrundlagen für Aluminiumkonstruktionen – Design Principles for Aluminium Structures, Aluminium in der Praxis, Stahlbau 67, Sonderheft Aluminium, Herausgeber: D. Kostea, Ernst & Sohn, Berlin.
- Mader W. (2004): Reinigung von Aluminium im Bauwesen, Seminar „Reinigung und Instandhaltung von Metallfassaden“ des GDA, Düsseldorf, 05.11.2004.

- Marks J. (2002): Emissions of Perfluorocarbons (PFCs) from the Aluminium Industry, A Decade of Progress, International Aluminium Industry (IAI), SBSTA 16 Bonn, Germany, 12 June, 2002.
- Martens P. N. (2002): Stoffstromanalyse und Nachhaltigkeit – am Beispiel Aluminium, Sonderdruck aus Metall –Internationale Fachzeitschrift für Metallurgie, 56. Jahrgang, 12/2002, Giesel Verlag GmbH Isernhagen..
- Meadows D. L., D. H. Meadows, J. Randers, (1972): The Limits to Growth, Universe Books, New York, USA.
- Meyer-Sternberg M. (2003): Aluminium im Brückenbau, Dissertation, Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung, Technische Universität München.
- Meyer-Sternberg M., D. Kosteas, P. Rossmeier, W. Sanders, E. Abendroth (1998): A critical Review of Fillet Weld Design Procedures, Proceedings 7th INALCO Conference 15-17 April 1998, Cambridge, UK.
- Mittag M. (1998): Arbeitszeiten, Baupreise, Leistungsbeschreibungen für Metall- und Stahlbaubetriebe, Bundesmittelwerte nach dem Preisstand 1996, einschließlich 10. Aktualisierung u. Ergänzungslieferung, Dezember 1998, WEKA Baufachverlag GmbH, Augsburg, 1998.
- Mori G., W. Adelhardt (1998): Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe, Teilstudie Aluminium, Geologisches Jahrbuch, Vol. Sonderhefte SH 2, Bundesanstalt für Geowissenschaften Hannover.
- MBO, Musterbauordnung (2002): §3 Allgemeine Anforderungen, elektronisch veröffentlicht: <http://www.bauordnungen.de/html/musterbauordnung.html#Musterbauordnung> [Stand November 2002].
- Neuberg F. (2004): Ein Softwarekonzept zur Internet-basierten Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken, Dissertation, Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München.
- NORDEL, Nordic Electricity Market (2005): Key Figures 2003, Facts about the nordic countries 2003, elektronisch veröffentlicht: <http://www.norderl.org> [Stand November 2002].
- OEA, Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters (2004): Aluminium recycling, The Road to High Quality Products, in cooperation with the European Aluminium Association (EAA), Brussels, BE.
- OECD, Organisation for Economic, Co-operation and Development (1994): Environmental Indicators, OECD Core Set, Paris, F.
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development (2003): Environmentally Sustainable Buildings - Challenges and Policies, OECD 972003011E1, ISBN: 9264033866.
- OGIP' 98 (1998): Ogip Software, BFE-Forschungsprojekt Projekte OGIP/DATO, Bundesamt für Energie (BFE), elektronisch veröffentlicht: http://www.empa-ren.ch/ren/ Projekte_Umwelt/ogip%203.htm [Stand 8.12.2004].
- OPTIMA (1999): Optima Software, Verbundprojekt RETEX/INTESOL, Institut für industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe, 1996-1999.

- Ornth W. (2002): Umweltkennzeichnung und –Deklarationen, 19. Tagung der mittel, ost- und südosteuropäischen Staaten 04. – 08.11.2002, Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen (BMVBW) Referat - BS 31: 2004, Berlin.
- Ornth W. (2003): Nachhaltigkeit – Eine neue Dimension von Bauqualität, Darmstädter Nachhaltigkeitssymposium, TU Darmstadt, Institut für Massivbau, Darmstadt, 17.-18.7.2003.
- PML, Peter Maier Leichtbau GmbH (2005): Aluminium im Vergleich, elektronisch veröffentlicht: <http://www.pml.de/de/bruecke/index.html> [Stand 20.10.2005]
- Petersen C. (1988): Stahlbau- Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden.
- PIB, Institut für Baupreisforschung GmbH (1999): Baupreishandbuch- Neubau/Altbau, Institut für Baupreisforschung GmbH, Edition AUM GmbH, Dachau, München.
- Pré Consultants (2005): Eco- indicator 99, elektronisch veröffentlicht: http://www.pre.nl/eco-indicator99/eco-indicator_99.htm [Stand 3.02.2005].
- Quinkertz R., G. Rombach (1999): Primärenergieaufwand und kumulierte Emissionen verschiedener Elektrolysesysteme zur Aluminiumherstellung, ERZMETALL – World of Metallurgy, 52 (1999) Nr. 7/8, Clausthal- Zellerfeld.
- Radlbeck C., E. Dienes, D. Kosteas (2004): Sustainability of Aluminium in Buildings, Structural Engineering International, SEI Volume 14, Number 3, IABSE, Zurich, CH.
- Radlbeck C., D. Kosteas (2004): Calibration Study for the Eurocode 9, Proceedings 9th INALCO Conference 2nd –3rd June, Cleveland, Ohio, USA.
- Radlbeck C., E. Dienes, D. Kosteas (2005a): Sustainable Competitiveness of Aluminium Building Products, Structural Survey, Vol. 23 No. 2, Bradford, UK.
- Radlbeck C., E. Dienes, M. Schlinz, D. Kosteas, G. Albrecht (2005b): Nachhaltiges Bauen mit Aluminium und/oder Glas, Schlussbericht zum BayFORREST Forschungsprojekt F243, Lehrstuhl für Stahlbau, Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung, Technische Universität München, 1.12.2005.
- Radlbeck C., J. Ocel, E. Dienes, D. Kosteas (2005c): LCCA of Aluminium Structures, 4th International Workshop on Life Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems (LCC4), Florida, USA, 8-11 May 2005.
- Richter K. (1996): Ökobilanz von Fenstern, Ökologische Bewertung von Fensterkonstruktionen, TechnikForschungsbericht der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf, CH, Zusammenfassung des EMPA, SZFF- Forschungsberichts, Bundesbaublatt Bundesbaublatt 3, 220- 223, elektronisch veröffentlicht: [h1996.ttp://216.239.59.104/msearch?q=cache:zQw CPNT IKBQJ: www.window.de /szffabs.htm+Richter,+Bundesbaublatt&hl=de&start=1](http://216.239.59.104/msearch?q=cache:zQw CPNT IKBQJ: www.window.de /szffabs.htm+Richter,+Bundesbaublatt&hl=de&start=1) [Stand 06.06.2005].
- Ryberg A., E. Eriksson (1999): Sustainable Development within the Aluminium Sector, Report, 5040, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm.
- SAEFL, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (1998): Life Cycle Inventories for Packagings, Environmental Series No. 250/1, (SAEFL/BUWAL), Bern, CH.
- Schäfer J. (2001): Effiziente Ressourcennutzung als Antwort auf den Vorwurf der Energieintensität, Veröffentlichung des Gesamtverbands der Aluminiumindustrie e.V. (GDA), Düsseldorf.

- Schmidt-Bleek F. et al. (1998): MAIA Einführung in die Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept. Birkhäuser-Verlag, Berlin.
- Schnell J. (2001): Grundlagen und Perspektiven einer nachhaltigen Bauwirtschaft. Deutscher Beton- und Bautechniktage 2001 in München. Vortragsband des Deutschen Beton- und Bautechnik Verein E.V., Ernst & Sohn, Berlin.
- Schucht S. (1999): Ökologische Modernisierung und Strukturwandel in der deutschen Aluminiumindustrie, FFU-Report 99-4, Forschungsstelle für Umweltpolitik (FFU), Freie Universität Berlin, Fachbereich Politik- und Sozialwissenschaften, Otto-Suhr-Institut für Politikwissenschaft, Berlin.
- Seddon E. (2004): Optimum Service Life for Aluminium Products in Building and Construction using approved Finishing Techniques, contribution to the ALFED Conference about 'Sustainability of Aluminium Products Used in Building and Construction', London, UK 13.10.2004.
- Seicht G. (1983): Investitionsentscheidungen richtig treffen, 4. durchgesehene und erweiterte Auflage, Industrieverlag Peter Linde, Wien.
- Sharp M. L. (1973): The Potential for Aluminum in Long Span Bridge Structures, Lehigh University, Bethlehem, USA.
- SIA, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2000): Kriterien für nachhaltige Bauten, SIA Dokumentation D 0164, Zürich, CH.
- SimaPro (2001): SimaPro 6 LCA Software, PRé Consultants, Amersfoort NL & ifu Hamburg GmbH, Amersfoort, 2001, elektronisch veröffentlicht: www.simapro.de/ [Stand 8.12.2004].
- SINTEF, The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology (2001): Sustainable Use of Aluminium in Buildings, Report No.1 Overview of Research Studies, STF22 A01525, elektronisch veröffentlicht: <http://www.eaa.net/future/EUprojects.asp> [Stand 14.3.2004].
- SINTEF, The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology (2001): Sustainable Use of Aluminium in Buildings, Report No.2 Current Status and Future Prospects, STF22 A01526, elektronisch veröffentlicht: www.eaa.net/future/EUprojects.asp [Stand 14.3.2004].
- SFB 525, Sonderforschungsbereich 525 (2002): Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung des Aluminium- Stoffstroms, RWTH Aachen, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), 1997 bis 2002, elektronisch veröffentlicht: <http://www.rwth-aachen.de/sfb525/icons/aluminiumstoffstrom.pdf> [Stand 15.02.2005].
- Statistisches Bundesamt (2005): Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz), 1.1 Aktuelle Ergebnisse, Fachserie 17, R2, 9/2005, Statistisches Bundesamt, Berlin.
- Statistisches Bundesamt (2005a): Inflationsrate in Deutschland, Statistisches Bundesamt, Berlin elektronisch veröffentlicht: www.destat.de [Stand 28.10.2005].
- SZ, Süddeutsche Zeitung (2004): Aluminium statt Stahl – Branche profitiert von hohen Preisen des Konkurrenz-Werkstoffs, Süddeutsche Zeitung GmbH, Wirtschaft, München, 1.12.2004.
- Timm G. (2003): Nachhaltigkeit wird jetzt zur Pflichtaufgabe – Ökologisches Planen geht über Umweltprodukte weit hinaus, Deutsches Ingenieurblatt, Berlin.

- Töpfer, K. (1997): Nachhaltige Baupolitik zwischen Ökonomie und Ökologie, Tagungsband 2+3, Ministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn-Bad Godesberg.
- Umberto (2003): Umberto Software, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH und ifu Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH, Hamburg, 2003, elektronisch veröffentlicht: www.umberto.de [Stand 8.12.2004].
- UBA, Umweltbundesamt (2001): Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) – Reference Document on best available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries, Umweltbundesamt, Berlin.
- UBA, Umweltbundesamt (2002): Umweltdaten Deutschland 2002, Umweltbundesamt Berlin, 2002, elektronisch veröffentlicht: www.umweltbundesamt.de [Stand 16.11.2002].
- UCTE, Union for the Coordination of Transmission of Electricity (2003): Statistics of UCTE Countries, Net Production in 2003 in TWh, Brussels, elektronisch veröffentlicht: http://www.ucte.org/pdf/statistics/Production/e_production_2003.pdf, [Stand 25.04.2005].
- Valtinat G. (2003): Aluminium im Konstruktiven Ingenieurbau, Bauingenieur-Praxis, Ernst & Sohn, Berlin.
- Vorholz F. (2004): Gütesiegel für Heim und Heizung, ZEIT Nr. 46, WIRTSCHAFT, Hamburg, 23.12.1977.
- Vollrath F., H. Tathoff (2002): Handbuch der Brückeninstandhaltung, 2. Auflage, VBT Verlag Bau und Technik, Düsseldorf.
- Volkshausen W. (2003): Methodische Beschreibung und Bewertung der umweltgerechten Gestaltung von Stahlwerkstoffen und Stahlerzeugnissen, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Freiberg.
- WCED, World Commission on Environment and Development (1987): Our common future, elektronisch veröffentlicht: http://www.are.admin.ch/are/de/nachhaltig/international_uno/unterseite02330/ [Stand 16.12.2005].
- Weber-Blaschke G., H. Frieß, L. Peichl, M. Faulstich (2002): Aktuelle Entwicklungen bei Umweltindikatorensystemen, USWF – Z Umweltchem Ökotox 12(12), Landsberg und Ft. Worthz/Tx, USA: ecomed verlagsgesellschaft AG & Co.
- Weber-Blaschke G., M. Faulstich (2003): Stoffstrommanagement: Grundlagen und Anwendung, Beitrag für das Müll-Handbuch, Erich-Schmidt-Verlag GmbH & Co, Berlin.
- Werner F. (2002): Treatment of aluminium recycling in LCA, Development and Evaluation of the Value-Corrected Substitution Procedure Applied to Window Frames, commissioned by EAA, EMPA Dübendorf, CH.
- 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. Dissertation 14750 Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich, CH.
- Wicona (2005): Innovationen und Nachhaltigkeit, visionenbauen, Ulm, 2005, elektronisch veröffentlicht: www.visionenbauen.de [Stand 14.3.2004].
- Wildemann H. (2000): Investitionsplanung und Wirtschaftlichkeitsrechnung, Skript des MBA- Aufbaustudiengangs, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, Unternehmensführung, Logistik und Produktion, Technische Universität München.

Winter B. (2002): Evaluierung der EU BAT-Dokumente, Herstellung und Verarbeitung von Nichteisenmetallen, BE- 202, Umweltbundesamt GmbH, Wien. AT.

Woodward D.G. (1997): Life Cycle Costing – theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, Vol. 15, No. 6, pp. 335-344.

13. Normenverzeichnis

- DIN 276 (1993): Kosten im Hochbau, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 1055-1 (2002): Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 1: Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 1055-2 (Norm-Entwurf) (2003): Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Bodenkenngrößen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 1055-3 (2002): Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 1055-3/A1 (Norm-Entwurf) (2005): Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten; Änderung A1, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 1055-4 (2005): Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 1055-100 (2001): Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 1461 (1999) Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebrauchte Zinküberzüge, Änderungen und Prüfungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 12944-1 (1998): Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, Teil 1: Allgemeine Einleitung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 12944-2 (1998): Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, Teil 2: Einteilung der Umgebungsbedingungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 12944-3 (1998): Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, Teil 3: Grundlagen zur Gestaltung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 12944-4 (1998): Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, Teil 4: Arten von Oberflächen und Oberflächenvorbereitung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 12944-5 (1998): Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, Teil 5: Beschichtungssysteme, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.

- DIN EN 13947-1 (2000): Wärmetechnisches Verhalten von Vorhangfassaden - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Vereinfachtes Verfahren, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 14024 (2004): Metallprofile mit thermischer Trennung- Mechanisches Leistungsverhalten- Anforderungen, Nachweis und Prüfungen für die Beurteilung; Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4102-4 (1994): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4102-4 /A1 (2004): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile; Änderung A1 / Achtung: Gilt in Verbindung mit DIN 4102-4 (1994-03).
- DIN 4113-1 (1980): Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Teil 1: Berechnung und bauliche Durchbildung. 1980. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4113-1 /A1 (2002): Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Teil 1: Berechnung und bauliche Durchbildung, Änderung A1, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4113-2 (2002): Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Teil 2: Berechnung geschweißter Aluminiumkonstruktionen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 4113-3 (2000): Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Teil 3: Ausführung und Qualitätskontrolle. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4114-1 (1952): Stahlbau – Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung) - Berechnungsgrundlagen, Vorschriften, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4114-2 (1953): Stahlbau – Stabilitätsfälle(Knickung, Kippung, Beulung)- Berechnungsgrundlagen, Richtlinien, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 4108-6 (2000): Wärmeschutz und Energie- Einsparung in Gebäuden – Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 4701-10 (2001): Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen – Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 17611 (2000): Anodisch oxidierte Erzeugnisse aus Aluminium und Aluminiumknetlegierungen, Technische Lieferbedingungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-1 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-2 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und

- Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-3 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-4 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-5 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-6 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Wohnungslüftanlagen und Luftheizanlagen für den Wohnungsbau, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-7 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftheiz- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-8 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-9 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN V 18599-10 (2005): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18800-1 (1990): Stahlbauten- Bemessung und Konstruktion, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18800-2 (1990): Stahlbauten- Stabilitätsfälle, Knicken, von Stäben und Stabwerken, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18800-3 (1990): Stahlbauten- Stabilitätsfälle, Plattenbeulen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18800-4 (1990): Stahlbauten- Stabilitätsfälle, Schalenbeulen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18960 (1999): Nutzungskosten im Hochbau, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.

- DIN 32736 (2000): Gebäudemanagement - Begriffe und Leistungen Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 50939 (1996): Chromatieren von Aluminium, Korrosionsschutz, Verfahrensgrundsätze und Prüfverfahren, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 755-1 (1997): Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile, Technische Lieferbedingungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 755-2 (1997): Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile, Mechanische Eigenschaften, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 755-3 (1995): Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile, Rundstangen, Grenzabmaße und Formtoleranzen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 755-4 (1995): Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile, Vierkantstangen, Grenzabmaße und Formtoleranzen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 755-5 (1995): Norm Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile, Rechteckstangen, Grenzabmaße und Formtoleranzen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 755-6 (1995): Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile; Sechskantstangen; Grenzabmaße und Formtoleranzen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 755-7 (1995): Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile, Nahtlose Rohre, Grenzabmaße und Formtoleranzen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 755-8 (1995): Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile, Mit Kammerwerkzeug stranggepresste Rohre, Grenzabmaße und Formtoleranzen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 755-9 (1995): Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile, Profile, Grenzabmaße und Formtoleranzen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN 12020-1 (2001): Aluminium und Aluminiumlegierungen - Stranggepresste Präzisionsprofile aus Legierungen EN AW-6060 und EN AW-6063 - Teil 1: Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 12020-1:2001, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN ISO 14040 (1997): Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen, Deutsche Fassung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN ISO 14041 (1998): Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz, Deutsche Fassung; Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN ISO 14042 (2000): Ökobilanz – Auswertung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- EN ISO 14043 (2000): Ökobilanz – Wirkungsabschätzung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.

- ENV 1999-1-1 (1998): Design of Aluminium Structures, Part 1-1: General Rules – General Rules and Rules for Buildings, European Committee for Standardization, Brussels.
- ENV 1999-1-2 (1999): Design of Aluminium Structures- Part 2: Structures susceptible to Fatigue, European Committee for Standardization, Brussels.
- prEN 1999-1-1: 2005 (2005): Design of Aluminium Structures, Part 1-1: General Structural Rules. European Committee for Standardization, Brussels.
- prEN 1999-1-2: 2003 (2003): Design of Aluminium structures, Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design, European Committee for Standardization, Brussels.
- RAL-GZ 424/2 (2000): Holz-Aluminiumfenster - Fertigung und Montage Haustüren, Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- RAL-RG 636/1 (1988): Aluminiumfenster, Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (1988), Beuth Verlag, Berlin.
- RAL-GZ 996 (1987): Haustüren (Aluminium-, Holz- und Kunststoffhaustüren), Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- VDI, Verein Deutscher Ingenieure (2002): VDI-Richtlinie 2243 - Recyclingorientierte Produktentwicklung, Berlin, Beuth Verlag.
- VDI, Verein deutscher Ingenieure (1997): Kumulierter Energieaufwand, Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden, VDI-RL 4600, Beuth Verlag, Berlin.

Abkürzungsverzeichnis

ADT	Architectural Desktop
AFA	Aluminium Finishing Association
AFI	Aluminium-Fenster-Institut
AP	Versauerungspotential
AUB	Arbeitsgemeinschaft umweltverträglicher Bauprodukte
BAT	Best Available Technique
BauPG	Bauproduktengesetz
BBodSchG	Bodenschutzgesetz
BDI	Bundesverband der deutschen Industrie
BIMSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BOO	Build- Operate- Own- Modell
BOT	Build- Operate- Transfer- Modell
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BPR	Bauproduktenrichtlinie
BT	Deutscher Bundestag
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schweiz
BV	Berechnungsverordnung
CAD	Computer Aided Design
CEN	Europäisches Komitee für Normung
ChemG	Chemikaliengesetz
CML	Centrum voor Milieukunde der Rijksuniversiteit Leiden
CSR	Corporate Social Responsibility
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DOE	Department of Energy in den USA
EAA	European Aluminium Association
EC	Eurocode

EDF	Électricité de France
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnEG	Energieeinsparungsgesetz
EP	Eutrophierungspotential
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
EPS	Expandierbares Polystyrol
EU	Europäische Union
Eurelectric	Union of the Electricity Industry
FCKW	Fluorchlor-Kohlenwasserstoffe
FSW	Friction Stir Welding
GAA	Gütegemeinschaft Anodisiertes Aluminium e.V
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
GDA	Gesamtverband deutscher Aluminiumindustrie
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GEFMA	Deutscher Verband für Facility Management e.V
GFÖB	Gesellschaft für ökologische Bautechnik Berlin mbH
GWP	Treibhauspotential
GWP 100	Treibhauspotential für 100 Jahre
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IAI	Industrieallianz für Interoperabilität
IAI	International Aluminium Institut
IPAI	International Primary Aluminium Production
IPP	Integrierte Produktpolitik
IPPC	Integrated Pollution Prevention Control
ISO	International Standard Organization
IÖW	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KEA _e	Kumulierter Aufwand an erneuerbarer Energie
KEA _{ne}	Kumulierter Aufwand an nicht erneuerbarer Energie
KEA _a	Kumulierter Aufwand an anderer Energie
KEA _{ges}	Gesamter Kumulierter Energieaufwand
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschaftsabfallgesetz

KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LME	London Metal Exchange Börse
NaBau	Normenausschuss Bauwesen
NCPOCP	Sommersmog
NMVOC	Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe
NORDEL	Nordic Electricity Market
NP	Eutrophierungspotential
MBO	Musterbauordnung
PA	Primäraluminium
PFC	Polyfluorierten Kohlenwasserstoffe
PIB	Institut für Baupreisforschung GmbH
POCP	Photooxidantienpotential
ODP	Ozonabbaupotential
OEA	Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
QS	Querschnitt
RAL	früher: Reichs-Ausschuss für Lieferbedingungen heute: Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.
SA	Sekundäraluminium
SAEFL	Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SFB	Sonderforschungsbereich
SC	Sub Committee
SZ	Süddeutsche Zeitung
TC	Technical Committee
TOPP	Ozonvorläuferpotential
UBA	Umweltbundesamt
UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity
UNO	Vereinte Nationen
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WCED	World Commission on Environment and Development
WEZ	Wärmeeinflusszone
WHG	Wasserhaushaltgesetz

Abbildungsverzeichnis

Abbildungen in Kapitel 1

Abb. 1.1: Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit nach Agenda 21	3
Abb. 1.2: Lebenszyklus eines Bauwerks.....	5
Abb. 1.3: Einflussmöglichkeit auf nachhaltiges Bauen (in Anlehnung an Schnell, 2001).....	6

Abbildungen in Kapitel 2

Abb. 2.1: Entsorgung gemäß der Kreislaufwirtschaft (Graubner & Hülske, 2003)	12
Abb. 2.2: Ausgewählte Methoden und Werkzeuge zur Bewertung der Nachhaltigkeit	16
Abb. 2.3: Vorgehensweise bei der Durchführung einer Ökobilanz	18
Abb. 2.4: Input- und Outputströme eines Produktlebenszyklus (Kümmel, 2000).....	19
Abb. 2.5: Klassifizierung von Emissionen (in Anlehnung an Ekkerlein, 2004).....	21
Abb. 2.6: Ganzheitlichen Analyse und Bewertung von Aluminiumkonstruktionen	33

Abbildungen in Kapitel 3

Abb. 3.1: Hauptmärkte für Aluminiumprodukte in Europa (EAA, 2004)	34
Abb. 3.2: Verbautes Aluminium im europäischen Bausektor seit 1960 (Gerber, 2004)	34
Abb. 3.3: Hauptmärkte für Walzprodukte und Strangpressprofile in Europa (EAA, 2004)....	35
Abb. 3.4: Gewichtseinsparung von Aluminium gegenüber Stahl (Valtinat, 2003)	36
Abb. 3.5: Temperaturverteilung einer Außenfassade mit Aluminiumpaneele.....	37
Abb. 3.6: Stranggepresste Aluminiumquerschnitte	38
Abb. 3.7: Beschichtungsmethoden von Aluminiumbauteilen in Europa (Seddon, 2004)	40
Abb. 3.8: Kirche San Gioacchino in Rom mit Dachplatten aus Aluminium (GDA, 2002a) ...	43
Abb. 3.9: Dortmunder Westfalenhalle mit Aluminium-Leistendach.....	43
Abb. 3.10: Größe der befragten Metallbauunternehmen	46
Abb. 3.11: Größe der befragten Architekturbüros	46
Abb. 3.12: Anwendungsbereiche von Aluminium aus Sicht der Metallbauer.....	47
Abb. 3.13: Anwendungsbereiche von Aluminium bei Planern.....	47
Abb. 3.14: Gründe aus Sicht der Metallbauer um Kunden von Aluminium zu überzeugen ...	48
Abb. 3.15: Gründe von Planern für den Einsatz von Aluminium	48
Abb. 3.16: Gründe von Kunden gegen Aluminium aus Sicht der Metallbauer	49

Abb. 3.17: Bedenken von Planern im Hinblick auf den Einsatz von Aluminium 49

Abbildungen in Kapitel 4

Abb. 4.1: Streubereich der σ - ε -Linien einer Aluminiumlegierung..... 57

Abb. 4.2: σ - ε -Annäherungen nach EC 9, DIN 4113 und DIN 18800..... 58

Abb. 4.3: Festigkeitswerte für AW 6082 T6 nach EC 9 und DIN 4113 60

Abb. 4.4: Spannungen σ_{\perp} , τ_{\parallel} , und τ_{\perp} in Kehlnaht gemäß EC 9 70

Abb. 4.5: Spannungen $\sigma_{w\perp}$, $\sigma_{w\parallel}$, und $\tau_{w\perp}$ in Kehlnaht gemäß DIN 4113..... 71

Abb. 4.6: Schweißnahtdicke a für die Doppelkehlnaht eines Knotenblechs je nach Winkel γ . 72

Abb. 4.7: Schweißnahtdicken a, a1 und a2 für eine Doppelkehlnaht je nach Winkel γ 72

Abbildungen in Kapitel 5

Abb. 5.1: Stoffstrom von Primär- und Sekundäraluminium (in Anlehnung an OEA, 2004)... 77

Abb. 5.2: Weltweite Gesamtproduktion von Primäraluminium seit 1900 (Gerber, 2004) 78

Abb. 5.3: Durchschnittlicher Strombedarf der Elektrolyse (Schäfer, 2001)..... 80

Abb. 5.4: Netzstrom-Mix in Deutschland, China und Brasilien im Jahr 80

Abb. 5.5: Europäische Netzstrom-Mixe im Jahr 2003..... 81

Abb. 5.6: Versorgungs-Mix vs. Landesverbund-Mix, USA, 1995 (Kugeler et al., 2004)..... 82

Abb. 5.7: Insellösung vs. Landesverbundmix, Kanada, 1995 (Kugeler et al., 2004) 82

Abb. 5.8: Verlauf des Stromverbrauchs (Energielexikon, 2005)..... 83

Abb. 5.9: Vertragsmix vs. Landesverbund vs. Grundlast, D, 1995 (Kugeler et al., 2004)..... 83

Abb. 5.10: Strommix von EAA, IPAI und IAI für die Aluminiumerzeugung..... 84

Abb. 5.11: Materialverluste und Wertverlust beim Recycling 91

Abb. 5.12: Abhängigkeit des Energieaufwandes von der Recyclingrate (Krone, 2000) 94

Abb. 5.13: Substitutionsmethode 95

Abb. 5.14: Wertbereinigte Substitutionsmethode 95

Abb. 5.15: Weltweite Verflechtung des Aluminiumstoffstroms im Jahr 1998..... 97

Abb. 5.16: KEA-Werte für die Herstellung von 1 kg Primäraluminium 105

Abb. 5.17: Wirkkategorien für die Herstellung von 1 kg Primäraluminium 105

Abb. 5.18: KEA-Werte für die Produktion von 1 kg Sekundäraluminium..... 106

Abb. 5.19: Wirkkategorien für die Produktion von 1 kg Sekundäraluminium 107

Abb. 5.20: Nicht erneuerbarer Primärenergieverbrauch zweier Fassadenvarianten..... 109

Abb. 5.21: Produktion u. Recycling von Dachblechen..... 112

Abbildungen in Kapitel 6

Abb. 6.1: Preis in [US \$/t] für 1 Tonne Primäraluminium seit 1998 (LME, 2005)..... 113

Abb. 6.2: Preis in [US \$/t] für 1 Tonne Sekundäraluminium seit 1998 (LME, 2005)..... 114

Abb. 6.3: Anteil der Planungsphase an den Fehlern bei Baurealisierungen (Erdell, 2005)...	116
Abb. 6.4: Inflationsraten in Deutschland seit 1970 (Statistisches Bundesamt, 2005a)	120
Abb. 6.5: Durchschnittsrendite börsennotierter Bundeswertpapiere	120
Abb. 6.6: Verlauf der Lebenszykluskosten der Fußgängerbrücken	123
Abb. 6.7: Verlauf der Lebenszykluskosten der untersuchten Aluminiumbrücke	124
Abb. 6.8: Lebenszykluskosten einer Aluminium- und Stahlfußgängerbrücke	125
Abb. 6.9: Grundstruktur des Betreibermodells	126

Abbildungen in Kapitel 7

Abb. 7.1: Ansicht und Grundriss der geplanten Pfosten-Riegelfassade	133
Abb. 7.2: Aluminiumpfosten und -riegel von Fassade A, Maße in [mm].....	134
Abb. 7.3: Aluminiumpfosten und -riegel von Fassade B, Maße in [mm].....	134
Abb. 7.4: Aluminiumpfosten und -riegel von Fassade C	135
Abb. 7.5: Stahlpfosten und -riegel von Fassade D.....	135
Abb. 7.6: Biegung und Normalkraft bei Durchlaufträger mit 1 m Pfostenabstand	140
Abb. 7.7: Biegung und Normalkraft bei Gerberträger mit 1 m Pfostenabstand.....	140
Abb. 7.8: Knicken bei Durchlaufträger mit 1 m Pfostenabstand	141
Abb. 7.9: Knicken bei Gerberträger mit 1 m Pfostenabstand	141
Abb. 7.10: Verhältnis der Ausnutzungsgrade von EC 9 zu DIN 4113	142
Abb. 7.11: Ergebnisse der Wirkkategorien pro m ² Fassadensystem.....	146
Abb. 7.12: Vergleich des KEA _{ne} von Fassade 1 und 3 in Abhängigkeit der Recyclingrate .	147
Abb. 7.13: Vergleich des KEA _{ne} von Fassade 2 und 3 in Abhängigkeit der Recyclingrate .	147
Abb. 7.14: Vergleich des KEA _{ne} von Fassade 4 und 6 in Abhängigkeit der Recyclingrate .	148
Abb. 7.15: Vergleich des KEA _{ne} von Fassade 5 und 6 in Abhängigkeit der Recyclingrate .	148
Abb. 7.16: Anteil des KEA _{ne} der Fassadensysteme am Heizwärmebedarf.....	150
Abb. 7.17: Kapitalwert der Lebenszykluskosten bei 1 m Pfostenabstand	151
Abb. 7.18: Kapitalwert der Lebenszykluskosten bei 2 m Pfostenabstand	152
Abb. 7.19: Modellierung der Fassadensysteme als Produktmodelle im ADT	153

Abbildungen in Kapitel 8

Abb. 8.1: Statisches System und Querschnitte des Kragarms	156
Abb. 8.2: Statisches System und Querschnitte des Rahmens	157
Abb. 8.3: Definierte Lastfälle des Kragarms und des Rahmens	158
Abb. 8.4: Lastfallkombination für die Rahmenstiele	158
Abb. 8.5: Verhältnis der Kräfte Xi unter Druck bzw. Biegung nach EC 9 und DIN 4113...	159
Abb. 8.6: Verhältnis der Kräfte Xi bei Biegung und Schub nach EC 9 und DIN 4113.....	160
Abb. 8.7: Verhältnis der Kräfte Xi bei Druck und Biegung nach EC 9 und DIN 4113.....	161

Abb. 8.8: Verhältnis der Kräfte Xi beim Beulnachweis nach EC 9 und DIN 4113.....	162
Abb. 8.9: Verhältnis der Kräfte Xi bei den Schweißnähten nach EC 9 und DIN 4113	163
Abb. 8.10: Verhältnis der Kräfte Xi der maßgebenden Nachweise beim Kragarm.....	164
Abb. 8.11: Verhältnis der Kräfte Xi der maßgebenden Nachweise beim Rahmen.....	165
Abb. 8.12: Ergebnisse der Wirkkategorien für den Kragarm ($m_{\text{Alu}}: m_{\text{Stahl}}= 1:2$).....	168
Abb. 8.13: Vergleich des KEA_{ne} der Kragarmvarianten ohne Nutzungsphase.....	169
Abb. 8.14: Vergleich des KEA_{ne} der Kragarmvarianten mit Nutzungsphase	169
Abb. 8.15: KEA_{ne} der einzelnen Kragarmvarianten bezogen auf die blanke Ausführung ...	170
Abb. 8.16: Ergebnisse der Wirkkategorien für den Rahmen ($m_{\text{Alu}}: m_{\text{Stahl}}= 1:2$)	171
Abb. 8.17: Vergleich des KEA_{ne} der Rahmenvarianten ohne Nutzungsphase	172
Abb. 8.18: Vergleich des KEA_{ne} der Rahmenvarianten mit Nutzungsphase.....	172
Abb. 8.19: KEA_{ne} der einzelnen Rahmenvarianten	173
Abb. 8.20: Kapitalwert der Lebenszykluskosten der Kragarmvarianten ($m_{\text{Alu}}: m_{\text{Stahl}}=1:2$)	174
Abb. 8.21: Gesamtkosten der Kragarmvarianten im Verhältnis zur blanken Ausführung ...	175
Abb. 8.22: Kapitalwert der Lebenszykluskosten der Rahmenvarianten ($m_{\text{Alu}}: m_{\text{Stahl}}=1:2$) .	176
Abb. 8.23: Gesamtkosten der einzelnen Rahmenvarianten.....	177

Abbildungen in Kapitel 9

Abb. 9.1: Ursprüngliche Holzkonstruktion des Lorenzistocks im Alten Hof.....	180
Abb. 9.2: Geplante Stahl-Glas-Konstruktion des Alten Hofes	180
Abb. 9.3: Alternative Dachkonstruktion aus geschweißten Aluminium- bzw. Stahlsparren	181
Abb. 9.4: Optimierte Querschnittswerte des angewandten Spektrums für Aluminium.....	182
Abb. 9.5: Auslastung der per Robustheitsanalyse optimierten Sparrensysteme.....	183
Abb. 9.6: Nicht erneuerbarer Energieaufwand (KEA_{ne}) je Dachsparren.....	185
Abb. 9.7: Erneuerbarer Energieaufwand (KEA_{e}) je Dachsparren.....	185
Abb. 9.8: Treibhauspotenzial (GWP 100) je Dachsparren	185
Abb. 9.9: Versauerungspotenzial (AP) je Dachsparren	186
Abb. 9.10: Eutrophierungspotenzial (NP) je Dachsparren.....	186
Abb. 9.11: Ozonvorläuferpotenzial (TOPP) je Dachsparren	186
Abb. 9.12: Vergleich des KEA_{ne} der blanken Sparren in Abhängigkeit der Recyclingrate .	187
Abb. 9.13: Vergleich des KEA_{ne} der beschichteten Sparren.....	187
Abb. 9.14: Vergleich des GWP 100 der blanken Sparren.....	188
Abb. 9.15: Vergleich des GWP 100 der beschichteten Sparren	188
Abb. 9.16: Gesamtkosten der blanken Dachkonstruktionen.....	190
Abb. 9.17: Gesamtkosten der beschichteten Dachkonstruktionen.....	191

Tabellenverzeichnis

Tabellen in Kapitel 2

Tab. 2.1: (Unter-) Kategorien mit Indikatoren gemäß Enquête (1998) und SIA (2000)	17
Tab. 2.2: Mögliches Ziel und Untersuchungsrahmen eines Aluminiumbauprodukts.....	19
Tab. 2.3: Quantifizierbare Wirkkategorien (in Anlehnung an Eyerer & Reinhardt, 2000)	20
Tab. 2.4: Wirkkategorien, die sich noch in der Entwicklung befinden (Eggerlein, 2004)	20
Tab. 2.5: Quantifizierbare Wirkkategorien mit Referenzgrößen	21
Tab. 2.6: Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren (EcoInvent, 2003).....	22
Tab. 2.7: Eutrophierungspotenzial (EcoInvent, 2003).....	22
Tab. 2.8: Versauerungspotenzial (EcoInvent, 2003).....	22
Tab. 2.9: Ozonabbaupotenzial (EcoInvent, 2003)	22
Tab. 2.10: Ozonvorläufer Potenzial (Eggerlein, 2004).....	22
Tab. 2.11: Aufteilung des kumulierten Energieaufwands (KEA) in Komponenten	25
Tab. 2.12: Aufteilung von kumulierten Stoffaufwands (KSA) in Komponenten	26
Tab. 2.13: Dynamische Verfahren zur Berechnung der Lebenszykluskosten	28
Tab. 2.14: Ausgewählte Computerprogramme zur ganzheitlichen Bewertung im Bau *	31

Tabellen in Kapitel 3

Tab. 3.1: Physikalische Eigenschaften von Aluminium versus Stahl.....	36
Tab. 3.2: Charakteristische Festigkeiten für Aluminium und Stahl.....	36
Tab. 3.3: Wesentliche Legierungselemente im Bauwesen.....	38
Tab. 3.4: Pulverbeschichtung und Eloxieren - Eigenschaften	41
Tab. 3.5: Beschichtungen im Bauwesen (in Anlehnung Aluminium-Zentrale, 1992).....	41
Tab. 3.6: Reinigungsintervalle von Aluminiumbauteilen (in Anlehnung an Mader, 2004)	42
Tab. 3.7: Nutzungsdauern unterschiedlicher Bauteile aus Aluminium.....	44

Tabellen in Kapitel 4

Tab. 4.1: Zukünftige EN-Richtlinien und dadurch ersetzte DIN-Normen für Aluminium.....	55
Tab. 4.2: Beispiel für Legierungs- und Zustandsdefinition nach EC 9 und DIN 4113.....	56
Tab. 4.3: Zuordnung von Zugfestigkeiten bei AW 6060 in EC 9 und DIN 4113.....	57
Tab. 4.4: Parameter für σ - ϵ -Linien nach EC 9 und DIN 4113.....	58

Tab. 4.5: Sicherheitskonzept nach EC 9 und DIN 4113	59
Tab. 4.6: Bemessungswiderstand für AW 6082 T6 nach EC 9 und DIN 4113	60
Tab. 4.7: Entfestigung in der Wärmeeinflusszone (WEZ) nach EC 9 und DIN 4113	61
Tab. 4.8: Ausdehnung der Wärmeeinflusszone (WEZ) nach EC 9 und DIN 4113	61
Tab. 4.9: Nachweis auf Zug und Druck (ohne Knickgefahr) nach EC 9 und DIN 4113	63
Tab. 4.10: Nachweis auf Biegung nach EC 9 und DIN 4113	63
Tab. 4.11: Nachweis auf Schubbeanspruchung nach EC 9 und DIN 4113.....	64
Tab. 4.12: Nachweis auf Schub und Biegung nach EC 9 und DIN 4113	65
Tab. 4.13: Nachweis auf Biegeknicken nach EC 9 (Hohlquerschnitte) und DIN 4113.....	66
Tab. 4.14: Nachweis auf Biegedrillknicken nach EC 9 und DIN 4113	68
Tab. 4.15: Nachweis auf lokales bzw. örtliches Beulen nach EC 9 und DIN 4113.....	68
Tab. 4.16: Nachweis auf Beulen bei Stegen von Biegeträgern nach EC 9 und DIN 4113	69
Tab. 4.17: Nachweis von Stumpfnähten nach EC 9 und DIN 4113.....	70
Tab. 4.18: Nachweis von Kehlnähten nach EC 9 und DIN 4113.....	71
Tab. 4.19: Nachweis von kombinierten Stumpf- und Kehlnähten nach EC 9 und DIN 4113	73
Tab. 4.20: Nachweis von mechanischen Verbindungsmitteln nach EC 9 und DIN 4113	74

Tabellen in Kapitel 5

Tab. 5.1: Treibhausgase mit Treibhauspotenzial (Glimm, 2003c).....	86
Tab. 5.2: Spezifische CO ₂ -Emissionen [kg CO ₂ /t _{AL}] von Aluminiumhütten in Europa.....	87
Tab. 5.3: Entfernung organischer Bestandteile (in Anlehnung an Krone (2000)).....	89
Tab. 5.4: Mechanische und physikalische Trennprinzipien.....	90
Tab. 5.5: Bestimmung von Sammlungs-, Aufbereitungs-, Schmelzrate und Wertverlust	93
Tab. 5.6: Standorte und Kapazitäten der deutschen Primäraluminiumerzeugung	97
Tab. 5.7: Vergleich von Wirkkategorien für die Herstellung von 1 kg Primäraluminium	99
Tab. 5.8: Vergleich des Treibhauspotenzials für die Herstellung von 1 m ² Aluminiumblech	99
Tab. 5.9: Prozesse mit jeweiliger Datenqualität in EAA, EcoInvent und GEMIS	100
Tab. 5.10: Zusammensetzung der berechneten Wirkkategorien	102
Tab. 5.11: Definitionen der KEA- Kategorien in EAA, EcoInvent und GEMIS.....	103
Tab. 5.12: Kennwerte zur Berechnung des (KEA) fossiler Energieträger.....	103
Tab. 5.13: Transportaufwendungen pro Tonne Primäraluminium in der EAA-Datenbank... ..	104
Tab. 5.14: Transportaufwendungen pro Tonne Primäraluminium in GEMIS	104
Tab. 5.15: Ergebnisse von EMPA vs. Eco Devis (in Anlehnung an Gerber (2004)).....	111

Tabellen in Kapitel 6

Tab. 6.1: Änderung der Erzeugerpreise von 01/1995- 09/2005.....	117
Tab. 6.2: Kosten für Aluminiumkonstruktionen der Legierung 6xxx.....	119

Tab. 6.3: Auswirkung des Kalkulationszins auf den Endpreis (Karrer, 2005)	123
Tab. 6.4: Rahmenparameter der drei untersuchten Fußgängerbrücken (Bentrup, 2000).....	124
Tab. 6.5: Instandhaltungsmaßnahmen nach DIN 1076	124
Tab. 6.6: Instandsetzungsmaßnahmen gemäß (Vollrath & Tathoff, 2002).....	124
Tab. 6.7: Charakteristische Daten der untersuchten Aluminiumbrücke (Höfle, 2004)	126

Tabellen in Kapitel 7

Tab. 7.1: Pfosten- und Riegelquerschnitte je Fassadensystem für Parameterstudie	136
Tab. 7.2: Ergebnisse der Parameterstudie für die Riegel bezogen auf die gesamte Fassade	137
Tab. 7.3: Ergebnisse der Parameterstudie für die Pfosten bezogen auf die gesamte Fassade	138
Tab. 7.4: Ausgewählte Fassadensysteme für ökologische Betrachtungen.....	143
Tab. 7.5: Modellierung der Nutzungsphase und des Recyclings der Fassadensysteme	144
Tab. 7.6: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung je nach Fassadensystem	145
Tab. 7.7: U-Werte und Heizwärmebedarf für Raumvolumen je nach Fassadentyp	149

Tabellen in Kapitel 8

Tab. 8.1: Maßgebende Nachweise des Kragarmes	164
Tab. 8.2: Maßgebende Nachweise des Rahmens	165
Tab. 8.3: Modellierung der Nutzungsphase und des Recyclings der Schilderbrücken.....	167

Tabellen in Kapitel 9

Tab. 9.1: Ergebnisse der Robustheitsanalyse	183
Tab. 9.2: Modellierung der Nutzungsphase und des Recyclings der Dachsparren.....	184
Tab. 9.3: Gesamtkosten der optimierten Dachkonstruktionen.....	189

Anhang A zu Kapitel 3

A.1 Fragebögen für Metallbauer

Methoden für eine nachhaltig profitable Unternehmensführung zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von Aluminiumbauprodukten

Eine Projektstudie in Zusammenarbeit mit:



Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre
Unternehmensführung, Logistik und Produktion
Univ.-Prof. Dr. Dr. habil. Dr. h. c. Horst Wildemann
Leopoldstr. 145
80804 München
www.bwl.wiso.tu-muenchen.de

Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dimitris Kosteas
Arcisstrasse 21
80333 München
www.lme.bv.tum.de

Ziel dieser Studie

Das Wettbewerbsumfeld für Unternehmen, insbesondere Baufirmen ist heute schwieriger denn je. Leere Staatskassen und strenge Sparmaßnahmen bei allen Auftraggebern erfordern Niedrigpreise und gleichzeitig qualitativ hochwertige Bauleistungen in kürzester Abwicklungszeit. Zusätzlich wird in Gesellschaft und Politik aufgrund steigender Umwelteinflüsse die Forderung einer nachhaltigen Wirtschaftsweise immer deutlicher. Nachhaltigkeit wird dabei als die Gleichsetzung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Belangen definiert. Für den Bausektor bedeutet dies die Entwicklung und der Einsatz hochwertiger Baumaterialien, moderner Technologien und effektiver Lösungen unter Berücksichtigung von Ökobilanzen und Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

Einige Baustoffe wie beispielsweise Aluminium hatten in der Vergangenheit wegen falscher Interpretation von Studien, zusammenhangloser Darstellung von Ergebnissen und Falschmeldungen in der Presse mit Vorurteilen bzgl. Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit zu kämpfen. Mit Hilfe dieses Fragebogens soll die derzeitige Marktsituation von Aluminiumbauprodukten analysiert werden. **Ziel ist es, Optimierungsmaßnahmen für Metallbauunternehmen abzuleiten, um eine rasche Umstellung auf die sich verschärfenden, wirtschaftlichen und ökologischen Randbedingungen zu ermöglichen.** Die Beachtung des Nachhaltigkeitsprinzips in der Unternehmens-Führung soll sich auf längere Sicht zum Wettbewerbsvorteil entwickeln - diese Tendenz möchten wir nun intensiv erforschen und praktische Anwendungsmethoden bzw. Tools für die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit ableiten.

Wir hoffen durch unsere Arbeit interessante Ergebnisse für die Praxis liefern zu können, die wir Ihnen selbstverständlich gern zur Verfügung stellen. Sollten Sie Anregungen, Kommentare oder Fragen haben, die durch unseren Fragebogen nicht abgedeckt sind, bitte kontaktieren Sie uns – wir würden uns über Ihren Beitrag freuen!

Mit herzlichem Dank für Ihre Kooperation und Ihre Zeit:

Andreas Hasselbeck

Daniel Klein

Mathias Riesemann

Hinweise zum Ausfüllen und zur Anonymisierung des Fragebogens:

Der Fragebogen umfasst insgesamt 44 kurze Fragen und ist eingeteilt in fünf Teile:

1. Allgemeines
2. Technik & Konstruktion
3. Ökologie
4. Wirtschaftlichkeit
5. Nachhaltigkeit und Wettbewerb
6. persönliche Einschätzung.

Das Ausfüllen dürfte ca. 30 Minuten in Anspruch nehmen - bitte kreuzen Sie die für Sie zutreffenden Antworten an.

Ihre Aussagen werden alle streng vertraulich behandelt. Um Ihnen die Ergebnisse aus unserer Studie zusenden zu können, bitte geben Sie folgende Informationen an:

Name

Firma

Position

Adresse

Email

Ansprechpartner

Bei Fragen oder Anregungen wenden Sie sich bitte an:

cand.-Ing. Mathias Riesemann
Tel: +49 89 35408829
Mobil : +49 160 90666048
Email: m_riesemann@web.de

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Eszter Dienes
Tel.: +49 89 289 230 53
Mobil: +49 172 5794766
Email: dienes@bv.tum.de

1. Allgemeines

1.1 Welche Aluminiumbauprodukte bietet Ihre Firma an?		
	<i>tragend</i>	<i>nicht-tragend</i>
Antennen- und Blitzableiterkonstruktionen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beschläge, Fenster- und Türgriffe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brücken	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Balkone	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dach-/Deckenkonstruktionen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fassadensysteme	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fenster	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Folien zur Isolierung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gerüste, Arbeitsbühnen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Leiter, Treppen, Verbindungsstege	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Türen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Unterkonstruktionen für Solarfassaden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wandkonstruktionen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:		

1.2 In welchen anderen Bereichen vertreiben Sie Aluminiumprodukte?	
Verpackung	<input type="checkbox"/>
Maschinenbau	<input type="checkbox"/>
Verkehr	<input type="checkbox"/>
Eisen- und Stahlindustrie	<input type="checkbox"/>
Elektrotechnik	<input type="checkbox"/>
Sonstiges	<input type="checkbox"/>

1.3 Wer ist Ihr Lieferant für Aluminiumhalbzeug?		
Ständig wechselnd, je nach Produkt und Preisangebot	<input type="checkbox"/>	
Festverträge	mit einem Unternehmen	<input type="checkbox"/>
	mit mehreren Unternehmen	<input type="checkbox"/>
Sowohl Festverträge als auch ständig wechselnde Unternehmen	<input type="checkbox"/>	

1.4 Mit welchen Bedenken bzgl. Ihrer Aluminiumbauprodukte werden Sie bei Ihren Kunden konfrontiert?					
Bedenken wegen:	<i>immer</i>	<i>häufig</i>	<i>manchmal</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Brandschutz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Festigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verformungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Korrosion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Umweltwirkung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hoher Anschaffungspreis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					

1.5 Wie überzeugen Sie Ihre Kunden bzw. warum entscheiden sich Ihre Kunden letztlich für ein Aluminiumbauprodukt?					
Technisch & konstruktive Gründe	<i>immer</i>	<i>häufig</i>	<i>manchmal</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Funktionalität, Formbarkeit, Profilvielfalt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geringes Gewicht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Festigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geringe Korrosionsanfälligkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Designflexibilität, leichte Bearbeitung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					
Ökonomische Gründe	<i>immer</i>	<i>häufig</i>	<i>manchmal</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Sehr gutes Preis-Leistungs-Verhältnis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lange Lebensdauer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wartungsarme Nutzung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					
Ökologische Gründe	<i>immer</i>	<i>häufig</i>	<i>manchmal</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Recyclebarkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nicht-toxisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					
Optische Gründe	<i>immer</i>	<i>häufig</i>	<i>manchmal</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Ästhetik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beschichtungsmöglichkeiten, Farbgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					

2. Technik & Konstruktion

2.1 Bitte bewerten Sie die DIN 4113 für Aluminiumkonstruktionen im Hinblick auf:

	<i>perfekt</i>	<i>gut</i>	<i>mittel</i>	<i>mäßig</i>	<i>schlecht</i>
Ausführlichkeit bzgl.					
- Werkstoffe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- Nachweise	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- Korrosionsschutz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- Brandschutz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verständlichkeit der Nachweise	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufwand für Berechnungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wirtschaftlichkeit der Ergebnisse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anwendbarkeit & Praxistauglichkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Frage nicht relevant – wir haben keine Erfahrung.					<input type="checkbox"/>

2.2 Welche Lebensdauer garantieren Sie Ihren Kunden für Ihre Aluminiumbauprodukte (vorausgesetzt die Umgebungsbedingungen sind durch keine extremen Einflüsse gekennzeichnet und der Kunde behandelt ihre Produkte sachgemäß)?

<10 Jahre	<input type="checkbox"/>
10-30 Jahre	<input type="checkbox"/>
30-60 Jahre	<input type="checkbox"/>
>60 Jahre	<input type="checkbox"/>
Nicht relevant – das Aluminiumprodukt hält länger als gekoppelte Baumaterialien.	<input type="checkbox"/>
Nicht relevant – wir sind zu keiner langen Garantiezeit verpflichtet.	<input type="checkbox"/>

2.3 Welchen Aufwand benötigen Ihre Aluminiumbauprodukte, um die garantierte Lebensdauer zu erreichen?

	<i>häufig</i>	<i>manchmal</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Reinigung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Inspektion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wartung (z.B. neuer Anstrich, Reparatur)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Keinen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.4 Was ist Ihren Erfahrungen zufolge der häufigste Schadensfall bei Ihren Aluminiumbauprodukten?

Versagen aufgrund Verlust der Tragfähigkeit	<input type="checkbox"/>
Verformungen aufgrund Verlust der Gebrauchstauglichkeit	<input type="checkbox"/>
Verschleiß	<input type="checkbox"/>
Korrosionsschäden	<input type="checkbox"/>
Brandfall	<input type="checkbox"/>
Nicht relevant – bei unseren Produkte sind noch nie Schäden aufgetreten.	<input type="checkbox"/>

2.5 Wie bewerten Sie die folgenden Punkte im Hinblick auf Aluminiumbauprodukte:?					
	<i>perfekt</i>	<i>gut</i>	<i>mittel</i>	<i>mäßig</i>	<i>schlecht</i>
Literatur über Aluminium im Bauwesen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationen im Internet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationsfluss zwischen Firmen untereinander	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationsfluss zwischen Firmen und Forschung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationen von Verbänden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Informationsfluss zwischen Kunden und Firmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.6 Mit welchen anderen Baumaterialien koppeln Sie Ihre Aluminiumbauprodukte?					
	<i>immer</i>	<i>häufig</i>	<i>manchmal</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Beton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Glas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Holz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PVC	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stahl/ Edelstahl	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					

3. Ökologie

3.1 Werden Sie mit ökologischen Vorwürfen (bspw. hoher Primärenergiebedarf, hohe Emissionen) in der Praxis bzgl. der Herstellung, Nutzung und Entsorgung Ihrer Aluminiumbauprodukte konfrontiert?

	<i>immer</i>	<i>häufig</i>	<i>manchmal</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Kunden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Medien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Umweltorganisationen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Andere Bauunternehmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					

3.2 Die Stadt München beschränkt durch einen "Ökologischen Kriterienkatalog" die Verwendung von Aluminium als Baumaterial - Werden Sie in der Praxis mit ähnlichen Auflagen gegenüber Aluminium als Baustoff konfrontiert?

Ja, bitte um Beschreibung:

Nein.

3.3 Betreiben Sie aktives Umweltmanagement?

Ja.

Noch nicht, ist aber geplant. *weiter zu 3.4*

Nein, aus finanziellen Gründen. *weiter zu 3.4*

Nein. *weiter zu 3.4*

3.3.1 Hat das Umweltmanagement Ihren Unternehmenserfolg erhöht?

Ja, folgendermaßen:

Noch nicht, wir rechnen aber damit in der Zukunft.

Nein.

3.4 Ist Ihnen der Begriff der Ökobilanz (Life-Cycle-Analysis) bekannt?

Ja.

Habe davon gehört, aber ich könnte den Begriff auf Anhieb nicht genau definieren.

Nein.

3.5 Führen Sie unten aufgelistete Aktivitäten in Ihrem Unternehmen durch?

	<i>ja</i>	<i>nein</i>
Systematische Erfassung der Stoff- und Energieflüsse auf Prozessebene	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ökologische Bewertung der Stoff- und Energieflüsse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entwicklung einer Informationsgrundlage (=Datenbank)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Erkennung ökologischer Schwachstellen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Identifizierung ökologischer Prioritäten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Optimieren des Aluminiumbauproduktes in ökologischer Hinsicht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3.6 Vergleichen Sie Ihre Aluminiumbauprodukte auf ökologischer Basis (z.B. Ökobilanz) mit anderen Materialien?	
Ja, die Ergebnisse sind für die Öffentlichkeit (z.B. Kunde) verfügbar. Bitte nennen sie das/die Vergleichsmaterial/ien:	<input type="checkbox"/>
Ja, aber nur intern, die Ergebnisse werden nicht veröffentlicht. Bitte nennen sie das/die Vergleichsmaterial/ien:	<input type="checkbox"/>
Noch nicht, ein Vergleich ist jedoch geplant mit:	<input type="checkbox"/>
Nein.	<input type="checkbox"/>

3.7 Haben Sie als Anbieter bei einer Ausschreibung bereits ökologische Stellungnahmen bzgl. Ihrer Aluminiumbauprodukte - freiwillig oder auf Anforderung - abgegeben?		
Ja, eine Energie- oder Ökobilanz von der Herstellung bis zum Zeitpunkt der Montage.	freiwillig	<input type="checkbox"/>
	auf Anforderung	<input type="checkbox"/>
Ja, eine Energie- oder Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus.	freiwillig	<input type="checkbox"/>
	auf Anforderung	<input type="checkbox"/>
Ja, sonstige:		
Nein, bisher nicht.		<input type="checkbox"/>

3.8 Wie entsorgen Sie Ihre Aluminium-Produkte und Aluminium-Produktionsabfälle?		
Wir kümmern uns nicht um die Entsorgung/ Wir sind zur Entsorgung nicht verpflichtet.		<input type="checkbox"/>
Wir entsorgen die ausgedienten Bauteile:	a) wir haben eine Rücknahmeverpflichtung	<input type="checkbox"/>
	b) nur bei Kundenanfrage	<input type="checkbox"/>
Wir verwerten den Aluschrott durch:	a) Festverträge mit Metallhändlern	<input type="checkbox"/>
	b) Sporadischen Schrottverkauf an unterschiedliche Metallhändler je nach Preisangebot	<input type="checkbox"/>
	c) Durch sowohl a) als auch b)	<input type="checkbox"/>
Wir beauftragen einen externen Dienstleister für die komplette Abwicklung der Demontage und Entsorgung.		<input type="checkbox"/>

3.9 Werden Sie bis 2010 den Bereich Ökologie forcieren und weiterentwickeln?	
Ja, wir wollen damit Kunden gewinnen und mehr Aufträge erhalten.	<input type="checkbox"/>
Ja, wir wollen im Falle umweltpolitischer Auflagen schnell reagieren können.	<input type="checkbox"/>
Bisher sind keine entsprechenden Maßnahmen geplant.	<input type="checkbox"/>

4. Wirtschaftlichkeit

4.1 Wie groß ist das Unternehmen, in dem Sie arbeiten?

Bis 9 Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>
10-19 Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>
20-99 Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>
100-499 Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>
500 und mehr Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>

4.2 Welchen Umsatz hat das Unternehmen im Jahr 2003 erzielt?

<1 Million €	<input type="checkbox"/>
>1 bis 10 Millionen €	<input type="checkbox"/>
>10 bis 50 Millionen €	<input type="checkbox"/>
>50 bis 100 Millionen €	<input type="checkbox"/>
>100 Millionen €	<input type="checkbox"/>

4.3 Welcher Prozentsatz davon wurde mit Aluminiumbauprodukten erzielt?

--

4.4 Wie lassen sich prozentual Ihre Auftraggeber zuordnen?

	2003	Prognose 2010
Öffentliche Auftraggeber (Ausschreibung)	%	%
Industrie	%	%
Handwerk	%	%
Endverbraucher (Private Bauherren)	%	%

4.5 Welche Werbungs- bzw. Marketingaktivitäten unternehmen Sie?

	<i>ständig</i>	<i>häufig</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Marktforschung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produkt-/ Preispolitik (Produktvielfalt, Preisstrategie, Konditionspolitik, u.s.w.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werbung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verkaufsförderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Benchmarking	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.5.1 Wie bzw. wo werben Sie für Ihre Aluminiumbauprodukte?

	<i>ständig</i>	<i>häufig</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Bau-Fachmessen, Ausstellungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Broschüren, Prospekte der Produkte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Internet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Persönliche Empfehlung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fachzeitschriften, Journale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Öffentlichkeitsarbeit (Presse, Referenzobjekte)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiges:				

4.5.2 An welche Zielgruppe richten sich Ihre Werbemaßnahmen?

Privatpersonen	<input type="checkbox"/>
Architekten	<input type="checkbox"/>
Baufirmen	<input type="checkbox"/>
Staatliche Auftraggeber	<input type="checkbox"/>
Sonstige:	

4.6 In welchen Bereichen sind Ihre Wettbewerber angesiedelt?

Andere Aluminiumverarbeiter	<input type="checkbox"/>
Stahl	<input type="checkbox"/>
Glas	<input type="checkbox"/>
Holz	<input type="checkbox"/>
Stein	<input type="checkbox"/>
Wir haben keine direkten Konkurrenten.	<input type="checkbox"/>
Sonstige:	

4.7 Welche der folgenden Punkte treffen bei Ihnen im Bereich Produktion und Fertigung zu?

	<i>ständig</i>	<i>häufig</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Einsatz neuester Technologien/ moderner Werkzeuge und Maschinen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Serienproduktion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lagerung (Rohstoff, Produkte)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Modernes Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Montage im Werk und anschließende Lieferung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lieferung und Montage vor Ort	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.8 Welche Aufwendungen haben Sie während der Nutzung der Aluminiumprodukte?

	<i>ständig</i>	<i>häufig</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Änderungen am System	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Inspektion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kundenservice, Bereitstellung techn. Daten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Regelmäßige Instandhaltung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiges:				

4.9 Welche Aufwendungen haben Sie bei Rücknahme und Entsorgung?

	<i>ständig</i>	<i>häufig</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Demontagekosten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transport zum Schrotthändler	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Abriss	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Deponie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstiges:				

4.10 Sind Sie über das Konzept der Lebenszykluskostenanalyse (Life-Cycle-Cost-Analysis) informiert?

Ja.	<input type="checkbox"/>
Habe davon gehört, aber ich könnte den Begriff auf Anhieb nicht genau definieren.	<input type="checkbox"/>
Nein. <i>weiter zu 4.11</i>	<input type="checkbox"/>

4.10.1 Stellen Sie für Ihre Bauprodukte eine Lebenszykluskostenanalyse zur Verfügung?

Ja, für den gesamten Lebenszyklus.	<input type="checkbox"/>
Noch nicht, ist aber bereits in Auftrag.	<input type="checkbox"/>
Nein. <i>weiter zu 4.11</i>	<input type="checkbox"/>

4.10.2 Welches Berechnungsverfahren verwenden Sie zur Lebenszykluskostenanalyse?

--

4.11 Führen Sie unten aufgelistete Aktivitäten in Ihrem Unternehmen durch?

	<i>ständig</i>	<i>häufig</i>	<i>selten</i>	<i>nie</i>
Systematische Erfassung aller anfallenden Kosten während des Produktlebenszyklus	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Suche nach Einsparpotentialen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Optimierung der Wirtschaftlichkeit Ihrer Bauprodukte über den gesamten Lebenszyklus hinweg	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verwendung von Lebenszykluskostenanalyse im Bereich Marketing	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. Nachhaltigkeit und Wettbewerb

5.1 Welcher Anteil Ihrer Geschäftsstrategie oder operativen Abläufe wird durch nachhaltige Zielsetzungen bestimmt? (Nachhaltigkeit: gleichmäßige Berücksichtigung wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer/ ästhetischer Gesichtspunkte)

Ein wesentlicher Teil	<input type="checkbox"/>
Ein kleiner Teil - wir planen es in der Zukunft weiter auszubauen	<input type="checkbox"/>
Bisher sind keine Maßnahmen für die Berücksichtigung der Nachhaltigkeit geplant. <i>weiter zu 5.5</i>	<input type="checkbox"/>

5.2 In welchen Unternehmensbereichen bzw. für welche Ziele wird die Nachhaltigkeit in Ihrem Unternehmen berücksichtigt?

	<i>ja</i>	<i>nein</i>
Freiwillige ökologische Leistungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Risikominimierung bzgl. Umwelt- und Produkthaftung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Produkt- und Prozessverbesserung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Imageverbesserung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kostensenkungspotentiale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Corporate Identity	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kapitalerhaltung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ansätze zur Erschließung neuer Kundenpotentiale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Leistungsverbesserung für bestehende Kunden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5.3 Verfassen Sie einen Nachhaltigkeitsbericht?

Ja, seit:	<input type="checkbox"/>
Nein.	<input type="checkbox"/>
Wenn nicht, haben Sie vor, in Zukunft einen Nachhaltigkeitsbericht zu verfassen?	<input type="checkbox"/>

5.4 Wie hoch sind die jährlichen Ausgaben zur Berücksichtigung der Nachhaltigkeit?

2003:	Prognose 2010
€/a	€/a

5.5 Wie beurteilen Sie eine Berücksichtigung der Nachhaltigkeit in Ihrem Unternehmen für die Zukunft?

Als Chance zur Imageverbesserung.	<input type="checkbox"/>
Keine Auswirkungen.	<input type="checkbox"/>
Keine Meinung.	<input type="checkbox"/>
Sonstige:	

6. Persönliche Einschätzung

6.1 Wo liegen Ihrer Meinung nach Optimierungsmöglichkeiten in der Vermarktung von Aluminium-Bauprodukten?

6.2 Welche Möglichkeiten sehen Sie, die Wettbewerbsfähigkeit von Aluminium-Bauprodukten zu verbessern?

6.3 Wo liegen Ihrer Meinung nach Optimierungsmöglichkeiten im Bereich Ökologie?

A.2 Fragebögen für Architekten

Methoden für eine nachhaltig profitable Unternehmensführung zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von Aluminiumbauprodukten

Eine Projektstudie in Zusammenarbeit mit:



Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre
Unternehmensführung, Logistik und Produktion
Univ.-Prof. Dr. Dr. habil. Dr. h. c. Horst Wildemann
Leopoldstr. 145
80804 München
www.bwl.wiso.tu-muenchen.de

Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dimitris Kosteas
Arcisstrasse 21
80333 München
www.lme.bv.tum.de

Zweck dieser Studie

Die Unternehmen und Baufirmen befinden sich heute in einer schwierigen Situation. Nur wer qualitativ hochwertige Bauleistungen zu niedrigen Preisen anbietet und in kürzester Zeit durchführen kann, hat Chancen auf einen Auftrag.

Zusätzlich wird durch die Gesellschaft und Politik aufgrund steigender Umwelteinflüsse die Anforderung für eine nachhaltige Wirtschaftsweise gestellt. Nachhaltigkeit wird dabei im Sinne der Gleichsetzung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Belangen definiert. Dies bedeutet eine gleichgewichtete Abwicklung zukünftiger Baumaßnahmen nach ästhetischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten. Gefordert ist nunmehr die Entwicklung und Einsatz hochwertiger Baumaterialien, moderner Technologien und effektiver Lösungen unter Berücksichtigung von Ökobilanzen und Lebenszykluskosten.

In der Vergangenheit hatte Aluminium wegen falscher Interpretation von Studien, zusammenhangloser Darstellung von Ergebnissen und Falschmeldungen in der Presse mit besonders schweren Vorurteilen bzgl. Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit zu kämpfen. Mit Hilfe dieses Fragebogens soll die derzeitige Marktsituation für Aluminiumbauprodukte erfasst und analysiert werden. Ziel ist es, Optimierungsmaßnahmen für Unternehmen abzuleiten, um eine rasche Umstellung auf die sich verschärfenden, wirtschaftlichen und ökologischen Randbedingungen zu ermöglichen. Der nachhaltige Charakter von Aluminium soll untersucht, Vorurteile widerlegt und der Einsatz im Bauwesen wissenschaftlich untermauert werden. Die Beachtung des Nachhaltigkeitsprinzips soll sich auf längere Sicht zum Wettbewerbsvorteil entwickeln - diese Tendenz möchten wir nun intensiv erforschen und praktische Anwendungsmethoden bzw. Tools für die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit erarbeiten.

Wir hoffen mit unserer Arbeit interessante Ergebnisse für die Praxis zu liefern, die wir Ihnen selbstverständlich auch gern zur Verfügung stellen. Sollten Sie Anregungen, Kommentare oder Fragen haben, die durch unseren Fragebogen nicht abgedeckt sind, bitte kontaktieren Sie uns – wir würden uns über Ihren Beitrag freuen!

!!Vielen Dank für Ihre Kooperation!!

Hinweise zum Ausfüllen des Fragebogens:

Der Fragebogen umfasst insgesamt 16 kurze Fragen:

Das Ausfüllen dürfte ca. 10 min in Anspruch nehmen - bitte kreuzen Sie die zutreffenden Antworten an.

Hinweis zur Anonymisierung des Fragebogens:

Ihre Aussagen werden alle streng vertraulich behandelt. Um Ihnen ein Exemplar des abschließenden Berichts zusenden zu können, füllen Sie bitte die nachfolgenden Zeilen aus

Name

Firma:

Position:

Adresse:

Email:

Ansprechpartner

Falls Sie Fragen zu dieser Studie haben, wenden Sie sich bitte an:

cand.-Ing. Mathias Riesemann

Tel: +49 89 35408829

Mobil : +49 160 90666048

Email: m_riesemann@web.de

Dipl.-Ing. Christina Radlbeck

Tel.: +49 89 289 230 52

Email: c.radlbeck@bv.tum.de

Rücksendeadresse

Mathias Riesemann

Connollystr. 3 G1002

80809 München

m_riesemann@web.de

1. Allgemeines

1.1 Wie groß ist das Architekturbüro/ Ingenieurbüro in dem Sie arbeiten?	
Bis 5 Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>
6-10 Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>
11-20 Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>
21 und mehr Mitarbeiter	<input type="checkbox"/>

1.2 In welchen Bereichen haben Sie bisher mit Aluminiumbauprodukten gearbeitet?						
	tragend	nicht-tragend	häufig	manchmal	selten	nie
Absturzsicherung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Antennen- und Blitzableiter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beschläge, Fenster- und Türgriffe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brücken	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Balkone	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Container, Garagen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dach-/Deckenkonstruktionen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fassadensysteme	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fenster	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Folien zur Isolierung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gerüste, Arbeitsbühnen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Leiter, Treppen, Verbindungsstege	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Konstruktionen mit Solarelementen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Türen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Türme	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wandkonstruktionen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wintergärten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:						

1.3 Warum entscheiden Sie sich für ein Aluminiumbauprodukt?					
	immer	häufig	manchmal	selten	nie
Technisch & konstruktive Gründe					
Funktionalität, Formbarkeit, Profilvervielfalt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geringes Gewicht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Festigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geringe Korrosionsanfälligkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Designflexibilität, leichte Bearbeitung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					
Ökonomische Gründe	immer	häufig	manchmal	selten	nie
Sehr gutes Preis-Leistungs-Verhältnis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lange Lebensdauer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wartungsarme Nutzung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					

Ökologische Gründe	immer	häufig	manchmal	selten	nie
Recyclebarkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geringer Energieverbrauch bei Nutzung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nicht-toxisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					
Optische Gründe	immer	häufig	manchmal	selten	nie
Ästhetik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beschichtungsmöglichkeiten, Farbgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					

1.4 Welche Bedenken haben Sie bzgl. Aluminiumbauprodukte?					
Bedenken wegen:	immer	häufig	manchmal	selten	nie
Brandschutz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Festigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verformungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Korrosion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Umweltwirkung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hoher Anschaffungspreis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonstige:					

1.5 Gibt es für Sie weitere Gründe um Aluminium in einem Bauwerk nicht zu verwenden? Wenn ja, welche?	

1.6 Ist Ihnen das Prinzip der Nachhaltigkeit bekannt?	
Ja, ich könnte es erklären	<input type="checkbox"/>
Ich habe davon gehört, könnte es aber auf Anhieb nicht erklären	<input type="checkbox"/>
Nein	<input type="checkbox"/>

1.7 Wussten Sie?		
	Ja	Nein
Dass Aluminium mit einer Dichte von $2,7\text{g/cm}^3$ nur ein Drittel des Gewichts von Stahl hat?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass die Festigkeit von Aluminium je nach Legierung variiert werden kann, und dadurch Werte im Bereich der Streckgrenze von Stahl ($f_{yk} = 240\text{N/mm}^2$) erzielt werden können?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass die Herstellung von Primäraluminium sehr energieaufwendig ist?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass man versucht, diese Energie aus Wasserkraft zu gewinnen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass Aluminium aufgrund der hervorragenden Korrosionsbeständigkeit in der Nutzungsphase nur minimalen Unterhalt benötigt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass dadurch wesentlich weniger Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen als z.B. bei Stahl und Holz anfallen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass sich dadurch die Kosten im Vergleich zu Stahl und Holz bereits nach 6-8 Jahren relativieren können?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass Aluminium nicht brennt und erst bei einer Temperatur von $650\text{ }^\circ\text{C}$ zu schmelzen beginnt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass Aluminium sehr dauerhaft ist, z.B. bestehen das Aluminiumkuppeldach der Kirche San Gioacchino in Rom und die Eros-Statue aus Aluminium des Piccadilly Circus in London bereits seit über einem Jahrhundert ohne größeren Wartungsaufwand	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass durch das Strangpressen von Aluminium vielfältige Profilformen produziert werden können und dadurch Querschnitte direkt an die entsprechende Belastung angepasst werden können?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass man sich dadurch im Gegensatz zu Stahl viele Aussteifungen, Bleche Verbindungsarbeiten und Arbeitsstunden sparen kann?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass Aluminium ohne Qualitätsverlust wiederverwertet werden kann?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass das Recycling (Umschmelzen) von Aluminium mit nur 5% des Energieaufwands der Primäraluminiumherstellung durchgeführt werden kann?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dass die derzeitige Recyclingrate des im Baubereich eingesetzten Aluminiums bereits 85% beträgt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

1.8 Welcher Anteil der Investitionsentscheidung wird aufgrund der reinen Anschaffungskosten getroffen? Bzw. wie hoch ist der Entscheidungsanteil aufgrund der gesamten Lebenszykluskosten (=alle Kosten, die über die Lebensdauer d.h. Planung, Produktion, Montage, Nutzung und Entsorgung bzw. Wiederverwertung des Produktes) anfallen.		
	Anschaffungskosten	Lebenszykluskosten
Derzeit	%	%
Zukünftig (2010)	%	%

2. Fassadenkonstruktionen aus Aluminium

2.1 Wie oft wird in Ihrem Büro Aluminium für Fassaden gewählt? (in Bezug auf die gesamte Anzahl der von Ihnen bisher geplanten Fassaden)	
0 – 20 %	<input type="checkbox"/>
20 – 40 %	<input type="checkbox"/>
40 – 60 %	<input type="checkbox"/>
60 – 80 %	<input type="checkbox"/>
80 – 100 %	<input type="checkbox"/>

2.2 Wie groß ist Ihrer Meinung nach der Einfluss der verschiedenen Gruppen auf die Entscheidung, welcher Werkstoff für die Fassade verwendet werden soll?					
	Sehr groß	groß	mittel	klein	Sehr klein
Architekt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ingenieur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauherr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauunternehmer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Metall-, Fassadenbauer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2.3 Bei welchen Fassadenarten haben Sie bisher mit Aluminium gearbeitet?	
Integrierte Fassade (d.h. mit Zusatzfunktion z.B. Heizen, Kühlen oder Lüften)	<input type="checkbox"/>
Vorgehängte Fassade bzw. Zweite-Haut-Fassade mit Dauerhinterlüftung	<input type="checkbox"/>
Vorgehängte Fassade bzw. Zweite-Haut-Fassade mit regulierbarer Hinterlüftung	<input type="checkbox"/>
Filigrane Fassadenkonstruktionen (d.h. möglichst nur mit Zugbelastung)	<input type="checkbox"/>
Pfosten–Riegel–Konstruktionen	<input type="checkbox"/>
Sonderkonstruktionen (z.B. Seilverspannungen)	<input type="checkbox"/>
Sonstiges:	

2.4 Mit welchen Materialien haben Sie Aluminium bisher im Fassadenbau kombiniert?	
Beton	<input type="checkbox"/>
Glas	<input type="checkbox"/>
Holz	<input type="checkbox"/>
Stahl	<input type="checkbox"/>
Sonstige:	

2.5 Kennen Sie die Sandwichplatte der Firma Metawell?	
Ja	<input type="checkbox"/>
Nein	<input type="checkbox"/>

3. Persönliche Einschätzung

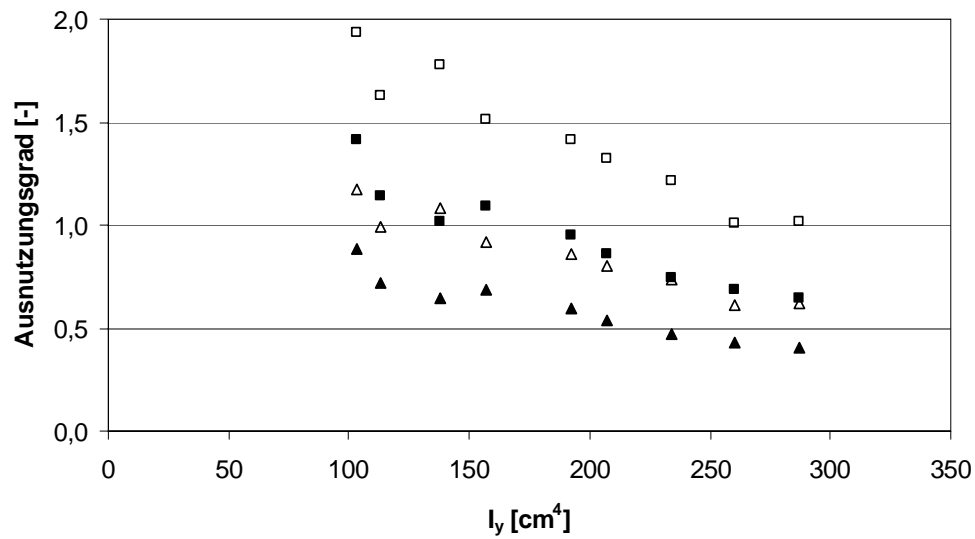
3.1 In welchen Bereichen sehen Sie noch Nachholbedarf von Aluminiumbauteilen gegenüber anderen Werkstoffen?

3.2 Welche Potentiale des Werkstoffes Aluminium werden Ihrer Meinung nach im Bauwesen bisher zu wenig genutzt?

3.3 Wo sehen Sie Ansatzpunkte zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Aluminiumbauteilen?

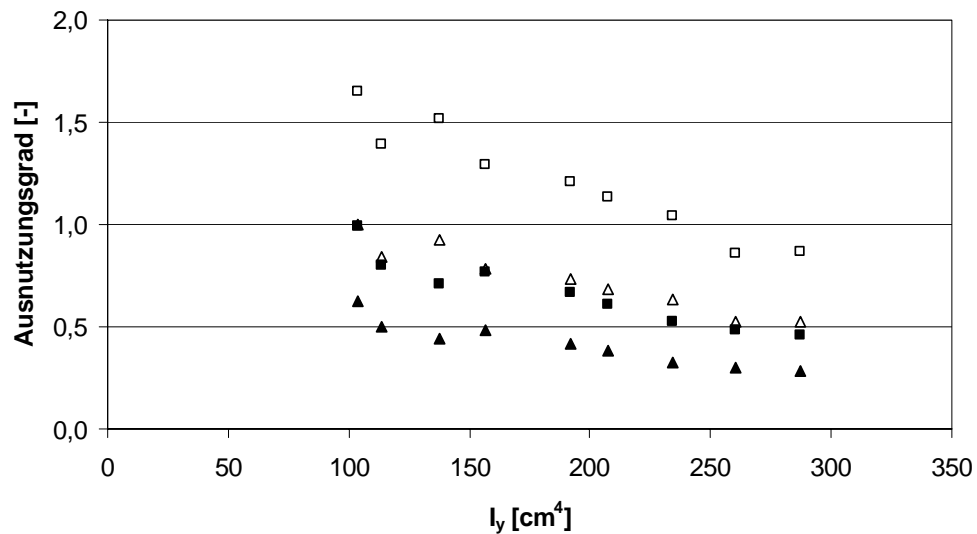
Anhang B zu Kapitel 7

B.1 Vergleich DIN 4113 – EC 9 bei den Fassadensystemen



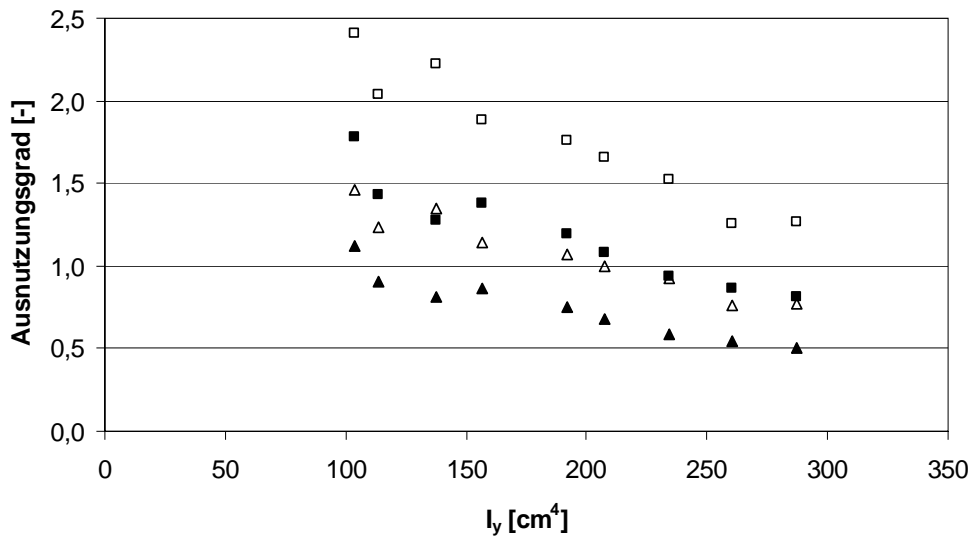
□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. B.1: Biegung und Normalkraft bei Durchlaufträger mit 1,6 m Pfostenabstand



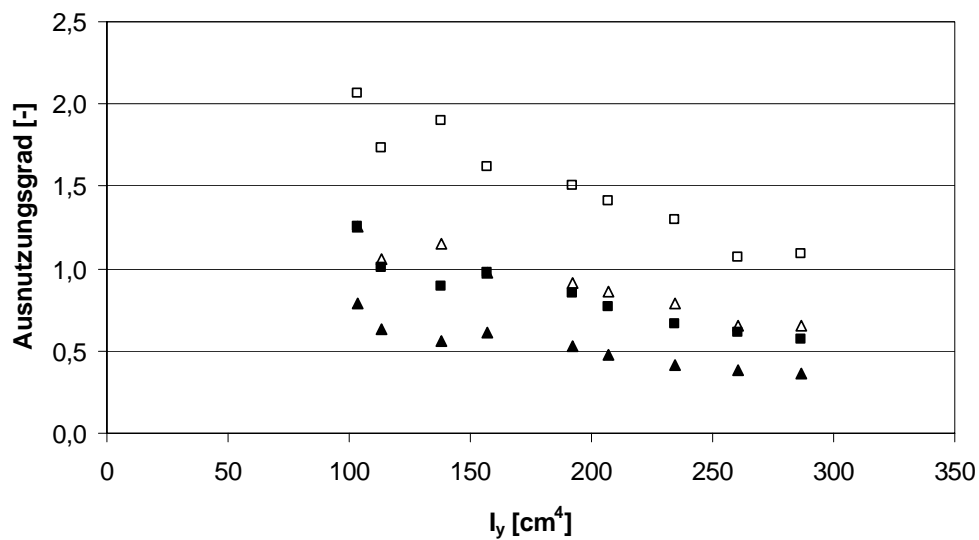
□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. B.2: Biegung und Normalkraft bei Gerberträger mit 1,6 m Pfostenabstand



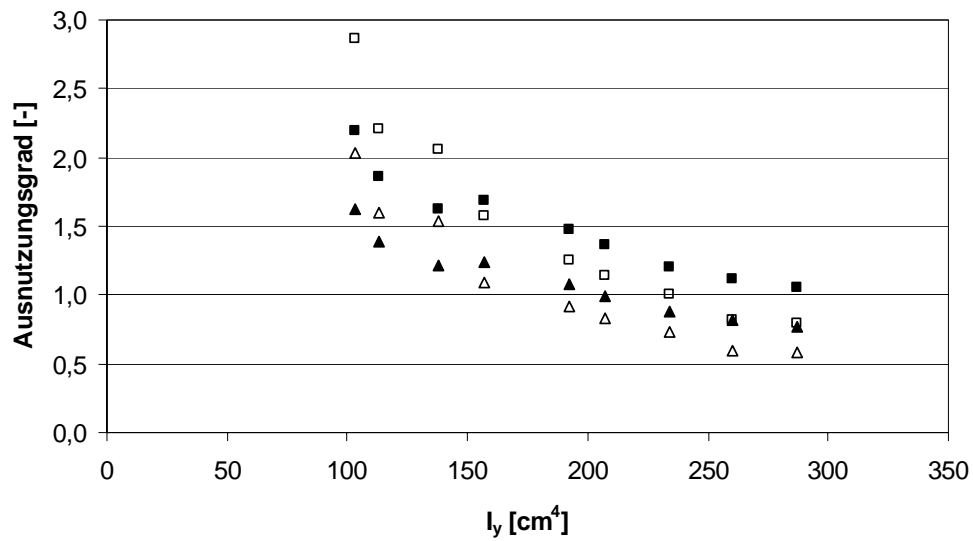
□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. B.3 Biegung und Normalkraft bei Durchlaufträger mit 2 m Pfostenabstand



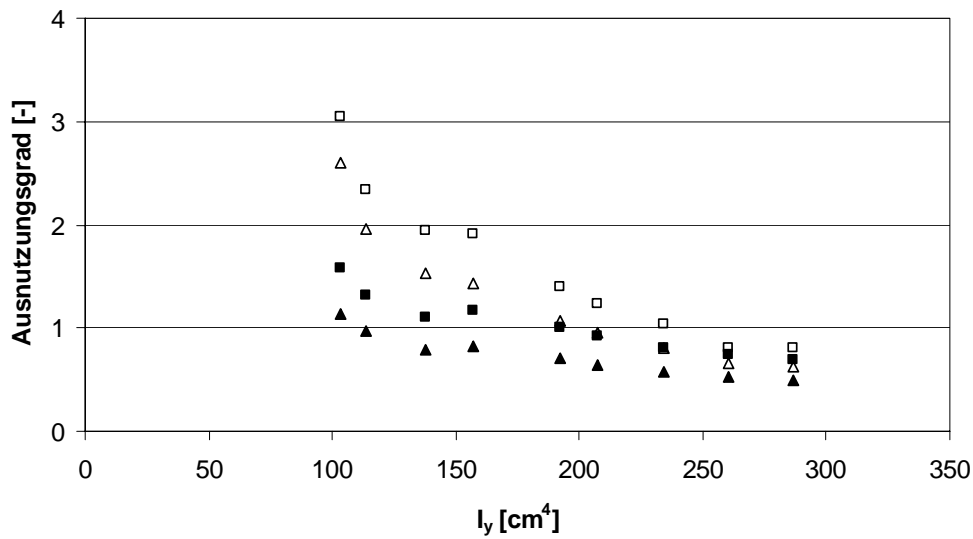
□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. B.4: Biegung und Normalkraft bei Gerberträger mit 2 m Pfostenabstand



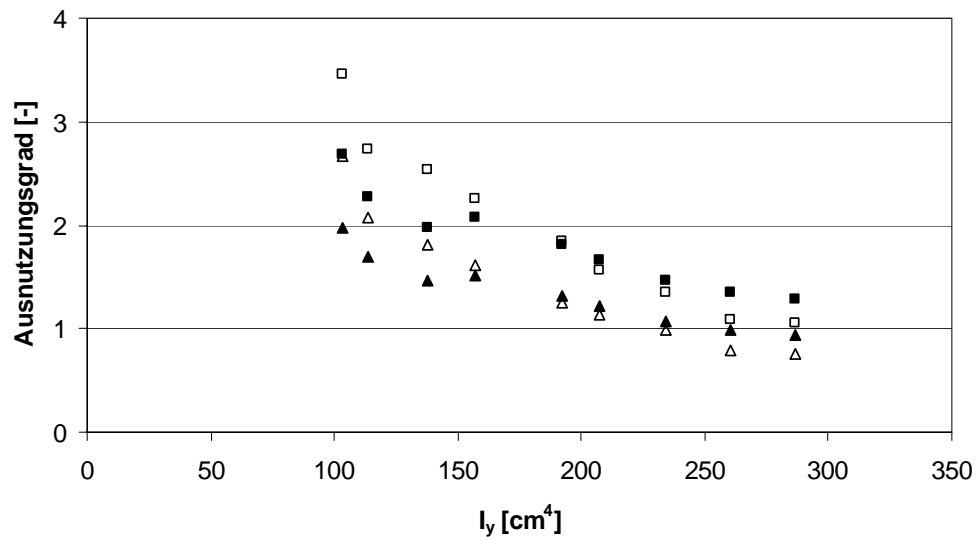
□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. B.5: Knicken bei Durchlaufträger mit 1,6 m Pfostenabstand



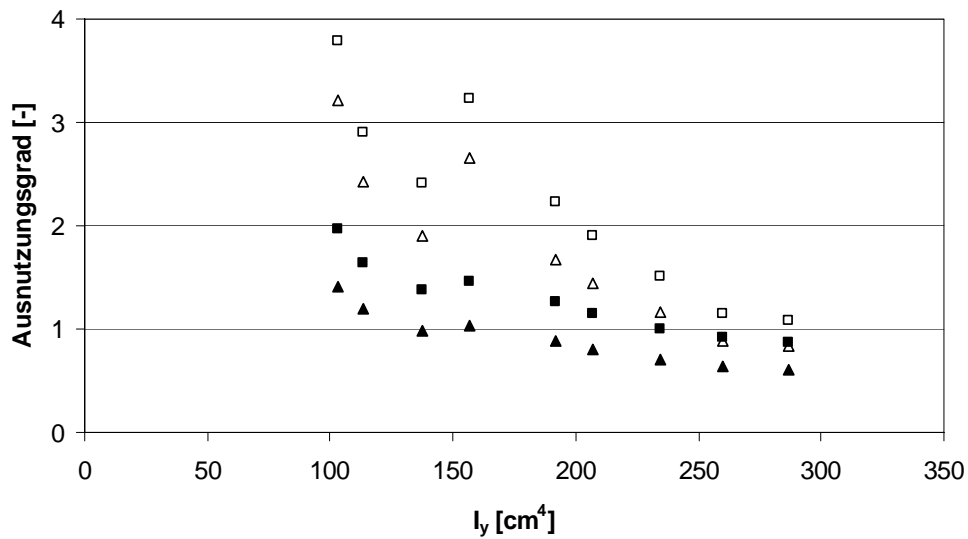
□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. B.6: Knicken bei Gerberträger mit 1,6 m Pfostenabstand



□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. B.7: Knicken bei Durchlaufträger mit 2 m Pfostenabstand



□ AW 6060 T66 DIN 4113 ■ AW 6060 T66 EC 9 △ AW 6082 T6 DIN 4113 ▲ AW 6082 T6 EC 9

Abb. B.8: Knicken bei Gerberträger mit 2 m Pfostenabstand

B.2 Masseverteilung der Fassaden 1 bis 6

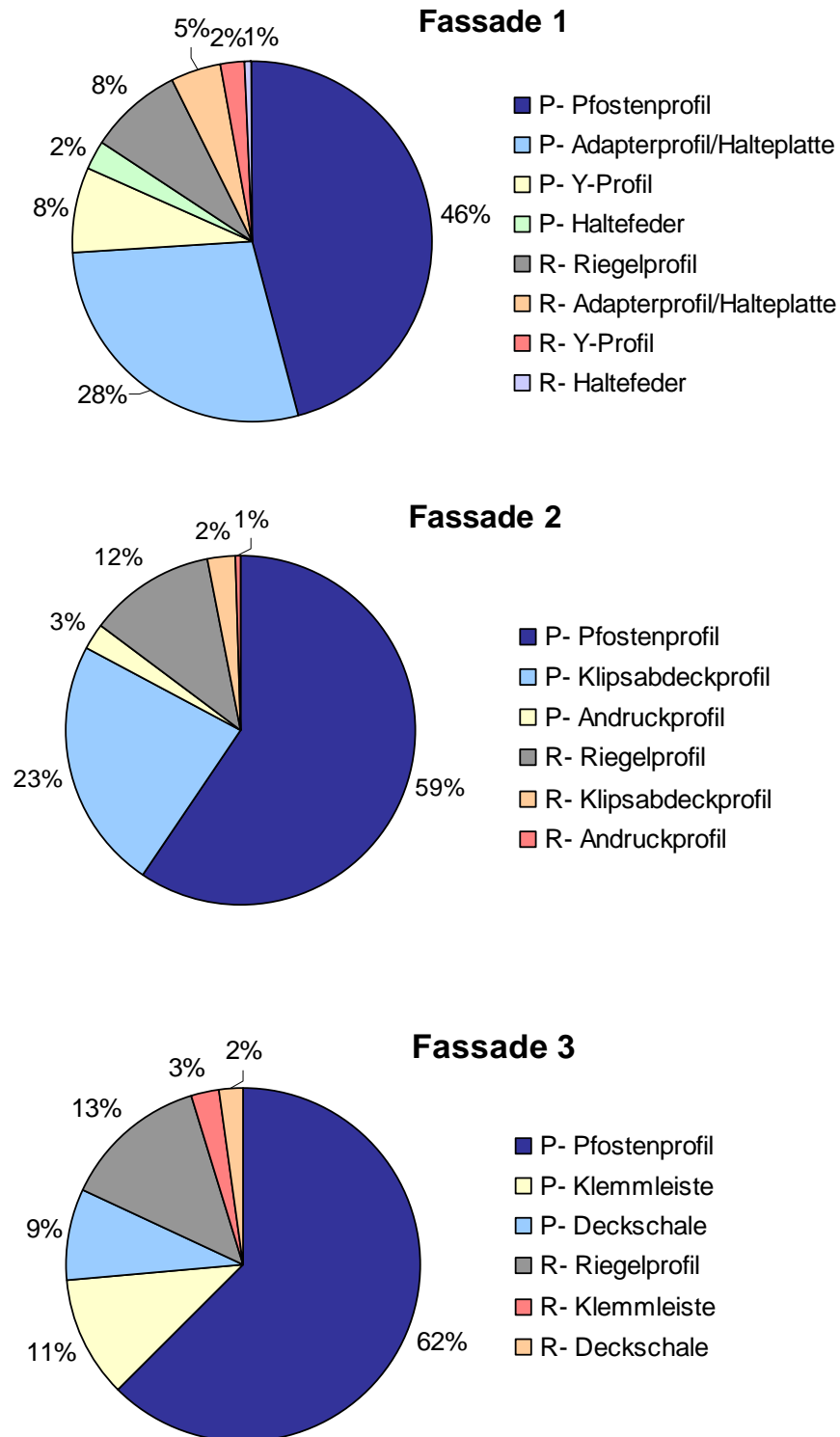


Abb. B.9: Massenverteilung der Pfosten-Riegelkonstruktionen 1-3 mit 1 m Pfostenabstand und Durchlaufträgerwirkung

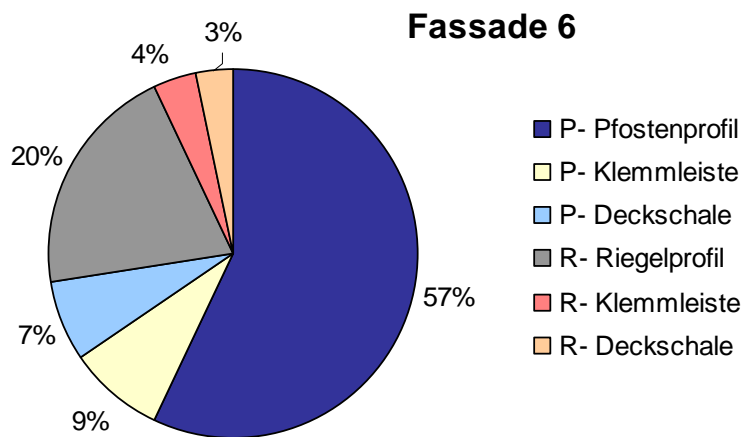
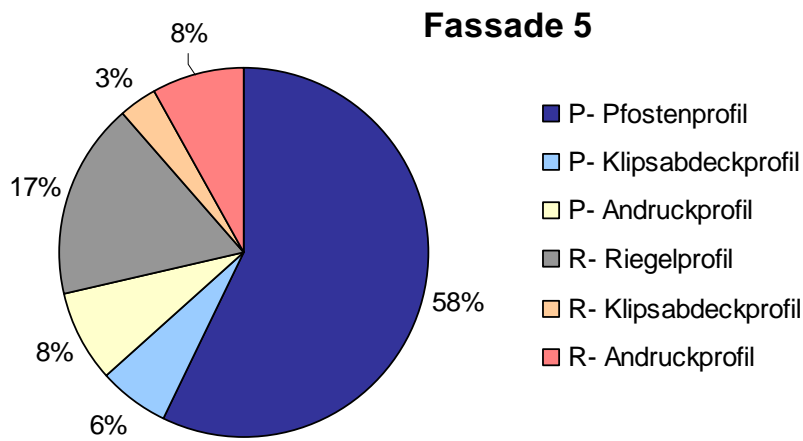
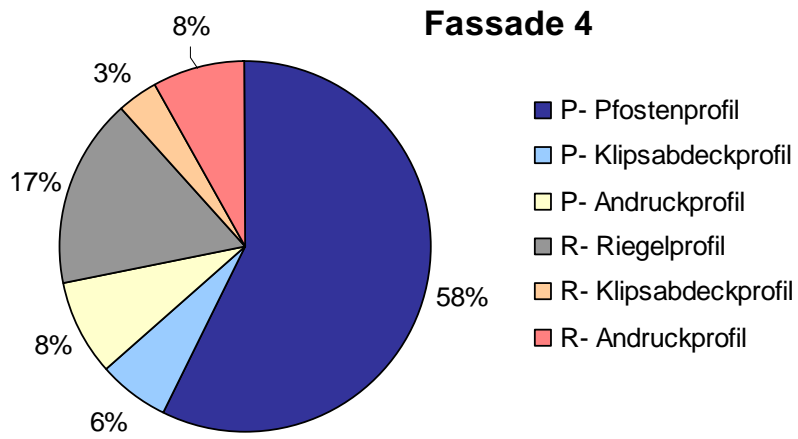


Abb. B.10: Massenverteilung der Pfosten-Riegelkonstruktionen 4-6 mit 2 m Pfostenabstand und Gerberträgerwirkung

B.3 Wirkungsabschätzung und Bewertung der Fassadensysteme

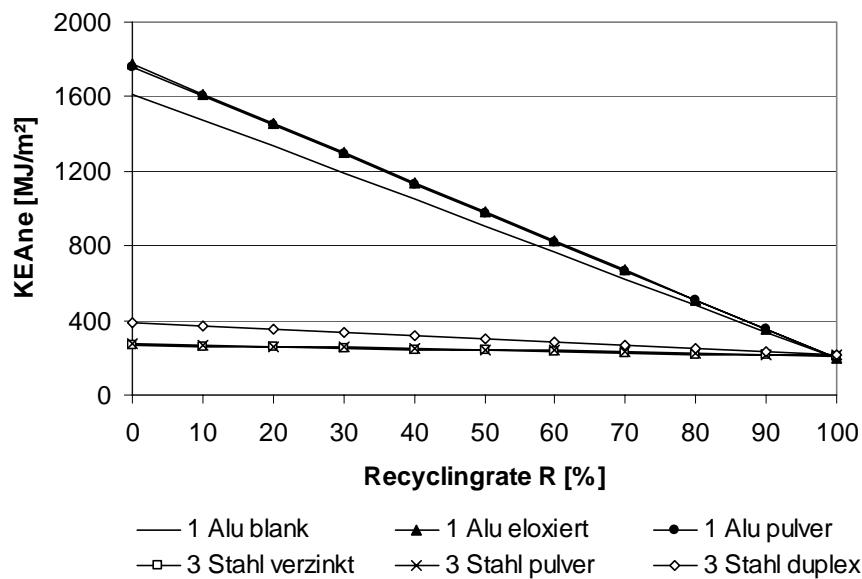


Abb. B.11: Vergleich des KEA_{ne} von Fassade 1 und 3 inklusive Nutzungsphase in Abhängigkeit der Recyclingrate

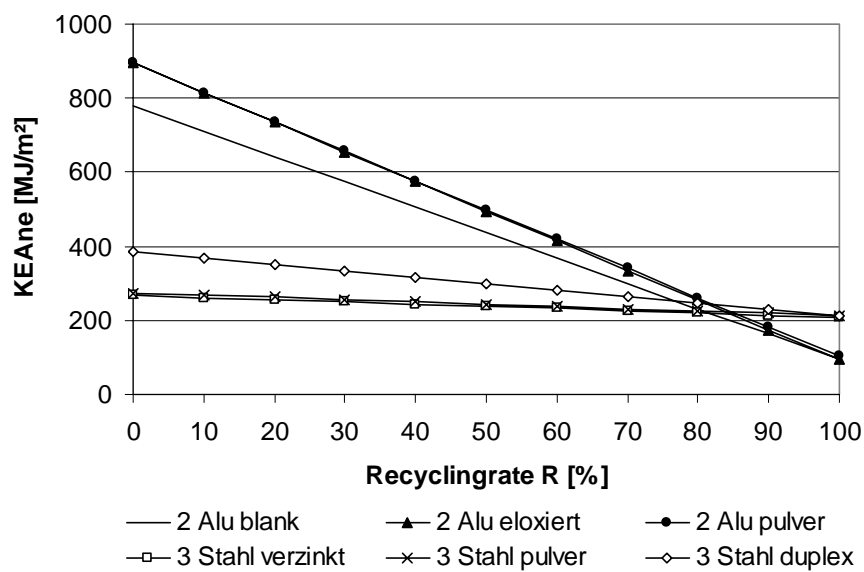


Abb. B.12: Vergleich des KEA_{ne} von Fassade 2 und 3 inklusive Nutzungsphase in Abhängigkeit der Recyclingrate

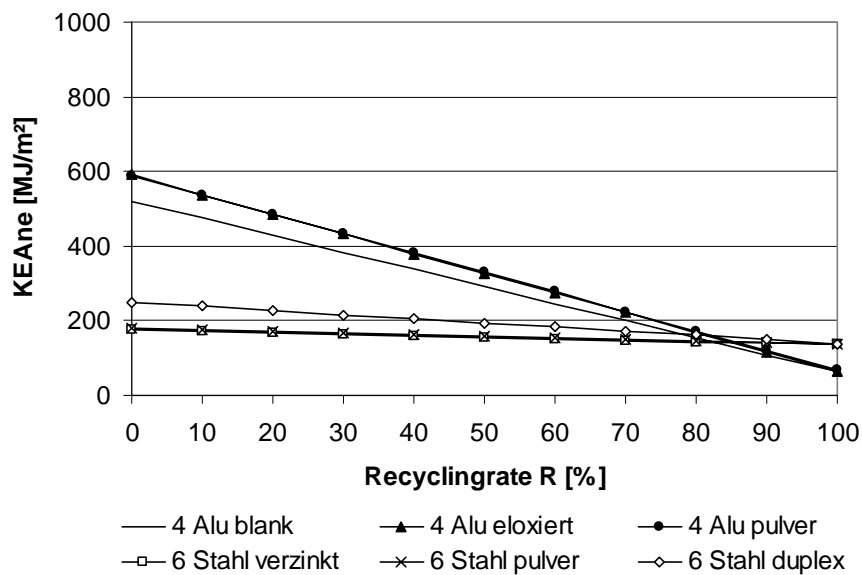


Abb. B.13: Vergleich des KEA_{ne} von Fassade 4 und 6 inklusive Nutzungsphase in Abhängigkeit der Recyclingrate

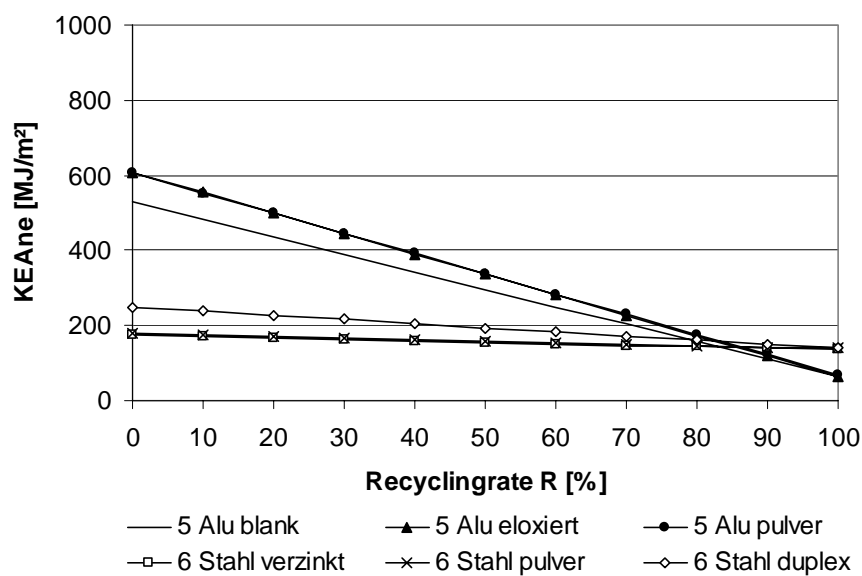


Abb. B.14: Vergleich des KEA_{ne} von Fassade 5 und 6 inklusive Nutzungsphase in Abhängigkeit der Recyclingrate

