

Schienenfahrzeugtechnik

Lehrbrief



Prof. Dr. Raphael Pfaff
Lehrgebiet Schienenfahrzeugtechnik

Inhaltsverzeichnis

1 Präliminarien	3
2 Requirements Engineering	5
3 Fahrzeugkonstruktion	11
3.1 Bauformen	11
3.2 Begrenzungen	12
3.3 Wagenkastenrohbau	16
4 Laufwerk (Fahrwerk)	21
5 Einführung Zugdynamik	29
6 Zugdynamik	30
6.1 Kuppelstoß, Crash	30
6.2 Kraftschluss, Schlupf	31
6.3 Fahrwiderstand, Zugkraft, Zugbremsung	33
7 Einführung Spurführung	36
7.1 Spurweiten	36

1 Präliminarien

Lernziele

- Studierende können, ausgehend von einer Kenntnis der Grundlagen des Systems Schienenfahrzeug, Anforderungen an Schienenfahrzeuge und ihre Subsysteme formulieren.
 - Studierende kennen die Grundlagen von Spurführung und Zugdynamik sowie von Fahrzeug- und Drehgestellkonstruktion.
 - Studierende können sich selbstständig in ein Thema der Schienenfahrzeugtechnik einarbeiten und zu den Ergebnissen präsentieren.
 - Studierende können Mess- und Simulationsergebnisse in Berichtform dokumentieren.

Fehlt etwas?

hr noch gebrauchen? z.B. für die Railway Challenge, euer Mobilitätsfenster, ...

Was könnt Ihr noch gebrauchen? z.B. für die Railway Challenge, euer Mobilitätsfenster, ...

Themenplan, Kapitel aus Ihme (2019)

[Link zum Buch \(Im VPN\)](#)

Thema	Kapitel
Requirements Engineering	Lehrbrief + Video
Zugdynamik & Fahrwiderstand	2
Fahrzeugkonstruktion	6
Laufwerke	5, 6.6
Einführung Spurführung	Lehrbrief + Video
Kuppelstoß, Crash	Lehrbrief + Video

Prof. Dr. Raphael Pfaff

Selbststudium und semesterbegleitende Prüfung

- Konzepterstellung Parkbahn-Lokomotive
 - Nach IMechE-Lastenheft + Zusatzanforderungen
 - Ggf. enger Kostenrahmen
- Ablauf
 1. Anforderungsabdeckung / Grobkonzept (High-Level Design)
 2. Detailed Design (Standardisierter Antriebsstrang und Bremse)
 - a) Wagenkasten
 - b) Drehgestell
 3. Nachweisführung
 - a) Wagenkasten: Festigkeit
 - b) Drehgestell: Entgleisungssicherheit
- Dokumentation durch technische Berichte
- Gewichtung Berichte: in Summe 100% der Modulnote

2 Requirements Engineering



In diesem Abschnitt der Veranstaltung sollt ihr lernen,

- wo die Anforderungen an Schienenfahrzeuge herkommen,
- wie man systematisch mit ihnen arbeitet und
- welche Prüfschritte euch (auch in Industrieprojekten) erwarten.

Warum Requirements Engineering (RE)?



Requirements Engineering befasst sich mit dem systematischen Erfassen, Umsetzen und Prüfen von Anforderungen im Entwicklungsprozess. Durch striktes RE kann man Projektrisiken erheblich reduzieren und evtl. auch Kosten sparen.

- Qualität: Qualität ist das Maß der Erfüllung der Anforderungen an ein Produkt.
- Kosten- und Termintreue
- Einbindung der Stakeholder (Anspruchsteller)
- Systematisierung der Beschaffung und des Engineerings

Key-Aspects of Requirements Engineering



Was RE vom sonstigen Entwicklungsprozess unterscheidet ist vornehmlich, dass:

- alle, die im Projekt Ansprüche haben ("Stakeholder") können sich einbringen,
- Prüfungen werden als Reviews mit den Stakeholdern durchgeführt und
- jede Anforderung ist von Anforderung bis zum Nachweis der Erfüllung nachvollziehbar.

Beim dritten Punkt wird sichergestellt, dass eine geschlossene Kette von Verweisen von der Anforderung über alle nachgelagerten Dokumente (Pflichtenheft, Konstruktionsunterlagen, Test-Spec...) führt, die sicherstellt, dass diese Anforderung umgesetzt und erfüllt wurde. Traceability bei Wikipedia

- Stakeholder Involvement
- Technical Reviews
- Traceability

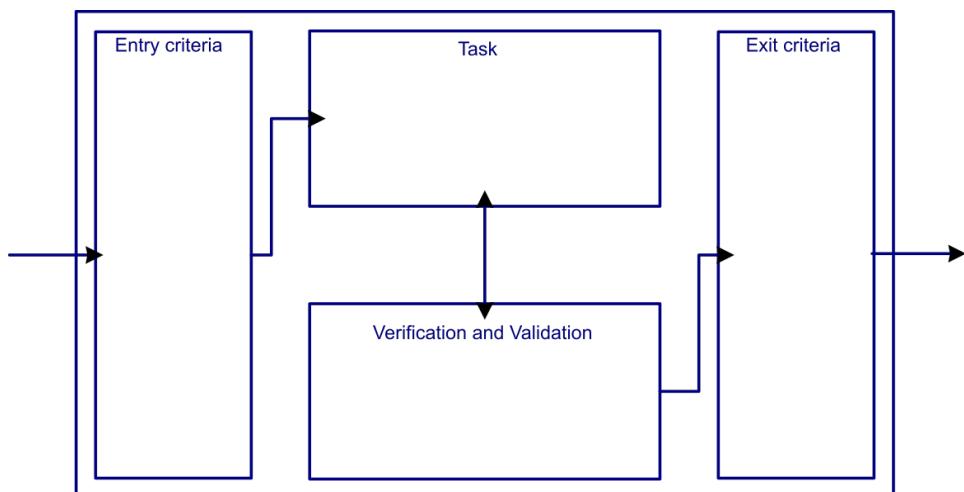
Generisches Phasenmodell



Jede Phase eines Entwicklungsprozesses kann (sollte!) wie folgt abgebildet sein, damit die Qualität des Entwicklungsschritts sichergestellt werden kann.

Für jede Phase festzulegen:

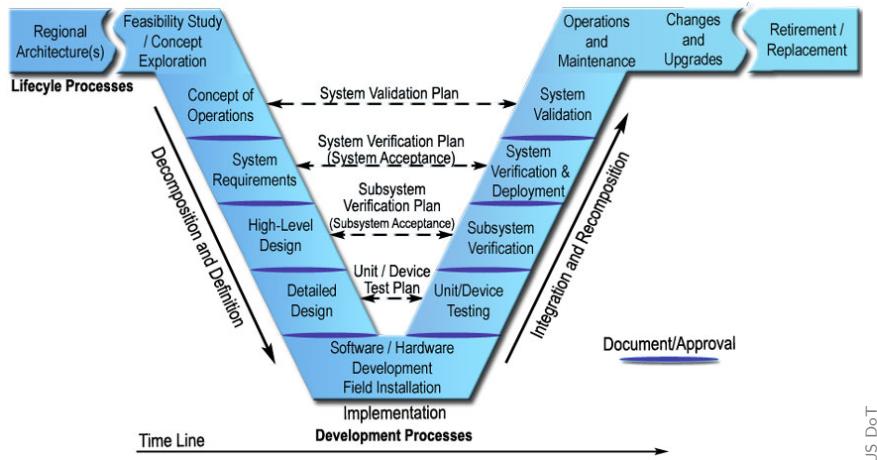
- Purpose
- Inputs
- Entry Criteria
- Roles
- Verification steps
- Outputs
- Exit criteria
- Resources
- Management review activities



V-Modell für Requirements Engineering



Die einzelnen Phasen können dem V-Modell entnommen werden (es empfiehlt sich sogar!). Bitte beachtet im Bild die Verbindungen zwischen absteigendem Pfad (Entwicklungsdocumente) und aufsteigendem Pfad (Prüfdokumente): hier hat die Organisation die Möglichkeit, sich weiterzuentwickeln. V-Modell bei Wikipedia



US DoT

Requirements Analysis



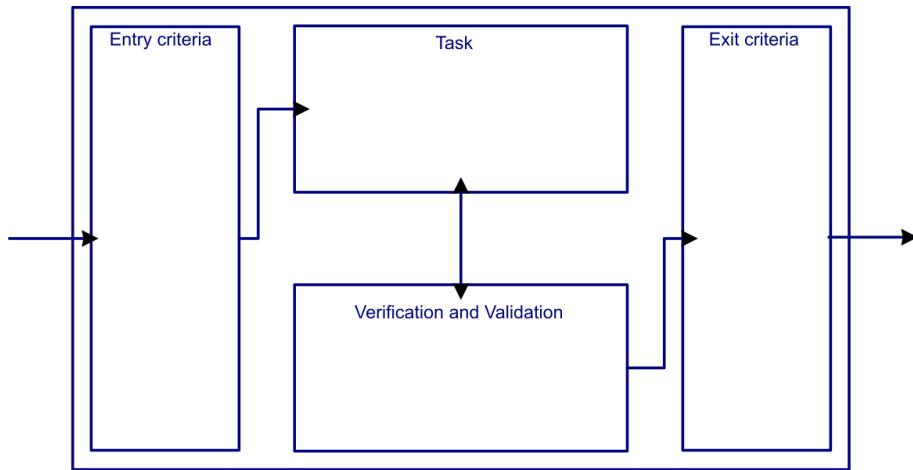
Im ersten Schritt geht es um das Ermitteln der System Level Requirements, also der sehr hoch angesiedelten Anforderungen. Das hört sich einfacher an, als es ist: viele Kunden wissen gar nicht, was sie brauchen. Daher liest man häufig auch den Term "Elicit Requirements (Anforderungen hervorlocken)" dafür.

Der erste Meilenstein fragt daher ab, ob beide Seiten die Anforderungen verstanden haben. Hier geht es auch um rudimentäre Dinge wie den Ausgabestand des Lastenhefts.

Leitfragen:

- What are the stakeholders?
- What is the system to do?
- How well it is to do it?
- Under what conditions?

Typischer Meilenstein: Initial Design Review (IDR)



System Specification

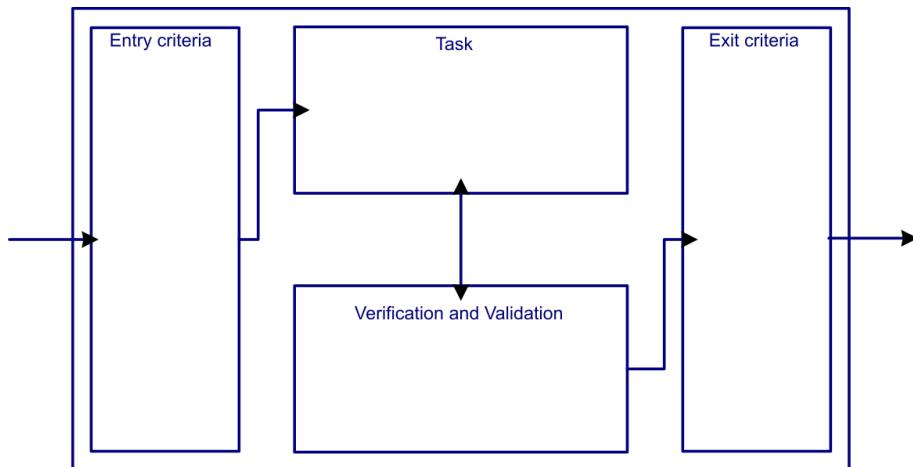


Im nächsten Level geht es um den Entwurf auf einer hohen Abstraktionsebene, also um die Architektur, Lösungen und den Zuschnitt der Subsysteme.

Leitfragen:

- Is the required system feasible?
- What are system and subsystem borders?
- What are associated costs/lead times/risks?
- How can the risk be reduced?
- Which system integration steps are necessary?

Typischer Meilenstein: Preliminary Design Review (PDR)



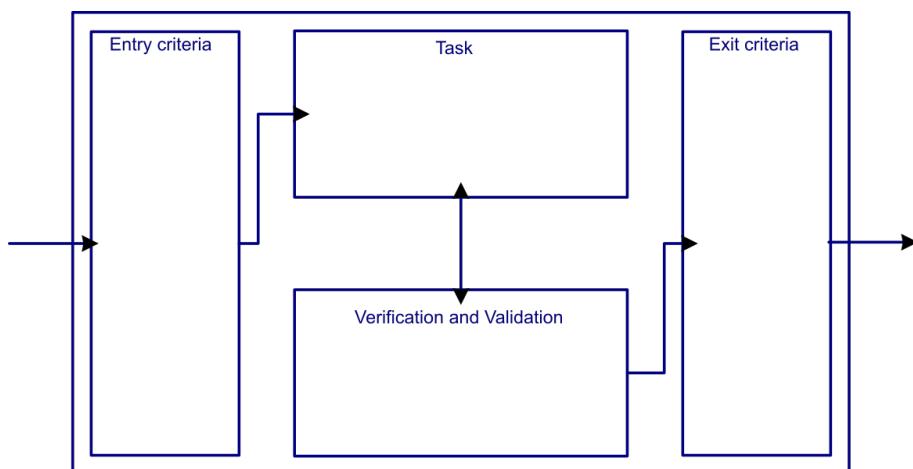
Subsystem Design



In diesem Schritt wird die Feinstruktur des Systems entwickelt ("Lower Level Design"), also die Architektur der Subsysteme, Detaillösungen und der Zuschnitt der Module. **Leitfragen:**

- What are the subsystem requirements?
 - Make or Buy?
 - Which deliverables (e.g. documentation) are requested?
 - What is the suitable subsystem structure?

Typischer Meilenstein: Critical Design Review (CDR)



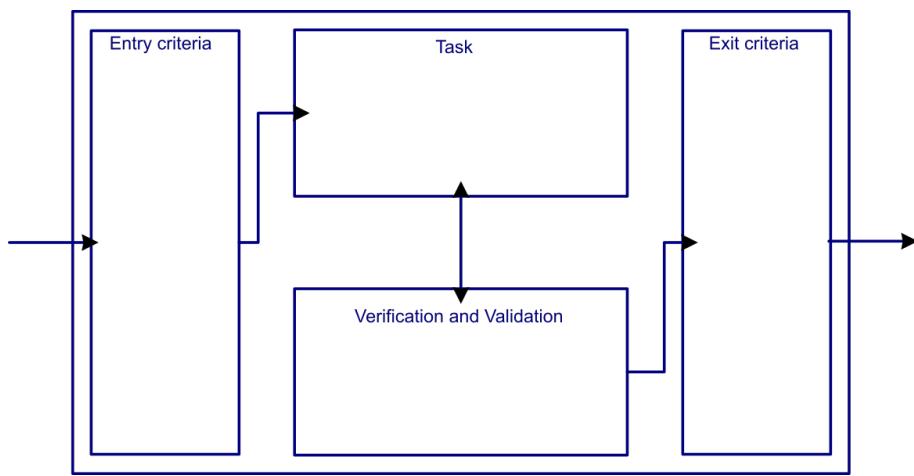
Module Design



Jetzt geht es ins Eingemachte: im Module Design entwickelt man die "Build to Specifications", also Zeichnungen, Schemata usw., nach denen dann wirklich gefertigt bzw. beschafft wird. Dementsprechend muss das dann auch ordentlich überprüft werden - in der Regel ganz klassisch im Vier-Augen-Prinzip, also Prüfung und Freigabe

Leitfragen:

- How can the module be realised efficiently?
 - What are critical characteristics of the module and its parts?
 - Can service proven modules be used or adapted?



3 Fahrzeugkonstruktion



In diesem Abschnitt sollt ihr lernen,

- wie Wagenkästen konstruiert werden können,
- welche Einschränkungen es gibt für
 - Vollbahnen und
 - Straßenbahnen, sowie
- welche normative Anforderungen es gibt.

Lest bitte begleitend die Kapitel 6.1 bis 6.5 aus Ihme (2019) - und schaut auch bitte in die angezogenen Normen (vor allem DIN EN 12663 und DIN EN 15227 rein Perinorm (im VPN)). Kapitel 6.4 ist für euer Projekt besonders wichtig - und da könnt ihr auch die Normen in angepasster Form nutzen!

In der Perinorm-Suchmaske könnt ihr bei "Dokumentnummer +" direkt die Nummer der Norm eingeben.

3.1 Bauformen

Konstruktionsprinzipien der Wagenkästen

Differenzialbauweise

- Fertigung aus Halbzeugen:
 - Einzelteile einfach geformt
 - Formgebung durch Fügen und Umformen

Integralbauweise

- Fertigung aus komplex geformten Elementen:
 - z.B. Strangpressprofile
 - Formgebung durch Fügen und Zerspanen

Tragfunktion

- Tragendes Untergestell
- Selbsttragender Wagenkasten



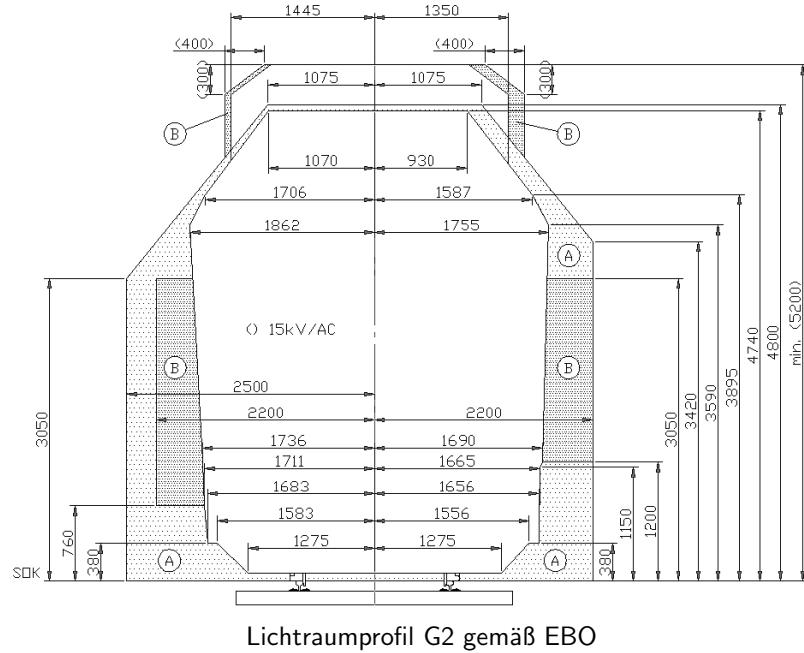
Quelle: Siemens Pressebild

Wagenkasten in Integralbauweise

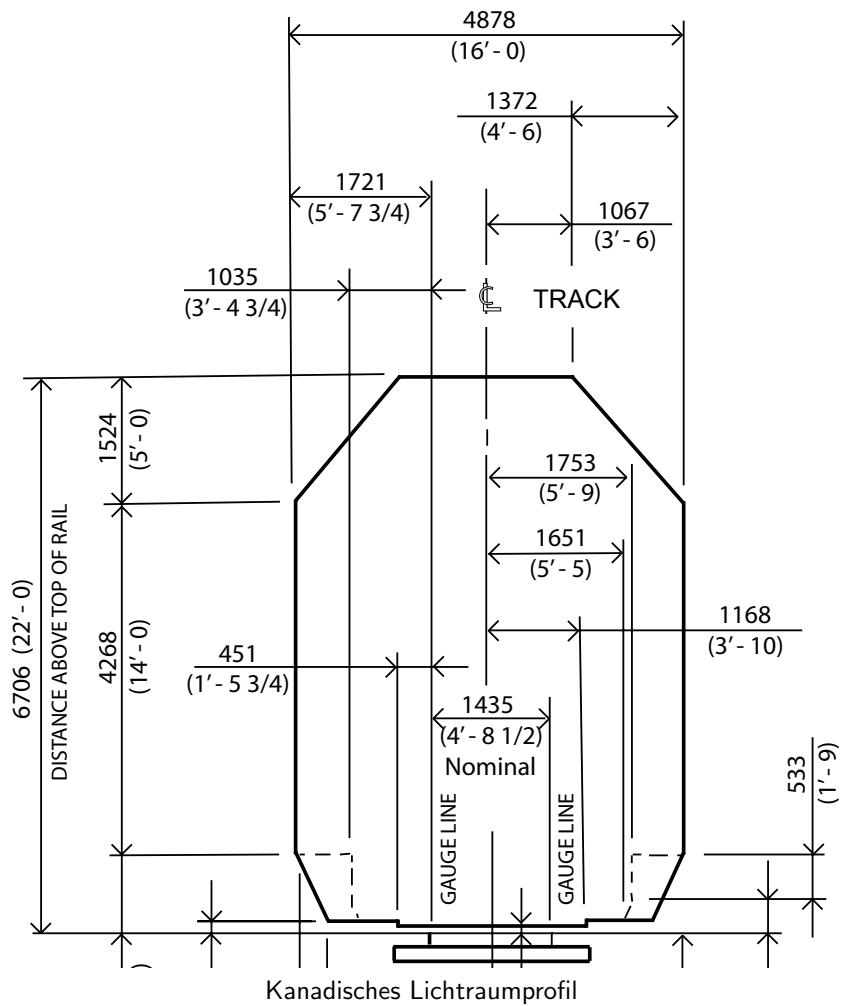
3.2 Begrenzungen

Lichtraumprofil streckenseitig

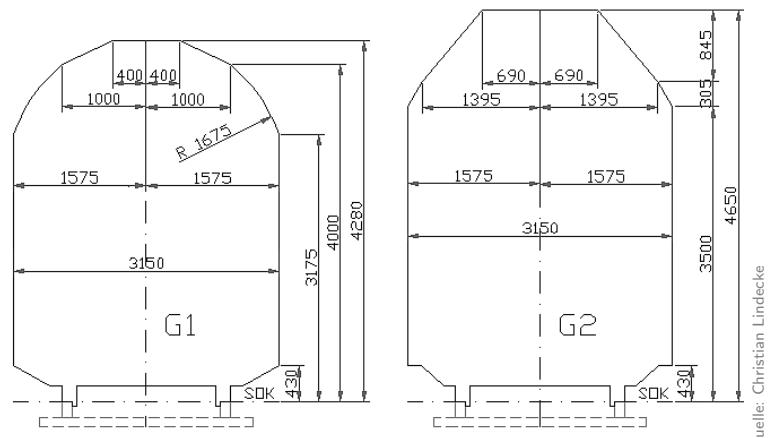
- Streckenseitiges Lichtraumprofil muss berücksichtigen
 - Beladungszustände
 - Dynamische Bewegungen:
 - * Ein-/Ausfedern
 - * Wanken
 - * Nicken
 - Bogenfahrt
 - Kompatibilität mit anderen Fahrzeugen
- Deutsches Regelprofil: G2
- Europäisch: G1
- Betrieblich Lademaßüberschreitungen möglich



Quelle: Christian Lindecker



Fahrzeugbegrenzung: Querschnitt



Quelle: Christian Lindecker

**Breiteneinschränkung und Lichtraumbedarf**

Entspricht Abbildung 1.25a aus Ihme (2019).

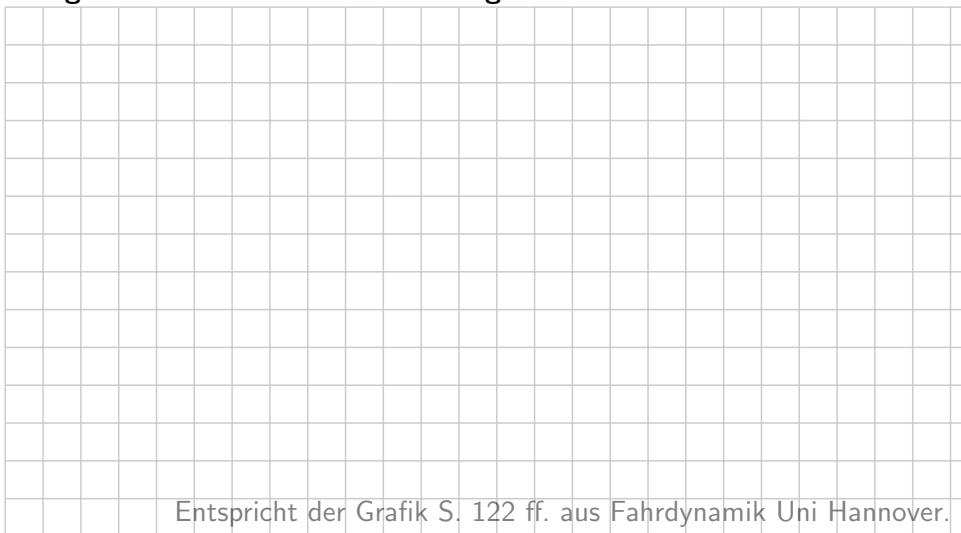
Radsatzlasten und Meterlasten

- Beschränkung der Radsatzlast:
 - Gemäß Streckenkategorie
 - Normativ, z.B. TSI Loc&Pas (für HGV), EN 15528
- Beschränkung der Streckenlast
 - z.B. für Brückenbauwerke, Oberbau

Klasse	Radsatzlast	Meterlast
A	16 t	5,0 t/m
B1	18 t	5,0 t/m
B2	18 t	6,4 t/m
C2	20 t	6,4 t/m
C3	20 t	7,2 t/m
C4	20 t	8,0 t/m
D2	22,5 t	6,4 t/m
D3	22,5 t	7,2 t/m
D4	22,5 t	8,0 t/m
E4	25 t	8,0 t/m
E5	25 t	8,8 t/m



Längen- und Gewichtseinschränkungen



Hier gilt: SK: Schraubenkopplung, AK: Automatische Mittelpufferkopplung, Ukom, Febis etc: Steuerungen für verteilte Traktions- und Bremssteuerung.

Schaut euch doch mal das hier an: Distributed Power und Locotrol

3.3 Wagenkastenrohbau



Zur Einstimmung Sorry, ist Sendung mit der Maus, aber sehr gut!

Anforderungen an den Wagenkasten car body

- Festigkeit (EN 12663):
 - Zug-/Druckkräfte im Zugverband
 - Crash-Szenarien (EN 15227)
 - Drucksöße, Druckdichtigkeit
 - Durchbiegung unter Beladung
 - Schwingungen
- Kunden-/ betriebliche Anforderungen
 - Lebensdauer
 - Reparaturfreundlichkeit, Ersatzteilverfügbarkeit
 - Geringe Masse
 - Design
 - Entsorgung/Recycling

- Normative/gesetzliche Anforderungen
 - Brandschutz (DIN 5510, EN 45545, ...)
 - Material (EG 1907/2006 REACH)
 - Crash und Festigkeit s.o.
- Systemimmanente Anforderungen (Schwingungen, elastische Verformung,...)

Leichtbau der Wagenkästen

- Alle Elemente an Aufnahme der Beanspruchungen beteiligen
- Gut (leicht) ertragbar:
 - Zug- und Druckkräfte
- Mit zusätzlichem Material ertragbar:
 - Torsions- und Biegemomente
- Höherfeste Materialien werden zögerlich angenommen
 - Bedenken bei Wartbarkeit und Lebensdauer



Werkstoffe für Wagenkästen

- Stahl:
 - Klassisch eingesetzt: Baustähle S235, S355
 - Ebenfalls anzutreffen: Edelstähle, z.B. X5CrNi18-10
 - Gut zu fügen und umzuformen
 - Dauerfestigkeit und elastisch/plastisches Verhalten gutmütig
- Aluminium:
 - Geringere Dichte, geringerer E-Modul
 - Dauerfestigkeitsgrenze wenig ausgeprägt

- Schweißnähte wenig ermüdungsfest
- Fügeverfahren erfordern getrennte Behandlung von Stahl
- Kunststoffe:
 - In der Regel faserverstärkt (GFK, CFK)
 - Ermöglichen Integralbauweise und Funktionsintegration
 - Auch als Sandwichmaterialien
- Waben und Schaummaterialien:
 - Eingesetzt im Deformationsbereich

Hauptbaugruppen des Rohbaus

- Untergestell
 - (Mittel/Aussen-) Langträger
 - Querträger
- Seitenwände
 - Druckwechselbelastung
- Dach
 - Wasserablauf
- Endwände
 - Schnittstellen, Crash
- Kopfmodule
 - Vorfertigung, Schnittstellen, Crash



Quelle: Voith Pressebild

Prozess Wagenkastenfertigung

Bei allen Schritten zu beachten: Teils extremer Verzug durch Wärmeeinleitung

1. Einzelteifertigung

- Schneiden, Schweißnahtvorbereitung, Kanten, etc.

2. Baugruppenfertigung

- Schweißen, evtl. Bearbeitung
- Hand- oder Roboterschweißen je nach Naht
- Vermessung

3. Wagenkastenaufbau

- Vorsprengung bei statischer Durchbiegung
- Dichtigkeitsprüfung

4. Richten

5. Sandstrahlen

Prof. Dr. Raphael Pfaff



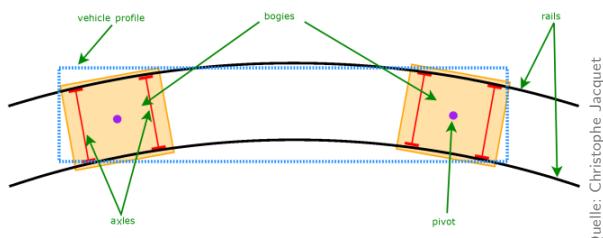
Quelle: Siemens Pressebild

Prüfen der
Aussenkontur

4 Laufwerk (Fahrwerk)

Grundsätzliche Anforderungen

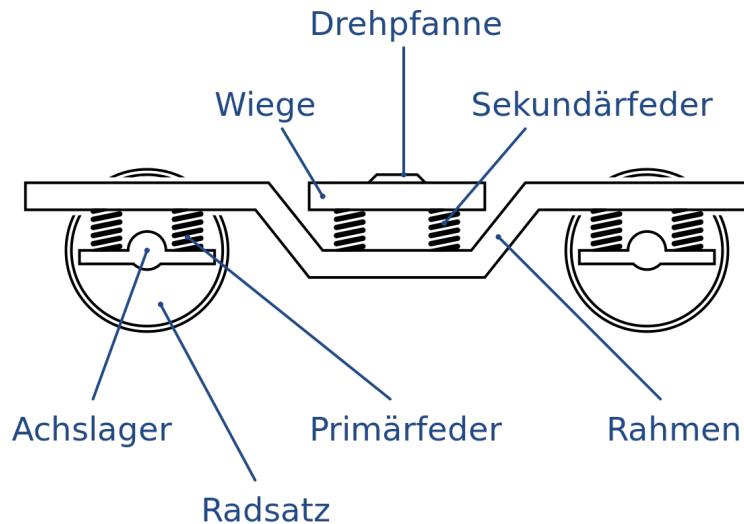
- Übertragung und Ausgleich der Vertikallasten zwischen Rad und Schiene
- Spurführung des Fahrzeugs
- Übertragung und Begrenzung der dynamischen Kräfte, aufgrund von:
 - Gleislagefehlern
 - Bögen
 - Weichen
 - Dynamik zwischen den Fahrzeugen
- Wirksame Dämpfung von angeregten Schwingungen
- Übertragung von Traktions- und Bremskräften



Quelle: Christophe Jacquet

Anatomie der Eisenbahndrehgestelle bogies

- Radsätze *wheelset*
- Räder *wheels*
- Radsatzlager *axlebox*
- Radsatzaufhängung *suspension*
 - Federn
 - Dämpfer
- Begrenzungen und Anschläge
- Wagenkastenanbindung
- Drehgestellrahmen *bogie frame*



Quelle: Partim

Radsätze

- Unterscheidung:
 - Innen-/Aussenlagerung
 - Bremse
 - * Klotzbremse
 - * Radbremsscheibe
 - * Wellenbremsscheibe
 - Antriebe
 - * Symmetrisch
 - * Asymmetrisch



Quelle: Falk2

Radsatzlager

- Heute überwiegend Wälzlager
- Zylindrische Lager:
 - Vorteile bei der Übertragung von Radsatzlasten
 - Wenig bis keine Querführung
- Konische Lager:
 - Reduzierte ertragbare Radsatzlasten
 - Sehr gute Querführung



Quelle: Ketamin

Räder

Unterscheidung

- Konstruktionsprinzip:
 - Einteilig
 - Bereift
- Querschnitt:
 - Gerade
 - S-förmig
 - Konisch
 - Wellenform

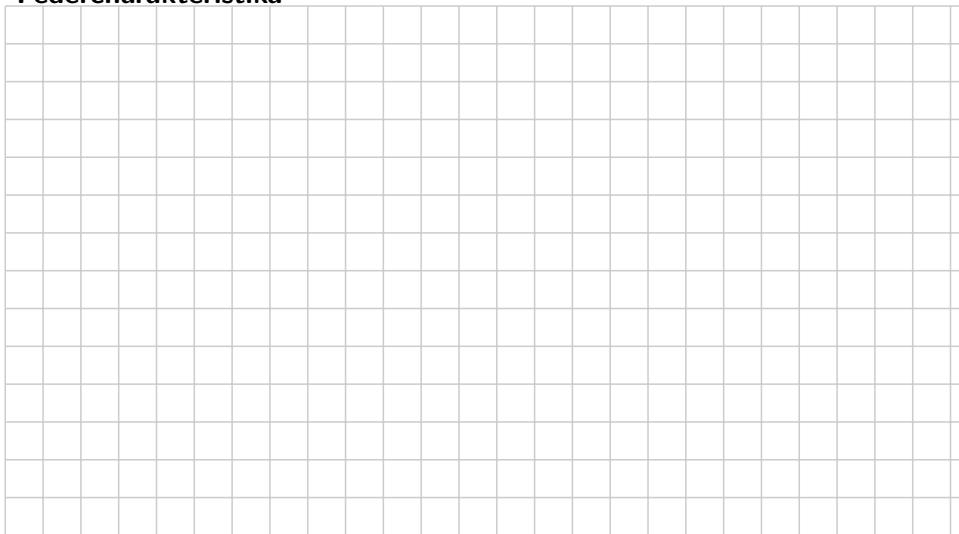
Prof. Dr. Raphael Pfaff



Begrenzungen und Anschläge



Federcharakteristika



Verbindung Drehgestell - Wagenkasten

- Drehpfanne
 - Flach
 - Kugelig
- Drehbar um Drehzapfen

- Meist Übertragung der Längskräfte
- Evtl. zusätzlich Abstützung auf Gleitplatten
- Weitere Verbindungen:
 - Wankstütze
 - Schlingerlämpfer

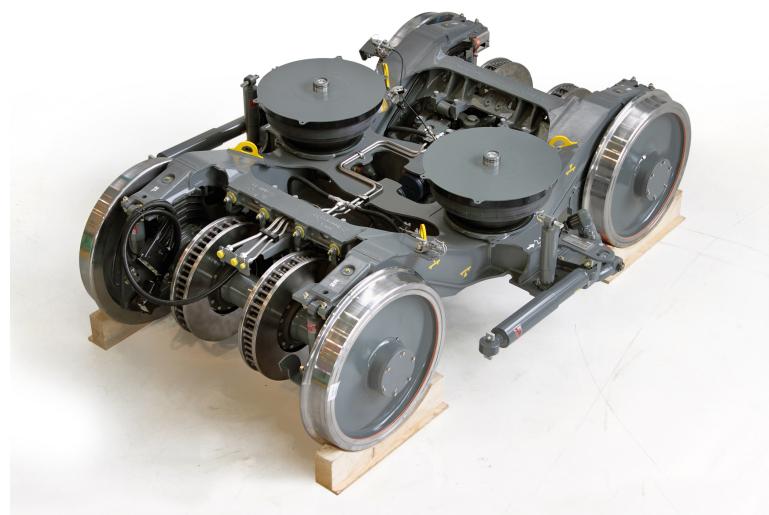


Quelle: Manuel Schneider

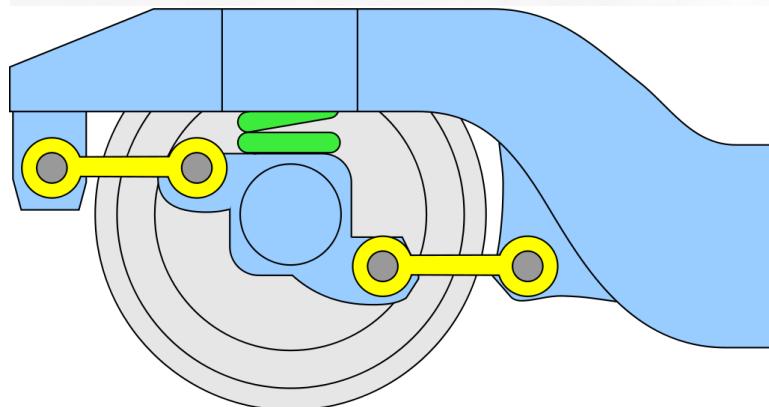
Radsatzaufhängung

- Üblich: zweistufige Federung
 - Primärstufe:
 - * Radsatz gegen Drehgestellrahmen
 - * Beschleunigung bis 100 g
 - Sekundärstufe:
 - * Drehgestellrahmen gegen Fahrzeug
 - * Hohe Anforderungen an Dämpfung
- Bei Güterwagen auch einstufige Federung

Prof. Dr. Raphael Pfaff



Quelle: Siemens Pressebild



Quelle: Clang/ Siemens-Gas

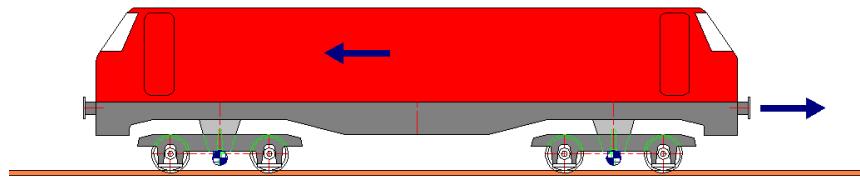
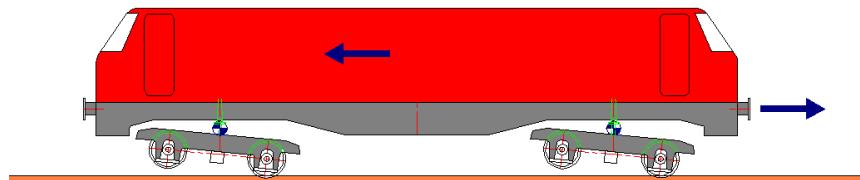


Quelle: Ketamin

Verbindung Drehgestell - Wagenkasten

Prof. Dr. Raphael Pfaff

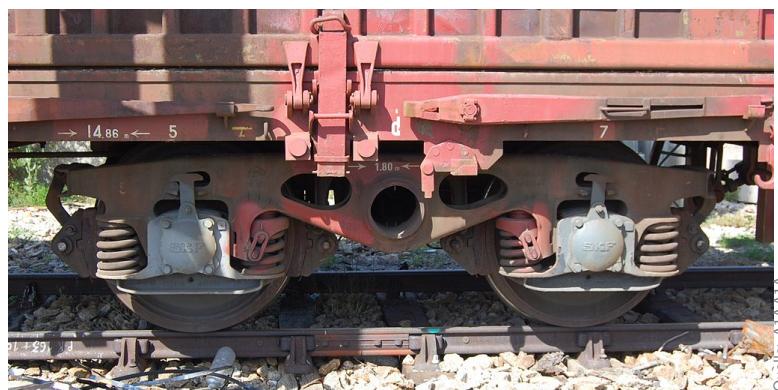
- Drehpfanne
 - Flach
 - Kugelförmig
- Hochanlenkung
- Tiefanlenkung



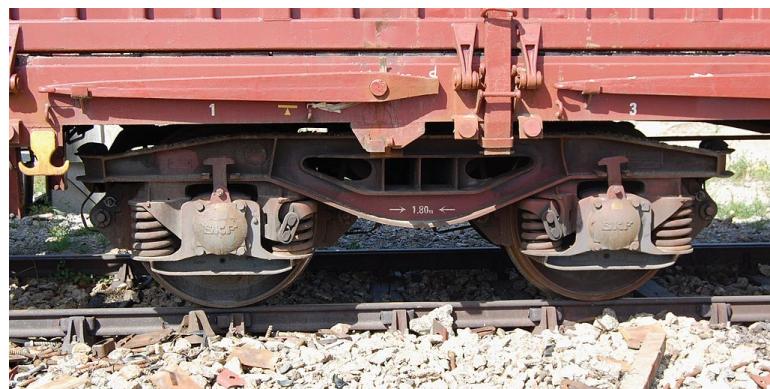
Quelle: Christian Linderke

Drehgestellrahmen

- Form:
 - H-Form
 - O-Form
- Herstellung:
 - Schweißen
 - Gießen



Prof. Dr. Raphael Pfaff

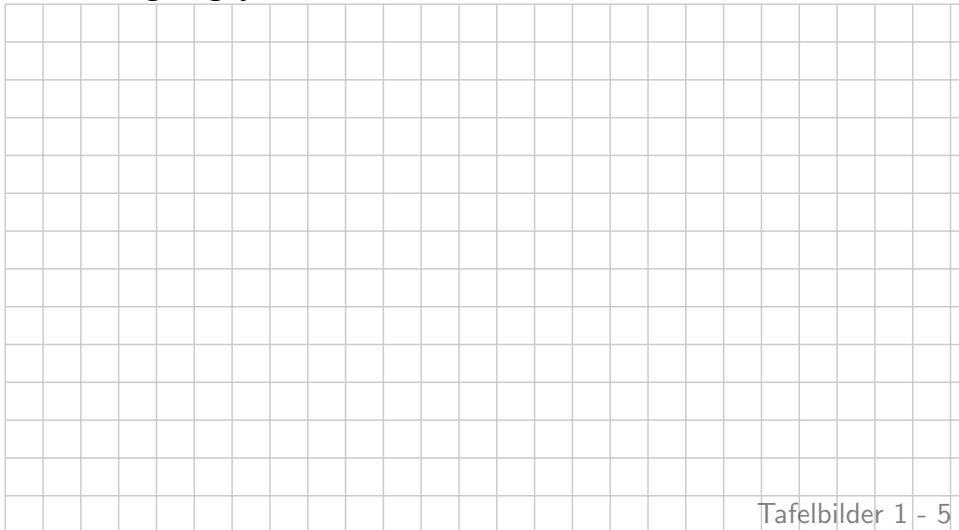


Quelle: A1AA1A

5 Einführung Zugdynamik



Einführung Zugdynamik am Tafelbild



Tafelbilder 1 - 5

6 Zugdynamik

6.1 Kuppelstoß, Crash



Reversibler Energieverzehr: Lösungen, Wirkungsgrade

Crash: Anforderungen der EN15227 (DIN EN 15227, 2010)

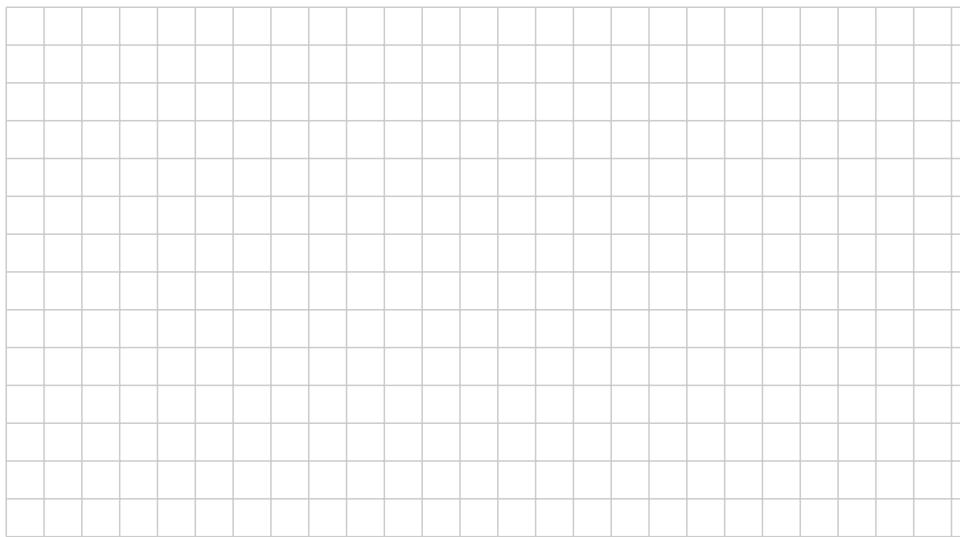
Szenario	Hindernis	Kollisionsgeschwindigkeit v_c			
		C I	C II	C III	C IV
1	Identische Zugeinheit	36	25	25	15
2	Güterwagen 80 t	36	-	25	-
	129 t Regionalzug	-	-	10	-
3	Deformierbar 15 t	$v_{lc} - 50$	-	25	-
	Starr 3 t	-	-	-	25

- Zusätzlich: Anforderungen an Bahnräume
- Überlebensraum und maximale Verzögerungen müssen eingehalten werden
- Nachweis über Komponententests und validierte Modelle möglich



Umsetzung Anforderungen EN 15227

Prof. Dr. Raphael Pfaff



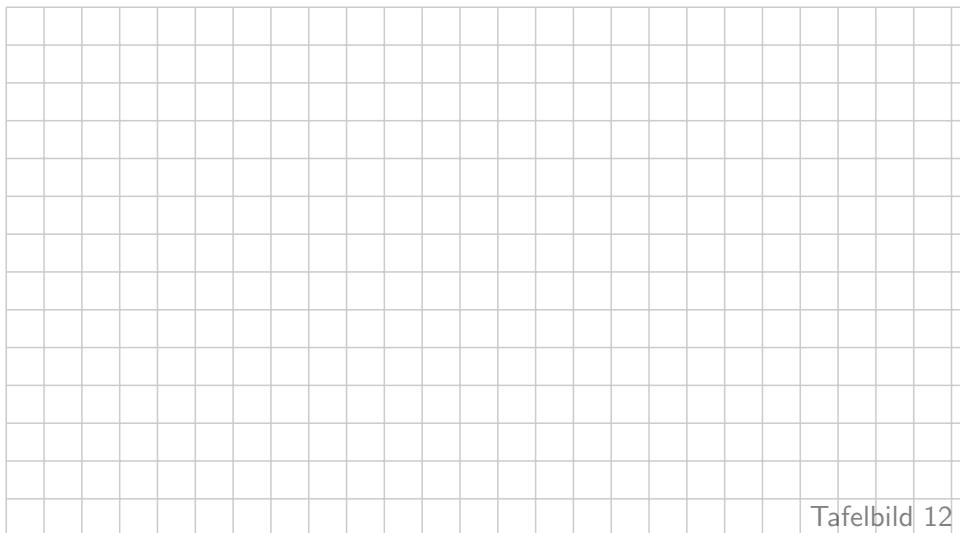
6.2 Kraftschluss, Schlupf

💡 **Kräfte am Rad**



💡 **Physikalische Kraftschlusstheorie**

Prof. Dr. Raphael Pfaff



Tafelbild 12



Kraftschluss-Schlupf-Gesetz

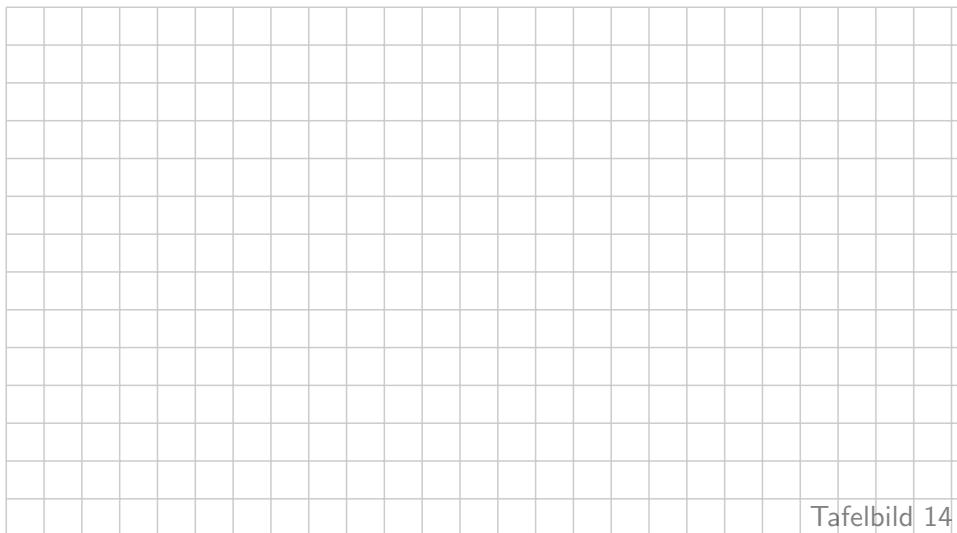


Tafelbild 13



Radschlupf: weitere Einflüsse

Prof. Dr. Raphael Pfaff

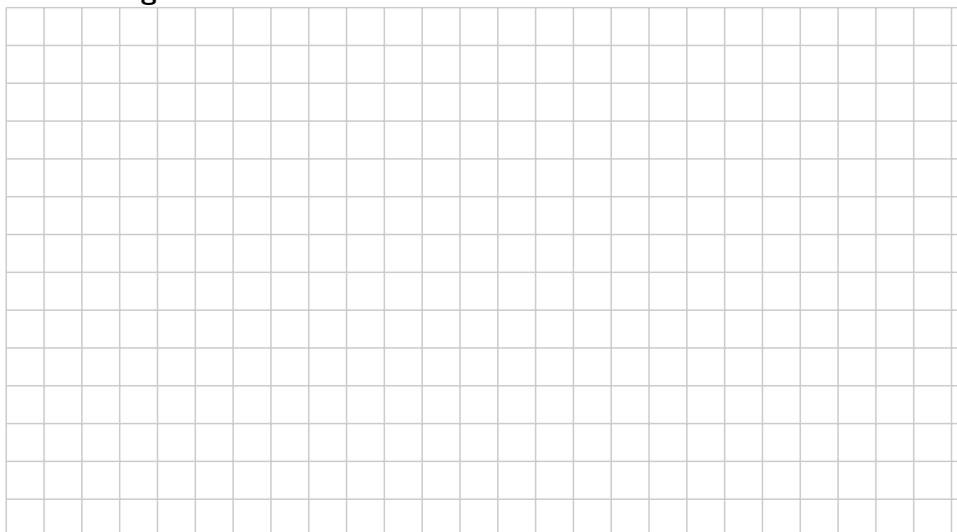


Tafelbild 14

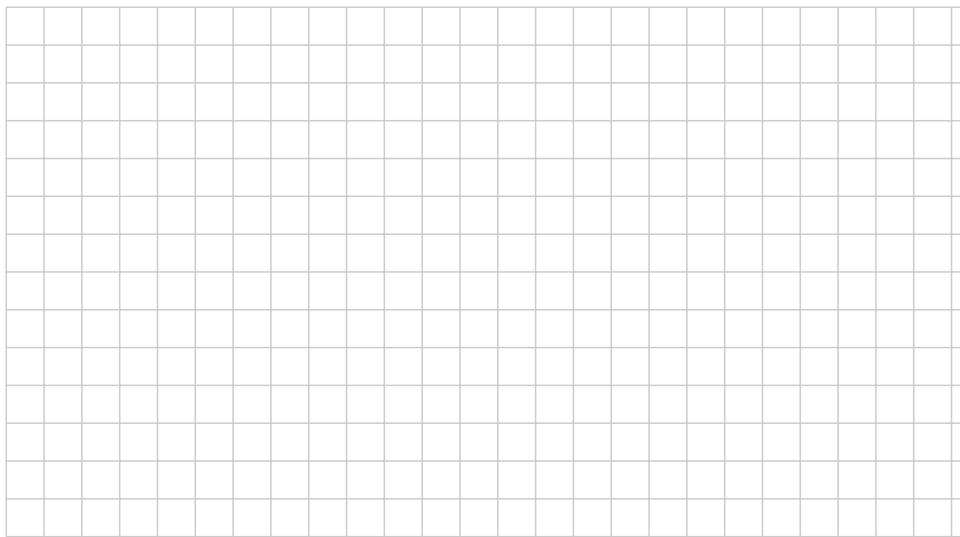
6.3 Fahrwiderstand, Zugkraft, Zugbremsung



Sammlung Fahrwiderstände am Tafelbild



Zugkraftdiagramm am Tafelbild



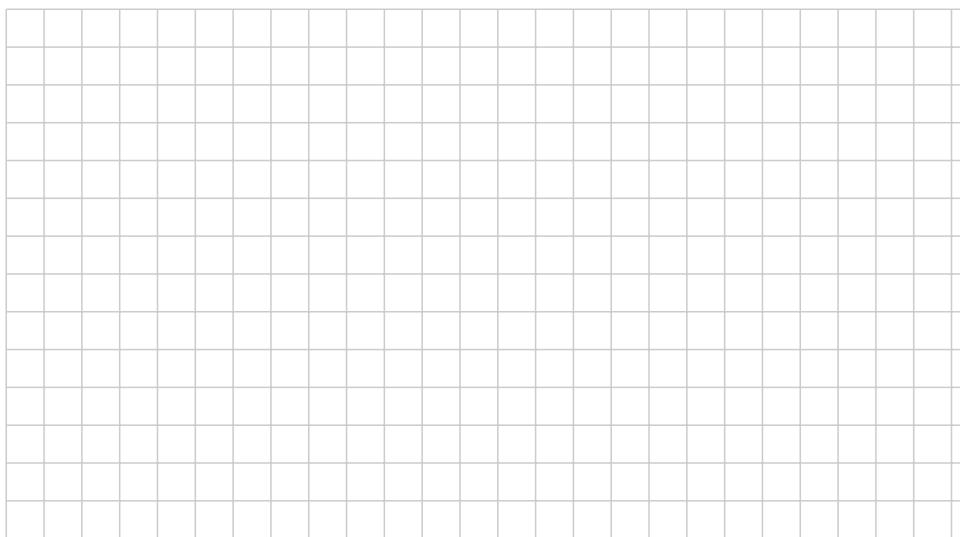
Modelle für Zugdynamik

- Massenpunktmodell
 - z.B. Einzelfahrzeuge, Überschlagsrechnungen
- Homogenes starres Massenbandmodell
 - z.B. Reisezüge
- Inhomogenes starres Massenbandmodell
 - z.B. lange Güterzüge
- Elastisches homogenes Massenbandmodell
 - z.B. Triebzüge
- Elastisches inhomogenes Massenbandmodell
 - Allgemeines Modell

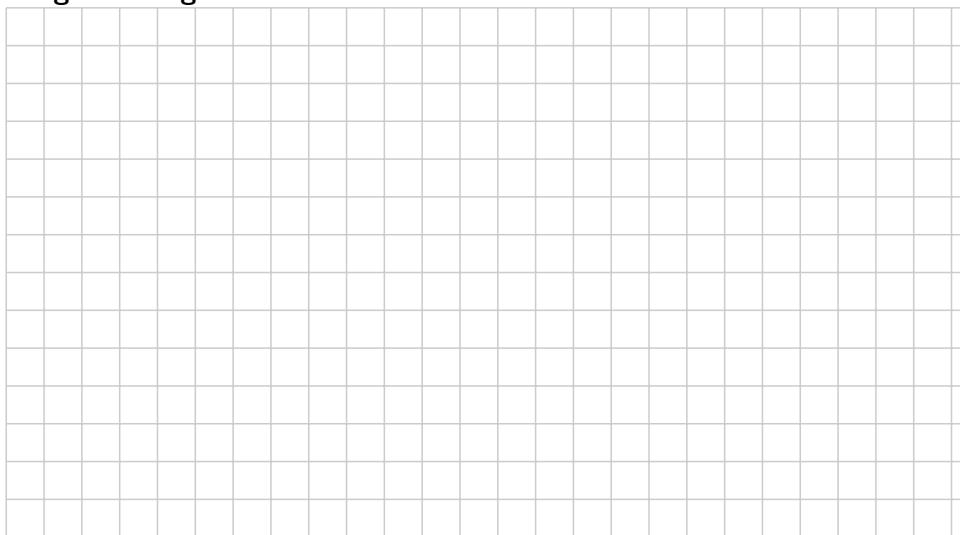


Neigungskraft am Tafelbild

Prof. Dr. Raphael Pfaff



Zugbremsung am Tafelbild



7 Einführung Spurführung

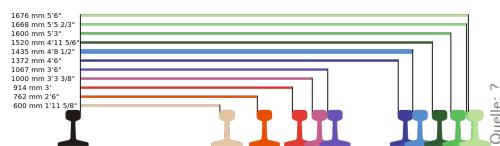
7.1 Spurweiten

Spurweite track gauge

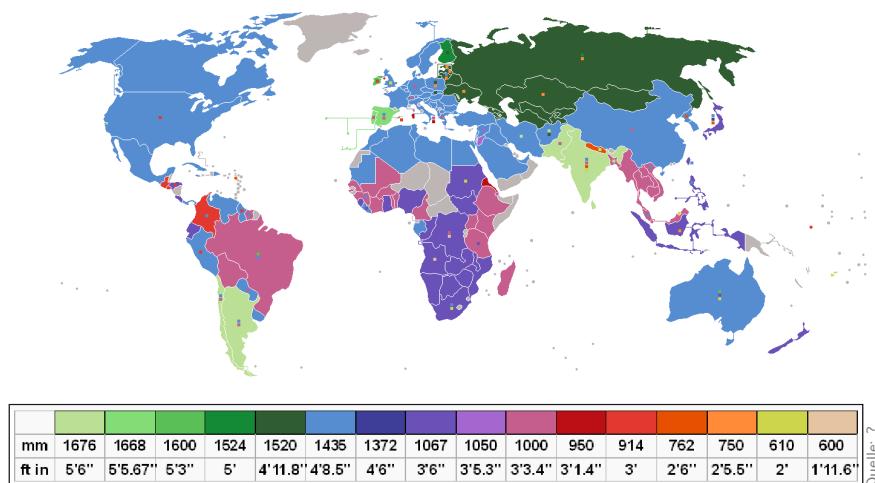
- Spurweiten
 - Begründet aus wirtschaftlichen und militärischen Motiven:
 - Regelspur: 1435 mm
 - Breitspur *wide gauge*
 - * Russische Spur: 1520 mm
 - * Indische Spur: 1676 mm
 - * Iberische Spur: 1668 mm
 - Schmalspur *narrow gauge*
 - * Kapspur: 1067 mm
 - * Meterspur: 1000 mm

Definition 1 (Spurweite). Die Spurweite ist der Abstand der Schienen zueinander, gemessen ($14,5 \pm 0,5$) mm unterhalb der Schienenoberkante tsi (2014).

Definition 2 (Spurweitentoleranz). Abhängig von Netz und Strecke ist die Spurweite toleriert, üblich in Deutschland: (1435^{+35}_{-5}) mm.



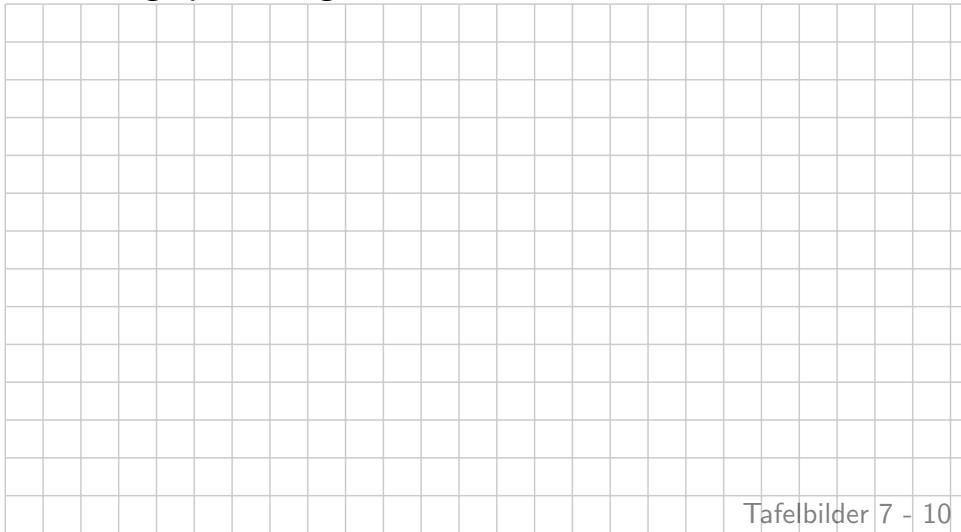
Geografische Verteilung der Spurweiten



Prof. Dr. Raphael Pfaff



Einführung Spurführung



Literatur

Literatur

Technical specification for interoperability relating to the infrastructure subsystem of the rail system in the European Union. Number 1299/2014/EU. European Railway Agency, 2014.

DIN EN 15227. *DIN EN 15227: Bahnanwendungen - Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2010.

Joachim Ihme. *Schienenfahrzeugtechnik.* Springer, 2019.

Dietrich Wende. *Fahrdynamik des Schienenverkehrs.* Vieweg und Teubner, 2003.