

# Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik



## 03 Wagenkasten

Dr.-Ing. Michael Karatas

Siemens Mobility GmbH  
Krefeld-Uerdingen

[michael.karatas@siemens.com](mailto:michael.karatas@siemens.com)



## Überblick



- I. Einführung
- II. Zugförderung
- III. Wagenkasten**
- IV. Fahrtechnik / Systemkinematik
- V. Komfort
- VI. Antrieb
- VII. Bremse

## Gliederung



### Wagenkasten

- Einführung
- Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise
- Berechnung mit Auslegungsrelevanz

## Gliederung

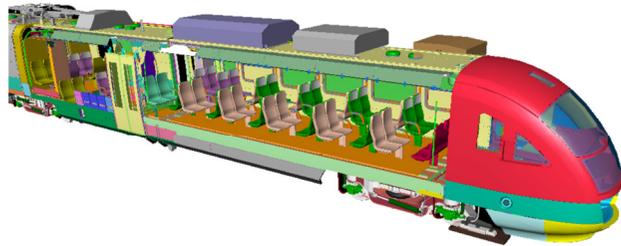


### Wagenkasten

- Einführung
- Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise
- Berechnung mit Auslegungsrelevanz

### 3.1 Einführung Allgemeines

Schnittdarstellung eines Schienenfahrzeugs



Quelle: Siemens

### 3.1 Einführung Allgemeines

Ein Zug ist ein mechatronisches System.



Quelle: Siemens



**Software**

- Antriebssteuerung
- Train Control (Zug- und Wagensysteme, HMI, Diagnose etc.)
- IT im Zug (FIS, WLAN, Fahrgastzählung etc.)

**Elektrik/Elektronik**

- Subsysteme Antrieb (Panto, Trafo, Umrichter, Motoren etc.)
- Subsysteme Hilfsbetriebeversorgung
- Verkabelung

**Mechanik**

- Wagenkasten
- Subsysteme (Türen, Klima, Sanitary, Sitze etc.)
- Fahrwerke

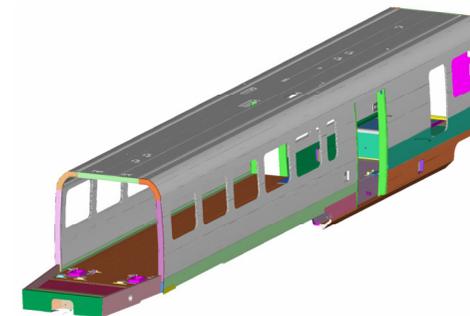
### 3.1 Einführung Allgemeines

Funktionsgruppen eines Schienenfahrzeugs nach EN 15380-2:2006

<b>BA Fahrzeugkasten</b>	DA Fahrzeuginneneinrichtung
BB Untergestell	EA Fahrwerk
BC Längswände	FA Energieanlage, Antriebsanlage
BD Dach	GA Steuerungsanlage für Fahrbetrieb
BE Fahrzeugkopf	HA Hilfsbetriebsanlage
BF Stirnwände	JA Überwachungs- und Sicherheitseinr.
BG Anschweißteile/Anbauteile	KA Beleuchtung
BH Zwischendecke, z.B. Doppelstockwagen	LA Klimatisierung
BJ Zwischenwände (tragende)	MA Nebenbetriebsanlage
<b>CA Fahrzeugausbau</b>	NA Türen, Einstiege
CB Fenster	PA Informationseinrichtungen
CC Fußboden	QA Pneumatik / Hydraulik
CD Innenverkleidung	RA Bremse
.	SA Fahrzeugverbindungseinrichtungen
.	TA Tragsysteme, Umschließungen
.	UA elektrische Leitungsverlegung
.	Z Profile und Standardteile

### 3.1 Einführung WK-Kastenaufbau und Werkstoffe

CAD-Darstellung eines Wagenkastens

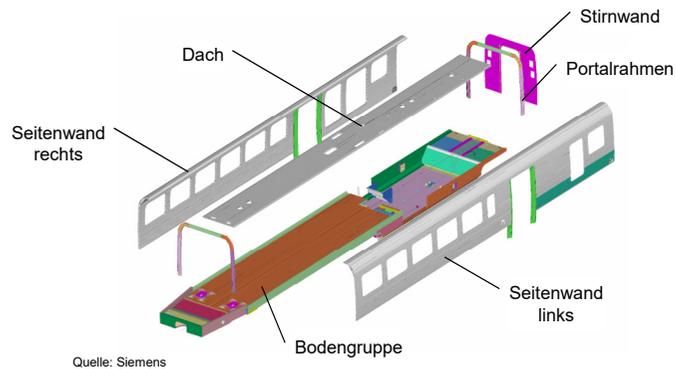


Quelle: Siemens

## 3.1 Einführung

### WK-Kastenaufbau und Werkstoffe

CAD-Darstellung der Hauptkomponenten eines Wagenkastens



## 3.1 Einführung

### WK-Kastenaufbau und Werkstoffe

#### ▪ Stahl

Sorten:

- Baustahl S355, St 37, St 52, Guß

Lieferformen:

- Standardprofile, Bleche, Gußteile

Anwendungen:

- Wagenkästen für Triebköpfe und Lokomotiven
- Wagenkästen für Reisezugwagen
- Drehgestelle und Rahmen für Unterflurgeräte, Wagengelenke

Kosten (durchaus schwankend, abhängig vom Weltmarkt):

- Stahl ca. 1 €/kg (2002), ca. 1,6 €/kg (2006), ca. 0,5 €/kg (2014),
- Edelstahl ca. 2 - 3 €/kg (2002), ca. 3,2 - 4,8 €/kg (2006), ca. 1 €/kg (2014)

## 3.1 Einführung

### WK-Kastenaufbau und Werkstoffe

#### ▪ Aluminium

Sorten:

- Knetlegierungen, z.B. AlMgSi0,7, Guss

Lieferformen:

- Strangpressprofile, Bleche, Gußteile

Anwendungen:

- Wagenkästen für Triebzüge, Kopf- und Mittelwagen
- Wagenkästen für Reisezugwagen

Kosten (ebenfalls vom Weltmarkt abhängig):

- Strangpressprofile ca. 5+x €/kg (einschließlich Werkzeugkosten bei großen Mengen)

## 3.1 Einführung

### WK-Kastenaufbau und Werkstoffe

#### ▪ Aluminiumlegierungen

Aluminium: Internationales Bezeichnungs-System

1000 Serie:	Mindestens 99% Aluminium, weich, kann kaltverfestigt werden
2000 Serie:	Kupferlegierungen, durch Wärmehärtung bis Stahlwerte, aber empfindlich für Spannungsrisskorrosion, wird durch 7000 Serie abgelöst
3000 Serie:	Mangan-Legierungen, kaltverfestigbar
4000 Serie:	Silizium-Legierungen
5000 Serie:	Magnesium-Legierungen, kaltverfestigbar, geeignet für tiefe Temperaturen
6000 Serie:	Magnesium-Silizium-Legierungen, leicht bearbeitbar, Wärmehärtung, nicht so hohe Festigkeitswerte wie 2000 oder 7000. (Standardmaterial für Rohbauten, geschlossene Strangpressprofile, z.B. 6005A: AlMgSi0,7 F26)
7000 Serie:	Zink-Legierungen, durch Wärmebehandlung höchste Festigkeitswerte aller Alu-Legierungen (findet auch Anwendung bei Rohbauten, Bleche, offene Profile)
8000 Serie:	hauptsächlich Lithium-Legierungen

### 3.1 Einführung WK-Kastenaufbau und Werkstoffe



#### Gegenüberstellung Stahl - Aluminium

	Vorteile	Nachteile
Stahl	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Festigkeit</li> <li>- Einfache Verarbeitung</li> <li>- Einfach schweißbar</li> <li>- Niedriger Preis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Dichte</li> <li>- Hohe Korrosionsneigung</li> </ul>
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niedrige Dichte</li> <li>- Geringe Korrosionsneigung</li> <li>- Preßbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Festigkeit</li> <li>- Hoher Preis</li> <li>- Aufwendige Verarbeitung</li> <li>- Spezielles Schweiß-Know-How</li> </ul>



### 3.1 Einführung WK-Kastenaufbau und Werkstoffe



#### Schweißverfahren

**MIG – Schweißen** (Metall-Inert-Gas) für NE-Metalle, Argon

**MAG – Schweißen** (Metall-Aktiv-Gas) für Stähle, CO<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub> und Argon

- Lichtbogen aus dem abschmelzenden Schweißdraht, kontinuierlich gefördert
- Gas umgibt den Lichtbogen für sehr hohe Geschwindigkeiten geeignet, bei guter Prozessbeherrschung auch gute Qualitäten
- MIG wird beim Schweißen von langen Nähten bei Großkomponenten eingesetzt

**WIG – Schweißen** (Wolfram-Inert-Gas) für alle Metalle

- Lichtbogen durch nicht abschmelzende Wolfram-Elektrode, umgebendes Schutzgas (Argon)
- Schweißdraht wird von der Seite zugeführt
- Für sehr hohe Qualitäten geeignet, sehr spritzerarm, geringere Schweißgeschwindigkeiten als MIG/MAG

**Elektrodenhandschweißen**

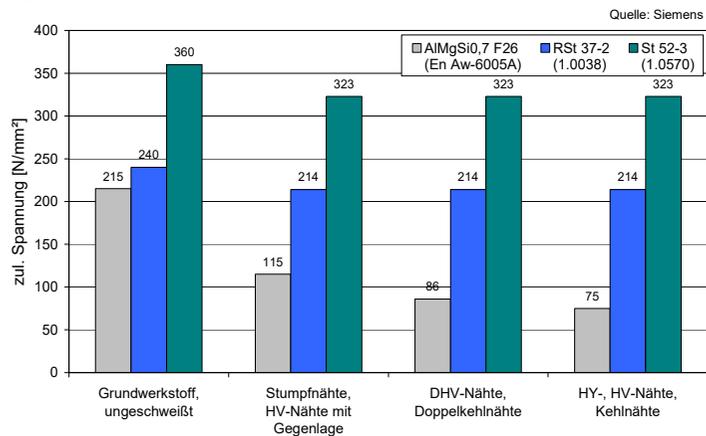
- Metallstab ist Schweißzusatz und Lichtbogenträger
- Umhüllung erzeugt abschirmende Gase und eine Stabilisierung des Lichtbogens



### 3.1 Einführung WK-Kastenaufbau und Werkstoffe



#### Festigkeitswerte unterschiedlicher Werkstoffe

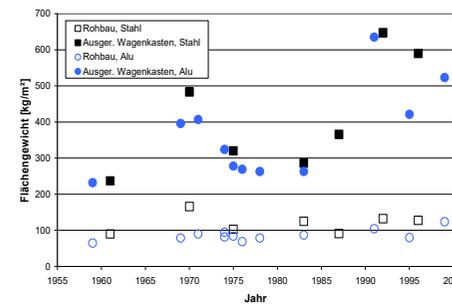


### 3.1 Einführung WK-Kastenaufbau und Werkstoffe

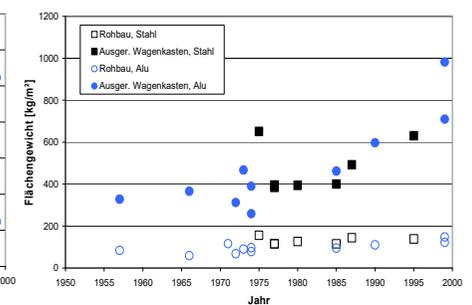


#### Entwicklung der Flächengewichte

##### Im Regionalverkehr



##### Im IC- und HGV-Verkehr



Quelle: Siemens

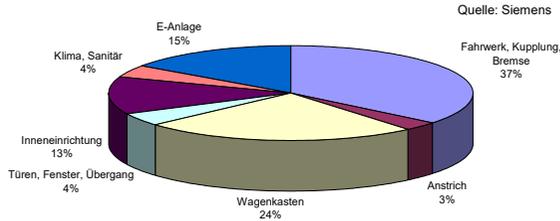


### 3.1 Einführung WK-Kastenaufbau und Werkstoffe

Massenverteilung im:

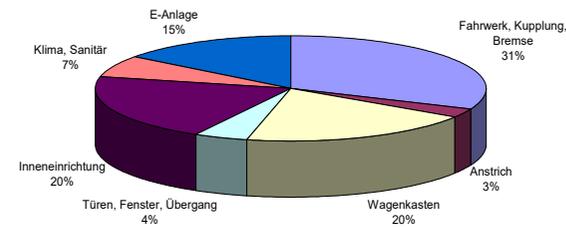
▪ **Regionalverkehr (LVT642)**

Bezug: Fahrzeuigeigengewicht 33000 kg



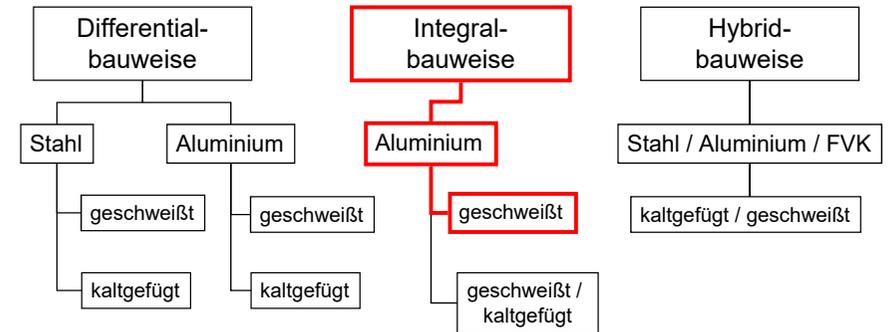
▪ **IC- und HGV-Verkehr (ICT)**

Bezug: Fahrzeuigeigengewicht 55000 kg



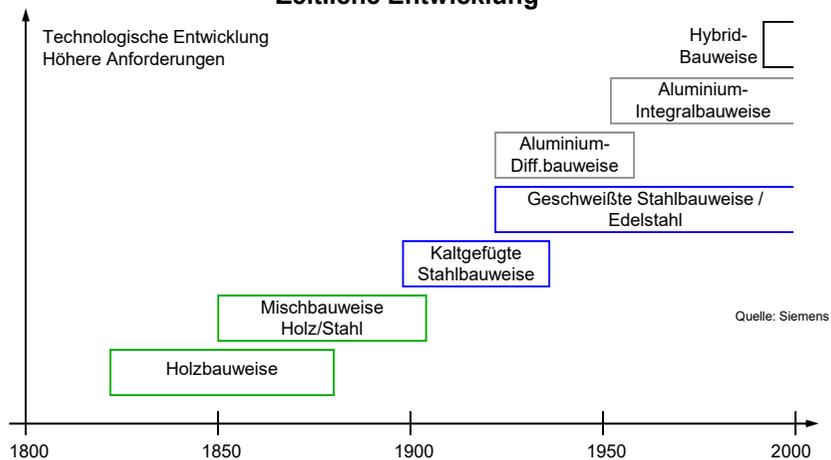
### 3.1 Einführung WK-Bauweisen

▪ **Übersicht**



### 3.1 Einführung WK-Bauweisen

**Zeitliche Entwicklung**

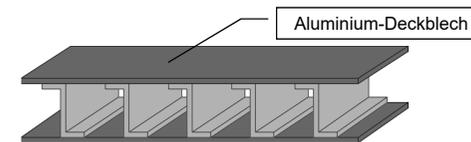


### 3.1 Einführung WK-Bauweisen

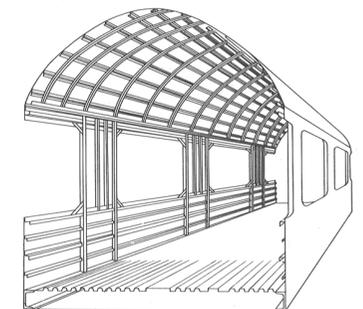
▪ **Differentialbauweise**

Definition:

„Ein Bauteil besteht aus der Verbindung einzelner Bauelemente“



Blechbeplanktes, geschweißtes Gerippe aus längslaufenden Stringern und umlaufenden Spanten



Beispiel Differentialbauweise

## 3.1 Einführung WK-Bauweisen

### ▪ Differentialbauweise

Vorteile:

- Verwendung von Stahl oder Aluminium möglich
- Auf Elementebene Verwendung von Standards (I, U-Profile, Bleche ...)
- Lokale Steifigkeitsanpassung
- Geringe Werkzeugkosten
- Einfache Fertigungstechnologie
- Einfache Reparatur

Nachteile:

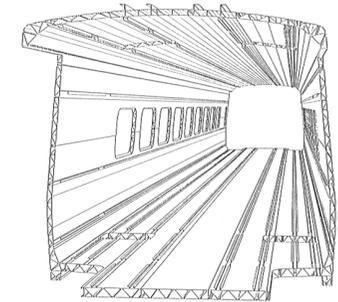
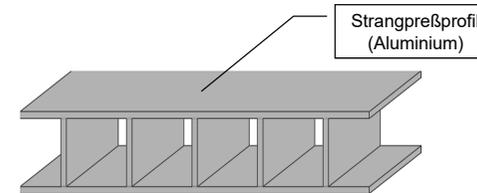
- Hoher Fertigungsaufwand durch hohe Teilezahl

## 3.1 Einführung WK-Bauweisen

### ▪ Integralbauweise

Definition:

„Ein Bauteil besteht aus einem Bauelement“



Beispiel Integralbauweise

Struktur aus Großprofilen mit anwendungsbezogenen Querschnittsformen ohne Teilung in Längsachse

## 3.1 Einführung WK-Bauweisen

### ▪ Integralbauweise

Vorteile:

- Geringer Fertigungsaufwand
- Automatisierbar
- Komplexes Außendesign durch individuelle Profilgestaltung

Nachteile:

- Strangpreßtechnologie nur für Aluminium verfügbar
- Hohe Material- und Werkzeugkosten durch individuelle Profilgestaltung
- Anspruchsvolle Fertigungstechnologie
- Keine Steifigkeitsänderung über Profillänge
- Hoher Aufwand im Reparaturfall

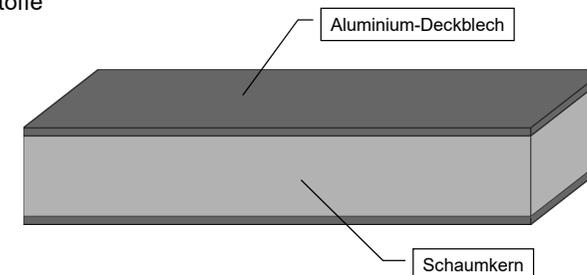
## 3.1 Einführung WK-Bauweisen

### ▪ Hybridbauweise

hybrid <lat.> (von zweierlei Herkunft; zwitterhaft)

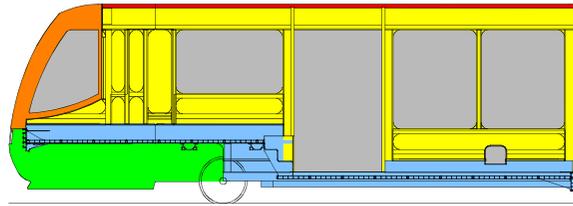
Definition:

„Ein Bauteil besteht aus einzelnen Bauelementen unterschiedlicher Werkstoffe“



### 3.1 Einführung WK-Bauweisen

Beispiel Hybridbauweise (RVT)



- Aluminium-Untergestell, geschweißt
- GFK-Sandwichkopf, geklebt
- Aluminium-Wände, geschraubt
- GFK-Sandwichschürzen, geschraubt
- Aluminium-Sandwichdach, geklebt

Die Entwicklung der Hybridbauweise für tragende Strukturen befindet sich erst am Anfang.

### 3.1 Einführung WK-Bauweisen

▪ Hybridbauweise

Werkstoffe

	Baustahl	Edelstahl	Aluminium	GFK unidirektional	CFK unidirektional
	S 355	X2CrNiN18-7	AlMgSi 0,7		
Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	7,85	7,9	2,7	2,6	1,8
E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]	210	200	70	40	115
Zugfestigkeit [MPa]	490 – 630	650 – 850	165 – 275	800 – 1.200	1.000 – 1.500
Bruchdehnung [%]	18	40	8		1,2
Wärmeausdehnung [10 <sup>-6</sup> /K]	11	17	23	7	0,14
Preis [€/kg]	0,5 – 1	2,5 – 3	5 – 6	3 – 5	30 – 50
Zugf./Dichte	≈ 75	≈ 100	≈ 75	≈ 380	≈ 700

### 3.1 Einführung WK-Bauweisen

▪ Hybridbauweise

Vorteile:

- Optimale Ausnutzung spezifischer Eigenschaften durch Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe
- Geringe Werkzeugkosten
- Geringer Verzug durch Kaltfügeverfahren

Nachteile:

- Anspruchsvolle Fügeverfahren
- Recycling nur bedingt möglich

### Gliederung

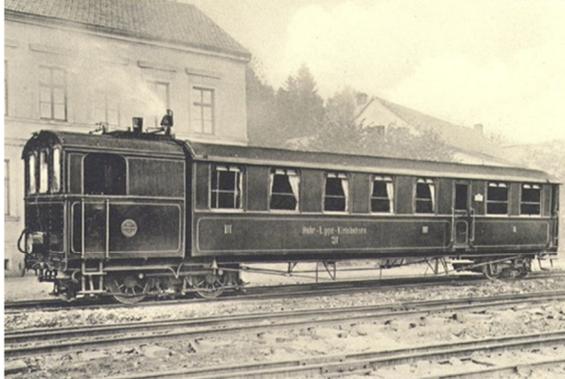
Wagenkasten

- Einführung
- Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise
- Berechnung mit Auslegungsrelevanz

## 3.2 Von der Stahl-Differential- zur Aluminium-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

### Dampfmotorwagen

2. und 3. Klasse



Quelle: Siemens

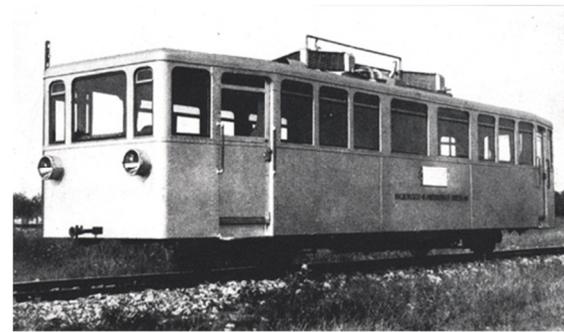
#### Technische Daten

Bauweise	Stahl-Differential
Spurweite	1 000 mm
Länge über Puffer	15 920 mm
größte Breite	2 650 mm
Sitzplätze 2. Klasse	12
Sitzplätze 3. Klasse	41
Lieferjahr	1907

## 3.2 Von der Stahl-Differential- zur Aluminium-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

### Diesetriebwagen

für die Halberstadt-Blankenburger Eisenbahn



Quelle: Siemens

#### Technische Daten

Bauweise	Aluminiumleichtbau.
	genietet
Wagenlänge	11 800 mm
Gewicht	10,4 t
Motorleistung	67 kW
	(6-Zylinder-Motor)
Sitzplätze	55
Stehplätze	15
Baujahr	1927

## 3.2 Von der Stahl-Differential- zur Aluminium-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

### Uerdinger Schienenbus VT 98 mit Steuerwagen VS 98



Quelle: Siemens

#### Technische Daten VT 98

Bauweise	Stahlleichtbau
Radsatzstand	6 000 mm
Wagenkastenlänge	12 750 mm
größte Höhe	3 300 mm
größte Breite	3 000 mm
Dienstmasse	18,9 t
Radsatzfahrmasse	unter 10 t (!)
Fußbodenhöhe über SO	1 140 mm
Dieselmotorleistung	2 x 110 kW
Höchstgeschwindigkeit	90 km/h
Anzahl der Sitzplätze VT / VS	65 / 40
Anzahl der Stehplätze VT / VS	38 / 54

## 3.2 Von der Stahl-Differential- zur Aluminium-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

### Diesetriebzug VT 628.0



Quelle: Siemens

#### Technische Daten

Bauweise	Stahlleichtbau	
Länge über Kupplungen	44 350 mm	
größte Wagenkastenbreite	2 883 mm	
größte Höhe über Antenne	4 164 mm	
Fußbodenhöhe über SO	1 220 mm	
Zahl der Sitzplätze	136	
Gesamtgewicht	77 t	
Motoren (wahlweise)		
	MB OM 404	2 x 210 kW
	KHD F12 L 413	2 x 206 kW
	MAN D 3256 BTXU	2 x 210 kW
Höchstgeschwindigkeit		120 km/h

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Die Generationen der VT 628-Baureihe

1972:	Entwicklung VT 628.0 und VT 627.0 - Prototypen begonnen
1974-75	Bau von 12 „Prototyp“-Fahrzeugen
1980	Entwicklung VT 628.1 - Prototyp begonnen
1982:	Bau von 3 „Prototyp“-Fahrzeugen
1983:	Entwicklung VT 628.2 begonnen
1986-89:	1. Serie von 150 Zügen (50 bei DUEWAG)
1989:	Weiterentwicklung zum VT 628.4 (Baureihe VT 628.3 gibt es nicht)
1991-95:	2. Serie von 189 Zügen (63 bei DUEWAG)

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Triebzug 628.0

Rohbau und Inneneinrichtung



Quelle: Siemens



## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Dieselhydraulischer Triebwagen VT 628.1



Quelle: Siemens

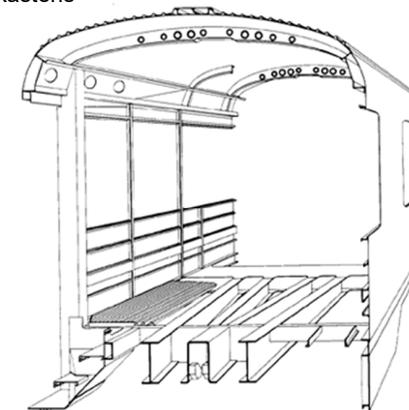
Technische Daten	
Bauweise	Stahlleichtbau
Gesamtlänge über Puffer (zweiteilig)	45 150 mm
größte Breite	2 850 mm
größte Höhe über SO	4 154 mm
Fußbodenhöhe über SO	1 210 mm
Zahl der Sitzplätze (zweiteilig)	128 (plus 21 Klappsitze)
Dienstgewicht	70 t
Antrieb	1 wassergekühlter, aufgeladener 12-Zyl.-Dieselmotor
Höchstgeschwindigkeit	357 kW 120km/h

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### SPNV- VT 628/ VS 928

Struktur des Wagenkastens



Quelle: Siemens



## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Dieselhdraulischer Triebwagen 628.2 / 928.2



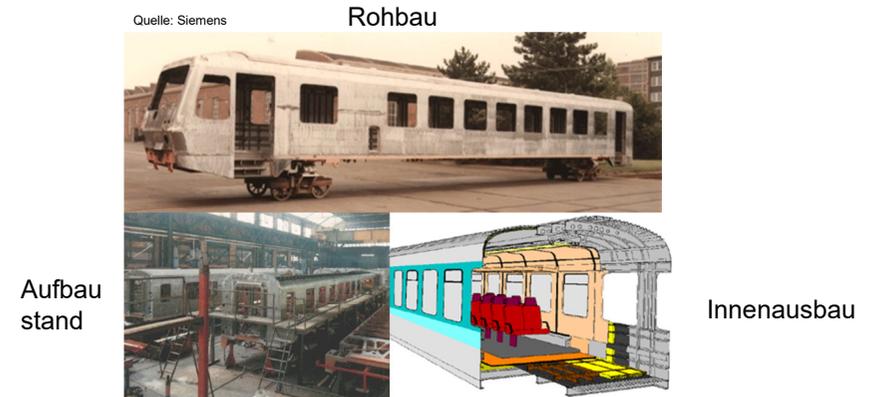
Quelle: Siemens

Technische Daten		Stahlleichtbau
Bauweise		Stahlleichtbau
Radsatzanordnung	2'B' + 2'2'	
Höchstgeschwindigkeit	120 km/h	
Gesamtlänge über Puffer	45.400 mm	
Länge des Wagenkastens	21.940 mm	
Drehgestellmittenabstand	15.100 mm	
Radsatzstand Drehgestelle	1.900 mm	
größte Breite	2.850 mm	
Fußbodenhöhe über SO	1.210 mm	
Zahl Sitzplätze 1. Klasse	10	
2. Klasse (+ Klappsitze)	112 (+21)	
Gesamtgewicht	67 t	
Höchstgewicht	91 t	
Motor	ein 12- Zylinder Dieselmotor, 410 kW bei 2.130 min <sup>-1</sup>	

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Dieselhdraulischer Triebzug 628.2 / 928.2



## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Zweiteiliger dieselhdraulischer Triebwagen 628.4/ 928.4



Quelle: Siemens

Technische Daten		Stahlleichtbau
Bauweise		Stahlleichtbau
Gesamtlänge über Puffer	46 400 mm	
größte Wagenbreite über Blech	2 850 mm	
Länge des Wagenkastens	22 440 mm	
Drehgestellmittenabstand	15 100 mm	
Fußbodenhöhe über SO	1 210 mm	
Sitzplätze 1. Klasse 628.4	-	
Sitzplätze 1. Klasse 928.4	12	
2. Klasse (+ Klappsitze) 628.4	64 (+ 8)	
2. Klasse (+ Klappsitze) 928.4	48 (+ 14)	
Eigengewicht 628.4	41,4 t	
Eigengewicht 928.4	29,0 t	
Höchstgewicht 628.4	56,8 t	
Höchstgewicht 928.4	44,0 t	
Höchstgeschwindigkeit	120 km/h	

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Zweiteiliger dieselhdraulischer Triebzug 628.4 / 928.4

Motorwagen und Steuerwagen / Rohbau



Quelle: Siemens

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Aluminium-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Dieselmehchanischer Triebwagen VT 642



Quelle: Siemens

#### Technische Daten

Bauweise	Aluminiumleichtbau
Höchstgeschwindigkeit	120 km/h
Dieselmotorleistung	2 x 257 kW
Eigengewicht	ca. 64 t
Radsatzfolge	B'(2)B'
Gesamtlänge über Kupplung	41 700 mm
Dachscheitelhöhe über SO	2 830 mm
Fußbodenhöhe über SO	575 mm
Zahl der Sitzplätze	123
1. Klasse	12
2. Klasse / Klappsitze	98 / 13
Baujahr	1998
Stückzahl	150

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Aluminium-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

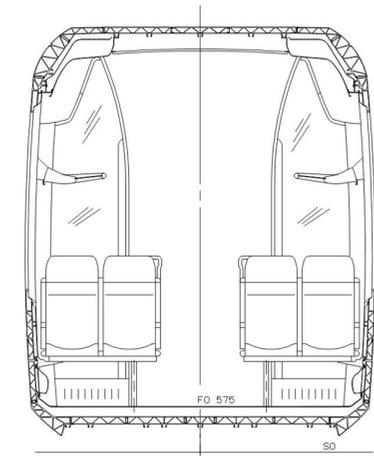


### VT 642.5/642.0

#### Querschnitt Niederflur 2. Klasse



GFK- Kopf



Quelle: Siemens

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Aluminium-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Zweiteiliger dieselelektrischer Triebzug VT 610



Quelle: Siemens

#### Technische Daten

Bauweise	Aluminiumintegralbauw.
Wagenlänge über Blech	51.250 mm
größte Wagenbreite über Blech	2.852 mm
größte Wagenhöhe über Blech	3.850 mm
Fußbodenhöhe über Schienenoberkante	1.290 mm
Drehgestelle	3 Triebdrehgestelle, 1 Laufdrehgestell, FIAT jedes Triebdrehgestell mit 1 Trieb- und 1 Laufratsatz
Motorleistung	2 x 485 kW
Höchstgeschwindigkeit	160 km/h
Sitzplätze 1. Klasse / 2. Klasse	16 / 114
Neigungsrichtung	(max. Neigungswinkel 8°)
	FIAT

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Aluminium-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



### Zweiteiliger dieselelektrischer Triebzug VT 610

#### Wagenkastenrohbau vor der Lackierung



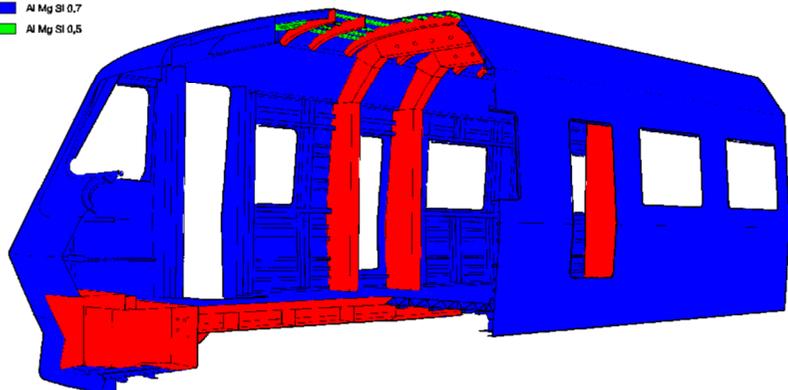
Quelle: Siemens

#### Innenansicht



### 3.2 Von der Stahl-Differential- zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

- Al Zn 4,6 Mg 1
- Al Mg Si 0,7
- Al Mg Si 0,5



Quelle: Siemens

### 3.2 Von der Stahl-Differential- zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

#### RegioSprinter

Rollout am 20 März 1995



Quelle: Siemens

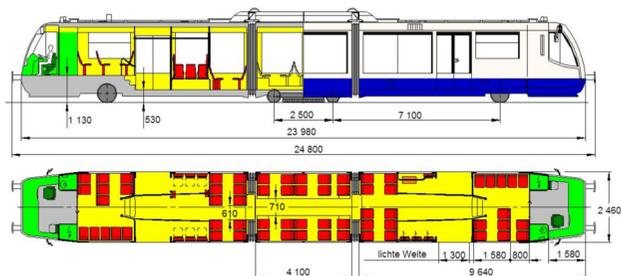
#### Technische Daten

Bauweise	3 tlg. geschweißter/geschraubter Alu-Wagenkasten mit Kunststoffkopf und Sandwichdecke
Behindertengerecht	ca. 70% Niederfluranteil; Rampen für Rollstuhlfahrer
Umweltfreundlich	Euro I bzw. Euro II-Motoren
Höchstgeschwindigkeit	100 km/h
Sitzplätze/Stehplätze	74/100
Fußbodenhöhe über Schienenoberkante	530/1 130 mm
Länge über Blech	23 980 mm
größte Breite	2 970 mm
Antrieb	dieselmechanisch (Euro I)
Eigengewicht	2x198 kW 31,5 t

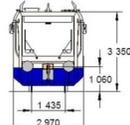
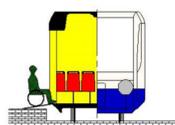
### 3.2 Von der Stahl-Differential- zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

#### RegioSprinter

Ansichten und Grundriß



Quelle: Siemens

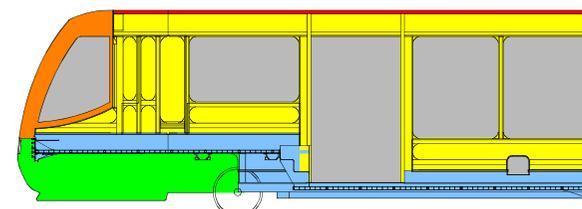


Sitzplätze	74
Stehplätze (4 Pers./m <sup>2</sup> )	100

### 3.2 Von der Stahl-Differential- zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

#### RVT Regionalverbrennungstriebwagen

Aufbau des Rohbauwagenkastens, Wagen 1 und 2



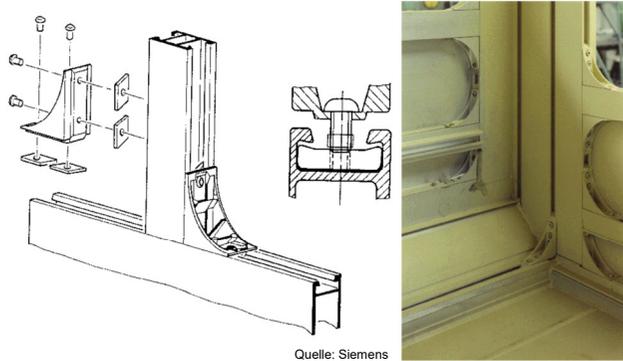
- Aluminium-Untergestell, geschweißt
- Aluminium-Wände, geschraubt
- GFK-Sandwichschürzen, geschraubt
- GFK-Sandwichkopf, geklebt
- Aluminium-Sandwichdach, geklebt

Quelle: Siemens

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



RVT Regionalverbrennungstriebwagen  
Schraubsystem Alusuisse-Lonza Railtec AG



Quelle: Siemens



## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)



RVT Regionalverbrennungstriebwagen  
Wagenkastenrohbau mit GFK-Sandwichkopf



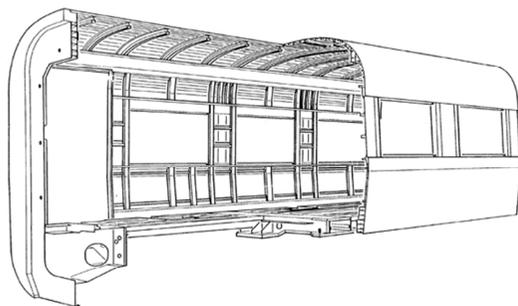
Quelle: Siemens



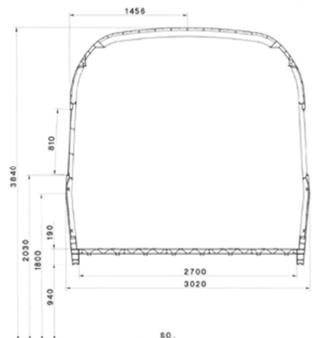
## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Hochgeschw. Züge)



ICE 1 - InterCity Express  
Mittelwagen, Struktur des Wagenkastens



Quelle: Siemens



## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Hochgeschw. Züge)



ICE 1 - InterCity Express  
Mittelwagen Avmz, Innenansicht des ersten Rohbaus



Quelle: Siemens

mit 3 Mittelwagen (1. Auslieferungsfahrt, 13.8.1990) DB



## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Aluminium-Integralbauweise (Hochgeschw. Züge)

ICE 2

2.-Klasse Mittelwagen, Wagengattung Bpmz, DB- Bauart 806.3



### Technische Daten

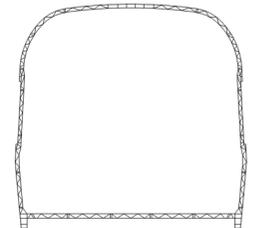
Bauweise	Aluminiumintegralbauw.
Länge über Kupplungsebene	26 400 mm
Drehzapfenabstand	19 000 mm
Wagenkastenlänge	25 600 mm
Wagenkastenbreite	3 020 mm
Fußbodenhöhe von SO	1 226 mm
Gesamthöhe	3 856 mm
Spurweite	1 435 mm
Maximale Geschwindigkeit $V_{max}$	280 km/h
Sitzplätze 2. Klasse	74

Quelle: Siemens

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Aluminium-Integralbauweise (Hochgeschw. Züge)



Wichtiges Funktionselement ist die C-Schiene



Quelle: Siemens

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Aluminium-Integralbauweise (Hochgeschw. Züge)

ICE 2

Mittelwagen, Innenausbau Isolierung



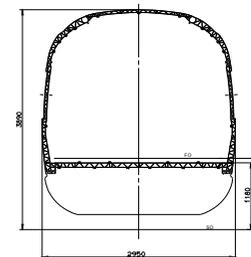
Quelle: Siemens

## 3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Aluminium-Integralbauweise (Hochgeschw. Züge)

ICE 3, Triebzug für den Hochgeschwindigkeitsverkehr, DB AG



Quelle: Siemens



### Technische Daten

Bauweise	Aluminiumintegralbauw.
Spurweite	1 435 mm
Zuglänge (8-teilig)	200 m
Breite	2 950 mm
Leergewicht des 8-teiligen Zuges (Ein-/Mehrsystem)	405 t/420 t
Stromsystem (Einsystem)	15 kV/16 2/3 Hz
Stromsystem (Mehrsystem)	15 kV/16 2/3 Hz, 25 kV/50 Hz, 1,5 kV DC, 3 kV DC
Leistung am Rad	8 000 kW
Höchstgeschwindigkeit	330 km/h
Anfahrzugkraft	300 kN
Bremssysteme	generatorische Bremse lineare Wirbelstrombremse Druckluftbremse mit Strahlbremsscheibe

## 3.2 Von der Stahl-Differential- zur Alu-Integralbauweise (Hochgeschw. Züge)

ICE 4, Triebzug für den Hochgeschwindigkeitsverkehr, DB AG



Technische Daten	
Bauweise	Stahl-Differential
Spurweite	1 435 mm
Zuglänge (12-teilig)	346 m
Breite	2 850 mm
Länge Mittelwagen	2790 mm
Leistung pro Powercar	9900 kW
Leistung (12-teilig) 6 Powercars	1650 kW
Höchstgeschwindigkeit	250 km/h



Quelle: Siemens

## Gliederung

### Wagenkasten

- Einführung
- Von der Stahl-Differential- zur Alu-Integralbauweise
- Berechnung mit Auslegungsrelevanz

## 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

- Statik

Forderung: „Der Wagenkasten muss alle auftretenden außergewöhnlichen Lasten ohne bleibende Verformung und alle Betriebslasten dauerhaft ertragen.“

Zulassungsvorschriften:

- DIN EN 12663: „Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen“
- UIC 566: „Beanspruchung von Reisezugwagenkästen und deren Anbauteilen“

Zusätzlich gelten die Angaben projektspezifischer Lasten-hefte.

## 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

### Lastfälle (Auszug)

Quelle: Siemens

Vertikallast	
Kupplungsdruck	
Anheben	
Außen- / Innen-druck	

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit



#### Beanspruchung der Wagenkästen

Prüfkräfte von Schienenpersonenfahrzeugen [DIN EN 12663]  
(Fahrzeugkategorie: z. B. Triebzugeinheiten)

außergewöhnliche (statische) Belastungen z. B. infolge Rangierstoß, Auffahren auf ein Hindernis,  
Anheben des Fahrzeugs, max. Betriebsgewicht

#### statische Kräfte auf den Wagenkasten in Längsrichtung

##### Druckkräfte

- 1.500 kN in der Höhe der Puffer
- 500 kN diagonal in der Höhe der (Seiten-)Puffer
- 400 kN 150 mm über der Oberseite des Bodens am Kopfstück
- 300 kN in Höhe der Fensterbrüstung
- 300 kN in Höhe des Obergurtes

##### Zugkraft

- 1.000 kN im Kupplungsbereich



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit



#### Statische Vertikalkräfte auf den Wagenkasten

##### maximales Betriebsgewicht

- $F_z = 1,3(m_1 + m_2)g$ 
  - $m_1$  = Masse des betriebsbereiten Wagenkastens
  - $m_2$  = Anzahl der Sitzplätze x 80 kg +  
Fläche des Ganges und der Vorräume  
[m<sup>2</sup>] x 4 x 80 kg
  - $g$  = Gravitationsbeschleunigung = 9,81 m/s<sup>2</sup>

##### einseitiges Anheben

- $F_z = 1,1(m_1 + m_3)g$ 
  - $m_3$  = Masse eines Drehgestells

##### beidseitiges Anheben

- $F_z = 1,1(m_1 + 2m_3)g$

#### Überlagerung statischer Längs- und Gewichtskräfte

- Pufferdruckkraft plus  $m_1g$  bzw.  $(m_1 + m_2)g$
- Zugkraft plus  $m_1g$  bzw.  $(m_1 + m_2)g$   
(ungünstigste Überlagerung ist dimensionierend)



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit



- Finite Elemente Methode (FEM)

Die Berechnung der Statik eines Wagenkastens erfolgt mit der Methode der Finiten Elemente:

- Beschreibung der Struktur durch kleine (finite) 2D- / 3D-Elemente („Gitternetz“)
- Elementeckpunkte sind Knotenpunkte mit sechs Freiheitsgraden
- Zusammenfassung aller Elemente liefert die (n x n) Steifigkeitsmatrix des Wagenkastens (n = Anzahl Knotenpunkte · 6)
- Lasten werden auf Knotenpunkte (Einzellasten) oder auf Elemente (Flächenlasten) aufgeprägt
- Ergebnis der Berechnung sind Verformungen, Spannungen, Eigenfrequenzen ...

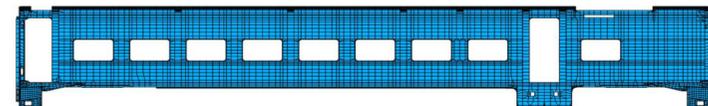
Die Berechnungsergebnisse sind durch einen Belastungsversuch nachzuweisen.



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit



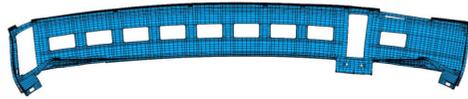
FE-Modell ICT-Mittelwagen



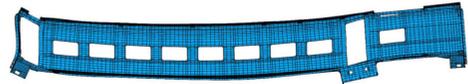
Verformung bei Vertikallast



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkei



Verformung bei Kupplungsdruck



Verformung bei einseitigem Anheben



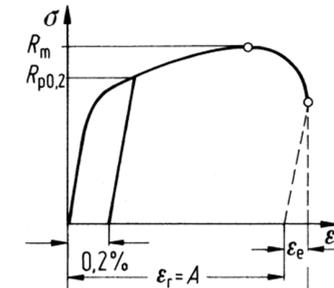
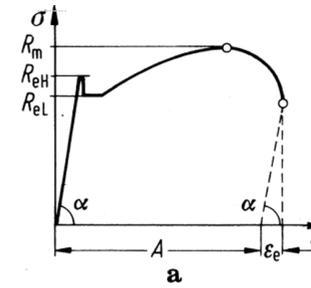
Verformung unter Innendruck

Quelle: Siemens

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkei

#### Statik, Werkstoffkennwerte

- Die statischen Materialkennwerte werden im Zugversuch ermittelt
  - a) ausgeprägte Streckgrenze
  - b) ausgeprägte Dehngrenze



Quelle: Dubbel

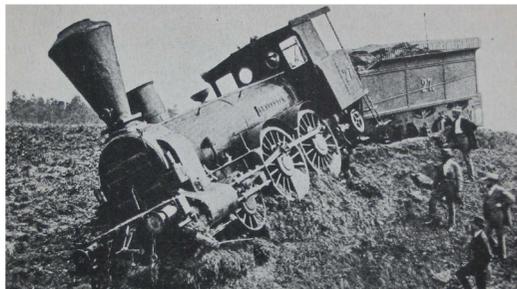
- $R_m$  - Zugfestigkeit
- $R_{p0,2}$  - 0,2%-Streckgrenze

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkei

#### Entgleisung der Lokomotive „Amstetten“

am 19. Okt. 1875 auf der Strecke Salzburg – Linz (Österreich)

Ursache der Entgleisung war ein gebrochener Radreifen, der der Dauerumlaufbelastung nicht standgehalten hatte. Die Tatsache, dass wechselbeanspruchter Werkstoff nicht so hoch belastbar ist wie statisch beanspruchter, war damals noch nicht bekannt.

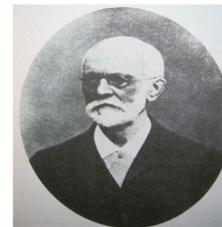


### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkei

In **Dauerschwingversuchen** wird die Schwingfestigkeit von Werkstoffen ermittelt: Zylindrische Versuchskörper werden mit einer sinusförmigen Spannungs-Zeit-Funktion

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \cos \Omega t$$

belastet, wobei Mittelspannung  $\sigma_m$  und Spannungsamplitude  $\sigma_a$  konstant bleiben. Beim Bruch der Probe oder beim Erreichen einer festgelegten Anzahl von Schwingzyklen wird  $\sigma_a$  über der Zahl  $N$  der ertragenen Schwingzyklen doppellogarithmisch aufgetragen. Diese Darstellung des Zusammenhangs zwischen Spannungsamplitude und Bruchlastspielzahl heißt **Wöhlerlinie**.



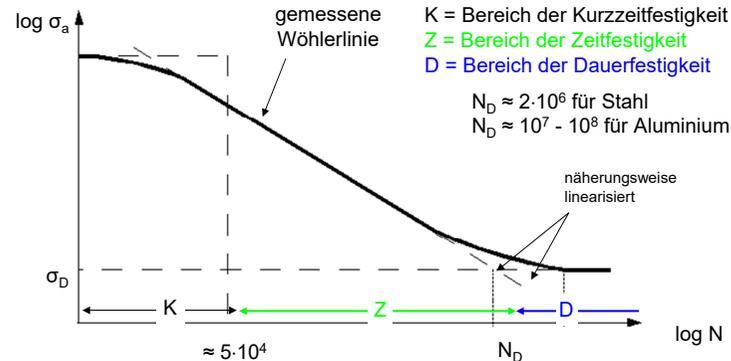
August Wöhler (1819 – 1914) führte zwischen 1858 und 1870 die ersten methodischen Schwingfestigkeitsversuche durch (Königlich Niederschlesische-Märkische Eisenbahn Frankfurt/Oder). Er erarbeitete die Grundlagen für die Methoden zur Ermittlung der Belastbarkeit dynamisch belasteter Werkstoffe.

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit



#### Dauerfestigkeit eines Werkstoffs

= Spannungsamplitude  $\sigma_D$ , die der Werkstoff bei schwingender Belastung dauerhaft (ohne Bruch, bleibende Schädigung oder Bauteilversagen) ertragen kann.



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit



**Kritische Strukturbereiche** müssen hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit berechnet werden.

Beispiele:

- ▶ **Krafteinleitungsstellen** (einschl. Halterungen für Ausrüstungsgegenstände)
- ▶ **Bauteilverbindungen** (wie Schweißnähte, Schraubverbindungen)
- ▶ **Geometrieänderungen**, die zu Spannungskonzentrationen führen (wie Tür- und Fensterecken)

Die Berechnung erfolgt (durch Handrechnung oder mit FE-Methode) auf

- ▶ **Dauerfestigkeit** oder
- ▶ **Betriebsfestigkeit.**

Art und Qualität der verfügbaren Daten beeinflussen, ob ein Dauerfestigkeitsnachweis oder ein Betriebsfestigkeitsnachweis geführt wird.

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit



Bei Wagenkästen von Schienenfahrzeugen handelt es sich in der Regel um geschweißte Strukturen, die dynamisch beansprucht werden. Daher ist die Dauerschwingfestigkeit der Schweißverbindungen zu berücksichtigen.

Maßgebend für die Art der Beanspruchung ist das Lastwechselverhältnis, d. h. das Verhältnis der kleinsten zur größten Spannung:

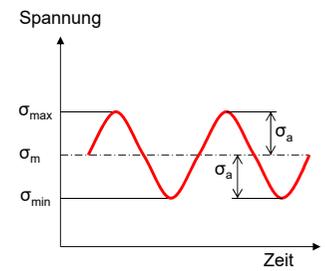
$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

- R = -1 ⇒ reine Wechselbeanspruchung
- R = 0 ⇒ reine Schwellbeanspruchung
- R = +1 ⇒ rein statische Beanspruchung

Die Größe des Spannungsausschlags

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$$

im Verhältnis zur Mittelspannung  $\sigma_m$  hängt von zahlreichen Fahrzeug-, Infrastruktur- und Betriebsparametern ab: z. B.  $\sigma_a / \sigma_m = 30\%$  ⇒ R = +0,54.



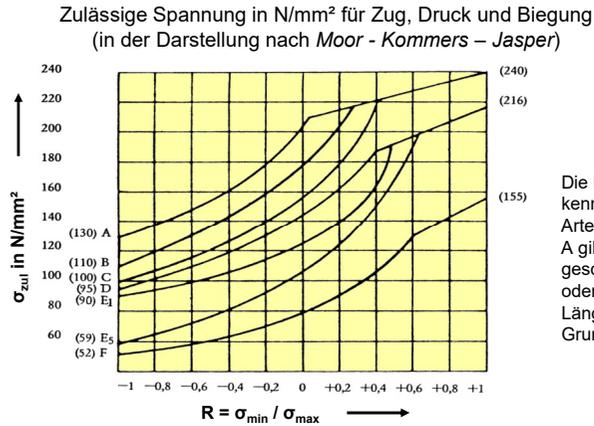
### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit



Werkstoff	Statische Werkstoffkennwerte in N/mm <sup>2</sup>				Schwingfestigkeitskennwerte in N/mm <sup>2</sup> (für 90% Überlebenswahrscheinlichkeit)					
	Zug		Biegung	Torsion	Wechselfestigkeitswerte			Schwellfestigkeitswerte		
	R <sub>m</sub>	R <sub>p0.2</sub>	σ <sub>b</sub>	τ <sub>b</sub>	σ <sub>ca</sub>	σ <sub>bw</sub>	τ <sub>w</sub>	σ <sub>z.Sch</sub>	σ <sub>b.Sch</sub>	τ <sub>Sch</sub>
Ck 35	650	420	540	270	250	310	180	400	470	270
Ck 45	750	480	620	310	300	370	210	480	550	310
40 Mn 4	900	650	720	410	350	430	260	560	660	410
34 Cr 4	1000	800	890	450	380	490	280	620	750	450
34 CrMo 4										
42 CrMo 4	1100	900	980	500	420	520	310	680	800	500
36 CrNiMo 4										
50 CrV 4	1200	1000	1080	520	440	550	340	720	850	520

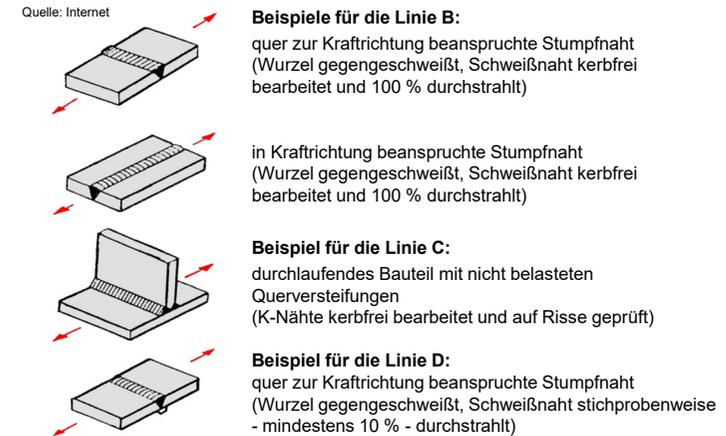
### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkei

#### Zulässige Spannung für Stahl S 355 (MKJ-Diagramm)



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkei

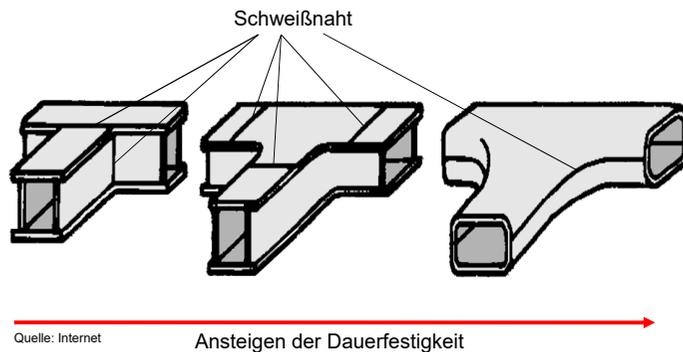
#### Dauerfestigkeit – Typische Arten von Schweißnähten



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkei

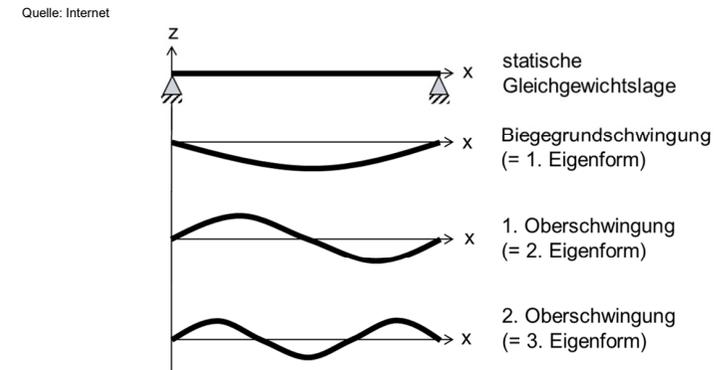
#### Schweißnahtinfluss auf die Dauerfestigkeit

Beispiel für funktionsgleiche Verbindungen mit unterschiedlicher Dauerfestigkeit



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Struktur

Die Benennung der Eigenformen orientiert sich am Schwingungsverhalten eines beidseitig gestützten Biegebalkens bzw. einfachen Drehschwingers.



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturmechanik



#### Modalanalyse des Wagenkastens

- Eigenfrequenzen jeweils im Frequenzbereich zwischen 10 Hz u. ca. 30 Hz
- Eigenschwingungsformen
- Keine Absolutwerte für Spannungen und Verformungen!

#### Erzwungene Schwingungen des Wagenkastens (hauptsächlich Anregung durch schlechte Gleislage)

- Beschleunigungen (und Geschwindigkeiten) interessierender Strukturpunkte ⇒ Komfortkennwerte
- Spannungen und Verformungen der Struktur

#### Modellierung

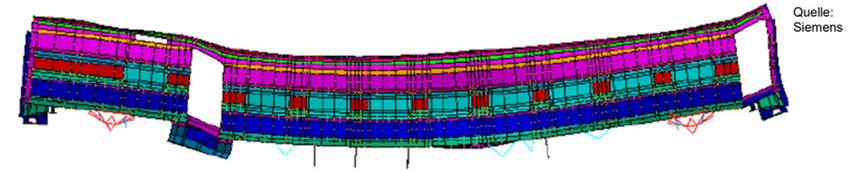
- massebehaftete Elemente (möglichst realistische Masseverteilung im Wagenkasten beachten)
- möglichst ganzen Wagenkasten modellieren (Halb- und Viertelstrukturen ungeeignet zur Modalanalyse)
- Modellierung des vollausgerüsteten Wagens sehr aufwendig



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturmechanik

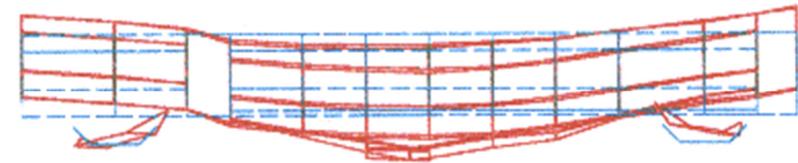


#### Vertikale Biegegrundschiwingung



Eigenfrequenz  $f = 10,75$  Hz

Rechnerische Modalanalyse mit ANSYS



Eigenfrequenz  $f = 11,75$  Hz

Messtechnische Modalanalyse



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturmechanik

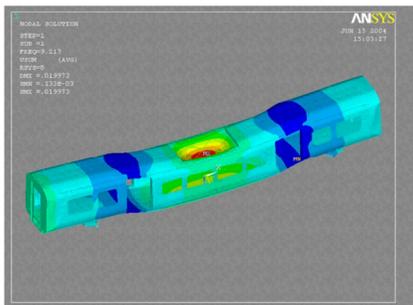


Vertikale Biegegrundschiwingung  
( $f = 9,2$  Hz)

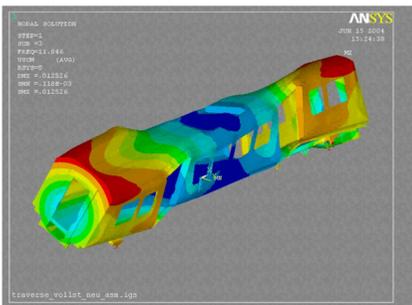
– EMU „Desiro UK“

Torsionsgrundschiwingung ( $f = 11,8$  Hz)  
um x-Achse

– EMU „Desiro UK“



Quelle: Siemens

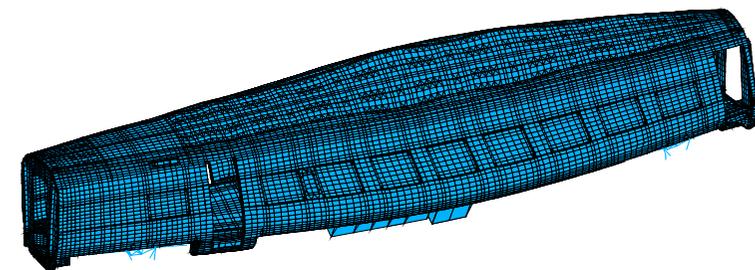


### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturmechanik



#### ▪ Eigenfrequenzanalyse

Dachquerschwiwingung ICT



Quelle: Siemens



### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturmechanik



- Zu jeder Eigenform gehört eine Eigenfrequenz. Eigenschwingungen sind harmonische Schwingungen (sin- bzw. cos-Schwingung).
- Eine Struktur mit z. B. 60.000 Freiheitsgraden hat auch 60.000 Eigenformen und Eigenfrequenzen.
- Technisch interessant sind nur die Eigenformen, bei denen die Struktur global verformt ist. Lokale Verformungen haben in der Regel eine sehr geringe Aussagekraft.
- Technisch interessant sind nur die Eigenfrequenzen bis ca. 30 Hz. (**aber**: Akustik ist ein separates Untersuchungsgebiet.)
- Dämpfung wird bei der rechnerischen Modalanalyse nicht berücksichtigt. Materialdämpfung führt jedoch in der Praxis dazu, dass es nicht zu Resonanzen mit Eigenfrequenzen höherer Ordnung kommt.
- Bei erzwungenen Schwingungen von Wagenkästen kommt es immer zu einer Überlagerung (Linearkombination) vieler Eigenformen.

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Crash



Zukünftige Projekte im Nah- und Fernverkehr lassen erhöhte Kundenanforderungen an die passive Sicherheit sowie verschärfte Zulassungsvorschriften erwarten.

Ziele verbesserter Crashesicherheit:

- Schutz des Fahrzeugführers und der Fahrgäste bei Unfall
- Reduzierung des Reparaturaufwands durch definierte Crashzonen

Simulationsverfahren:

- Verhalten der Fahrzeuge im Zugverband → eindimensionale Mehrmassensimulation
- Simulation der Energieabsorption der Fahrzeugstruktur → Crashsimulation mit FE-Modellen

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Crash



Unfallszenarien nach TSI, bzw. EN 15227

Die Vereinbarung zur Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeits-Bahnsystems (TSI) hat drei Kollisionsszenarien zur Fahrzeugauslegung vereinbart:

Szenario	Aufprallgeschwindigkeit	Auslegungskriterium
	10 m/s = 36 km/h	Führerstand nicht nennenswert beschädigt
	10 m/s = 36 km/h	Führerstand begrenzt beschädigt, Überlebensraum bleibt erhalten
	30,6 m/s = 110 km/h	Führerstand begrenzt beschädigt, Überlebensraum bleibt erhalten



Quelle: RP-Online am 07.12.2017, zum Auffahrunfall eines RE auf einen Güterzug bei Meerbusch am 05.12.2017

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Crash



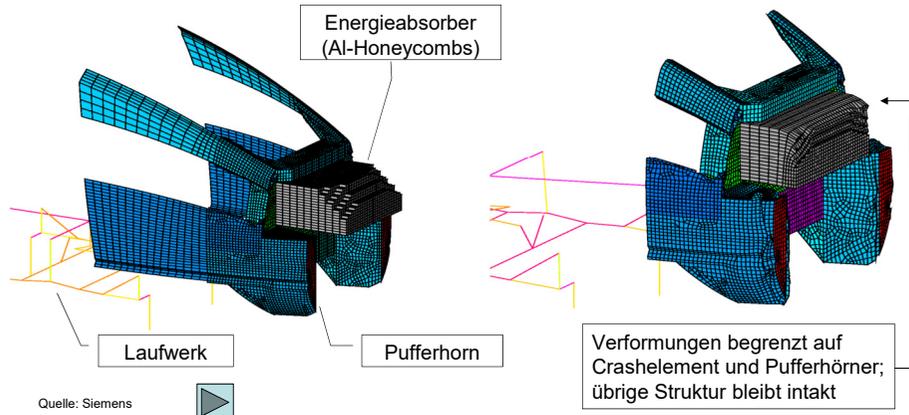
#### ▪ Kollisionsenergien

Das maximale Absorptionsvermögen durch definierte Crashabsorber beträgt pro Fahrzeugende 5 bis 10 MJ. Dies deckt alle statistisch relevanten Unfallszenarien ab.

v <sub>1</sub> [km/h]	Kollisionsenergie [MJ]					
	Einzelfahrzeug 68 t			Zug 400 t		
Crashgegner v <sub>2</sub> = 0	36	110	200	36	110	200
PKW (1 t)	0,05	0,46	1,52	0,05	0,47	1,54
LKW (15 t)	0,61	5,7	19	0,72	6,7	22
Güterwagen (80 t)	1,84	17	57	3,3	31	103
Zug (400 t)	2,91	27	90	10	93	309

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Crash

- Bugpartie eines Steuerwagens
- Verformte Bugpartie bei Aufprallgeschwindigkeit  $v = 10 \text{ m/s}$



Quelle: Siemens

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Aerodynamik

#### Aufgabenstellungen:

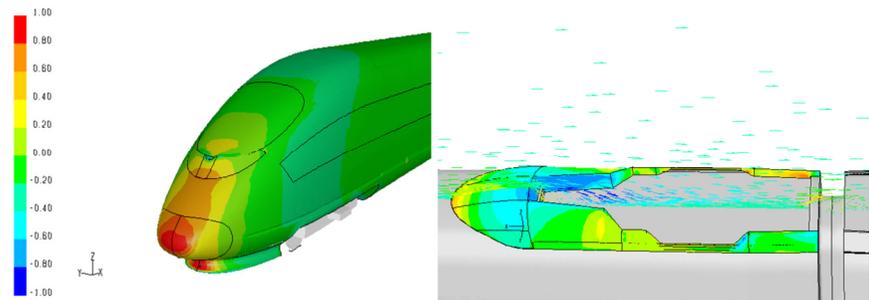
- Außenumströmung des Fahrzeugs auf freier Strecke mit/ohne Seitenwind
- Außenumströmung des Fahrzeugs im Tunnel
- Aerodynamische Optimierung einzelner Baugruppen
- Innendruckkomfort

#### Verfahren:

- Abschätzen von Auslegungsgrößen durch Extrapolation vergleichbarer Projekte
- Versuche (Modell, 1:1)
- Simulation (CFD)

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Aerodynamik

- Simulation



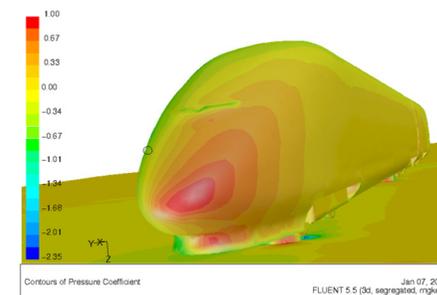
Quelle: Siemens

Kopfwagen ICE3  
Druckverteilung

Dachverkleidung ICE/S  
Druckverteilung und Geschwindigkeitsfeld

### 3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Aerodynamik

- Simulation



Quelle: Siemens

Schnellfahrstrecke Köln-Frankfurt,  
Wiedtalbrücke mit seitlichem Windschutzzaun

Die Druckverteilung auf den Wagen wird unter Seitenwind asymmetrisch. Die aerodynamischen Seitenkräfte und der Auftrieb drohen das Fahrzeug umzukippen. Besonders das führende Fahrzeug wird belastet.



## Zusammenfassung

### Wagenkasten

- Einführung
- Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise
- Berechnung mit Auslegungsrelevanz

## Überblick

- I. Einführung
- II. Zugförderung
- III. Wagenkasten
- IV. Fahrtechnik / Systemkinematik
- V. Komfort
- VI. Antrieb
- VII. Bremse

## Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik



Quelle: Siemens