

## Aspekte des Einsatzes von Aluminium bei den Verkehrsträgern

VON HEINZ LESMEISTER, NEUSS

Im Jahre 1979 wurden in Düsseldorf, erstmals in Europa, Raritäten aus der berühmten Sammlung HARRAH'S AUTOMOBILE COLLECTION, USA, ausgestellt, darunter der teuerste, seltenste, schönste Wagen der Welt und andere sagenhafte Automobile von Königen, Milliardären aus den 30er Jahren.

Unter den Ausstellungsstücken befand sich ein Fahrzeug, das folgende Daten kennzeichnete: Motorform: Reihen-Achtzylinder, Hubraum: 3257 ccm, Leistung: 200 PS, Höchstgeschwindigkeit: 217 km/h, Preis: US \$ 10.275,-, Baujahr: 1937. Das Auto war, so der Prospekt, natürlich nur mit dem Besten vom Besten ausgestattet: das Armaturenbrett aus edlem Holz, die Sitze aus feinstem Naturleder, die Karosserie aus Aluminium. Bei dem Auto, von dem hier die Rede ist, handelt es sich um einen Bugatti Atalante Coupe, Typ 57 SC.

Berühmte Beispiele für erste größere Serienanwendungen von Aluminium-Karosserieblechen sind der Dyna Panhard in Frankreich und der Mercedes 300 SL in den 50er Jahren.

### I. Entwicklung und Bedeutung des Aluminiums

Zu dieser Zeit blickte das Aluminium auf eine noch recht kurze Vergangenheit zurück, was industrielle Produktion und Verbrauch angeht. Um 1830 war *Oerstedt* die Herstellung des reinen Metalls Aluminium gelungen, indem er Aluminiumchlorid mit Kaliumamalgam behandelte. *Wöhler* verbesserte dieses Verfahren, indem er Kalium zur Reduktion einsetzte. Mit der Erfindung des Dynamos 40 Jahre später wurde die Voraussetzung für die Durchführung technischer Elektrolysen geschaffen. Ende der 80er Jahre des 19. Jahrhunderts entwickelten unabhängig voneinander *Heroult* in Frankreich und *Hall* in den USA das Grundprinzip der heutigen technischen Aluminiumoxidelektrolyse. Etwa gleichzeitig entwickelte *Bayer* in Österreich ein Verfahren zur Gewinnung des Aluminiumoxides aus Bauxit. Kurze Zeit darauf wurde in der Schweiz die erste Anlage in Europa zur elektrolytischen Gewinnung von Aluminium in Betrieb genommen.

Mit Beginn dieses Jahrhunderts setzte dann eine rasante Entwicklung von Produktion und Verbrauch dieses Metalls ein.

Wichtigste Erzeugerländer sind heute die USA, UdSSR, Kanada, Bundesrepublik Deutschland und Norwegen. Neue Kapazitäten werden nur an Standorten geschaffen, an denen billige elektrische Energie zur Verfügung steht. Aufgrund entsprechender Bauxitvorräte sowie des Angebots billiger Energie werden die größten Zuwachsraten bei der Hüttenaluminiumerzeugung in Ländern der südlichen Hemisphäre (Australien u. a.) erwartet. Unter den verwendeten Metallen nimmt Aluminium bereits heute nach Stahl den zweiten

#### *Anschrift des Verfassers:*

Heinz Lesmeister  
Rheinfelder Straße 7  
4040 Neuss

Tabelle 1: Anteil verschiedener Wirtschaftsräume an der Hüttenaluminiumproduktion der Welt in %

	1920	1940	1960	1970	1980
Europa ohne RGW-Länder davon Deutsches Reich bzw. BR Deutschland	41,3 9,4	50,1 26,1	19,1 3,7	19,6 3,0	23,4 4,5
Nordamerika davon USA	58,7 49,0	36,5 23,9	55,6 40,4	44,3 35,0	35,6 29,0
sonstige westl. Welt	—	4,5	5,2	14,3	20,5
gesamt westl. Welt	100,0	91,1	79,9	78,2	79,5
östl. Welt davon UdSSR	— —	8,9 7,2	20,1 15,5	21,8 16,5	20,5 15,1
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Quelle: Aluminium Taschenbuch, 14. Auflage, S. 2.

Rang ein. Bemerkenswert ist bei dieser Entwicklung insbesondere, daß Aluminium seine Bedeutung nicht durch die Verwendung in neuen Anwendungsbereichen erzielt hat, sondern fast ausschließlich durch die Substitution anderer Metalle, die in diesen Anwendungsbereichen bis dahin dominierten. Hier drängt sich zwangsläufig die Frage nach den Gründen auf.

Worin liegt die Attraktivität dieses Werkstoffes, die zu dieser Entwicklung geführt hat? Ein Blick auf die wichtigsten Eigenschaften des Metalls trägt wesentlich dazu bei, eine Antwort zu finden. Das Aluminium besitzt zahlreiche vorteilhafte Eigenschaften, die es gegenüber alternativen, konkurrierenden Werkstoffen auszeichnet. Hierzu sind besonders folgende zu rechnen:

- geringe Dichte: Mit 2,7 beträgt das spezifische Gewicht von Aluminium etwa ein Drittel desjenigen von Stahl. Der Vorteil gegenüber z. B. Kupfer und Blei ist noch größer. Aus der Gewichts Differenz bieten sich die Verwendungsmöglichkeiten u. a. bei beweglichen Konstruktionen wie Luft-, Wasser- oder Bodenfahrzeugen und führen dadurch unter sonst unveränderten Voraussetzungen zu Energieersparnis. Auf die Bedeutung dieser Komponente wird weiter unten noch ausführlich eingegangen;
- gute chemische Witterungs- und Seewasserbeständigkeit: Reinaluminium bzw. spezielle, kupferfreie Legierungen zeichnen sich durch besondere Korrosionsbeständigkeit aus. Das zeigt ihr überzeugender Einsatz z. B. im Bausektor oder in der Seeschifffahrt. Auch im Fahrzeugbau ist das günstige Korrosionsverhalten von hervorragender Bedeutung, sowohl was die Nutzungsdauer als auch das teilweise psychologisch bedingt wichtige Aussehen angeht. Zusätzliche Oberflächenbehandlungen erzielen noch höhere Wirkungsgrade;
- günstige konstruktive Merkmale: Aluminium besitzt eine günstige Relation von Festigkeit zu spezifischem Gewicht und eine gute Umformbarkeit. Damit sind die Voraussetzungen für einen vielseitigen Einsatz u. a. im Fahrzeugbau gegeben;

– hohe elektrische und Wärmeleitfähigkeit: Während sich die elektrische Leitfähigkeit u. a. im Einsatz von Aluminium bei Kabeln und Freileitungsseilen dokumentiert, wirkt sich die hohe Wärmeleitfähigkeit z. B. vorteilhaft beim Bau von Kolben, Zylindern und Wärmeaustauschern aus.

Neben diesen vorteilhaften Eigenschaften, aus denen sich u. a. die Bedeutung dieses Werkstoffes für den vielfältigen Einsatz im Verkehrsbereich ableiten läßt, soll zur Vervollständigung noch die gute Eignung für Verbindungsarbeiten mit anderen Materialien und die Unbrennbarkeit erwähnt werden.

Die qualitative Komponente alternativer Einsatzwerkstoffe als entscheidendes Kriterium zu wählen, kann nur dann zulässig sein, wenn sie so dominant ist, daß sie die technisch einzig vertretbare Lösung bietet. In der Regel jedoch muß auch die preisliche Komponente berücksichtigt werden bei der Entscheidungsfindung für das Substitutionsangebot. Der Werkstoff Aluminium ist teilweise erheblich teurer als die konkurrierenden Werkstoffe.

Ebenso wenig wie die Qualität kann der Preis als ausschlaggebendes Kriterium allein angesehen werden, sondern vielmehr das Produkt aus beiden Komponenten. Es muß folglich versucht werden, qualitative Merkmale zu quantifizieren. Das gelingt zwangsläufig nicht immer. Teilweise sind modische Erscheinungsformen dominante Entscheidungskriterien. Häufig jedoch ist die Entscheidung für einen Werkstoff (unter Einbeziehung der in Frage kommenden Komponenten) bei ökonomischer Betrachtungsweise eindeutig. So hat der Werkstoff Aluminium in den verschiedensten Verbrauchergruppen eine beachtliche Bedeutung erlangt. Bedingt durch den qualitativen Vorsprung sowie die preisliche Stabilität hat der Werkstoff über Jahrzehnte hinweg im Substitutionswettbewerb seine Position verbessert. Seit 1950 entspricht die Wachstumsrate des Aluminiumverbrauchs etwa dem 1,7fachen der Wachstumsrate des BSP<sup>1)</sup>.

Der Bereich Verkehr ist in vielen Ländern unangefochten die bedeutendste Verbrauchergruppe – so in der Bundesrepublik Deutschland – oder ist zumindest neben anderen ein bedeutender Bereich (vgl. Tabelle 2).

In der Bundesrepublik Deutschland – ähnlich in anderen Ländern (abhängig von der jeweils relativen Bedeutung dieser Industriezweige) – sind weitere wichtige Anwendungsbereiche das Bauwesen, die Verpackung, der Maschinenbau und die Elektrotechnik.

Tabelle 2: Anteil des Verkehrs am Aluminium-Endverbrauch in sechs Industrieländern (Angaben in 1000 t / %)

	Bundesrepublik Deutschland		Frankreich		Großbritannien		Italien		Japan		USA	
		%		%		%		%		%		%
1960	97,7	25 %	67,3	28 %	111,4	28 %	57,0	40 %	57,6	18 %	407,8	19 %
1970	191,6	23 %	134,6	28 %	134,0	27 %	140,0	33 %	256,7	22 %	734,3	16 %
1980	282,3	21 %	180,3	23 %	72,5	14 %	207,4	27 %	582,0	25 %	1014,7	16 %

Quelle: Aluminium Taschenbuch, 14. Auflage, S. 5.

1) Vgl. Aluminium-Taschenbuch, 14. Auflage, S. 5.

## II. Anwendungsbereiche im Verkehrswesen

Aluminium hat seine heutige Bedeutung im Verkehrsbereich durch ein maßgeschneidertes Angebot an Werkstofflegierungen erlangt, wobei unbestritten ist, daß in zahlreichen Anwendungsgebieten erst die Qualitäts-/Nutzenkomponente (z. B. Treibstoffersparnis bzw. Nutzlastgewinn aufgrund von Gewichtsvorteilen oder höhere Nutzungsdauer wegen größerer Korrosionsbeständigkeit) zu einem „gesamtwirtschaftlich eindeutigen Ergebnis“ geführt hat.

Von den Ursprüngen des Werkstoffes Aluminium bis zur heutigen Bedeutung zeigt sich jedoch eine konsequente Entwicklung. Praktisch seit Beginn der industriellen Herstellung von Aluminium boten qualitative Vorteile des Aluminiums Anreiz zum Einsatz im Verkehrsbereich. Bereits Anfang dieses Jahrhunderts wurden Motor- und Getriebegehäuseteile aus Aluminiumgußstücken gefertigt. Die Ursprünge des Aluminiumkolbens, der heute weltweit eine dominierende Stellung hat, reichen bis in die 20er Jahre zurück. Ebenfalls in diese Zeit fiel der Beginn des Einsatzes von Aluminium bei Wagenkästen für Schienenfahrzeuge (U-Bahnen in London und Berlin) sowie Karosserieteilen für Autobusse. So wurden in der Schweiz, neben den skandinavischen Ländern eines der Pionierländer in der Anwendung von Aluminium für Autobusse, die Aufbauten für die Busse der PTT bereits Ende der 20er Jahre aus Aluminium hergestellt. Diese Busse wurden vorrangig auf den Gebirgsstrecken eingesetzt. Auch im Schiffbau begann der industrielle Einsatz des Werkstoffes bei Aufbauten in den 30er Jahren.

Im Flugzeugbau blickte man zu diesem Zeitpunkt schon auf zwanzigjährige Erfahrung zurück. Die F 13 von Junker ging 1919 als erstes Ganzaluminium-Verkehrsflugzeug in Betrieb<sup>2)</sup>. Es gibt heute keinen Verkehrsträger, bei dem nicht Aluminium eine mehr oder weniger bedeutende Rolle spielt. Die unangefochtene Domäne liegt sicherlich im Automobilbau. Der Einsatz von Aluminium ist durch die ständige qualitätsmäßige Herausforderung an den substitutiven Werkstoff u. a. im Verkehrsbereich zu seiner heutigen Bedeutung gelangt. Maßgebliche Bedeutung haben dabei der Gewichtsvorteil und die damit verbundene Energiekostensparnis des Anwenders. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang an die Auswirkungen des ersten „Erdölpreisschocks“ in der ersten Hälfte der 70er Jahre zu erinnern. Im folgenden wird die Entwicklung in den einzelnen Einsatzbereichen dargestellt.

### 1. Aluminium im Automobilbau

#### Personenfahrzeugbau

Um es vorwegzunehmen, PKW mit einer Ganzaluminiumkarosserie wie die erwähnten Bugatti, Dyna Panhard oder Mercedes 300 Coupe sind bis heute die Ausnahme geblieben. Ein aktuelles Beispiel aus der Serienproduktion kann nicht angeführt werden. Heute liegt der Aluminium-Anteil an der Leermasse im Durchschnitt zwischen 2 % und 6 %. Folgende Mittelwerte können zur Zeit genannt werden: Europa 30 – 40 kg, Japan 30 kg, USA 60 kg<sup>3)</sup>. Dabei ist der Anteil bei Fahrzeugen der gehobenen Preisklasse wesentlich höher als bei den übrigen PKW. Der Porsche 928 hat mit ca. 270 kg (19 % des Leergewichts) den

2) Vgl. Aluminium-Taschenbuch, 14. Auflage, S. 871.

3) Vgl. Aluminium-Taschenbuch, 14. Auflage, S. 872.

mit weitem Abstand höchsten Aluminium-Anteil der Serienmodelle. Der Anteil von Eisenwerkstoffen dagegen macht durchschnittlich immer noch Dreiviertel des Gesamtgewichts aus. Gußteile spielen die dominierende Rolle bei dem im PKW verwendeten Aluminium. Teile aus Knetlegierungen haben dagegen in Europa – anders als in den USA – relativ geringe Bedeutung. In diesem Bereich liegt jedoch noch ein beachtliches Entwicklungspotential, das gute Chancen hat, ausgeschöpft zu werden, wenn auch in kleineren Schritten. Viel hängt von den relevanten Einflußfaktoren aus der Umwelt des KFZ ab. Die an den Werkstoff gestellten Anforderungen sind äußerst vielfältig und hoch. Gefordert werden Korrosionsbeständigkeit (Karosserieteile, Kühler), Festigkeit / Steifigkeit (Sicherheitsteile, Karosserieteile), dekorative Oberfläche (Stoßfänger, Zierteile), Wärmeleitfähigkeit (Kolben, Kühler).

Zum Einsatz kommen dabei die den jeweiligen Anforderungen an das Bauteil bestens entsprechenden Aluminium-Legierungen. Als hauptsächlich verwendete Legierungselemente sind Si, Mg, Mn, Cu, Zn in unterschiedlichen Kombinationen und Anteilen zu nennen. Im folgenden sollen die wesentlichen Einsatzbereiche des Aluminium im PKW kurz erläutert werden.

Vom Aluminium-Motor spricht man bei Motoren mit Kurbelgehäuse, Zylinder und Zylinderkopf aus Aluminium. Die Verbreitung des Aluminium-Motors ist in Europa noch wesentlich größer als in den USA. Die weitestgehende Verbreitung von Aluminium-Motoren innerhalb Europas trifft man in Frankreich und Italien an (ca. 40%), in Deutschland dagegen beläuft sich der Anteil auf nur ca. 10%, in Europa ca. 30%. Der Verbreitungsgrad bei Zylinderköpfen liegt erheblich höher. Auch hier führen Frankreich und Italien (ca. 100%). Die Vergleichszahl beträgt für Deutschland 50%, für Europa 70%<sup>4)</sup>. Bei Kolben ist die Verwendung von Aluminium unbestritten. Mirentscheidend ist bei diesem Teil die hohe Wärmeleitfähigkeit, wodurch die durch die Verbrennung entstehenden Temperaturen auf ein akzeptables Maß reduziert werden. Als weitere Baugruppen, bei denen Aluminium vor allem aus Gründen der Gewichtsersparnis zunehmend den Vorzug vor anderen Werkstoffen erhält oder in Verbindung mit diesen eingesetzt wird (z. B. Kunststoff) sind Wärmeaustauscher (Wasser-, Ölkühler) und verschiedene Gehäuse (Ver-gaser, Luftfilter).

Aluminiumräder werden angeboten als geschmiedetes Rad (Daimler Benz), gegossenes Rad (Porsche) oder aus Blechformteilen geschweißtes Rad. Neben der Gewichtsersparnis, die zwischen 40% und 50% liegt, wird besonders dem Aussehen Beachtung geschenkt. In der Kombination von Styling und Kosten schneidet das gegossene Rad am günstigsten ab und hat daher die größte Bedeutung. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Wärmeleitfähigkeit zugunsten niedrigerer Temperaturen und damit verbunden höherer Nutzungsdauer bei Bremscheiben und Bremsflüssigkeit<sup>5)</sup>.

Weitere Anwendungsbereiche sind: Rad- bzw. Achsaufhängung, Scheibenbremsen (Bremskolben), Lenkung (Lenkgetriebe, Gelenkwelle, Lenkrad), rotierende Bauteile im Antrieb (Antriebswelle). Hierauf wird nicht weiter eingegangen; mit der Aufzählung wird jedoch das Bild der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten abgerundet.

4) Vgl. Koewius, A., Fortschritte im Automobil-Leichtbau mit Aluminium, in: Aluminium, 55. Jg. (1979), Heft 12, S. 815.

5) Vgl. Koewius, A., Aluminium, 2. Internationales Symposium Aluminium und Automobil, Sonderdruck aus Metall, 35. Jg. (1981), S. 10.

Vom Ausgangsgewicht gehört die Karosserie zu den attraktivsten Ansatzpunkten für die Substitution von Stahl durch Aluminium. Unter dem Aspekt der Gewichtsersparnis eröffnet sich in diesem Bereich eine der wirksamsten Möglichkeiten. Sieht man einmal von den genannten Ausnahmen ab, haben technische und Kostengründe zunächst den Substitutionsprozeß erheblich erschwert. Das Umformverhalten von Stahl in Tiefziehqualität und die Kosten waren erheblich günstiger. Als Ergebnis intensiver Forschung und Entwicklung stehen inzwischen Aluminium-Legierungen und Umformwerkzeuge/-techniken zur Verfügung, die die Ausgangsposition für den Einsatz von Aluminium erheblich verbessert haben. Um die Formsteifigkeit sicherzustellen, beträgt die Aluminium-Blechdicke heute bis zum 1,4-fachen gegenüber Stahl. Hier liegt jedoch noch ein erhebliches Potential zur Verbesserung. Beispiele für Aluminium-Verwendung im Karosseriebereich findet man heute fast ausschließlich bei PKW der höheren Preisklasse: Tür-/Kotflügel (Porsche 928), Motorhaube (Porsche 928, Mercedes S-Klasse), Kofferraumdeckel (Mercedes S-Klasse).

Weniger problematisch wegen der geringen Anforderung an die Oberfläche sind nicht sichtbare Innenteile wie Motorhauben-/Kofferraumdeckelversteifungen, Instrumententafelversteifung, Fondsitzkissenrahmen. Bei allen genannten Beispielen wird eine Gewichtsersparnis von 50% und mehr erzielt. In Europa bisher weitaus weniger bedeutsam als in den USA ist die Verwendung von Aluminium bei Stoßfängern. In den USA war bereits 1977 jedes Dritte produzierte Auto mit Stoßfängern aus Aluminium ausgerüstet, in Europa findet man dagegen nur vereinzelt Beispiele. Grund sind gesetzliche Bestimmungen in den USA.

Automobil- und Aluminiumindustrie haben die Herausforderungen, die sich aus dem heutigen bzw. erwarteten Umfeld an das Automobil ergeben, angenommen. Im Rahmen eines vom BMFT geförderten Projektes „Auto 2000“<sup>6)</sup> haben die beteiligten Firmen und Institutionen Daimler Benz, VW, Audi und eine Hochschularbeitsgemeinschaft ihre Konzeption von einem Modellauto vorgestellt. Der Verwendung von Aluminium kommt dabei eine bedeutende Rolle zu. Sie beschränkt sich jedoch im wesentlichen auf die heute schon bekannten Anwendungsgebiete, wobei ein verstärkter Einsatz im Karosseriebereich festzustellen ist. Bemerkenswert ist allerdings eine sich auch in anderen Verkehrsbe-reichen (z. B. Flugzeug) bereits abzeichnende Konkurrenz zum Kunststoff.

Unabhängig von diesem Forschungsprojekt testet Porsche auf der Basis des 928 seit 1982 eine Ganzaluminiumkarosserie. Die Gewichtsersparnis erreicht bis zu 50% gegenüber Stahl bei gleichem Energieaufnahmevermögen bei Unfallaufprall. So beträgt das Gewicht der Aluminium-Tür bei dem Porsche 928 9,5 kg gegenüber 19 kg als Stahlversion. Die Umformigenschaften der verwendeten Legierung ALMG 0.4 Si 1,2 erlauben bis zu 80% den Einsatz auch der für Stahl verwendeten Umformwerkzeuge<sup>7)</sup>.

Als weiteres Beispiel, das u. a. auch die Konkurrenz von Kunststoff zu Aluminium verdeutlicht, sei das Forschungsauto ECV-3 (Energy Conservation vehicle) erwähnt<sup>8)</sup>. Die tragende Karosseriestruktur besteht aus Aluminium, nichttragende Anbauteile aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Räder und Motor sind aus Aluminium. Das Gewicht der Rohkarosserie beträgt 138 kg und liegt damit um 125 kg unter dem einer vergleichbaren

6) Der exakte Titel lautet: Demonstration automobiltechnischer Forschungsergebnisse in integrierter Gesamtkonzeption von PKW-Versuchsmodellen.

7) Vgl. Aluminium intern, Nr. 3 (1983), S. 1.

8) Vgl. Aluminium intern, Nr. 3 (1983), S. 5.

Ganzstahlkarosserie. Der cw-Wert beträgt 0,25. Der Kraftstoffverbrauch pro 100 km wurde wie folgt ermittelt: Stadtverkehr 5,8 l, 90 km/h 3,5 l, 120 km/h 4,5 l.

An den erwähnten Beispielen zeigt sich, daß im PKW noch ein beachtliches Entwicklungspotential für den Werkstoff Aluminium steckt, jedoch die Aufmerksamkeit nicht nur auf die Substitutionsmöglichkeit gegenüber Stahl, sondern auch auf die zunehmende Konkurrenz zum Kunststoff zu richten ist.

### Nutzfahrzeugbau

Gewichtersparnis bedeutet Nutzlastgewinn und Energieersparnis. Mit dieser kurzen Formel ist die Bedeutung von Aluminium auch in diesem Anwendungsbereich treffend charakterisiert. Auf dieser Grundlage baut ebenfalls entscheidend die wirtschaftliche Rechtfertigung für den Einsatz dieses Werkstoffes auf<sup>9)</sup>.

Besonders in Nordamerika – anders als zur Zeit noch in Europa – sind die Sachzwänge, die die Anwendung von Aluminium im Nutzfahrzeugbau entscheidend beeinflussen, von erheblicher Bedeutung. Die Beachtung gesetzgeberischer Auflagen bezüglich Schadstoffemissionen, Sicherheit, Lärmbekämpfung führt bei Fahrzeugkonstruktionen zwangsläufig zu höherem Gewicht und damit zu höheren Kosten. Andererseits zwingt der zunehmende Wettbewerbsdruck die Transportunternehmen, alle Möglichkeiten zur Kostenreduzierung auszuschöpfen. Diesem offensichtlichen Widerspruch kann noch am ehesten durch weitere Forcierung der Leichtbauweise begegnet werden.

Neben den Teilen, deren Einsatzmöglichkeiten im PKW bereits besprochen worden sind, ist die Leichtbauweise im Bereich der Aufbauten von hervorragender Bedeutung. Insbesondere bei Schüttgut-, Tank- und Silofahrzeugen ist die Voraussetzung gegeben, den Nutzlastgewinn weitestgehend auszuschöpfen. Welche Dimensionen sich gerade in diesem Bereich eröffnen, zeigt das Beispiel des MAN-Pilotfahrzeuges 16.280 FLS, das allein bei dem Aufbau aus Aluminium gegenüber der Stahlversion eine Gewichtersparnis von 2.200 kg erzielt<sup>10)</sup>. Dagegen kommt der Nutzlastgewinneffekt weniger deutlich zum Tragen bei Transportgütern mit einer ungünstigeren Gewicht-Volumen-Relation oder bei Stückgütern. Aus diesem Grund sind auch Ganzaluminiumpritschenaufbauten recht selten anzutreffen. Beachtliche Bedeutung haben jedoch inzwischen Aluminium-Bordwände, insbesondere bei Speditionsfahrzeugen, erlangt, da die Gewichtersparnis zu sehr geschätzten Vorteilen bei manuellem Handling führt. Auch bei dreiseitigen Kippmuldenfahrzeugen wird die Ganzaluminiumkonstruktion selten angetroffen. Dagegen sind wie bei den Pritschenaufbauten die Bordwände aus Aluminium. Meistens handelt es sich bei diesen um Blech-Profil-Konstruktionen bzw. um Konstruktionen aus speziellen „maßgeschneiderten“ Strangpreßprofilen.

Mehr noch als bei Pritschenaufbauten wirkt sich bei Kofferaufbauten, die als fester oder Wechsellaufbau eingesetzt werden, die Gewichtersparnis positiv aus. Diese Aufbauten werden in der Regel von darauf spezialisierten Herstellern angeboten. Die Fertigung er-

folgt entweder aus Profilen, Blechen oder Bändern nach eigenen Konstruktionsprinzipien, oder die Aufbauten werden aus vorgefertigten Teilen wie Seitenwände, Stirnwände, Türen, Dächer zusammengesetzt. Insbesondere auch bei Spezialaufbauten, z. B. für Kühltransporte kann man häufig die Verwendung von Sandwich-Bauelementen antreffen. In zunehmendem Maße werden Kofferaufbauten mit hydraulisch zu betätigenden, rückseitigen Ladebordwänden ausgerüstet. Typische Beispiele sind wiederum Speditionsfahrzeuge sowie auch (Werks-)Fahrzeuge, die für die Belieferung von Supermärkten eingesetzt werden.

Nicht nur bei den Lastkraftwagen, sondern auch bei anderen Fahrzeugarten hat die Anwendung von Aluminium aufgrund der Vorzüge des Werkstoffes zunehmende Bedeutung erlangt. Neben dem Home-Mobil/Caravan ist vor allem im Omnibusbau auf die schon traditionelle Anwendung von Aluminium hinzuweisen. Besonders im europäischen Ausland (Skandinavien, Großbritannien) sind Ganzaluminiumbusse schon lange im Einsatz. Bekanntes Beispiel sind die Doppeldeckerbusse in London.

Mehr noch als in Europa hat sich in Nordamerika aus den bereits erwähnten Gründen Aluminium im Nutzfahrzeugbau durchgesetzt. Typisches Beispiel sind Fahrerhäuser, die eine Gewichtersparnis von ca. 50% gegenüber der Stahlversion erzielen. Weiter wird neben einer Standardversion, in der viele Bauteile auch schon aus Aluminium sind, eine sogenannte „light weight option“ angeboten, die für viele Transportunternehmer eine echte Alternative darstellt. Die Beispiele aus Nordamerika sowie einzelne Prototypen in Europa zeigen das weite Spektrum auf, innerhalb dessen Aluminium verwendet werden kann. Die weitere Entwicklung wird bestimmt durch gesetzgeberische Maßnahmen, technologische Fortschritte bei der Fertigung und Verarbeitung sowie die Entwicklung der relevanten Kostenfaktoren.

## 2. Aluminium im Schienenfahrzeugbau

Seit den 30er Jahren hat man bei einzelnen Fahrzeugkonstruktionen schon Erfahrungen gesammelt (z. B. U-Bahn in Berlin). In den 60er Jahren zeichnete sich dann der Beginn einer verstärkten Substitution von Baustahl durch Aluminium in den verschiedensten Bereichen der Fahrzeugserienfertigung ab. Die heutige Bedeutung des Einsatzes von Aluminium ist im wesentlichen auf die fortgeschrittene Produktionstechnik in der Aluminium-Verarbeitung sowie die sich aus dem Einsatz des Werkstoffes ergebende Masseersparnis zurückzuführen. Diese Masseersparnis ist z. B. bei Aluminium-Gußgehäusen gegenüber Stahlgußgehäusen mit ca. 60 – 65% der Masse dieses Bauteiles besonders hoch. Die Gewichtersparnis liegt bei den Rohbauwagenkästen gegenüber Stahl bei 40 – 50%. Bezogen auf das Fahrzeuggewicht beläuft sich die Ersparnis auf 8 – 12%. Neben dieser primären Gewichtersparnis ergeben sich bei anderen Bauteilen durch deren geringere Beanspruchung weitere Einsparungsmöglichkeiten, die in der gleichen Höhe liegen, so daß im Personenfahrzeugbau eine Gesamtersparnis von ca. 20% realistisch ist<sup>11)</sup>. So betrug z. B. bei einem Zweiwagenzug der Berliner U-Bahn die Einsparung ca. 11 t; davon 6 t

9) Vgl. dazu das Kapitel „Wirtschaftlichkeitsberechnung“ weiter unten.

10) Vgl. Kellermann, P., Lapp, K., Sieg, U., Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Aluminium im LKW-Bau, in: Aluminium, 59. Jg. (1983), S. 879.

11) Vgl. Koewius, A., Aluminium für den Leichtbau von Schienenfahrzeugen, in: Aluminium, 51. Jg. (1975), S. 659.

bei dem Wagenkasten, 4 t bei den Drehgestellen (einschl. Motoren, Getriebe usw.), 1 t bei sonstigen Ausrüstungsgegenständen<sup>12)</sup>.

Für Güterfahrzeuge liegt die Vergleichszahl – abhängig vom Fahrzeugtyp – bei 10 – 35 %.

Der Vorteil der Gewichtersparnis wird auf unterschiedliche Weise ausgenutzt. Er bewirkt einmal eine Verringerung der Betriebskosten, und hier vor allem der Energie. Dieser Vorteil kommt vor allem im Personenfahrzeugbau zum Tragen. Andererseits ermöglicht die Gewichtsreduzierung im Güterwagenbau eine bessere Relation von Nutzlast zu Gesamtlast, d. h. bei gleicher Brutto-tkm-Leistung steigt die Netto-tkm-Leistung.

Die Eisenbahnverwaltungen stellen zahlreiche technische Anforderungen an Fahrzeugkonstruktionen. Die Aluminiumindustrie hat sich dieser Herausforderung gestellt durch fortschrittliche Entwicklungen in den Bereichen von Konstruktionslegierungen, Strangpreß- und Schweißtechniken. So gelang es mit der Großstrangpreßprofilbauweise der Fahrzeuglängen entsprechende Profile herzustellen, die bei der Fertigung zu Einsparungen führten, so daß die Gesamtkosten nicht mehr höher als bei vergleichbarer Stahlkonstruktion liegen<sup>13)</sup>. Die hier genannten Vorteile sollen im folgenden kurz an einigen Beispielen erläutert werden.

### Personenfahrzeuge

Im Personenfahrzeugverkehr kommen die Vorteile von Aluminium-Konstruktionen besonders zur Geltung. Hier besteht die Forderung nach hoher Geschwindigkeit bei kurzen Fahrstrecken und kleinen Halteabständen, wobei die Leichtbauweise zu einer beachtlichen Betriebskostensparnis durch Reduzierung der besonders in diesem Verkehr masseabhängigen Antriebsenergie führt. Als logische Folge findet man die häufigsten Anwendungsbereiche bei für den Stadtbahn- bzw. U-Bahn-Verkehr bestimmten Fahrzeugen. Als Beispiele sollen hier erwähnt werden die Köln-Bonner-Eisenbahnen sowie die U-Bahnen in München, Berlin, Paris, London, Tokyo und San Francisco. Für die einzelnen Teile des Wagenkastens werden Profile bzw. Bleche eingesetzt. Mitentscheidend für den wirtschaftlichen Einsatz ist – wie bereits erwähnt – die Entwicklung der Großstrangpreßprofilbauweise sowie eine gewisse Serienfertigung. Die Serienfertigung ist ebenfalls ein Wirtschaftlichkeitsfaktor bei Schmiedestücken, die man vor allem in Drehgestellen findet. Der Vorteil einer Gußkonstruktion liegt darin, daß die Anpassung der Wanddicken, der Anordnung, Zahl und Größe von Verstärkungen an die Beanspruchungsverhältnisse ohne überflüssigen Materialaufwand und ohne Verbindungsstellen gelingt<sup>14)</sup>.

Wie vielfältig die Einsatzmöglichkeiten sind, zeigt der Hinweis, daß bei vielen Schienenfahrzeugen auch bei der Innenausstattung wie z. B. Aschenbecher, Gepäckträger etc. Aluminium verwendet wird.

12) Vgl. Blänke, K., Geschweißte Aluminiumwagen der Berliner U-Bahn, Sonderdruck aus: Aluminium, 41. Jg. (1965), S. 2.

13) Vgl. Aluminium-Taschenbuch, 14. Auflage, S. 895.

14) Vgl. Koewius, A., Aluminium für den Leichtbau von Schienenfahrzeugen, in: Aluminium, 51. Jg. (1975), S. 656.

### Güterfahrzeuge

Im Güterfahrzeugbau und im Personenfahrzeugbau sind mit unterschiedlicher Gewichtung auch die von den Eisenbahnverwaltungen verbindlich herausgegebenen Vorschriften bzw. Anforderungsprofile mit ins Kalkül einzubeziehen. Beispielhaft erwähnt seien nur min./max. Achs-/Radlast, Lichtraumprofil, Geschwindigkeit, Gleisbeschaffenheit. Wesentliches Argument für den Leichtbau bei Güterwagen ist, in Höhe der Einsparung beim Eigengewicht Nutzlast zu gewinnen, d. h. bei gleicher Brutto-tkm-Leistung erhöht sich unter Voraussetzung voller Auslastung die Netto-tkm-Leistung. Dieses Ziel kann am ehesten erreicht werden bei Güterwagen mit Aluminiumaufbau als Schüttgutwagen oder Tankwagen. Besonders in Nordamerika werden Güterwagen dieser Art aus Aluminium eingesetzt und häufig für den Verkehr in Blockzügen über lange Distanzen zusammengefaßt.

Legt man für einen Vergleich die Herstell-/Anschaffungskosten zugrunde, so schneidet die Stahlversion in der Regel günstiger ab. Für eine wirtschaftliche Betrachtung ist dieser Vergleich unzureichend. Geht man von einer geforderren Netto-tkm-Leistung aus, wird diese von weniger Aluminium-Güterwagen und weniger Lokomotiven erbracht. Das führt in diesen Bereichen zu einer Investitionskostenersparnis. Gleichzeitig ist eine geringere Brutto-tkm-Leistung erforderlich, was zu einer Energiekostensparnis führt. Eine entsprechende Vergleichsrechnung, die von 230 Aluminium-Güterwagen ausgeht, die in Blockzügen mit Laufleistungen von 126.000 km/Jahr/Fahrzeug Kohle über eine Entfernung von 416 km transportieren, führt zu Investitionsmehrkosten von 5,2 %. Diese werden durch Betriebskostensparnis in 14 Monaten amortisiert<sup>15)</sup>. Auch bei anderen Wagenarten, so z. B. bei Wagen mit Schiebetüren/-dächern ist die Leichtbauweise wegen des besseren Handling vorteilhaft.

Nicht nur bei den traditionellen Schienensystemen nimmt Aluminium aufgrund seiner Vorzüge einen bedeutenden Rang ein; ebenfalls bei der Entwicklung von neuen Systemen wie der Magnetschienenbahn ist der Einsatz von Aluminium zu beobachten.

### 3. Aluminium im Luftverkehr

Gerade in der Luftfahrt ist der Leichtbauweise eine hervorragende Bedeutung beizumessen. Leichtbauweise und Triebwerktechnik bestimmen in entscheidendem Maße den Treibstoffverbrauch. Weite Teile, insbesondere des Flugzeugrumpfes bzw. der Tragflächen, werden daher aus hochfesten Aluminium-Legierungen hergestellt. Ebenso sind Luftfrachtcontainer aus Aluminium-Blech-Profil-Konstruktionen. Ein neues Einsatzgebiet, in dem sich Aluminium bisher hervorragend bewährt hat, ist die Raumfahrt. Dies gilt sowohl für die Raumfahrzeuge selbst als auch für Trägerraketen. Interessantes Beispiel ist die inzwischen schon mehrfach gestartete Raumfähre Space Shuttle mit dem Raumlabor Spacelab. Die Raumfähre hat eine tragende Aluminium-Konstruktion. Die Außenhaut ist mit Keramikplatten abgedeckt als Wärmeschutz während der Wiedereintrittsphase in die Erdatmosphäre. Der Treibstofftank besteht fast ausschließlich aus Aluminium und weist eine Länge von ca. 50 m sowie einen Durchmesser von mehr als 8 m auf. Die ebenso wie

15) Vgl. Koewius, A., Aluminium für den Leichtbau . . . , a.a.O., S. 139.

die Raumfähre wiederverwendbaren Feststoffraketen sind bis auf die Triebwerke ebenfalls weitgehend aus Aluminium.

Die weitere Entwicklung wird allgemein sehr positiv eingeschätzt, wenn auch in jüngster Zeit bei einzelnen Bauteilen des Flugzeuges wie z. B. Höhen- oder Seitenruder eine Substitution durch massensparenden, jedoch teureren Einsatz von speziellen Kunststoffen zu beobachten ist.

#### 4. Aluminium im Schiffbau

Zahlreiche Anwendungsgebiete von Aluminium lassen sich bei See- und Binnenschiffen nennen: Planken, Schiffsraumabdeckungen, -unterteilungen, Reling, Lukendeckel, Deckaufbauten usw. Neben der Gewichtsersparnis spricht besonders die Wartungsfreundlichkeit für Aluminium. Als interessante Beispiele seien die Tanks für Flüssiggastransporte bei Seeschiffen erwähnt, bei denen bis zu 4.000 t Aluminium verarbeitet werden, oder die Passagierschiffe „United States“, „France“, „Queen Elisabeth II“ mit bis zu 2.000 t in den Deckaufbauten<sup>16)</sup>. Beachtliche Bedeutung gewinnt die Leichtbauweise bei Küstenmotorschiffen, die häufig in Fahrwasser mit geringer Tiefe verkehren. Auch im Bootsbau hat Aluminium als Werkstoff Eingang gefunden. Bekannt ist die Hochseeyacht „Pinta“ mit einer Aluminiumrumpfkonstruktion. Aluminium steckt jedoch in diesem Bereich in einem äußerst intensiven Wettbewerb mit glasfaserverstärktem Kunststoff. Bei Masten und ähnlichen Ausrüstungsgegenständen hat Aluminium dagegen aus Gewichts- und Kostengründen Holz verdrängt. Aluminium zeichnet sich gegenüber alternativen Werkstoffen in diesem Bereich besonders durch Korrosionsbeständigkeit und Reparaturfreundlichkeit aus.

### III. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Energie und Umwelt haben sich gerade in den letzten Jahren zu Faktoren entwickelt, die im Bewußtsein des Menschen einen hervorragenden Stellenwert erlangt haben. Solange Energie scheinbar abundant und im Bewußtsein der Verbraucher kostengünstig war, solange die Umwelt scheinbar intakt war, bestand offensichtlich kaum Anlaß, nach Alternativen zu fragen. Dessen ungeachtet hatte der Werkstoff Aluminium im Substitutionswettbewerb mit konkurrierenden Werkstoffen auch in der Vergangenheit schon beachtliche Erfolge zu verbuchen. Doch vor allem im Wettbewerb mit Stahl stellt sich, soweit qualitative Unterschiede nicht zum Tragen kamen, aus preislichen Gründen nicht die Frage der Substitution; sie „rechnete“ sich nicht. Die höheren Investitionskosten der „Aluminium-Version“ konnten nicht durch entsprechende Energiekostenersparnis als Folge der Gewichtsersparnis kompensiert oder sogar überkompensiert werden. Die oben skizzierte Entwicklung hat eine neue Ausgangsbasis geschaffen. Einige Aspekte haben darüber hinaus dazu beigetragen, die Alternative „Leichtbauweise“ – neben anderen – verstärkt in den Vordergrund zu stellen: geschärftes Kostenbewußtsein der Verkehrsunternehmer aufgrund weiter zunehmenden Wettbewerbsdrucks, bessere Arbeitsbedingungen durch leichteres Handling, größere Wartungsfreundlichkeit u. a.

16) Vgl. Aluminium-Taschenbuch, 14. Auflage, S. 899.

Unabhängig von dieser neuen Perspektive bleibt die Frage der Wirtschaftlichkeit von höchster Relevanz, es sei denn, gesetzliche Bestimmungen setzen ökonomische Betrachtungsweisen außer Kraft.

Am Beispiel des Nutzfahrzeugbereiches sollen im folgenden die Grundlagen einer Wirtschaftlichkeitsberechnung für den alternativen Einsatz des Werkstoffes Aluminium anstelle von Stahl erläutert werden. Bei den beiden Hauptkriterien „Energie“ und „Gewicht“ kann man von folgenden Richtwerten ausgehen:

- Durch die Substitution von Stahl durch Aluminium wird im Durchschnitt eine Gewichtsersparnis von ca. 50% erzielt, wobei bei einzelnen Teilen Abweichungen von  $\pm 15\%$  möglich sind. Hierbei handelt es sich um primäre Gewichtsersparnis, d. h. die des Teilstückes selbst. Durch die Verwendung leichterer Teilstücke wird auch die Belastung anderer Teilstücke reduziert, die also leichter konstruiert werden können (sekundäre Gewichtsersparnis). Multipliziert man die Primärgewichtsersparnis mit ca. 1,25, so ergibt sich die Gesamtgewichtsersparnis einschließlich der Sekundärgewichtsersparnis<sup>17)</sup>.
- Für die Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs vom Fahrzeuggewicht ergibt sich beim PKW basierend auf zahlreichen Untersuchungen ein Durchschnittswert von ca. 0,6 l / 100 kg / 100 km. Hier sind jedoch erhebliche Abweichungen je nach den Verkehrsbedingungen möglich. So wird im Stadtverkehr üblicherweise ein Wert von 1 l / 100 kg / 100 km angesetzt.

Beim PKW ist die Wirtschaftlichkeit dann gegeben, wenn die wertmäßige Kraftstoffersparnis (abdiskontiert) über die Nutzungsdauer – ausgedrückt in Fahrleistung – höher ist als die zusätzlichen Anschaffungskosten der „Aluminium-Version“.

Bei einem Nutzfahrzeug hat der Transportunternehmer die Möglichkeit, den durch die Gewichtsersparnis erzielten Nutzlastgewinn voll auszuschöpfen. In dem Maße wie der Nutzlastgewinn nicht voll verwertet werden kann bzw. Leerfahrten anfallen, wird der Kraftstoffverbrauch reduziert. Für den Transportunternehmer gilt dann folgende Rechnung:

Mehrerlös + Ersparnis  $\cdot$  Afa  $\cdot$  Zinsen = Bruttogewinn  $\cdot$  Ertragssteuer = Nettogewinn + Afa = Amortisationsbetrag (p. a.)<sup>18)</sup>. Die Amortisationszeit sollte zumindest kürzer sein als die geplante Nutzungsdauer.

Ohne Rücksicht auf die Erlössituation geht eine Studie der FAT bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung allein von der Kostenseite aus<sup>19)</sup>. Aus einer möglichen Verringerung der Transportkosten je Einheit ergibt sich dann ebenfalls eine verbesserte Ertragslage des Unternehmens. Im folgenden sollen die wesentlichen Punkte sowie Ergebnisse der Studie kurz erläutert werden.

17) Vgl. Hufnagel, W., Koewius, A., Aluminiumwerkstoff für den Automobilbau, Sonderdruck aus: Automobil-Industrie, 24. Jg. (1979), Heft 3, S. 2.

18) Es handelt sich um eine vergleichende Betrachtung zur Stahlversion, d. h. nur die Differenzbeträge (z. B. höhere Zinsen aufgrund höherer Anschaffungskosten) gehen in die Rechnung ein. Folglich wird der Amortisationsbeitrag auch nur den Anschaffungsmehrkosten gegenübergestellt.

19) Vgl. FAT, Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Aluminium im LKW-Bau (= Schriftenreihe Forschungsvereinigung Automobilbautechnik e. V., Band 26), Frankfurt am Main.

Ausgangspunkt des Kostenvergleichs ist eine Stahlversion mit bereits heute standardmäßig verwendeten Aluminium-Bauteilen (z. B. Kolben). Die substituierbaren Bauteile werden nach technischen und preislichen Kriterien klassifiziert (siehe Tabelle 3). Am Beginn des sukzessiven Substitutionsprozesses steht das Bauteil, bei dem das Verhältnis der Mehrkosten zur Gewichtsersparnis am günstigsten ist. Ferner wurden folgende Unterscheidungskriterien herangezogen:

Fahrzeugtypen: Fünf Gewichtsklassen mit je folgenden vier Aufbauten: Kasten, Pritsche, Kipper, Sattel.

Einsatzbedingungen: Kurzstrecke (Stadtverkehr) 100 km  
 Mittelstrecke 100 – 200 km  
 Langstrecke (Fernverkehr) 200 km. } je Tour

Ladungskategorien: Stückgut, Schüttgut, Flüssigkeit.

Der Kostenvergleich wird auf der Basis der Transportkosten (DM/tkm) durchgeführt, die sich aus den Fahrzeugkosten in Abhängigkeit der jährlichen Transportleistung ergeben:

$$(1) \text{ Transportkosten in DM/tkm} = \frac{\text{jährliche Fahrzeugkosten in DM p. a. als Funktion der jährlichen Fahrleistung}}{\text{jährliche Transportleistung in tkm p. a.}}$$

Die *Fahrzeugkosten* setzen sich zusammen aus den bauartabhängigen und bauartunabhängigen Kosten. Die bauartabhängigen Kosten ergeben sich aus der Summe der fahrzeugabhängigen Kosten (z. B. Kaufpreis, Abschreibung, Zinsen) und den fahrleistungsabhängigen Kosten (z. B. Kraft-/Schmierstoffe, Reifen, Reparatur). Die bauartabhängigen Kosten werden durch die Substitution beeinflusst. Bauartunabhängige Kosten sind z. B. Personal-, Verwaltungskosten.

Die *Transportleistung* ergibt sich aus der Multiplikation des Auslastungsgrades in  $\tau$  ausgedrückt mit der Fahrleistung der Nutzfahrten in km. Bezogen auf die Kosten eines Jahres ergibt sich folgende Gleichung:

$$(2) \text{ Transportkosten in DM/tkm} = \frac{\text{Fahrzeugkosten in DM p. a.}}{\text{Jährliche Fahrleistung der Nutzfahrten in km p. a.} \times \text{Durchschnittliche Beladung des Fahrzeugs je Nutzfahrt in t}}$$

Die Ausnutzung des Nutzlastgewinns hängt einmal von der Art des Transportgutes (z. B. Stück-/Massengut), zum anderen auch von der Nachfrage nach Transportleistung ab. Um diese Betrachtungsweise mit einzubeziehen, wird die Gleichung (2) wie folgt modifiziert:

$$(3) \text{ Transportkosten in DM/tkm} = \frac{\text{Gesamte Fahrzeugkosten in DM p. a.}}{\text{Jährliche Fahrleistung der Nutzfahrten in km p. a.} \times \text{Nutzlastkapazität des Stahl-Fahrzeugs in t} + \text{Nutzlastgewinn durch Aluminiumbauweise} \times \text{Auslastung des Nutzlastgewinns in \%}}$$

Tabelle 3: Nutzlastgewinne der substituierten Bau-/Kleinenteile für MAN-Pilotfahrzeug 16.280 FLS

Bauteilbezeichnung	Anzahl der Teile im Fahrzeug	Summe Nutzlastgewinn der Einzelteile in kg	Selbstkosten		Summe Nutzlastgewinn der Einzelteile in kg	Selbstkosten Aluminium < Stahl (-) / Aluminium > Stahl (+)
			Aluminium < Stahl (-)	Aluminium > Stahl (+)		
Zylinderkopf	6	44,4	-	-	1	-
Zylinderkurbelgehäuse	1	94	+	-	1	-
Kupplungsgehäuse <sup>3)</sup>	-	-	-	-	1	-
Getriebegehäuse	1	58	+	+	1	-
Rahmen	1	189	+	+	1	-
Vorderachskörper	1	39	+	+	1	-
Fahrerhaus mit Türen Aufbau <sup>1)</sup>	1	128,5	+	+	2	4,80
Scheibenrad <sup>1)</sup>	7	158,9	-	-	7	31,40
Scheibenrad <sup>2)</sup>	7	168	+	+	7	31,40
Aufbau <sup>2)</sup>	1	2200	+	+	1	12,50
Kleinenteile I	11	31,4	-	-	11	4,50
Kleinenteile II	1	63,6	+	+	4	1,04
Summe (Sattelzugmaschine)		806,8			1	4,90
Summe (Sattelzug)		3174,8			1	14,00
1) Sattelzugmaschine; 2) Tanksattelanhänger; 3) entfällt, da bereits in Aluminium gebaut.						
Summe Kleinenteile II	10	63,54			10	63,54
(Selbstkosten Aluminium > Stahl)						

Quelle: Kellermann, P., Lapp, K., Sieg, U., Wirtschaftlichkeit des Einsatzes . . . , a. a. O., S. 879 f.

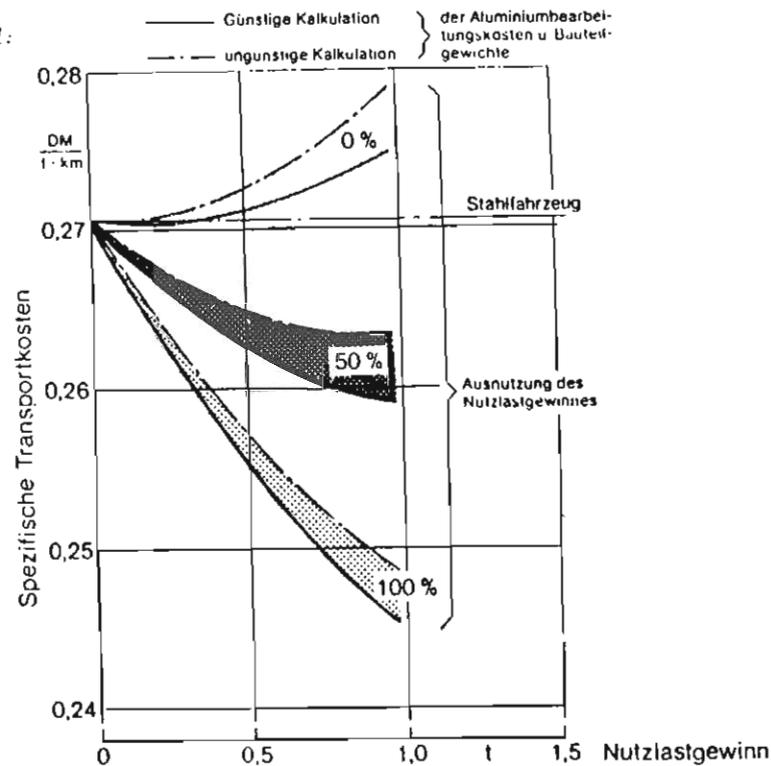
Aus der Differenz der Transportkosten in DM/tkm ergeben sich Minder-/Mehrtransportkosten der Aluminium-Version gegenüber der Stahlversion. Das Ergebnis wird am folgenden Beispiel eines 16-t-LKW mit Pritschenaufbau dargestellt (Kostenbasis 1978):

- Gewichtersparnis = 1.000 kg
- Mehrkosten = DM 19.000,-
- Fahrleistung gesamt: 110.000 km/Jahr
- Fahrleistung unter Nutzlast: 73.300 km/Jahr
- Transportleistung des Stahlfahrzeugs, vollausgelastet: 592.000 t (Nutzlast) x km p. a.
- Transportleistung der „Aluminiumversion“ bei 50 % Auslastung des Nutzlastgewinnes 629.500 tkm p. a.
- Transportleistung der „Aluminiumversion“ bei 100 % Auslastung des Nutzlastgewinnes 667.000 tkm p. a.

Ergebnis: Senkung der Transportkosten gegenüber dem Stahlfahrzeug

- bei 50 % Auslastung des Nutzlastgewinnes = - 0,008 DM/tkm
- bei 100 % Auslastung des Nutzlastgewinnes = - 0,024 DM/tkm gegenüber 0,271 DM/tkm Transportkosten des Stahlfahrzeugs.

Abbildung 1:



Quelle: Kellermann, P., Lapp, K., Sieg, U., Wirtschaftlichkeit des Einsatzes . . . , a.a.O.

Der Transportkostenverlauf bei sukzessiver Substitution von Stahl durch Aluminium ist beispielhaft in Abb. 1 dargestellt.

Bei dieser Kostenbetrachtung ist ein in manchen Fällen bedeutender Aspekt nicht berücksichtigt. Im (Werk-)Verkehr mit Massengut, insbesondere auf festen Routen, bei denen eine bestimmte Transportleistung gefordert wird, für die mehrere Fahrzeuge gleichen Typs eingesetzt werden, ergibt sich aus dem Nutzlastgewinn ab einer bestimmten Flottengröße eine Investitionskostenersparnis. So erbringen z. B. bei einer Gewichtersparnis von 1.000 kg eines 15-t-Fahrzeugs mit 7 t Nutzlast sieben Fahrzeuge die gleiche Leistung wie bisher acht Fahrzeuge. Dadurch verändert sich das Ergebnis des Kostenvergleichs erheblich zugunsten der „Aluminium-Version“.

Die sich abflachende Kurve ergibt sich aus der Tatsache, daß zuerst das Bauteil substituiert wurde, bei dem die Relation Gewichtersparnis / Mehrkosten am günstigsten ist.

#### IV. Perspektiven

Die Entwicklung der Einsatzmöglichkeiten des Werkstoffes Aluminium im Verkehrswesen sind grundsätzlich positiv zu beurteilen. Hierfür sprechen folgende Gründe:

(1) Die Verfügbarkeit ist auf lange Sicht gewährleistet. Der derzeitige Vorrat an Bauxit wird auf ca. 40 Mrd t geschätzt, was einer Menge von ca. 9 Mrd t Aluminium entspricht. Der jährliche Verbrauch liegt zur Zeit bei ca. 13 Mio t.

(2) Die Preisentwicklung von Aluminium ist über die Jahre hinweg als moderat zu bezeichnen. Sie liegt von 1970 – 1983 bei ca. 4 % jährlich und damit unter der Inflationsrate in Deutschland. In den Jahren 1950 – 1970 betrug die jährliche Preissteigerung nur ca. 0,5 %. Eine Korrektur der bisherigen Subventionspolitik bei Stahl könnte zu einer Bereinigung der Wettbewerbsverzerrung gegenüber Aluminium und damit zu einer verbesserten Ausgangsbasis von Aluminium führen. In diesem Zusammenhang ist auch die Möglichkeit des Recycling von erheblicher Bedeutung, da mit diesem Verfahren die Energiekosten gegenüber der Hüttenerzeugung erheblich reduziert werden können.

(3) Die technologische Entwicklung bei dem Werkstoff Aluminium hat die Voraussetzung geschaffen, daß Aluminium nicht nur bei den bekannten Verkehrssystemen seine Position festigen, sondern auch bei zukünftigen Entwicklungen in allen Verkehrsbereichen eine bedeutende Rolle spielen kann. Erwähnt seien nur bei Straßenfahrzeugen die Entwicklung eines Langzeitautos, bei Schienenfahrzeugen die Magnetbahn, in der Luftfahrt die Raumfähren.

Unbestritten sind jedoch auch preisliche und/oder qualitative Grenzen, an die der Einsatz von Aluminium stößt. Ferner ist zu berücksichtigen, daß die Verwendung von Aluminium nicht die einzige Möglichkeit darstellt, der besonders heute aktuellen Forderung nach Energieersparnis und verminderter Umweltbelastung gerecht zu werden. Parallel hierzu sind im KFZ-Bereich z. B. Bestrebungen zu nennen, die auf eine technische Verbesserung der Wirkungsgrade bei Antrieb und Kraftübertragung zielen, den cw-Wert zu verringern oder bleifreien Kraftstoff einzusetzen.