

Dr.-Ing. Michael Karatas

Siemens Mobility GmbH
Krefeld-Uerdingen

michael.karatas@siemens.com



Gliederung

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

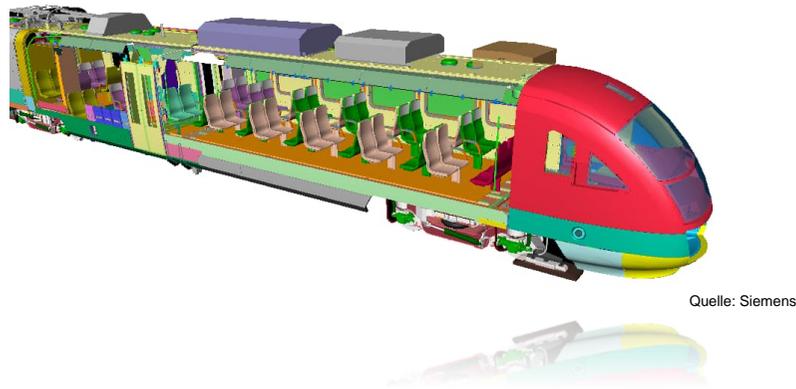
Gliederung

Wagenkasten

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

3.1 Einführung Allgemeines

Schnittdarstellung eines Schienenfahrzeugs



3.1 Einführung Allgemeines

Ein Zug ist ein mechatritisches System.



1/3

Software

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

1/3

Elektrik/Elektronik

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

1/3

Mechanik

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

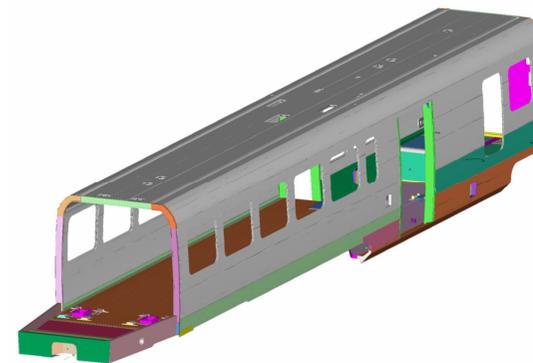
3.1 Einführung Allgemeines

Funktionsgruppen eines Schienenfahrzeugs nach EN 15380-2:2006

BA Fahrzeugkasten	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
CA Fahrzeugausbau	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

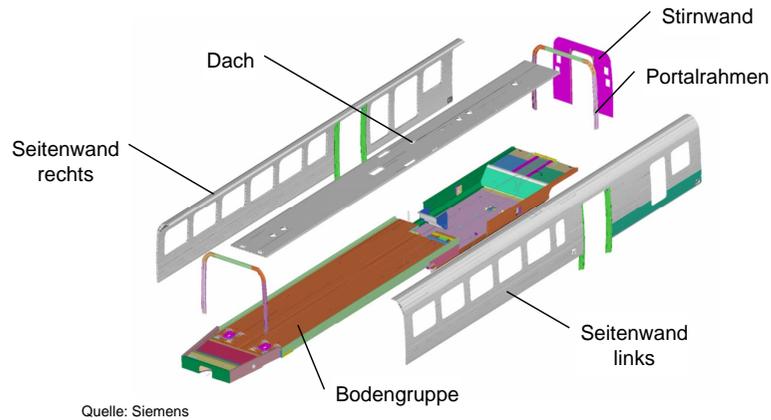
CAD-Darstellung eines Wagenkastens



3.1 Einführung

WK-Kastenaufbau und Werkstoffe

CAD-Darstellung der Hauptkomponenten eines Wagenkastens



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

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

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

Gegenüberstellung Stahl - Aluminium

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

Schweißverfahren

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

MAG – Schweißen (Metall-Aktiv-Gas) für Stähle, CO₂ oder CO₂ 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

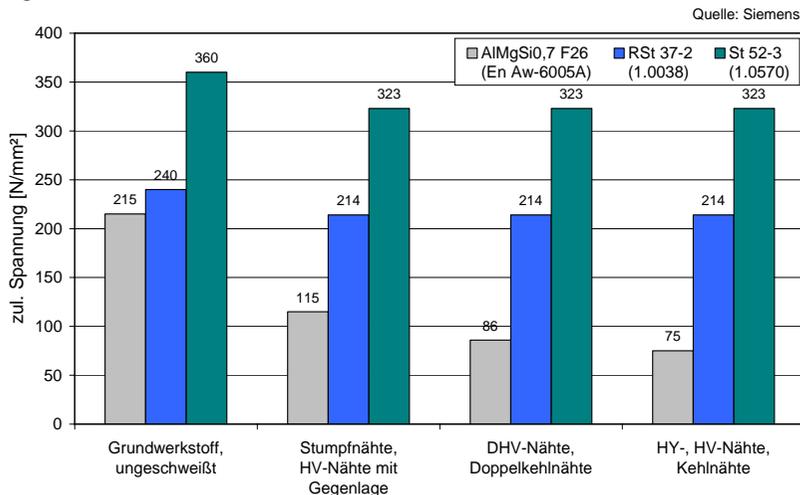
WIG – Schweißen (Wolfram-Inert-Gas) für alle Metalle

- 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

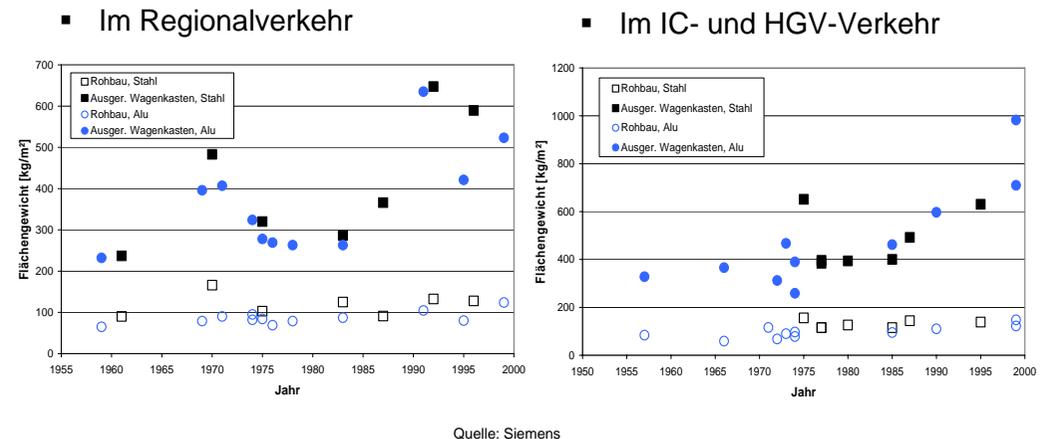
Elektrodenhandschweißen

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

Festigkeitswerte unterschiedlicher Werkstoffe



Entwicklung der Flächengewichte

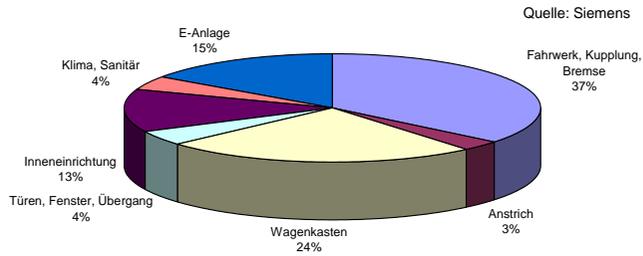


3.1 Einführung WK-Kastenaufbau und Werkstoffe

Massenverteilung im:

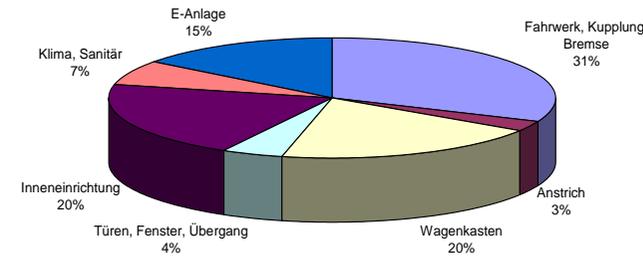
Regionalverkehr (LVT642)

Bezug: Fahrzeuggewicht 33000 kg



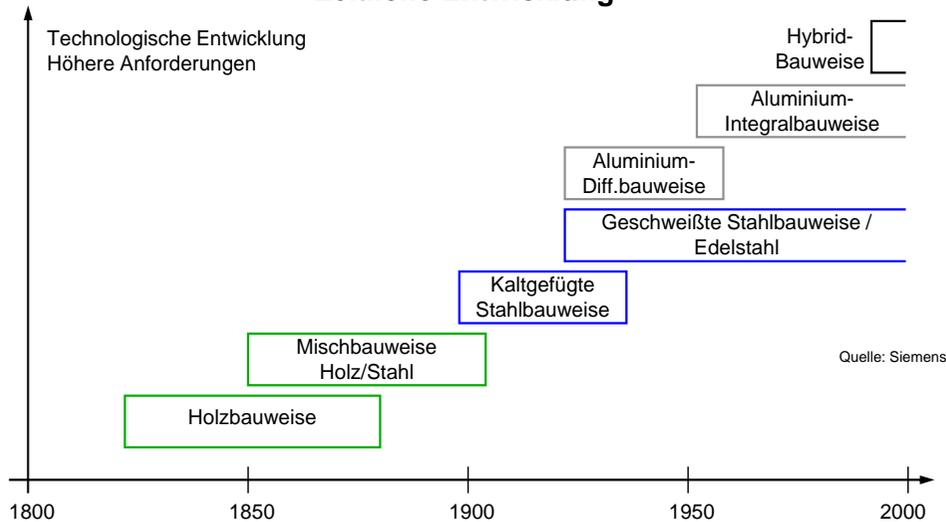
IC- und HGV-Verkehr (ICT)

Bezug: Fahrzeuggewicht 55000 kg



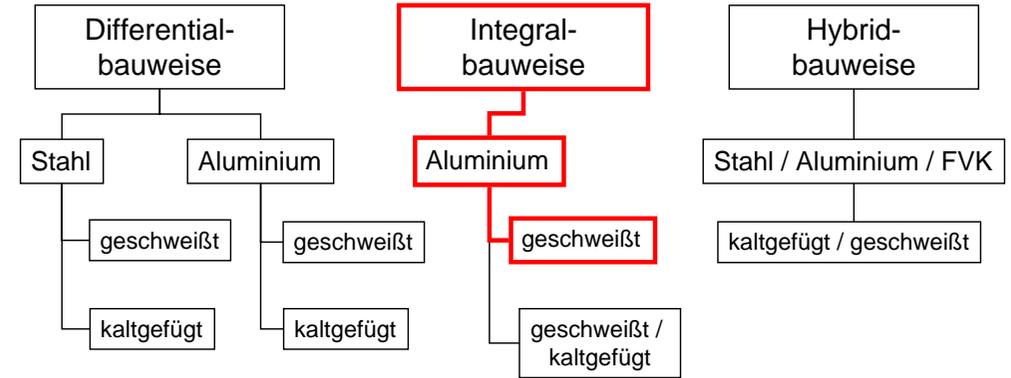
3.1 Einführung WK-Bauweisen

Zeitliche Entwicklung



3.1 Einführung WK-Bauweisen

Übersicht



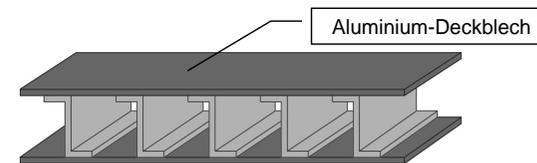
3.1 Einführung WK-Bauweisen

3.1 Einführung WK-Bauweisen

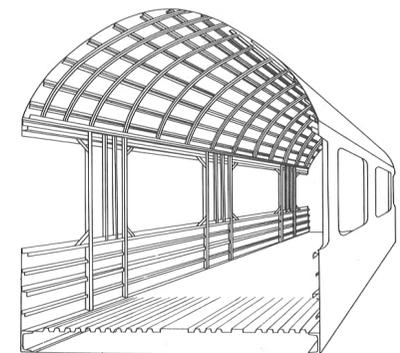
Differentialbauweise

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

Vorteile:

- Geringer Fertigungsaufwand
- Automatisierbar
- Komplexes Außendesign durch individuelle Profilgestaltung

Nachteile:

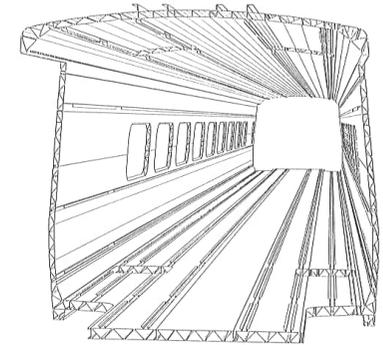
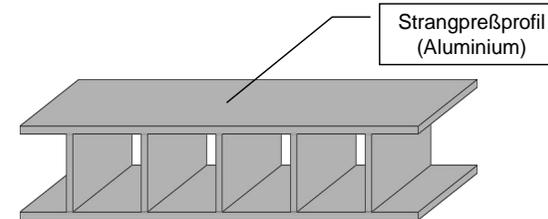
- Strangpreßtechnologie nur für Aluminium verfügbar
- Hohe Material- und Werkzeugkosten durch individuelle Profilgestaltung
- Anspruchsvolle Fertigungstechnologie
- Keine Steifigkeitsänderung über Profillänge
- Hoher Aufwand im Reparaturfall

3.1 Einführung WK-Bauweisen

▪ Integralbauweise

Definition:

„Ein Bauteil besteht aus einem Bauelement“



Struktur aus Großprofilen mit anwendungsbezogenen Querschnittsformen ohne Teilung in Längsachse

Beispiel Integralbauweise

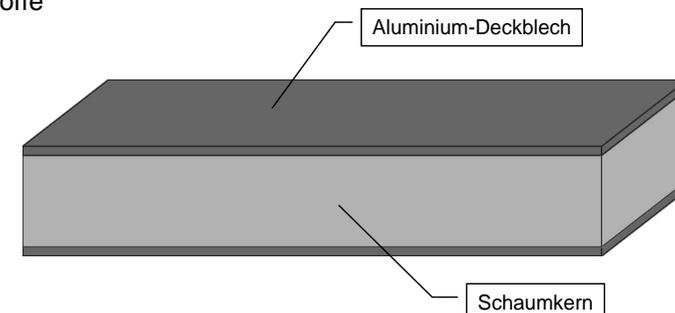
3.1 Einführung WK-Bauweisen

▪ Hybridbauweise

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

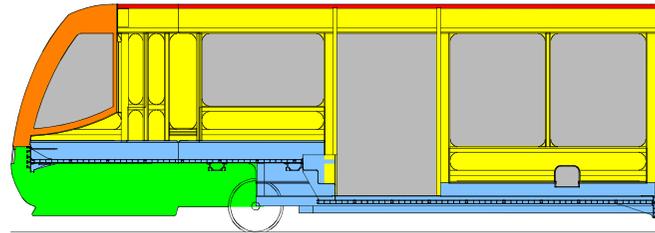
Definition:

„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

Vorteile:

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

Nachteile:

- Anspruchsvolle Fügeverfahren
- Recycling nur bedingt möglich

3.1 Einführung WK-Bauweisen

Hybridbauweise

Werkstoffe

	Baustahl	Edelstahl	Aluminium	GFK unidirektional	CFK unidirektional
	S 355	X2CrNiN18-7	AlMgSi 0,7		
Dichte [kg/dm³]	7,85	7,9	2,7	2,6	1,8
E-Modul [kN/mm²]	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 ⁻⁶ /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

Gliederung

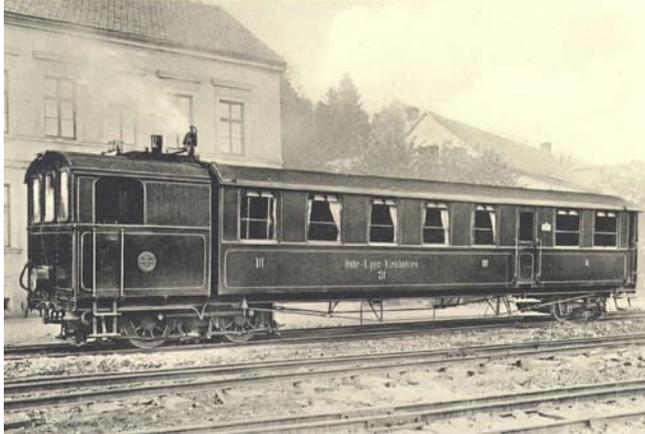
Wagenkasten

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

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

Dampfmotorwagen

2. und 3. Klasse



Quelle: Siemens

Technische Daten

Bauweise	Stahldifferential
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 Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

Uerdinger Schienenbus VT 98 mit Steuerwagen VS 98



Quelle: Siemens

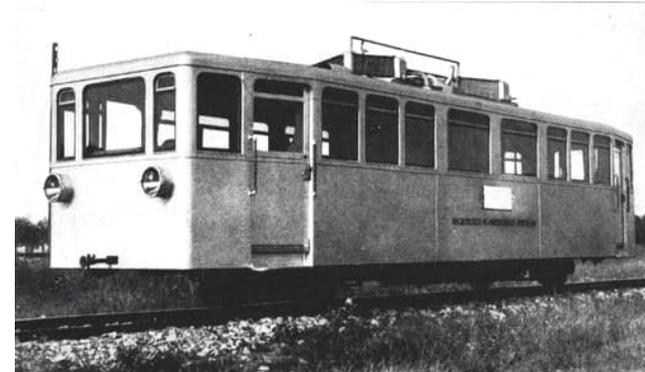
Technische Daten VT 98

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 Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

Dieseltriebwagen

für die Halberstadt-Blankenburger Eisenbahn



Quelle: Siemens

Technische Daten

Bauweise	Aluminiumleichtbauw.
	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 Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

Dieseltriebzug 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)

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	357 kW
Höchstgeschwindigkeit	120km/h

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

Triebzug 628.0

Rohbau und Inneneinrichtung

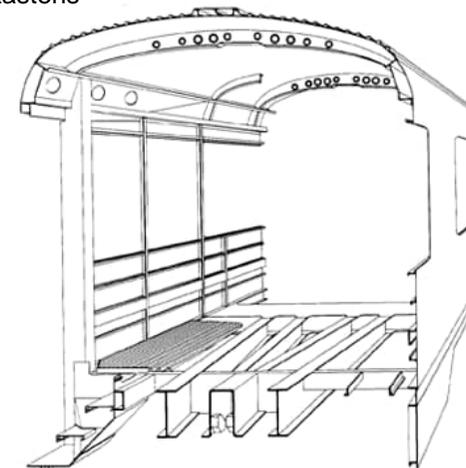


Quelle: Siemens

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

SPNV- VT 628/ VS 928

Struktur des Wagenkastens



Quelle: Siemens

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

Dieselhydraulischer Triebwagen 628.2 / 928.2



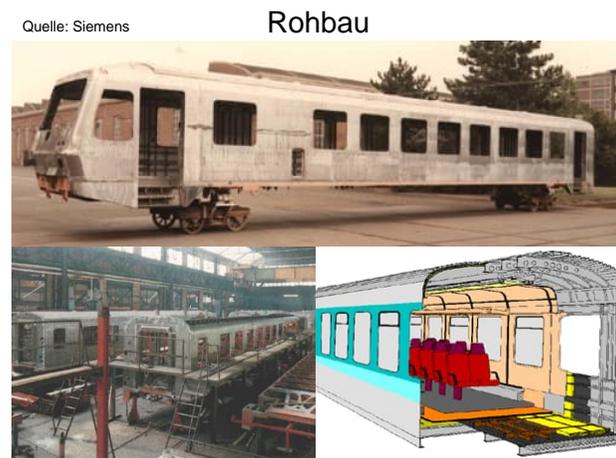
Technische Daten

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 ⁻¹

Quelle: Siemens

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

Dieselhydraulischer Triebzug 628.2 / 928.2



Aufbau stand

Innenbau

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

Zweiteiliger dieselhydraulischer Triebwagen 628.4/ 928.4



Technische Daten

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

Quelle: Siemens

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

Zweiteiliger dieselhydraulischer Triebzug 628.4 / 928.4

Motorwagen und Steuerwagen / Rohbau



Quelle: Siemens

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

Dieselmehchanischer Triebwagen VT 642



Quelle: Siemens

Technische Daten

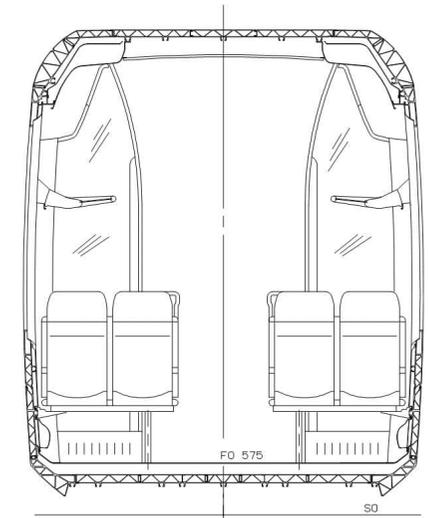
Bauweise	Aluminiumleichtbau
Höchstgeschwindigkeit	120 km/h
Dieselmotorleistung	2 x 257 kW
Eigengewicht	ca. 64 t
Radsatzfolge	B'(2)B'
Gesamtlänge über Kupplung	41 700 mm
Dachscheitelhöhe über SO	2 830 mm
Fußbodenhöhe über SO	575 mm
Zahl der Sitzplätze	123
1. Klasse	12
2. Klasse / Klappsitze	98 / 13
Baujahr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

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

VT 642.5/642.0

Querschnitt Niederflur 2. Klasse

GFK- Kopf



Quelle: Siemens

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

Zweiteiliger dieselelektrischer Triebzug VT 610



Quelle: Siemens

Technische Daten

Bauweise	Aluminiumintegralbau.
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 Laufadsatz
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 Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

Zweiteiliger dieselelektrischer Triebzug VT 610

Wagenkastenrohbau vor der Lackierung

Innenansicht



Quelle: Siemens



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

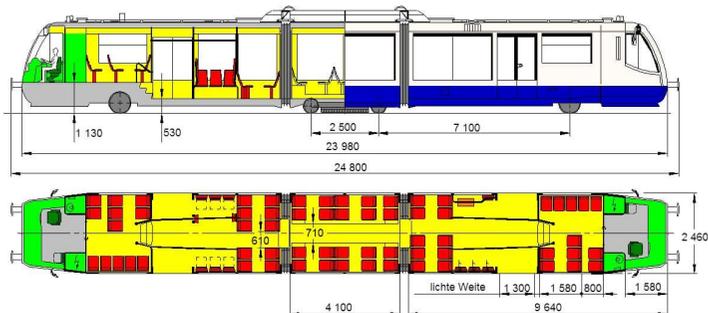


Quelle: Siemens

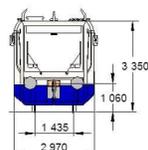
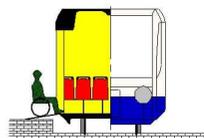
3.2 Von der Stahl-Differential-/ zur Alu-Integralbauweise (Regionaltriebzüge)

RegioSprinter

Ansichten und Grundriß



Quelle: Siemens



Sitzplätze 74
Stehplätze (4 Pers./m²) 100

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

RegioSprinter

Rollout am 20 März 1995



Quelle: Siemens

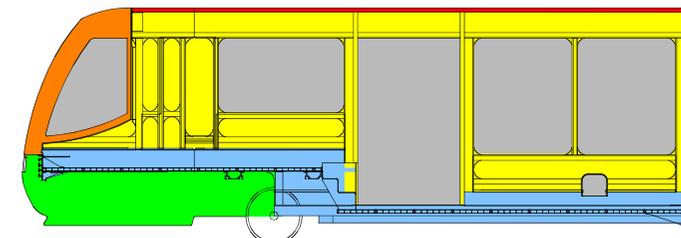
Technische Daten

Bauweise	3 tlg. geschweißter/ geschraubter Alu-Wagenkasten mit Kunststoffkopf und Sandwichdecke
Behindertengerecht	ca. 70% Nieder- Fluranteil; 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, dieselmotorsch	(Euro I) 2x198 kW
Eigengewicht	31,5 t

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

RVT Regionalverbrennungstriebswagen

Aufbau des Rohbauwagenkastens, Wagen 1 und 2



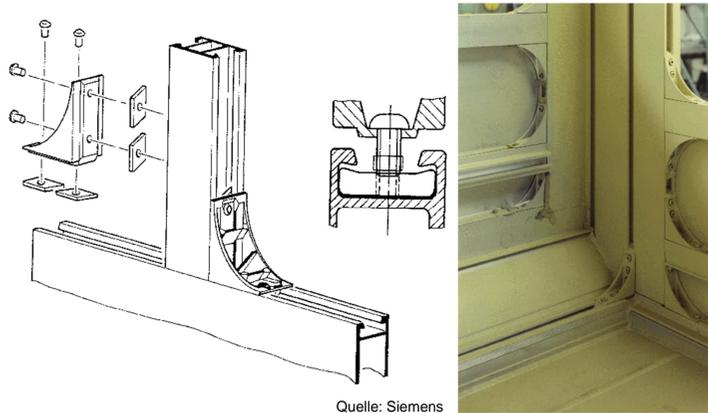
- Aluminium-Untergestell, geschweißt
- GFK-Sandwichkopf, geklebt
- Aluminium-Wände, geschraubt
- GFK-Sandwichschürzen, geschraubt
- Aluminium-Sandwichdach, geklebt

Quelle: Siemens

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

RVT Regionalverbrennungstriebwagen

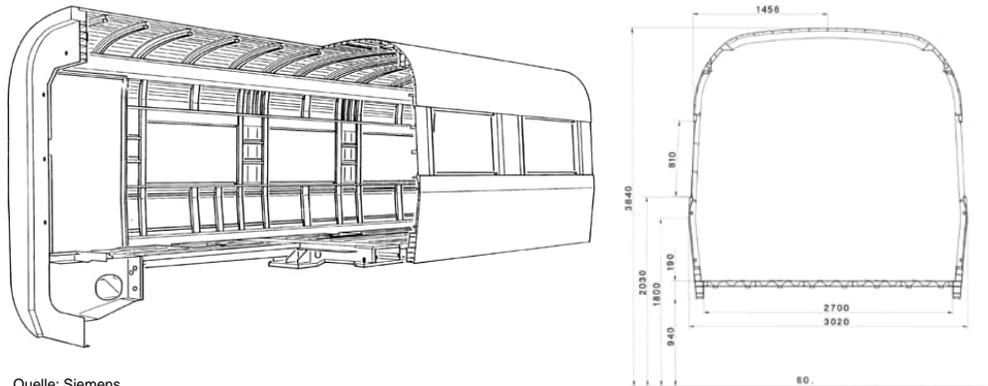
Schraubsystem Alusuisse-Lonza Railtec AG



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

ICE 1 - InterCity Express

Mittelwagen, Struktur des Wagenkastens



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

RVT Regionalverbrennungstriebwagen

Wagenkastenrohbau mit GFK-Sandwichkopf



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

ICE 1 - InterCity Express

Mittelwagen Avnz, Innenansicht des ersten Rohbaus



mit 3 Mittelwagen (1. Auslieferungsfahrt, 13.8.1990) DB

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

ICE 2

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



Technische Daten

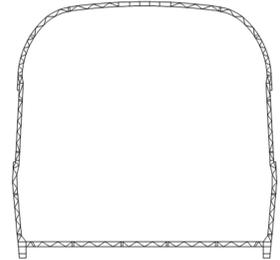
Bauweise	Aluminiumintegralbau.
Länge über Kupplungsebene	26 400 mm
Drehzapfenabstand	19 000 mm
Wagenkastenlänge	25 600 mm
Wagenkastenbreite	3 020 mm
Fußbodenhöhe von SO	1 226 mm
Gesamthöhe	3 856 mm
Spurweite	1 435 mm
Maximale Geschwindigkeit V_{max}	280 km/h
Sitzplätze 2. Klasse	74

Quelle: Siemens

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



Wichtiges Funktionselement ist die C-Schiene



Quelle: Siemens

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

ICE 2

Mittelwagen, Innenausbau Isolierung



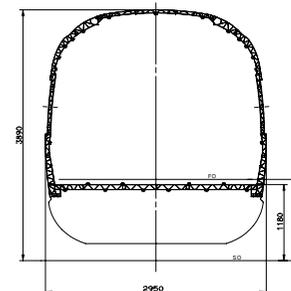
Quelle: Siemens

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

ICE 3, Triebzug für den Hochgeschwindigkeitsverkehr, DB AG



Quelle: Siemens



Technische Daten

Bauweise	Aluminiumintegralbau.
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

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) aufgebracht
- Ergebnis der Berechnung sind Verformungen, Spannungen, Eigenfrequenzen ...

Die Berechnungsergebnisse sind durch einen Belastungsversuch nachzuweisen.

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 [m²] x 4 x 80 kg
 - g = Gravitationsbeschleunigung = 9,81 m/s²

einseitiges Anheben

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

beidseitiges Anheben

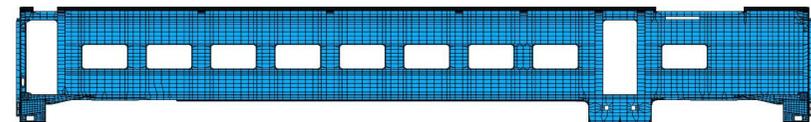
- $F_z = 1,1(m_1 + 2m_3)g$

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)

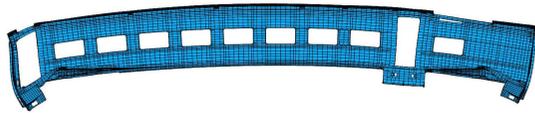
3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

FE-Modell ICT-Mittelwagen

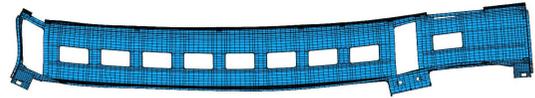


Verformung bei Vertikallast

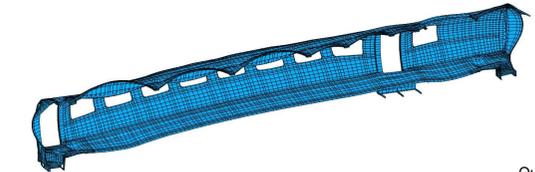
3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit



Verformung bei Kupplungsdruck



Verformung bei einseitigem Anheben



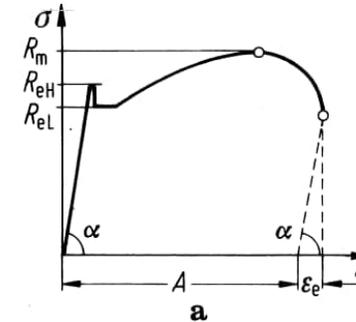
Verformung unter Innendruck

Quelle: Siemens

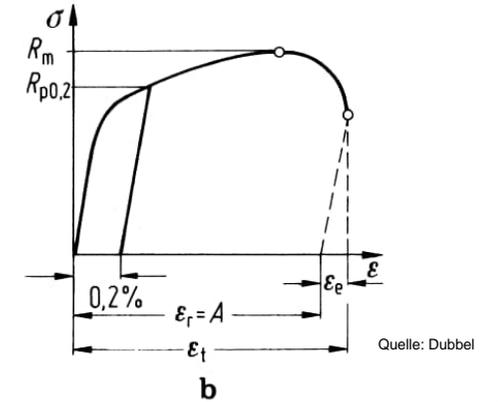
3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

Statik, Werkstoffkennwerte

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



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



Quelle: Dubbel

3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

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.

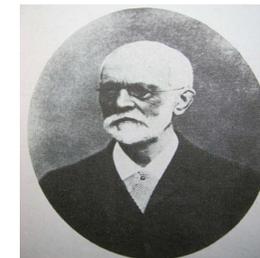


3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

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 σ_m und Spannungsamplitude σ_a konstant bleiben. Beim Bruch der Probe oder beim Erreichen einer festgelegten Anzahl von Schwingzyklen wird σ_a über der Zahl N der ertragenen Schwingzyklen doppellogarithmisch aufgetragen. Diese Darstellung des Zusammenhangs zwischen Spannungsamplitude und Bruchlastspielzahl heißt **Wöhlerlinie**.

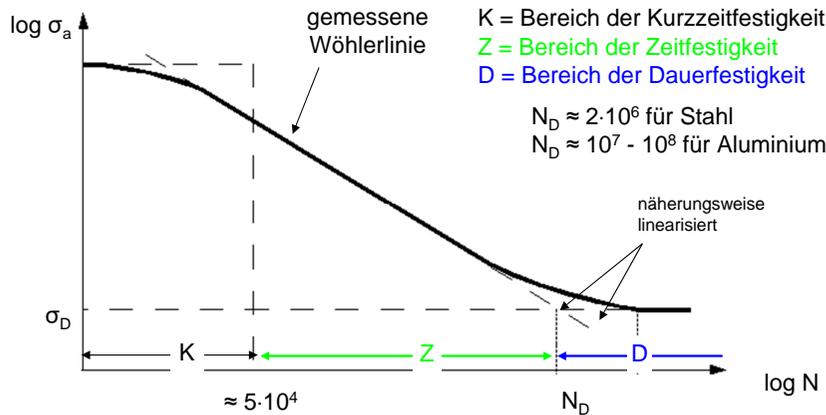


August Wöhler (1819 – 1914) führte zwischen 1858 und 1870 die ersten methodischen Schwingfestigkeitsversuche durch (Königlich Niederschlesische-Märkische Eisenbahn Frankfurt/Oder). Er erarbeitete die Grundlagen für die Methoden zur Ermittlung der Belastbarkeit dynamisch belasteter Werkstoffe.

3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

Dauerfestigkeit eines Werkstoffs

= Spannungsamplitude σ_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:

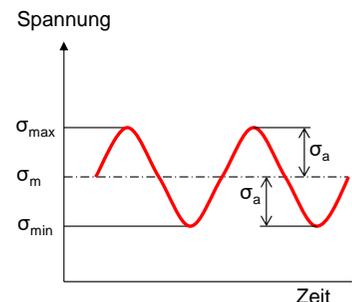
$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

- 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 σ_m hängt von zahlreichen Fahrzeug-, Infrastruktur- und Betriebsparametern ab: z. B. $\sigma_a / \sigma_m = 30\% \Rightarrow R = +0,54$.

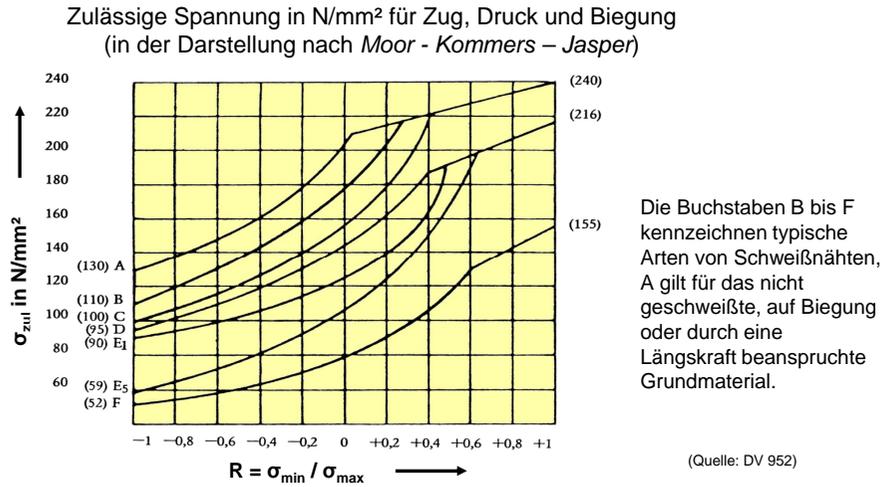


3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

Werkstoff	Statische Werkstoffkennwerte in N/mm ²				Schwingfestigkeitskennwerte in N/mm ² (für 90% Überlebenswahrscheinlichkeit)					
	Zug		Biegung	Torsion	Wechselfestigkeitswerte			Schwellfestigkeitswerte		
	R _m	R _{p0,2}	σ _{bF}	τ _F	σ _{zW}	σ _{bW}	τ _W	σ _{zSch}	σ _{bSch}	τ _{Sch}
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 Festigkeit

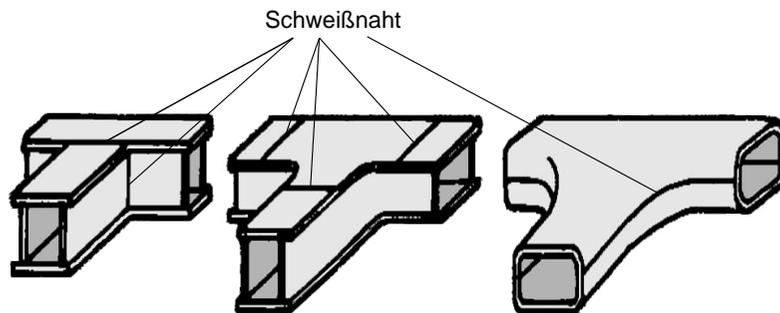
Zulässige Spannung für Stahl S 355 (MKJ-Diagramm)



3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

Schweißnahteinfluss auf die Dauerfestigkeit

Beispiel für funktionsgleiche Verbindungen mit unterschiedlicher Dauerfestigkeit



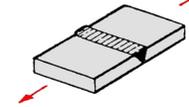
Quelle: Internet

Ansteigen der Dauerfestigkeit

3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Festigkeit

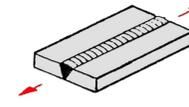
Dauerfestigkeit – Typische Arten von Schweißnähten

Quelle: Internet

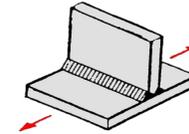


Beispiele für die Linie B:

quer zur Krafrichtung beanspruchte Stumpfnah (Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht kerbfrei bearbeitet und 100 % durchstrahlt)

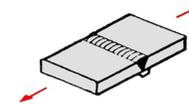


in Krafrichtung beanspruchte Stumpfnah (Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht kerbfrei bearbeitet und 100 % durchstrahlt)



Beispiel für die Linie C:

durchlaufendes Bauteil mit nicht belasteten Querversteifungen (K-Nähte kerbfrei bearbeitet und auf Risse geprüft)



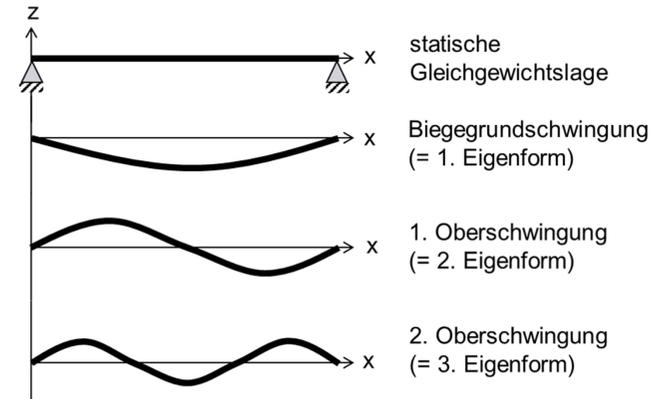
Beispiel für die Linie D:

quer zur Krafrichtung beanspruchte Stumpfnah (Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht stichprobenweise - mindestens 10 % - durchstrahlt)

3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturdynamik

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

Quelle: Internet



3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturdynamik

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 \Rightarrow Komfortkennwerte
- Spannungen und Verformungen der Struktur

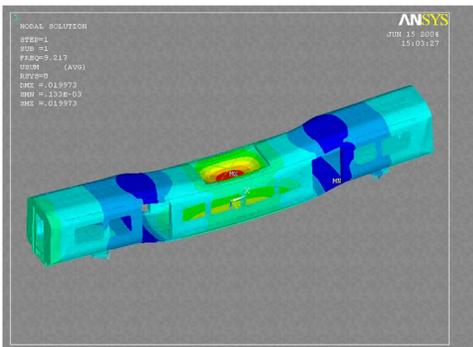
Modellierung

- 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 Strukturdynamik

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

– EMU „Desiro UK“

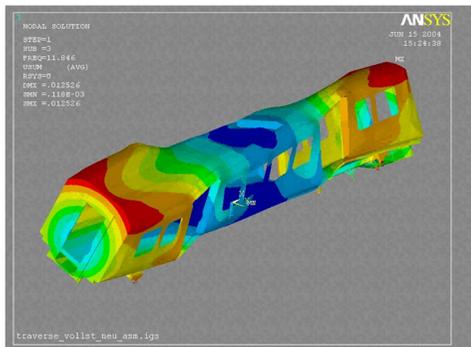


Quelle: Siemens



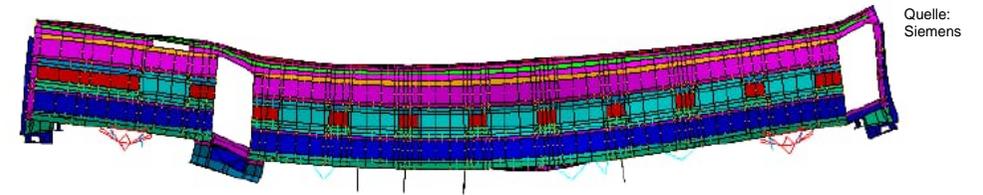
Torsionsgrundschwingung ($f = 11,8$ Hz)
um x-Achse

– EMU „Desiro UK“



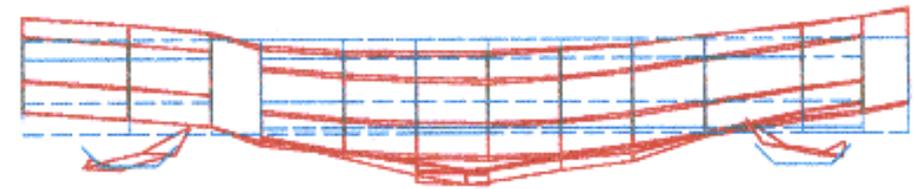
3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturdynamik

Vertikale Biegegrundschwingung



Eigenfrequenz $f = 10,75$ Hz

Rechnerische Modalanalyse mit ANSYS



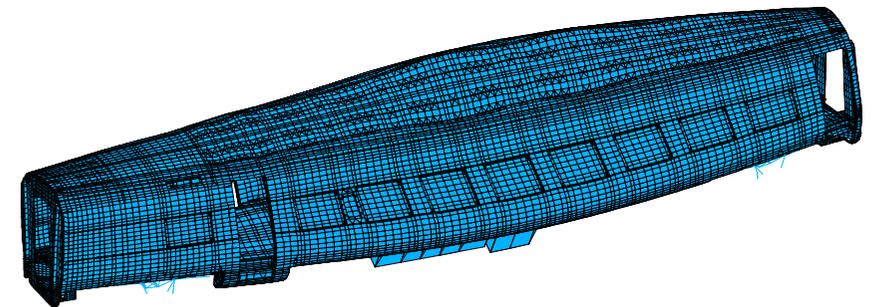
Eigenfrequenz $f = 11,75$ Hz

Messtechnische Modalanalyse

3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturdynamik

▪ Eigenfrequenzanalyse

Dachquerschwingung ICT



Quelle: Siemens

3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz Strukturdynamik



- 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



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



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



▪ Kollisionsenergien

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

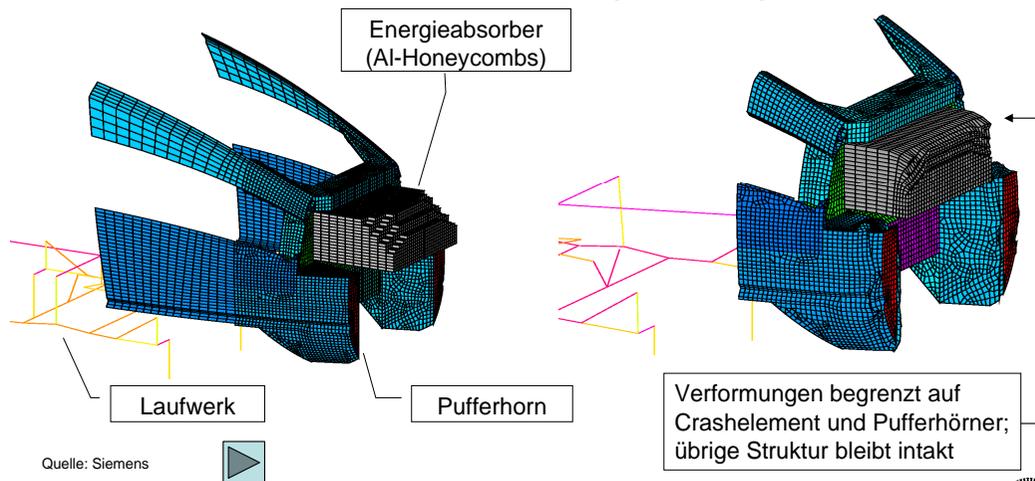
v ₁ [km/h]	Kollisionsenergie [MJ]					
	Einzelfahrzeug 68 t			Zug 400 t		
Crashgegner v ₂ = 0	36	110	200	36	110	200
PKW (1 t)	0,05	0,46	1,52	0,05	0,47	1,54
LKW (15 t)	0,61	5,7	19	0,72	6,7	22
Güterwagen (80 t)	1,84	17	57	3,3	31	103
Zug (400 t)	2,91	27	90	10	93	309



3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz

Crash

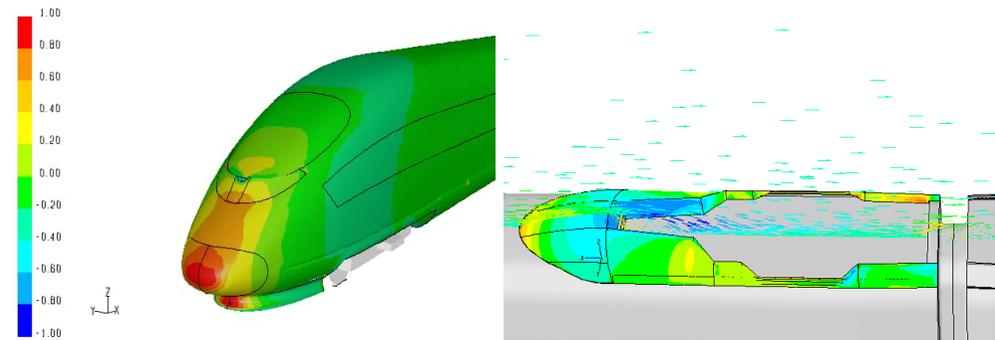
- Bugpartie eines Steuerwagens
- Verformte Bugpartie bei Aufprallgeschwindigkeit $v = 10 \text{ m/s}$



3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz

Aerodynamik

- Simulation



Quelle: Siemens

Kopfwagen ICE3
Druckverteilung

Dachverkleidung ICE/S
Druckverteilung und Geschwindigkeitsfeld

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

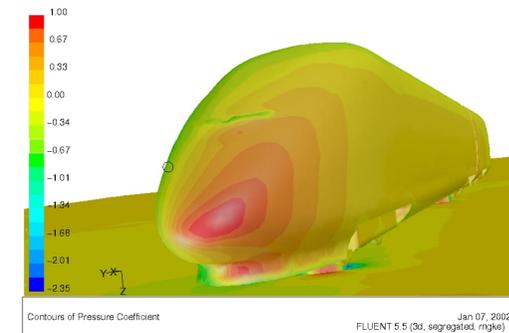
Verfahren:

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

3.3 Berechnung mit Auslegungsrelevanz

Aerodynamik

- Simulation



Quelle: Siemens

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