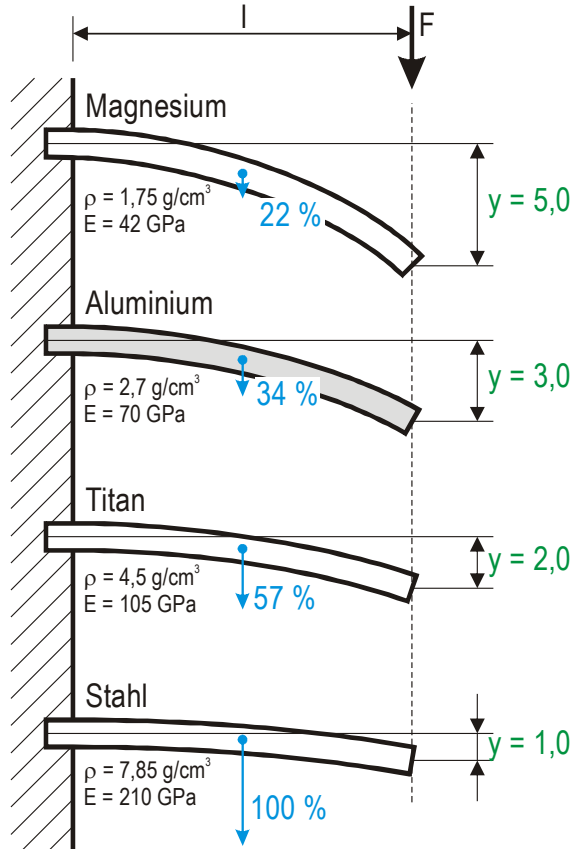


- 2.2.1. Einführung & wichtige Eigenschaften
- 2.2.2. Aluminium-Legierungen im Tragwerk
- 2.2.3. Aluminium-Integralbauweise
- 2.2.4. Weitere Aspekte

Folie Vergleich Metallwerkstoffe

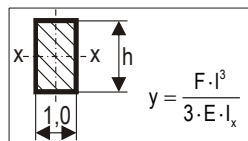
Gleicher Querschnitt (A, I_x)

verschiedene Steifigkeit ($E \cdot I_x$)
verschiedene Masse (m)



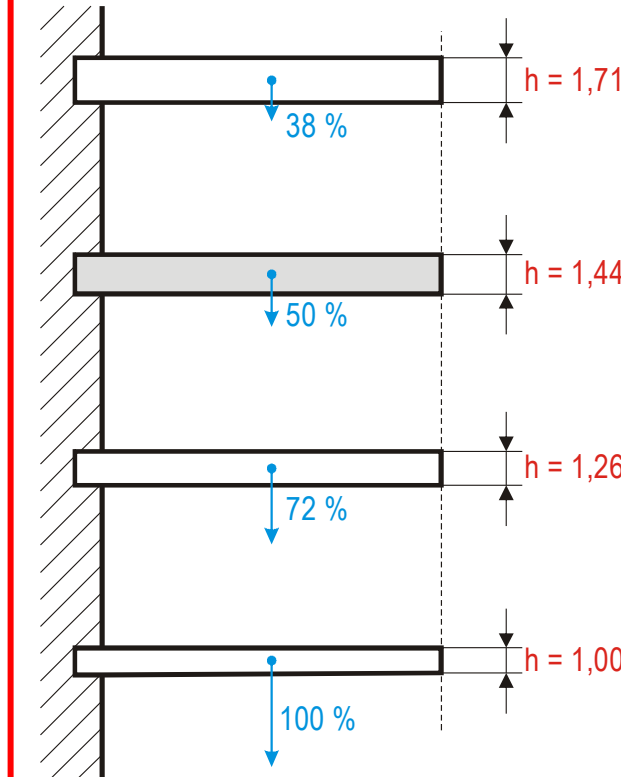
$$y = y_{\text{Stahl}} \cdot \frac{E_{\text{Stahl}}}{E}$$

$$m = m_{\text{Stahl}} \cdot \frac{\rho}{\rho_{\text{Stahl}}}$$



Gleiche Steifigkeit ($E \cdot I_x$)

verschiedener Querschnitt (h, I_x)
verschiedene Masse (m)

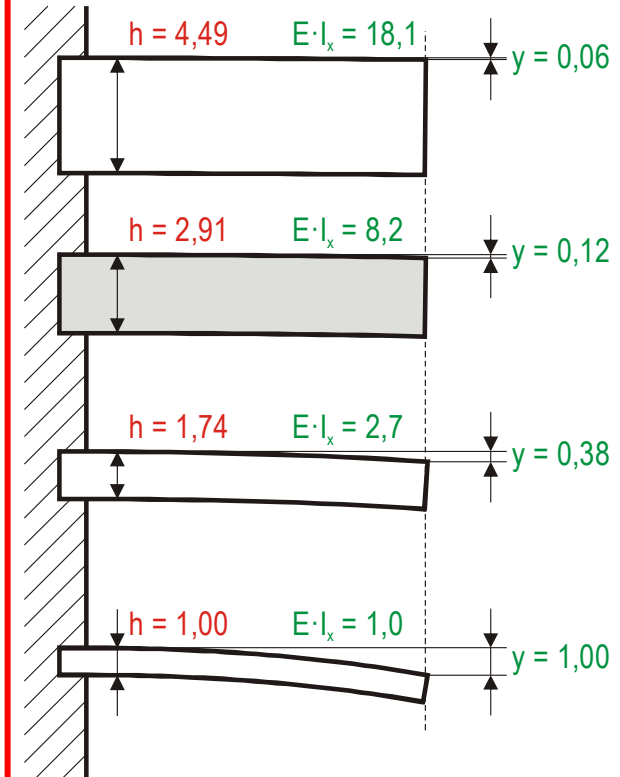


$$h = h_{\text{Stahl}} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{\text{Stahl}}}{E}}$$

$$m = m_{\text{Stahl}} \cdot \frac{\rho \cdot h}{\rho_{\text{Stahl}} \cdot h_{\text{Stahl}}}$$

Gleiche Masse (m)

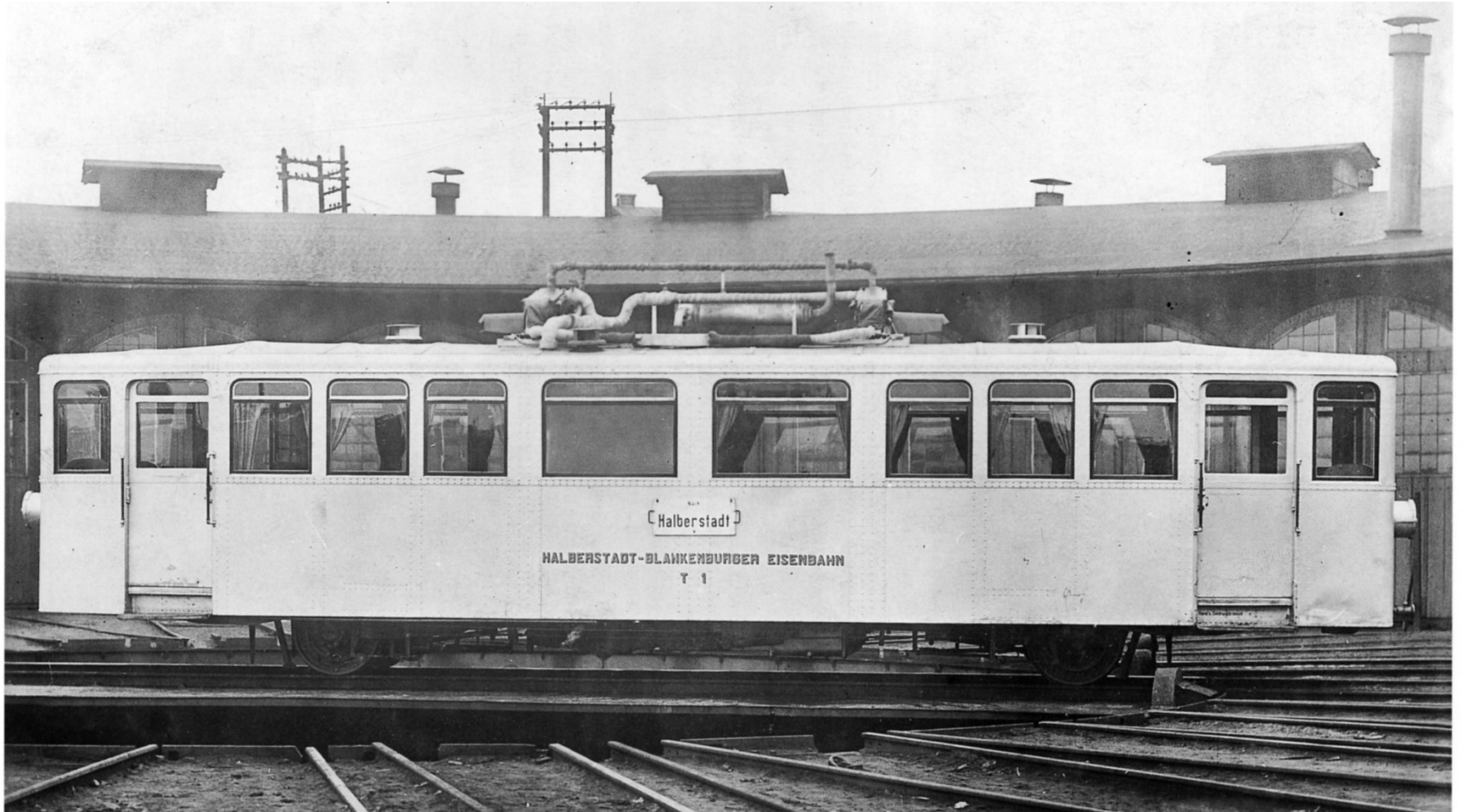
verschiedener Querschnitt (h, I_x)
verschiedene Steifigkeit ($E \cdot I_x$)



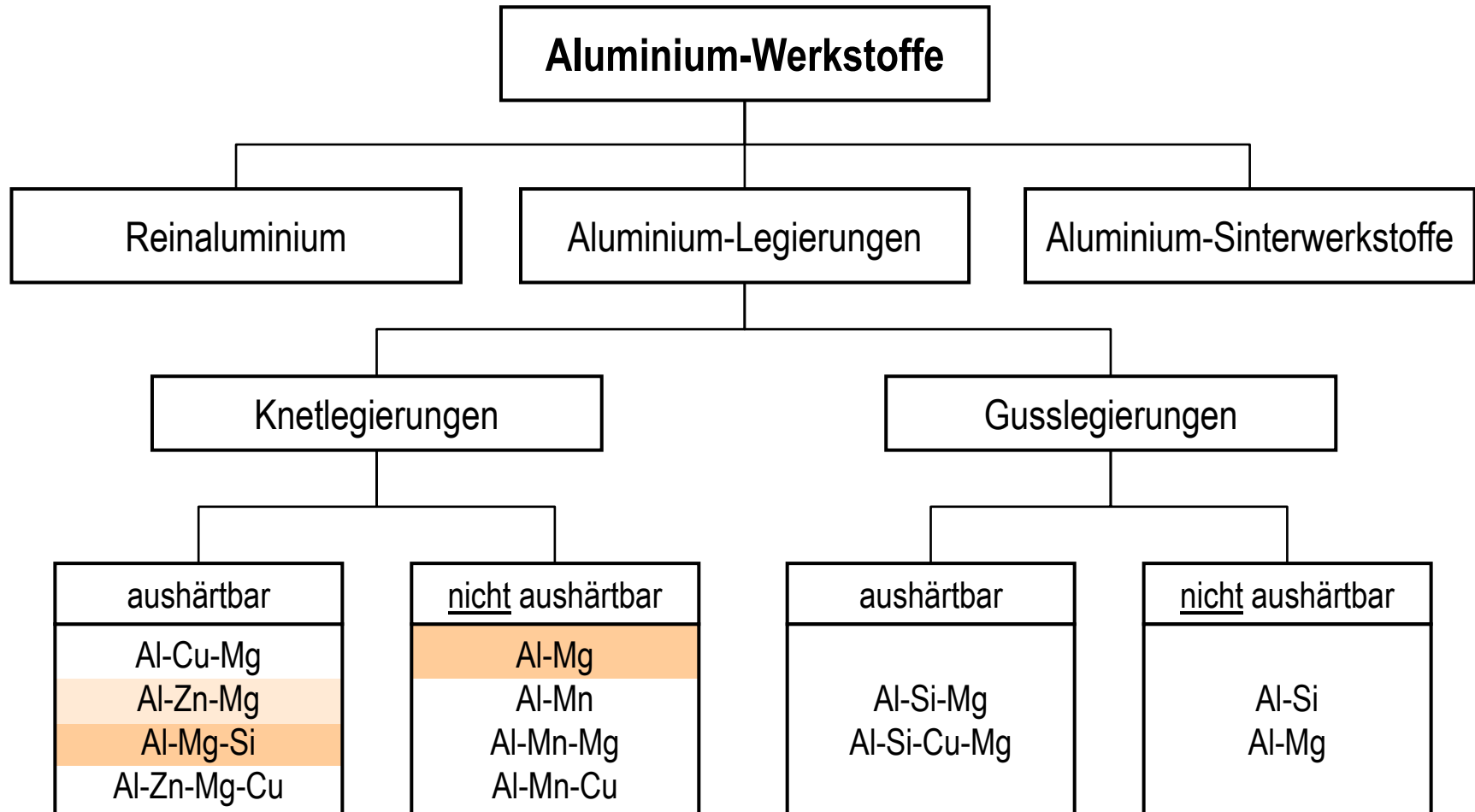
$$h = h_{\text{Stahl}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{Stahl}}}{\rho}}$$

$$y = y_{\text{Stahl}} \cdot \frac{E_{\text{Stahl}} \cdot h_{\text{Stahl}}^3}{E \cdot h^3}$$

Folie Triebwagen T1 HBE

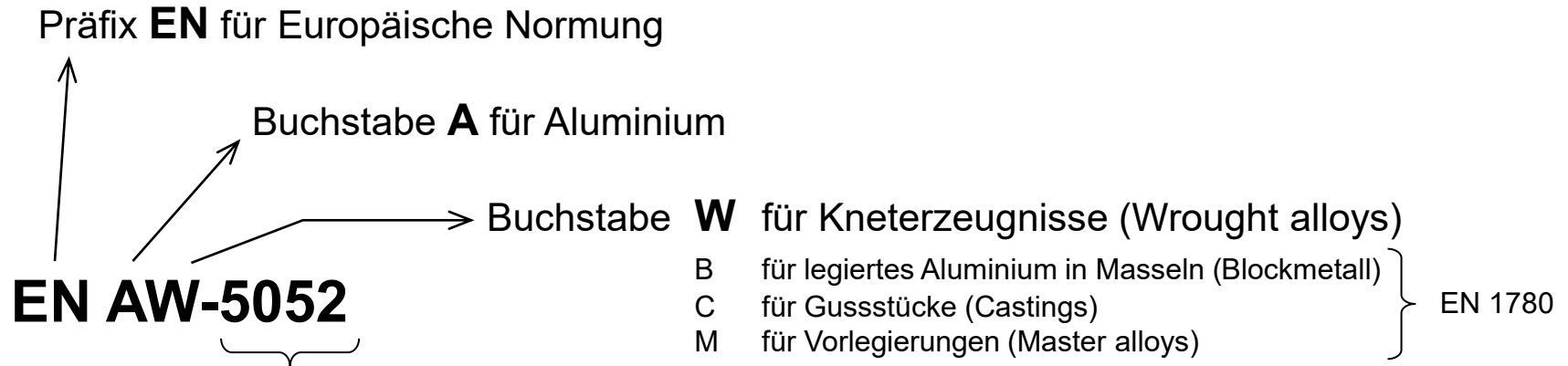


(Quelle: Werner Steinke: 125 Jahre Halberstadt-Blankenburger Eisenbahn, 2000)



(Quelle: nach Schatt, ...: Konstruktionswerkstoffe)

Folie Bezeichnung von Aluminiumwerkstoffen nach DIN EN 573



vier Ziffern für internationale Bezeichnung

= chemische Zusammensetzung + ggf. Kennbuchstabe einer nationalen Variante:

1xxx (Serie 1000)	Aluminium, mindestens 99,00 % und höher
<i>Aluminiumlegierungen, unterteilt nach den Hauptlegierungselementen</i>	
2xxx (Serie 2000)	Kupfer
3xxx (Serie 3000)	Mangan
4xxx (Serie 4000)	Silicium
5xxx (Serie 5000)	Magnesium
6xxx (Serie 6000)	Magnesium und Silicium
7xxx (Serie 7000)	Zink
8xxx (Serie 8000)	sonstige Elemente

Folie DIN EN 573-3: ... Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen

Tabelle 5 (fortgesetzt)

Bezeichnung der Legierung		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Bemerkungen	Andere ^a		Aluminium min.
Numerisch	Chemische Symbole													Einzel	Insgesamt ^b	
EN AW-5251	EN AW-Al Mg2Mn0,3	0,40	0,50	0,15	0,10-0,50	1,7-2,4	0,15	—	0,15	0,15	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-5052	EN AW-Al Mg2,5	0,25	0,40	0,10	0,10	2,2-2,8	0,15-0,35	—	0,10	—	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-5252	EN AW-Al Mg2,5(B)	0,08	0,10	0,10	0,10	2,2-2,8	—	—	0,05	—	—	0,05	—	0,03	0,10	Rest
EN AW-5352	EN AW-Al Mg2,5(A)	0,45 Si+Fe		0,10	0,10	2,2-2,8	0,10	—	0,10	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-5154A	EN AW-Al Mg3,5(A)	0,50	0,50	0,10	0,50	3,1-3,9	0,25	—	0,20	0,20	—	—	0,10-0,50 Mn+Cr ^c	0,05	0,15	Rest
EN AW-5154B	EN AW-Al Mg3,5Mn0,3	0,35	0,45	0,05	0,15-0,45	3,2-3,8	0,10	0,01	0,15	0,15	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-5354	EN AW-Al Mg2,5MnZr	0,25	0,40	0,05	0,50-1,0	2,4-3,0	0,05-0,20	—	0,25	0,15	—	—	0,10-0,20 Zr	0,05	0,15	Rest

Tabelle A.5 (fortgesetzt)

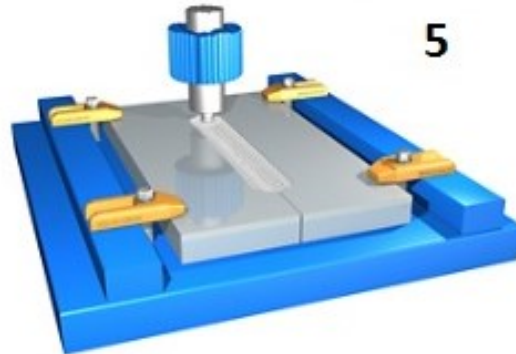
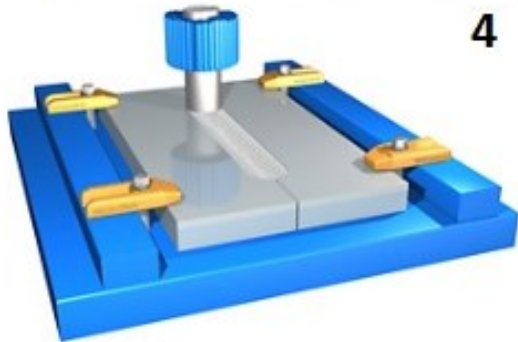
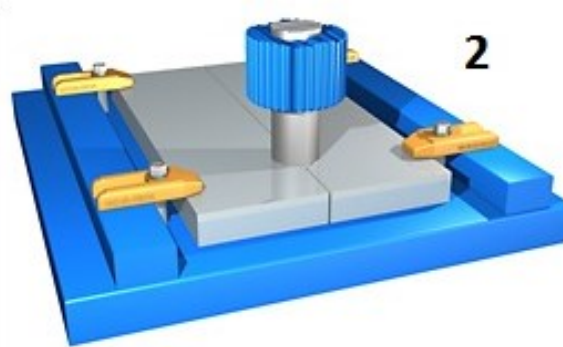
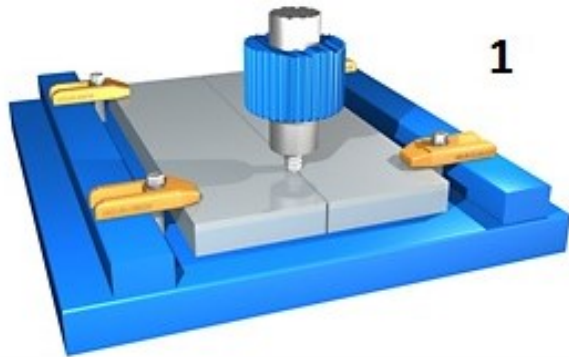
Bezeichnung der Legierung		Schmiedestücke und Schmiedevormaterial	Draht und Vordraht			Gezogene Erzeugnisse	Stranggepresste Erzeugnisse	Folie	Vormaterial für Wärmeaustauscher (Finstock)	Bleche, Bänder und Platten	Vormaterial für Dosen, Deckel und Verschlüsse	Butzen	HF-längsnahtgeschweißte Rohre	Legierung für Lebensmittelkontakt
Numerisch	Chemische Symbole		Elektrotechnische Anwendung	Schweißtechnische Anwendung	Mechanische Anwendung									
EN AW-5449	EN AW-Al Mg2Mn0,8(B)	—	—	—	—	—	—	—	X	—	—	X	N	
EN AW-5050	EN AW-Al Mg1,5(C)	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	J	
EN AW-5050A	EN AW-Al Mg1,5(D)	—	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	J	
EN AW-5051A	EN AW-Al Mg2(B)	—	—	X	X	X	—	—	—	—	—	—	J	
EN AW-5251	EN AW-Al Mg2Mn0,3	—	—	X	X	X	—	—	X	X	—	X	J	
EN AW-5052	EN AW-Al Mg2,5	—	—	—	X	X	X	—	—	X	X	—	X	J

Folie Vergleich grundlegender Eigenschaften von Al und Fe

Eigenschaften		Aluminium	Eisen (Stahl)
Dichte	g/cm ³	2,7	7,87
Kristallgitter		kfz	krz
E-Modul	N/mm ²	70·10 ³	210·10 ³
R _{p0,2} , R _e	N/mm ²	ca. 10	ca. 100
R _m	N/mm ²	ca. 50	ca. 200
spez. Wärmekapazität	J/(g·K)	0,88	0,53
Wärmeleitfähigkeit	W/(cm·K)	2,3	0,75
spez. elektr. Widerstand	nΩm	28-29	97
Ausdehnungskoeffizient	1/K	24·10 ⁻⁶	12·10 ⁻⁶
Schmelzpunkt	°C	660	1.539
Schmelzpunkt der Oxide	°C	2.050 (Al ₂ O ₃)	1.400 (FeO) 1.600 (Fe ₃ O ₄) 1.455 (Fe ₂ O ₃)

Schweißen von Aluminium!!

Folie Reibrührschweißen (friction stir welding)

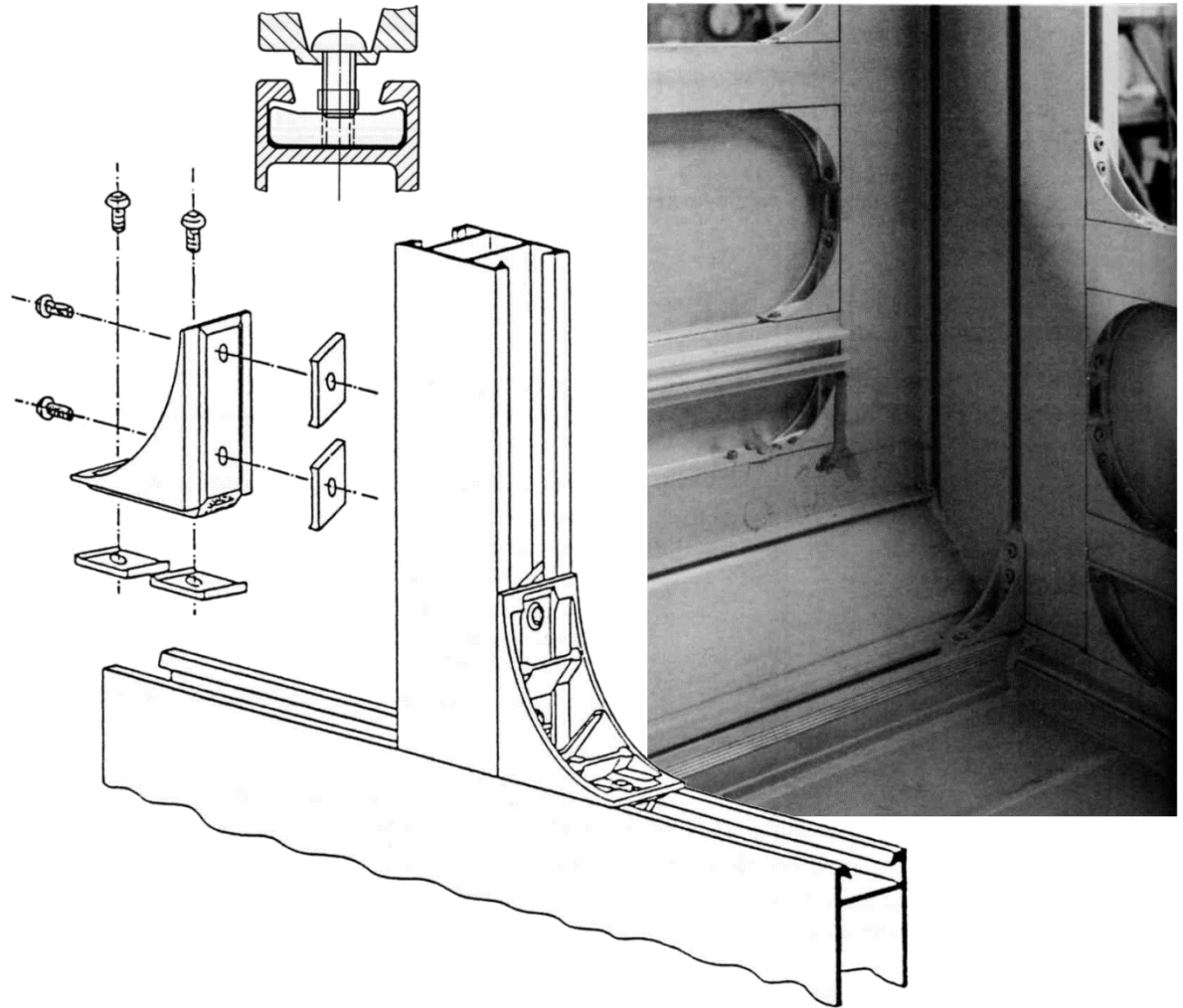


- Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes
- geringer Verzug
- geringer Energieverbrauch
- hohe statische und dynamische Nahtfestigkeiten
- einfache Nahtvorbereitung

- keine Spritzer, kein Rauch
- kein Zusatzdraht
- leicht automatisierbar
- keine Schweißerprüfung erforderlich

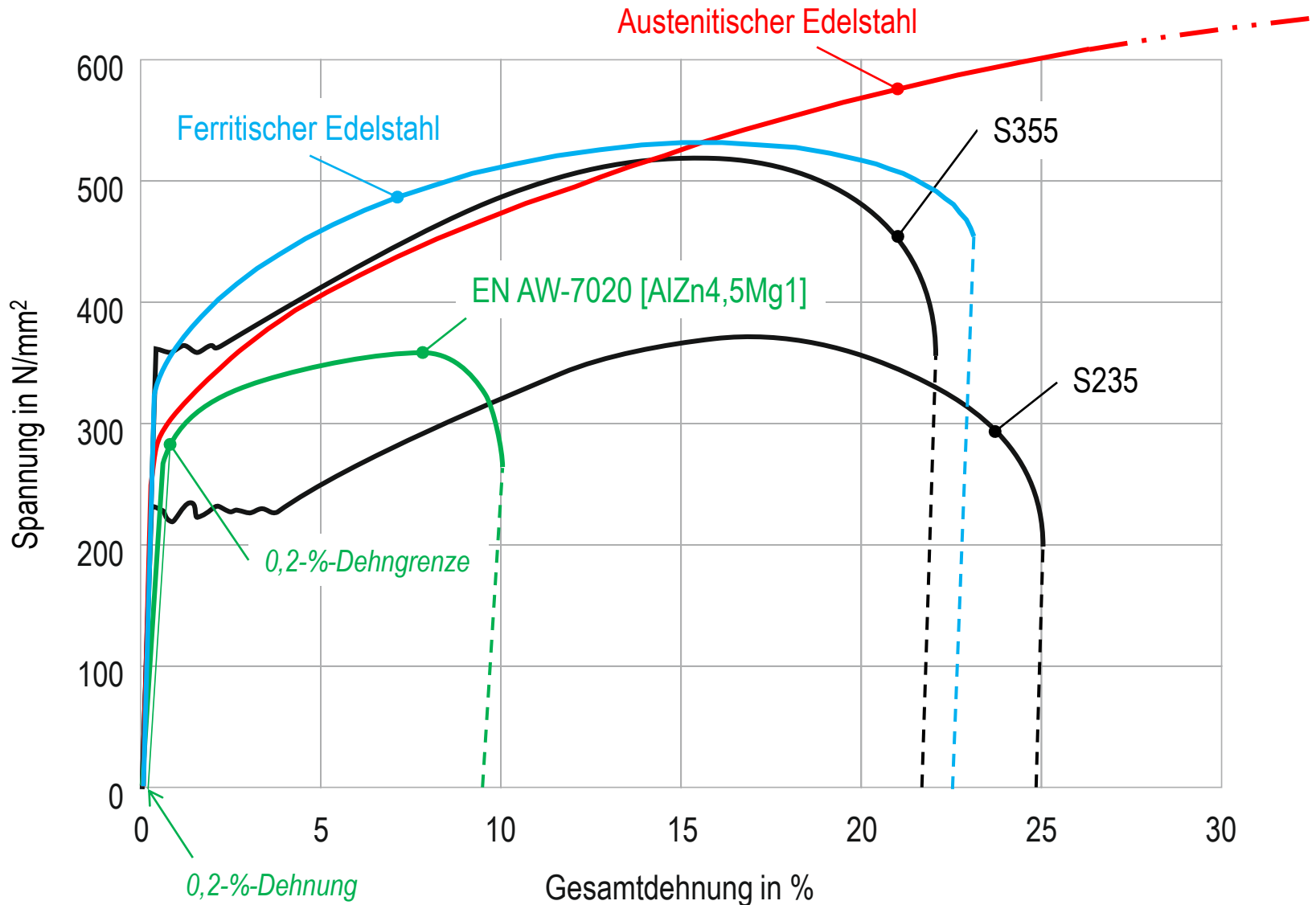
(Quelle: de.wikipedia.org)

Folie Schraubverbindungssystem Wagenkastenaufbau RegioSprinter



(Quelle: Schraut: ETR 44(1995)5)

Folie Spannungs-Dehnungs-Diagramm



Folie Wöhlerlinienkatalog nach IIW (I)

≈ Faktor 2,5

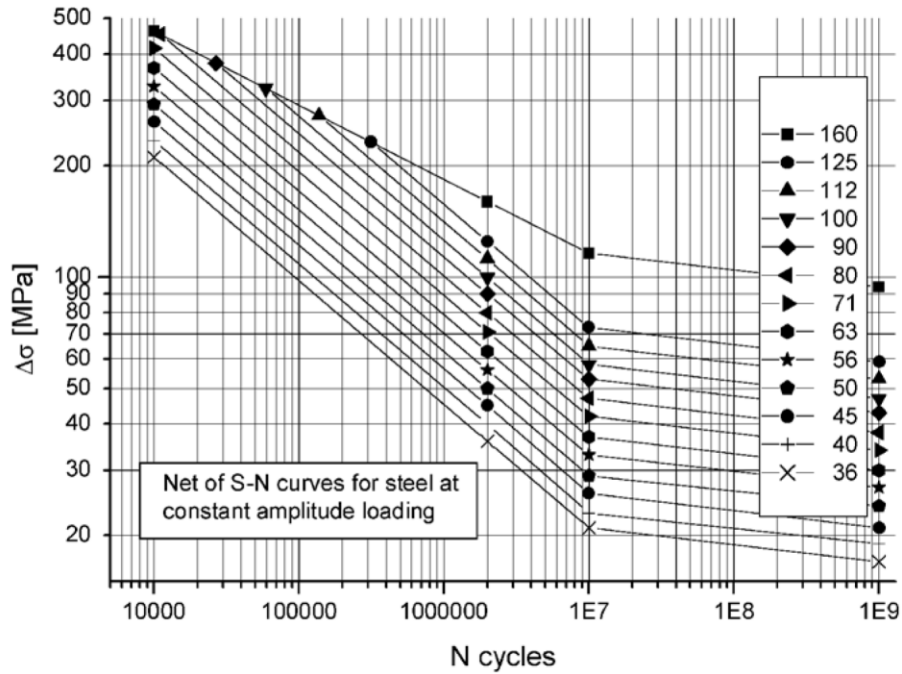


Fig. (3.2)-1:
Fatigue resistance S-N curves for **steel**, normal stress

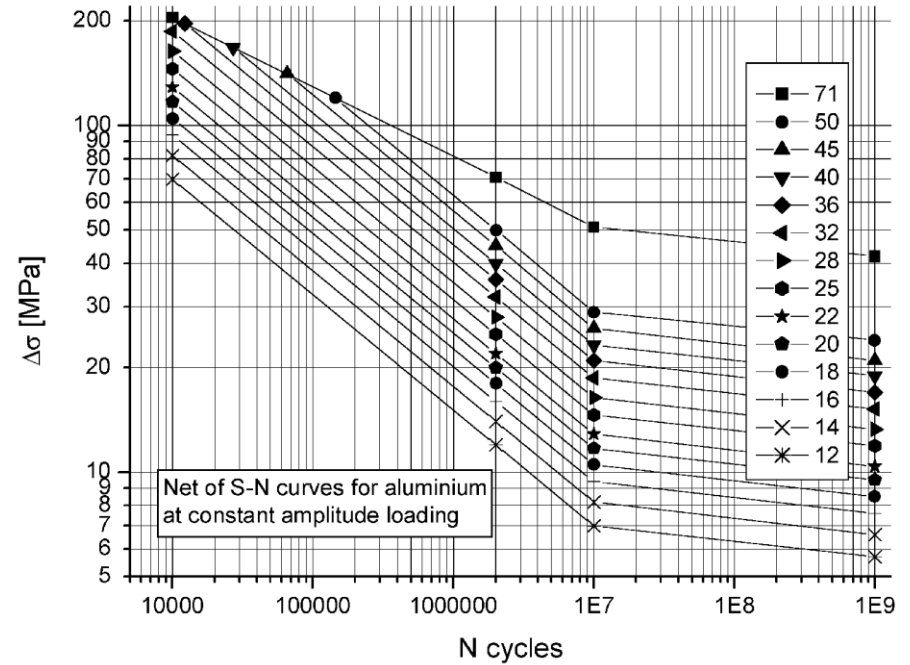
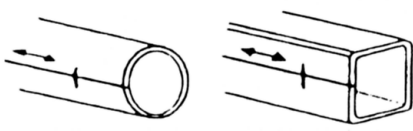
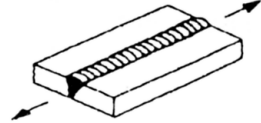
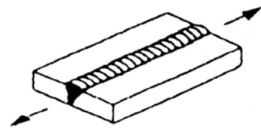
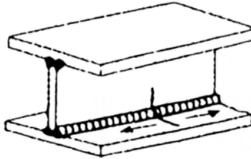


Fig. (3.2)-2:
Fatigue resistance S-N curves for **aluminium**, normal stress

(Quelle: IIW-Empfehlungen, Febr. 2005)

Tabelle 5.4.1 Bauteilklassen für Nennspannung (Normalspannung), Fortsetzung 3 von 10.

Nr.	Konstruktives Detail	Beschreibung	FAT Stahl	FAT Alu
300	Schweißnähte, längsbelastet			
311		Automatisch geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen; ohne Nahtansätze mit Nahtansätzen	125 90	50 36
312		Längsbelastete Stumpfnahtheit, beidseitig blecheben parallel zur Naht bearbeitet, 100 % zFP.	125	50
313		Längsbelastete Stumpfnahtheit; ohne Nahtansätze, zFP mit Nahtansätzen	125 90	45 36
321		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete K-Naht, voll durchgeschweißt, ohne Nahtansätze, 100 % zFP, Spannung im Flansch.	125	50

(Quelle: FKM-Richtlinie 2003)



**Brand des Transformatorwagens 403 626
am 20.10.2018 (SFS Köln – Rhein/Main)**

(Quelle: ERI 2018-12)



Folie Einschätzung Aluminium-Legierungen hinsichtlich Werkstoffanforderungen

Anforderung	Stahl	Alu-Leg.
Festigkeit, Steifigkeit: <ul style="list-style-type: none"> – hohe Längsfestigkeit, hohe lokale Festigkeit ↔ Energieverzehbereiche – große Struktursteifigkeit (Stützweite, Überhang) ↔ definierte Elastizitäten – Strukturdämpfung 	↗	→
Schweißbarkeit	↗	↘
Möglichst ebene Oberfläche¹	→	↗
Geringe Masse → Leichtbau	↘	↗
Wirtschaftlichkeit <ul style="list-style-type: none"> – Materialkosten – Herstellungskosten¹ → Beschleunigung der Fertigungsabläufe – Folgekosten¹ im langen Betriebszeitraum <ul style="list-style-type: none"> • Korrosionsbeständigkeit • Reparaturfreundlichkeit 	↗ ↗ → ... ↗ ↘ ... ↗ ↗	↘ ↗ → ... ↗ ↗ →

¹Einschätzung im Zusammenhang mit typischer Bauweise

Folie Empfehlungen für Werkstoffauswahl – DIN 5513

Tabelle 2 — Werkstoffauswahl für Strangpressprofile

Werkstoff nach DIN EN 755-2	Zustands- hinweis	Festigkeitseigenschaften									Allgemeine Hinweise
		Wanddicke ^b		Zugfestigkeit		0,2 %- Dehn- grenze	Bruchdehnung		Schweiß- verbindung		
		über	bis	R_m MPa	min.		max.	$R_{p0,2}$ MPa	A_{50mm} %	A %	
EN AW-6005A-T6 (Vollprofile) ^a	lösungsgeglüht und warmaus- gelagert	–	5	270	–	225	6	–	165	115	EN AW-6060 für gering beanspruchte Teile, insbesondere bei Bauteilen für dekorative anodische Oxidation. Alle weiteren Werkstoffe für höher beanspruchte Teile, z. B. Wagenkasten. Gut schweißbar mit SG- <chem>AlMg4,5MnZr</chem> , SG- <chem>AlMg4,5Mn</chem> und SG- <chem>AlMg5</chem> . Bei Bauteilen für dekorative anodische Oxidation ist SG- <chem>AlMg5</chem> zu verwenden. Festigkeitsabfall in der Wärmeinflusszone beachten. Die Werkstoffe EN AW-6005A, EN AW-6060 und EN AW-6106 sind sehr gut strangpressbar, komplizierte Mehrkammerhohlprofile mit kleinsten Wanddicken sind möglich. EN AW-6082 ist gut strangpressbar. Im Zustand kaltausgehärtet T4 können die Werkstoffe kalt umgeformt werden.
EN AW-6005A-T6 (Hohlprofile) ^a	lösungsgeglüht und warmaus- gelagert	5	10	260	–	215	6	–	165	115	
		10	25	250	–	200	6	8	165	115	
		–	5	255	–	215	6	–	165	115	
		5	15	250	–	200	6	8	165	115	
EN AW-6060-T66 ^a	lösungsgeglüht und warmaus- gelagert	–	3	215	–	160	6	–	110	65	
		3	25	195	–	150	6	8	110	65	
EN AW-6082-T6 ^a	lösungsgeglüht und warmaus- gelagert	–	5	290	–	250	6	–	185	125	
		5	25	310	–	260	8	10	185	125	
EN AW-6106-T6 ^a	lösungsgeglüht und warmaus- gelagert	–	10	250	–	200	6	–	160	95	

^a Die Festigkeitseigenschaften dürfen durch Abschrecken an der Presse erzielt werden.

^b Wenn der Querschnitt eines Profils sich aus unterschiedlichen Dicken zusammensetzt, denen verschiedene Werte der Festigkeitseigenschaften zugeordnet sind, gelten jeweils die niedrigsten festgelegten Werte für gesamten Querschnitt des Profils.

Folgende Legierungen werden für den Einsatz bei Schienenfahrzeugen empfohlen:

Strangpressprofile:	EN-AW-6005A, EN AW-6082, EN AW-6060, EN AW-6106
Bänder, Bleche und Platten:	EN AW-5083, EN AW-5454, EN AW-5754, EN AW-6082
Aluminiumguss:	EN AC 21000, EN AC 42000, EN AC 43300, EN AC 51300
Schmiedeteile:	EN AW-5754, EN AW-5083, EN AW-6005A, EN AW-6082.

Bei Halbzeugen der Legierung EN AW-7020 (AlZn_{4,5}Mg₁) existiert ein Risiko in Bezug auf Spannungsrisskorrosions- bzw. Schichtkorrosionsempfindlichkeit.

Unter Berücksichtigung der konstruktiven Gegebenheiten bei Schienenfahrzeugen und den Unsicherheiten bezüglich der Einflüsse während des Betriebs wird bei Verwendung von EN AW-7020 im Schienenfahrzeugbau auf die Einhaltung der besonderen Verarbeitungsvorgaben und der empfohlenen Korrosionsschutzmaßnahmen der Aluminiumhersteller hingewiesen (z.B. Eloxieren, Beschichten, Lackieren, Wärmebehandlung). Für Neubaukonstruktionen wird daher auch vom Einsatz der Legierung EN AW-7020 abgeraten.

Folie Aluminium-Legierungen im Tragwerk

Al-Legierung

Al Mg Si (Serie 6000)



Al Zn Mg (Serie 7000)



Al Mg (Serie 5000) Al Cu (Serie 2000)



1927

1960

1971

1978

1991

2000

(Quelle: nach Schlimbach: ZEVrail Glas. Ann. (2004) Sonderheft Graz)

Folie Vergleich Aluminium-Legierungen (I)

Legierung	AlMg (Serie 5000)	AlMgSi (Serie 6000)	AlZn (Serie 7000)
Aushärtbarkeit	nicht aushärtbar (naturhart)	aushärtbar <ul style="list-style-type: none"> • kalt- und warmaushärtend (Warm-aushärtung → höhere Festigkeiten) • Kaltumformung (Recken) sofort nach Abkühlen beschleunigt Aushärtungsvorgang 	aushärtbar <ul style="list-style-type: none"> • Auslagerung bei Raumtemperatur → nach 3 Monaten wieder Festigkeitswerte des kaltausgehärteten Zustands)
Festigkeit	höchste Festigkeiten bei naturharten Alu-Legierungen (Mg erhöht Festigkeit)	geringere Festigkeiten als AlZnMg ↳ besser pressbar (dimensionierungsgerechte, gewichtsoptimierte Profile)	mittlere ... hohe Festigkeit ↳ mittlere Pressbarkeit (größere Wandstärken)
Schweißbarkeit	schweißbar	gut schweißbar (Festigkeitsabfall in der Wärmeeinflusszone)	günstige Schweiß Eigenschaften (erneutes Aushärten der WEZ ohne erneutes Lösungsglühen)
Weitere Eigenschaften	Korrosionsanfälligkeit bei <u>höheren</u> Mg-Gehalten (für interkristalline Korrosion anfällige Korngrenzenauscheidungen → Mg↓, Mn-Zusatz, Heterogenisierungsglühen)	am häufigsten angewendete aushärtbare Knetlegierung → die Legierung für Strangpressprofile	befriedigende Korrosionsbeständigkeit: <ul style="list-style-type: none"> • abhängig von Wärmebehandlung • geringe Verschlechterung durch Zn • Gefahr der Spannungsrisskorrosion (Einzelschäden z.B. U-Bahn Nürnberg)

Folie Vergleich Aluminium-Legierungen (II)

Legierung	AlMg (Serie 5000)	AlMgSi (Serie 6000)	AlZn (Serie 7000)
Wichtigste Vertreter	EN AW-5083 [AlMg4,5Mn]	<ul style="list-style-type: none"> • EN AW-6060-T66 [AlMgSi0,5-F22] → nur für untergeordnete Teile (Halter, Stangen, Rohre, ...) • EN AW-6005A [AlMgSi0,7] -T6 (-F26) → Profile 6...10 mm -T6 (-F27) → Profile ≤ 6 mm 	EN AW-7020 [AlZn4,5Mg1] <ul style="list-style-type: none"> • Stark kerbempfindlich • Starker alterungsbedingter Abfall der Ermüdungsfestigkeit • Einsatz nicht mehr empfohlen (DVS 1608)
Anwendungsbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • EN AW-5083 [AlMg4,5Mn]: <ul style="list-style-type: none"> – ICE 1/2-Mittelwagen, ICE 3, ICE-T: Bleche – BR 610: Bleche in Vorbauten u. Stirnwänden • EN AW-5049-H18 [AlMg2Mn0,8-F29]: S-Bahn Rhein/Ruhr 	<ul style="list-style-type: none"> • Tbis 875: Güterwagen mit 2 Radsätzen, Schiebewänden und Hubschiebedach <ul style="list-style-type: none"> – Dach, Seitenwände: AlMgSi – Untergestell: S355 • Strangpressprofile: <ul style="list-style-type: none"> – ICE 1/2-Mittelwagen, ICE3 → EN AW-6005A [AlMgSi0,7] – ICE T → auch EN AW-6060 [AlMgSi0,6] • Blechplatten: <ul style="list-style-type: none"> – ICE 3 → EN AW-6082 [AlMgSi1] 	<ul style="list-style-type: none"> • hochbeanspruchte Profile und Bleche der tragenden Struktur • reparaturträchtige Bereiche (bei Raumtemperatur aushärtend) • U-Bahn Berlin: EN AW-7020 [AlZnMg1, AlZn4,5Mg1] • S-Bahn Berlin • S-Bahn-Steuerwagen Bxf 796: EN AW-7020 [AlZn4,5Mg1] → Korrosionsprobleme durch Zn • ICE V Mittelwagen: u.a. EN AW-7020 [AlZn4,5Mg1]

Folie Einsatz von Aluminium-Profilen im Wagenkasten VT 11.5 DB

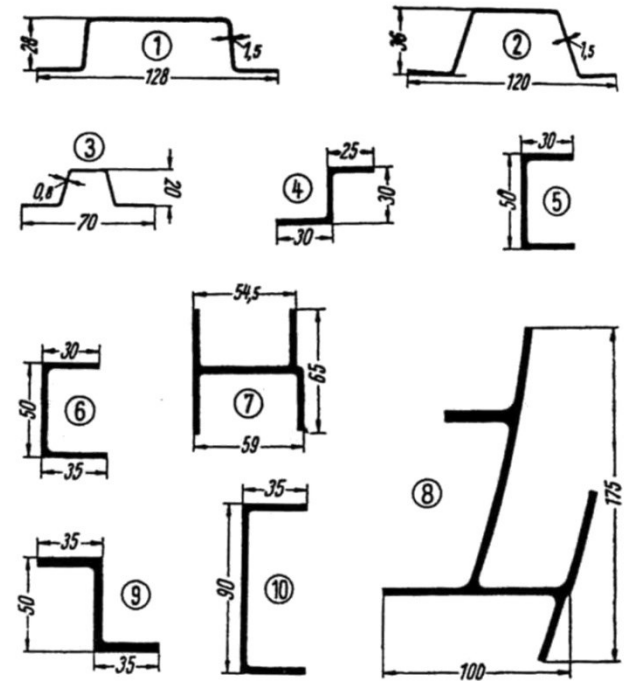
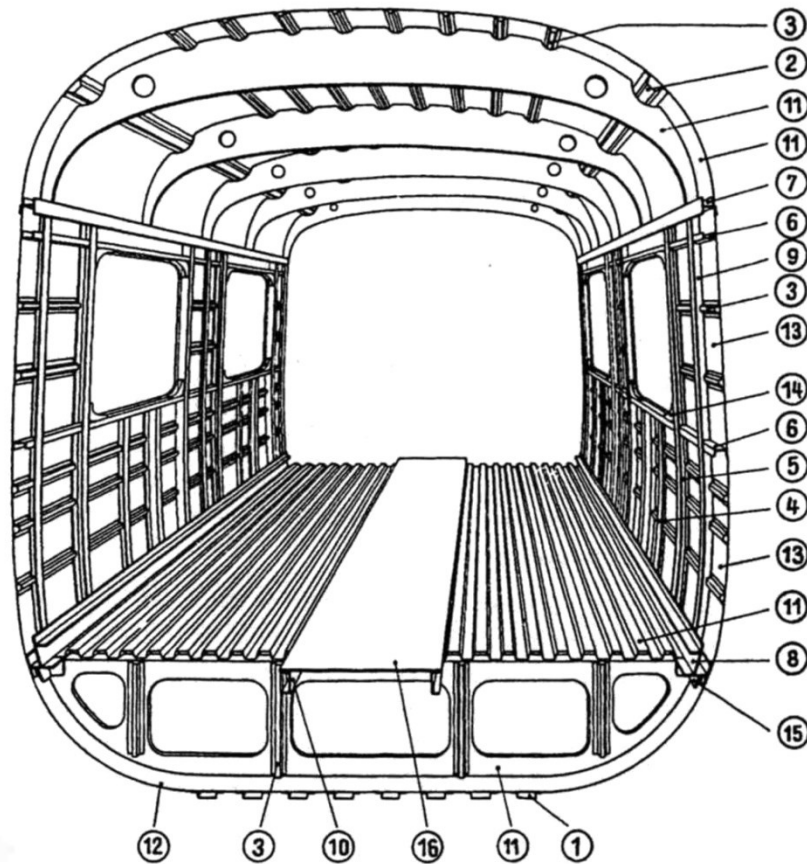


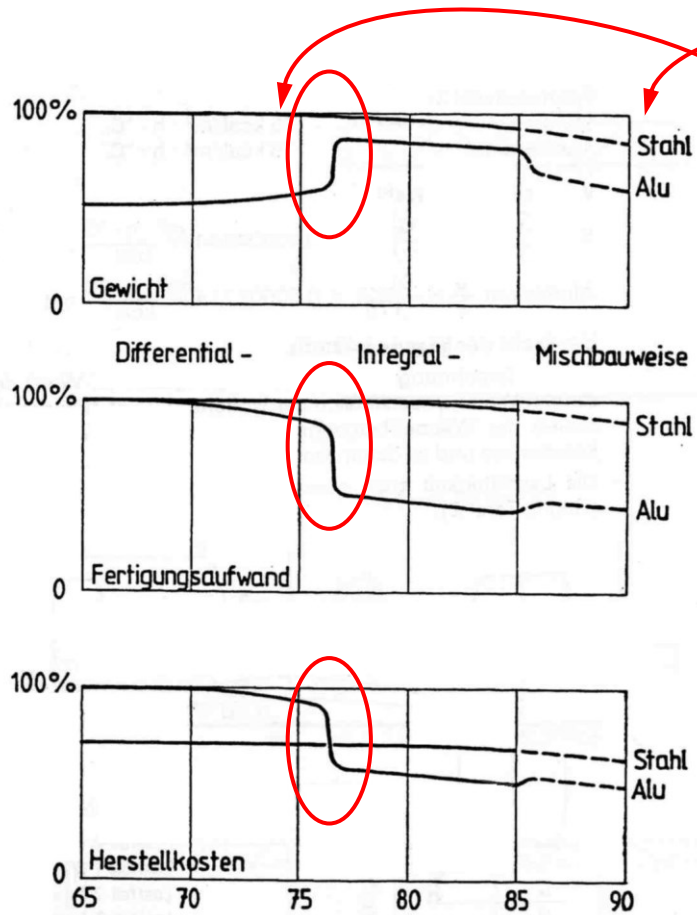
Bild 1: Schematische Darstellung des Wagenkastenaufbaus

Die Ziffern 1 bis 10 entsprechen den oben gezeigten Blech- bzw. Strangpreßprofilen (M. 1 : 5)

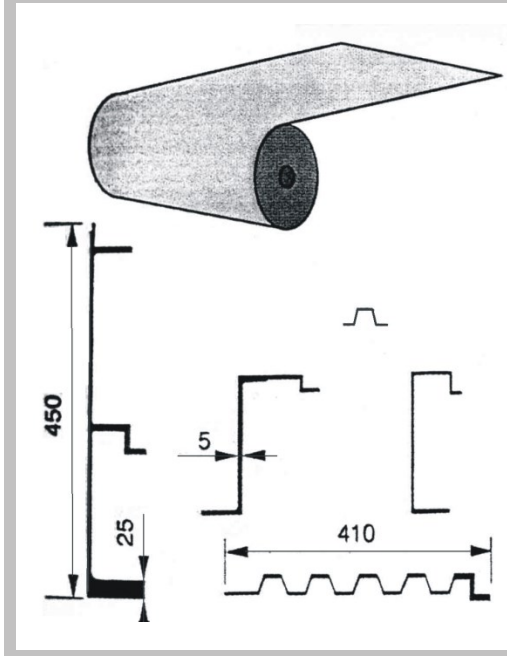
Die Ziffern 11 bis 16 entsprechen folgenden Wanddicken: 11 = 1,5 mm, 12 = 1,8 mm, 13 = 2,0 mm, 14 = 2,5 mm, 15 = 3,0 mm, 16 = 5,0 mm

(Quelle: Taschinger: Technische und wirtschaftliche Entwicklung der Aluminium-Schienerfahrzeuge, Symposium „Aluminium im Verkehr“, 1965)

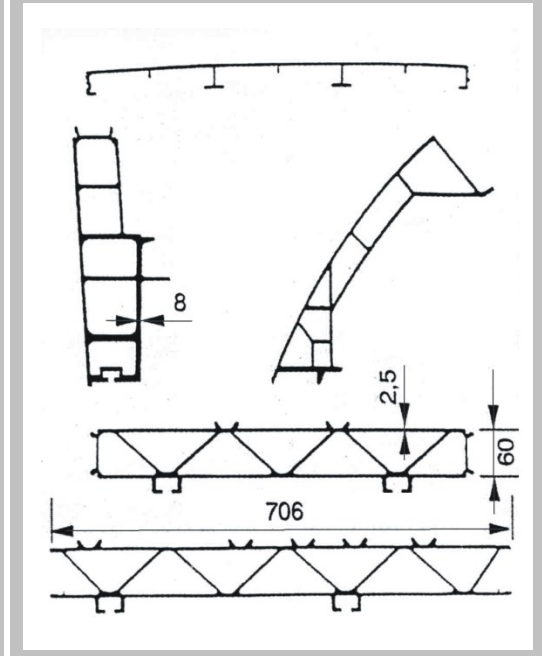
Folie Entwicklung des Einsatzes von Aluminium-Legierungen in Tragwerk



1974

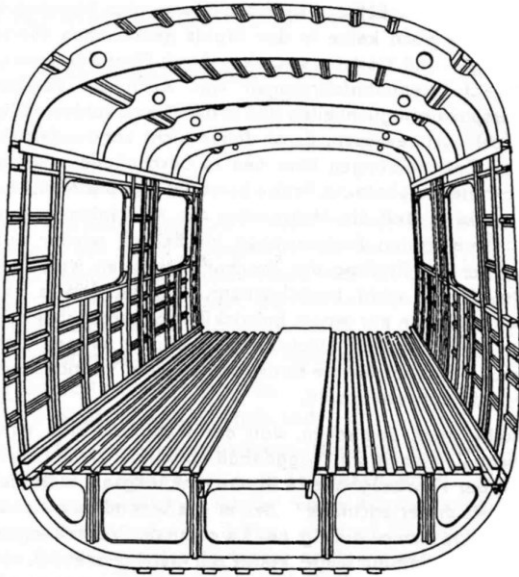


1991

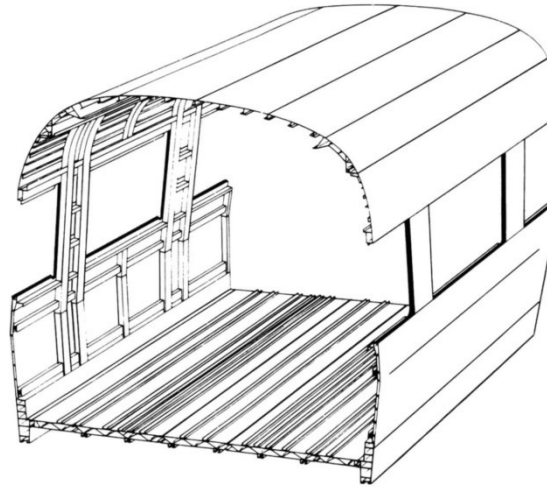


(Quelle: Hassel: ZEV-Glas. Ann. 111(1987)3; Buch Aluminium-Fahrzeuge)

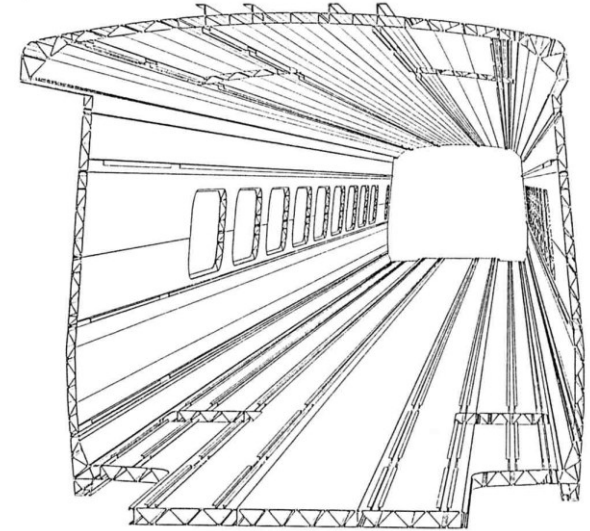
Folie Entwicklung zur Integralbauweise



VT 11.5 (TEE)
(1957)



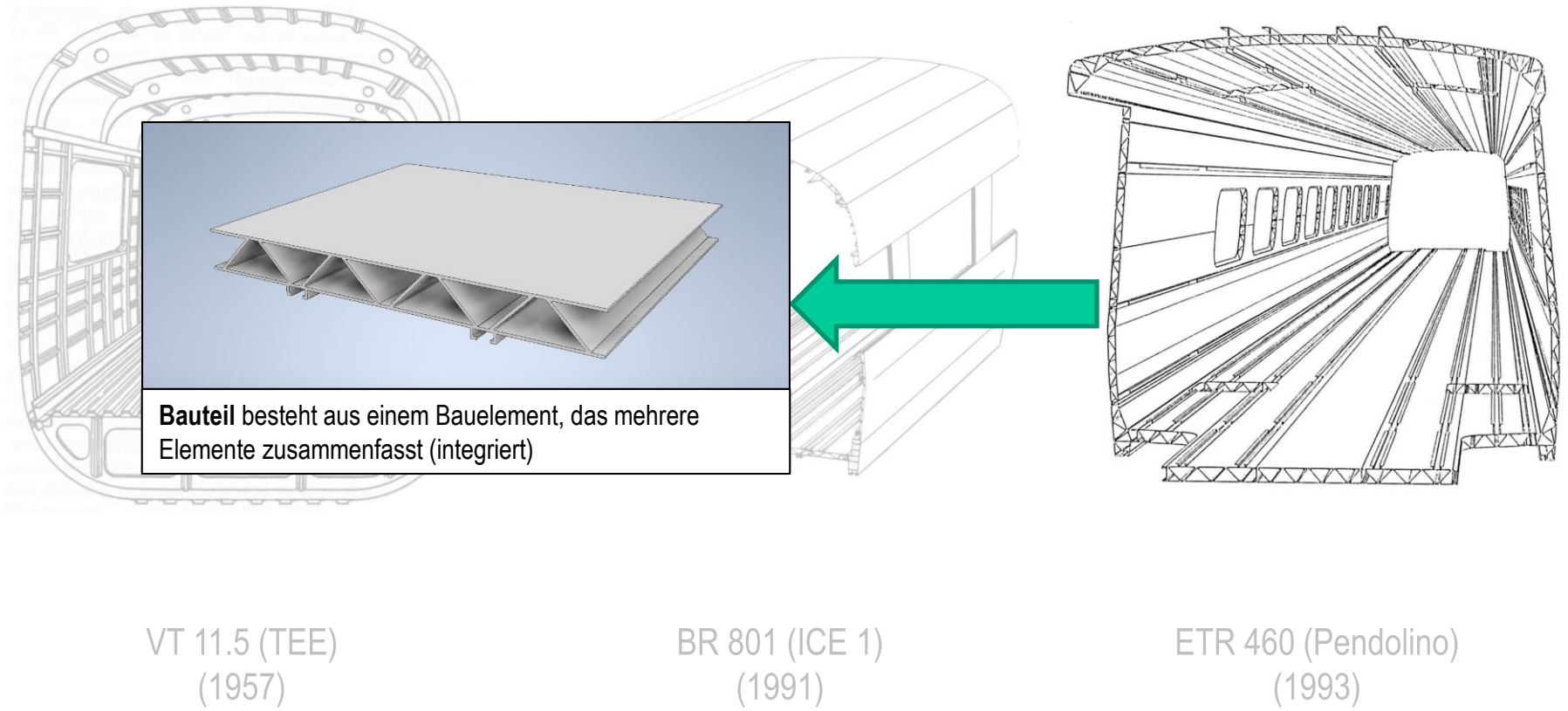
BR 801 (ICE 1)
(1991)



ETR 460 (Pendolino)
(1993)

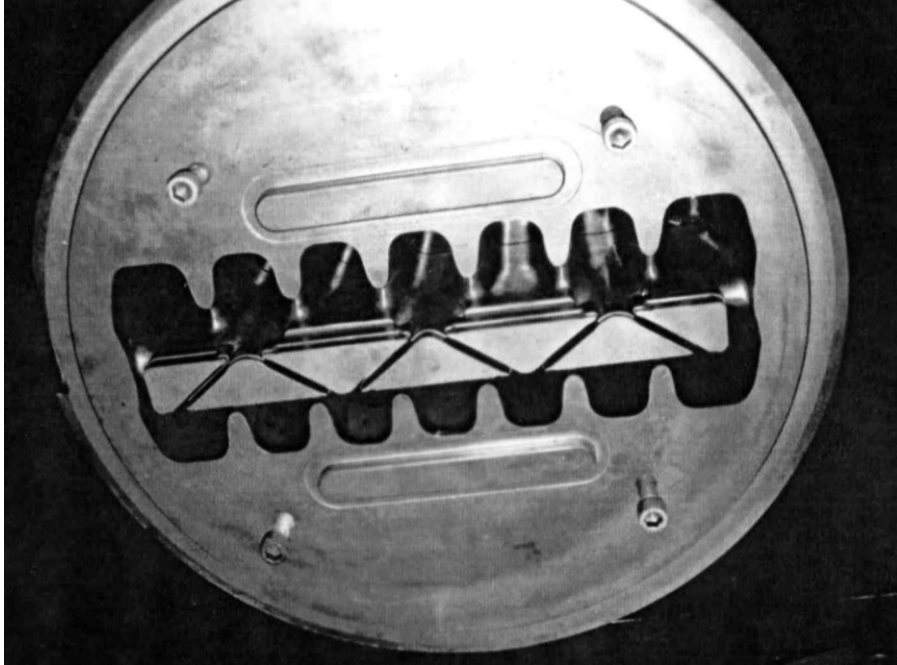
(Quelle: Taschinger; VAW; Elsner; Schnaas)

Folie Entwicklung zur Integralbauweise

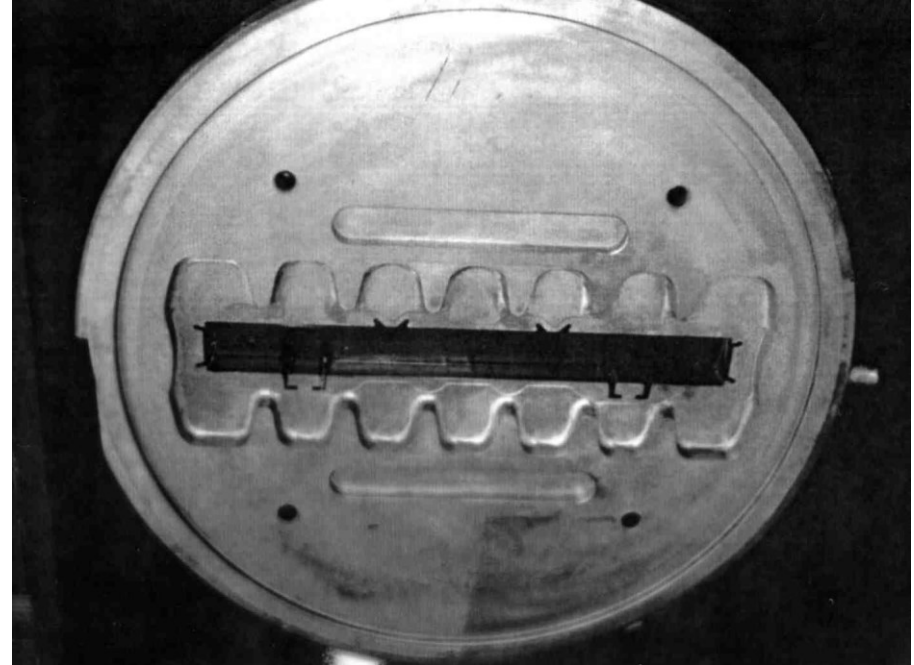


(Quelle: Taschinger; VAW; Elsner; Schnaas)

Folie Strangpressen von Hohlprofilen



Brückenwerkzeug



Stützwerkzeug

(Quelle: Dr. Ehinger)

Folie Vergleich Fertigungskosten Rohbau S-Bahn-Wagenkasten

(alle Werte ca.)		Stahl (ferrit./austenit. Stahl)	Aluminium	Alu/Stahl
Materialmasse	kg/m	540	350	60 %
Verschnitt	kg/m	160	50	30 %
Metermasse	kg/m	380	300	80 %
		———— - 80 kg/m ———→		
Fertigungsstunden	h/m	33	41	120 %
Materialpreis	DM/kg	1,7	8,6	510 %
Materialkosten	DM/m	918	3.010	330 %
Vorrichtungskosten	DM/m	420	590	140 %
Schweißmaterial	DM/m	32	66	210 %
Anstrichkosten	DM/m	1.600	1.200	80 %
Lohnkosten (75 DM/h)	DM/m	2.500	3.100	120 %
Fertigungskosten	DM/m	5.500	8.000	150 %
		—— + 2.500 DM/m ———→		

(Quelle: Köhler, 4.Fachtagung Konstr. und Fügen im Sfb-Bau, Halle/Saale 2001)

Tolerierbare Mehrkosten in DM pro eingespartem Kilogramm Masse,
bezogen auf das ganze Fahrzeug

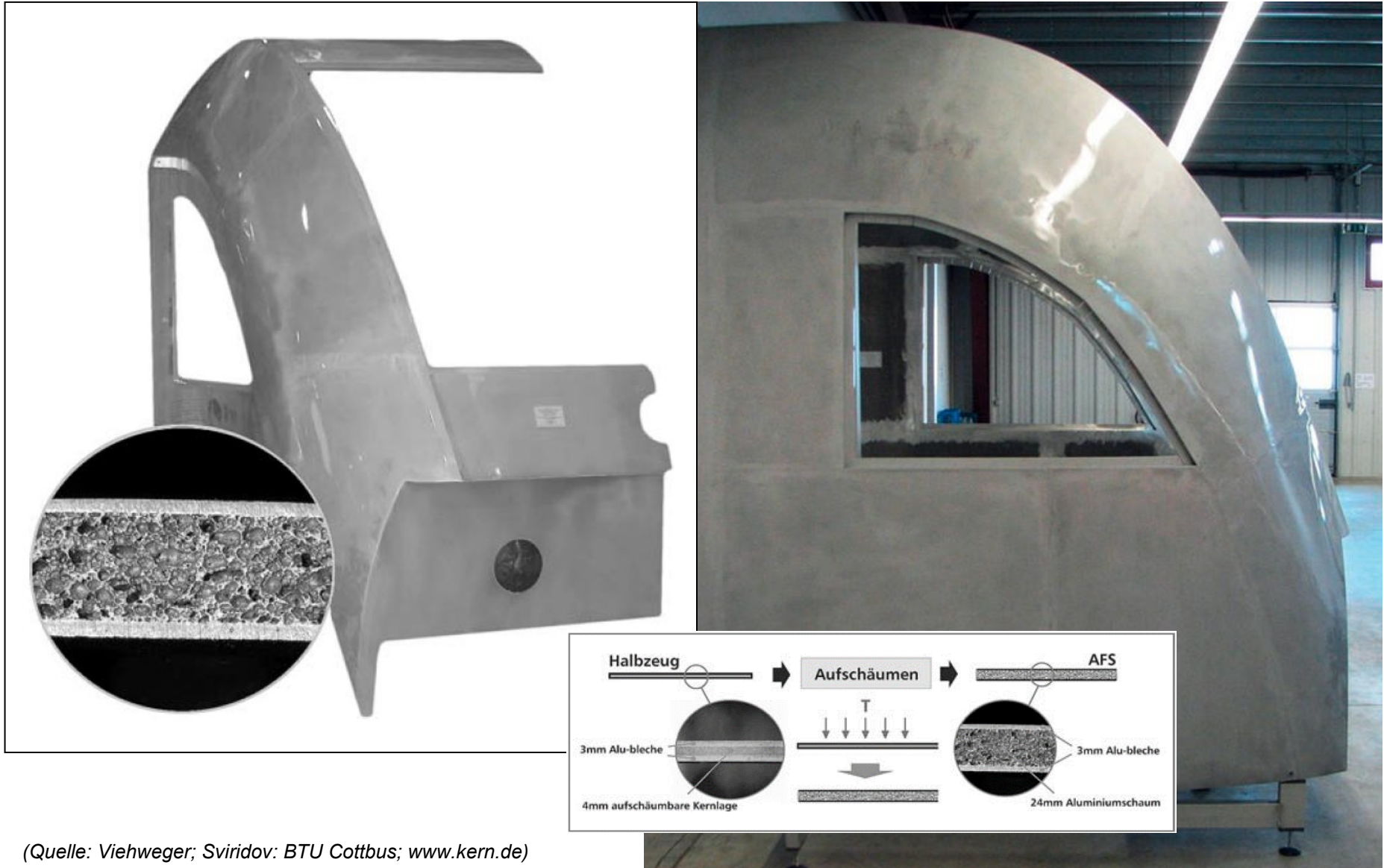
Verkehrsmittel	DM/kg
Pkw	10
Nahverkehrsschienenfahrzeug	40
Regionalflugzeug	500
Großraumflugzeug	1.000
Raumfahrt	10.000

Bsp.:

- **80 kg/m** durch Aluminium-Legierung eingespart (Differenz Metermasse)
- $80 \text{ kg/m} \times 40 \text{ DM/kg} = \mathbf{3.200 \text{ DM/m}}$ Mehrkosten zulässig
- Mehrkosten Bsp. **2.500 DM/m** → es rechnet sich!

(Quelle: Vortrag Ganzer, ETR 1994/H.12)

Folie Frontmodul aus Aluminiumschaumsandwich



(Quelle: Viehweger; Sviridov; BTU Cottbus; www.kern.de)

Folie Triebkopfhaube eines Schnellzuges



Raum Gewinn + 18% leichter

Verfügbarkeit sofort | demnächst | F&E-Thema

1,7 t

Alu + Stahl vorher

1,4 t

Aluminiumschaum nachher



schweißbar



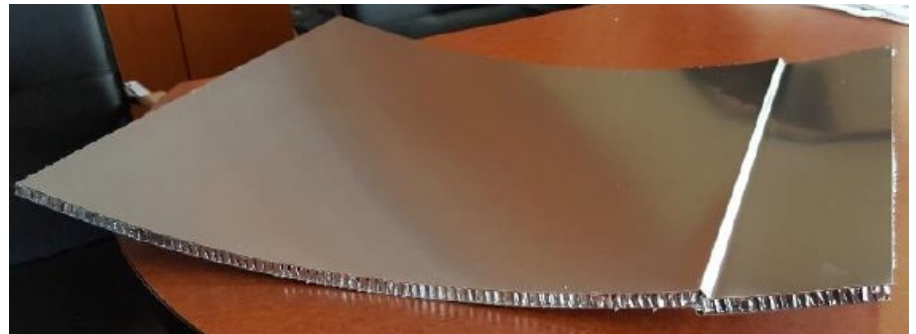
verschiedene Füge-technologien



Individuelle Formgebung

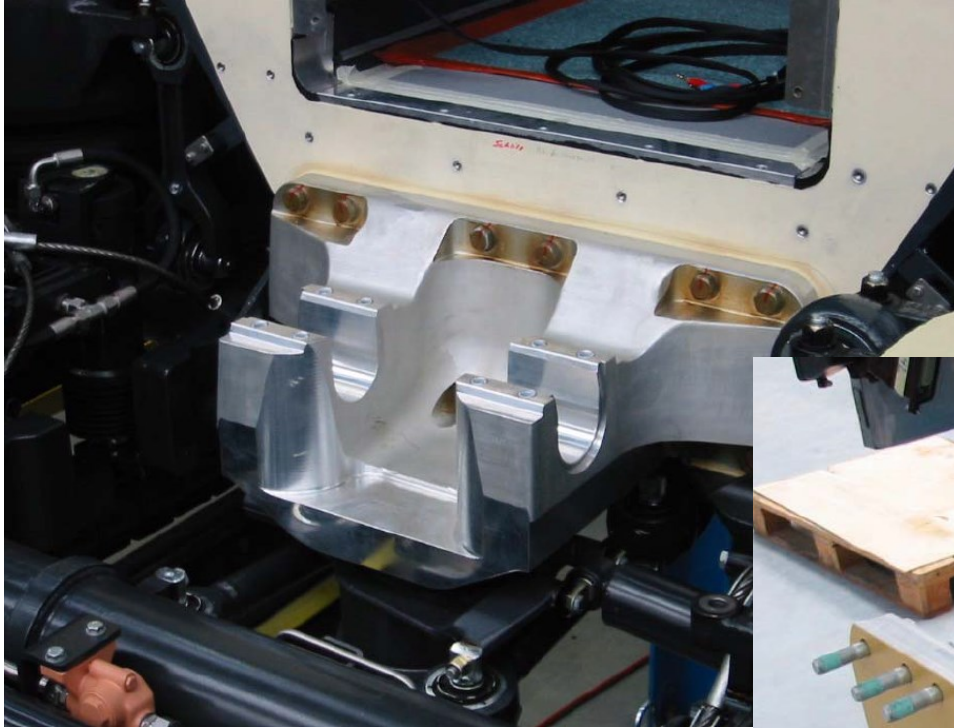
(Quelle: Havel metal foam: www.havel-mf.de)

Folie Paneele aus Wabenstrukturen

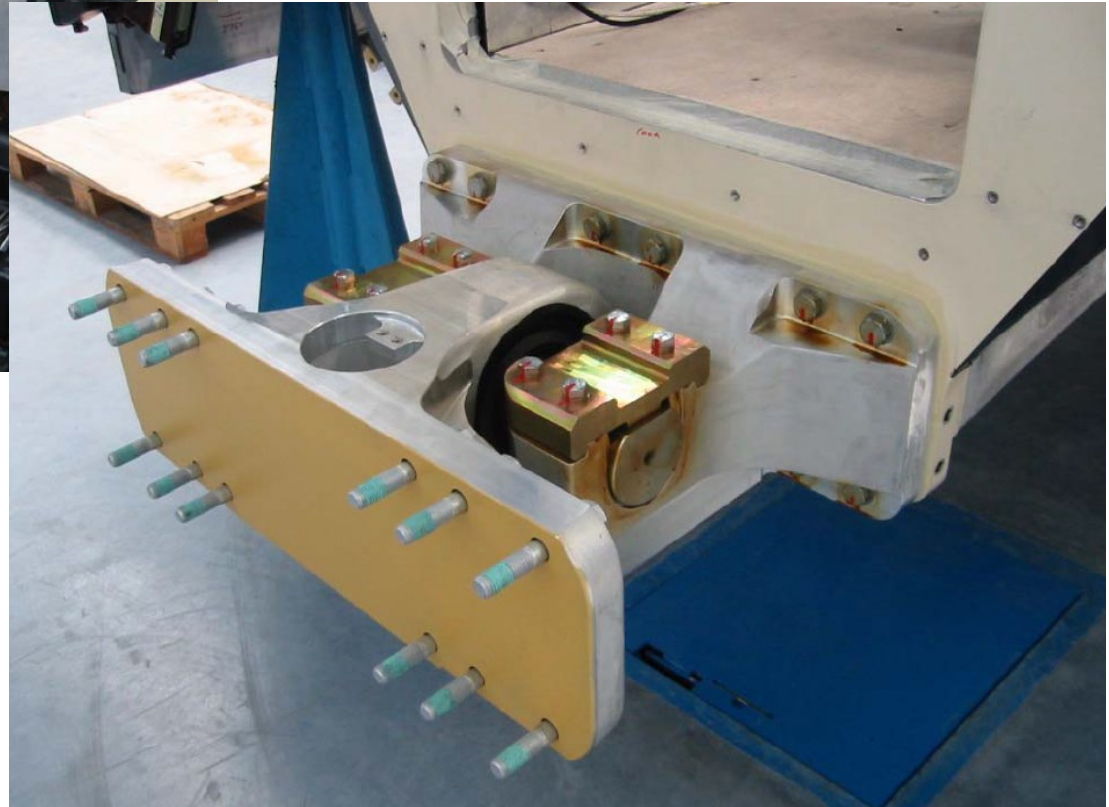


(Quelle: Vortrag N. Meyer, IWE GmbH & Co. KG, 12. Tagung „Fügen und Konstruieren im Sfz-bau“, SLV Halle 2017; INTAMIN Transportation)

Folie Gelenk FLIRT



Werkstoff: AlMgSi1
Masse Gelenk: ca. 166 kg (Stahl ca. 336 kg)
Fertigungsmethode: Gesenkschmieden



(Quelle: Leutenegger Engineering & Consulting)