

Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik



04 Fahrtechnik

Dr.-Ing. Michael Karatas

Siemens Mobility GmbH
Krefeld-Uerdingen

michael.karatas@siemens.com



Gliederung



Fahrtechnik

- Einführung
- Geradeauslauf
- Auslegungsrechnung
- Seitenwindwirkung

Systemkinematik

- Wechselwirkung
- Bogenlauf
- Messtechnik



Überblick



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



Gliederung



Fahrtechnik

- Einführung
- Geradeauslauf
- Auslegungsrechnung
- Seitenwindwirkung

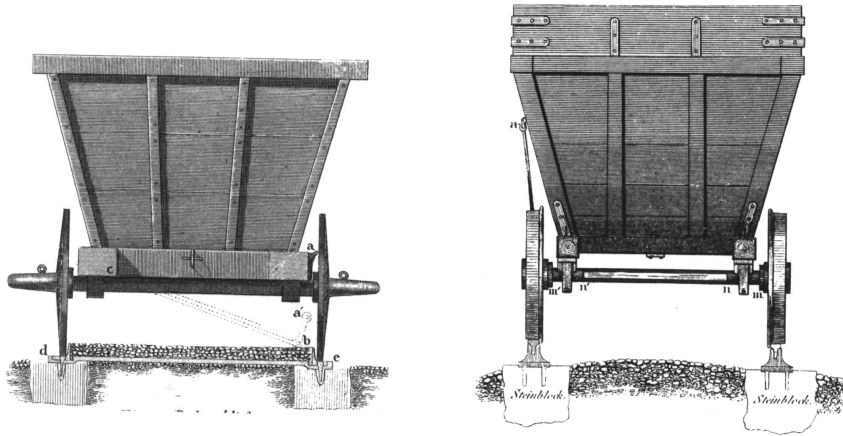
Systemkinematik

- Wechselwirkung
- Bogenlauf
- Messtechnik

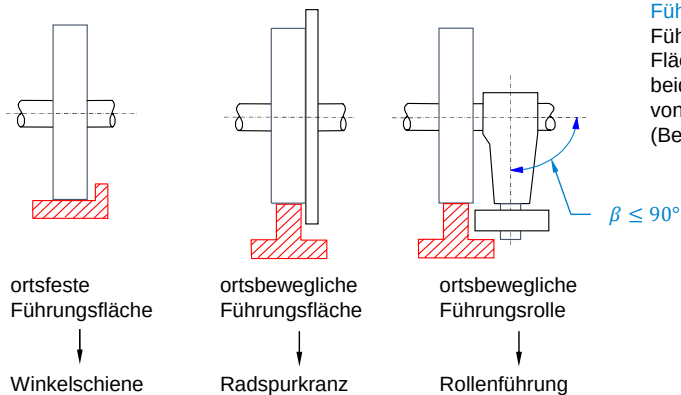


4.1 Einführung Allgemeines

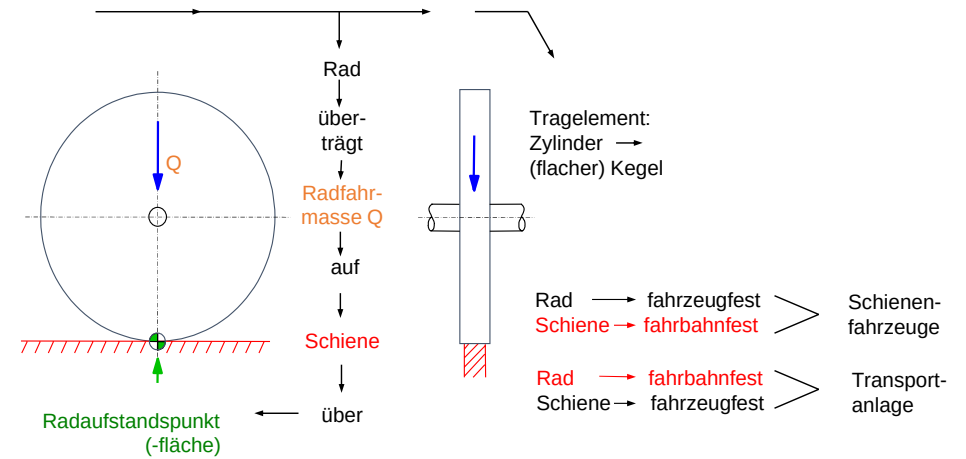
Anfänge der Spurführung



4.1 Einführung Führen



4.1 Einführung Tragen



4.1 Einführung Schiene im Prinzip 190 Jahre alt

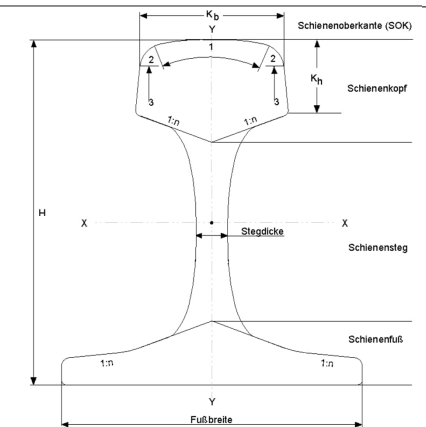
Breitfußschiene

Erfinder: Charles Vignol (1829)
Masse: zwischen 20 und 100 kg/m

1	Scheitelfläche
2	Kopfrundung
3	Fahrschienenflanke
1:n	Nelgung der Laschenanlagelflächen
x-x/y-y	Schwerpunktachsen
K _h	Kopfhöhe
K _b	Kopfbreite
H	Schienenhöhe

Bezeichnungen

49 kg/m → S 49
54 kg/m → S 54
60 kg/m → UIC 60
(70 kg/m)



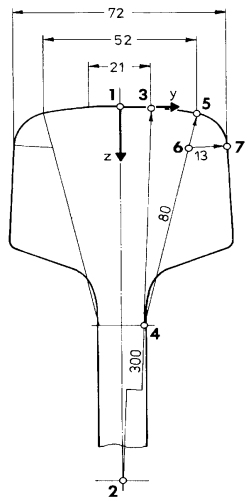
Typische Produktionslänge heute: 120 m
Verbindung durch Schweißen. Patentierung des
THERMIT-Prozesses durch Prof. Goldschmidt 1895

Quelle:
ZEVrail, Okt.2015, S. 371



4.1 Einführung

Geometrie des Schienenkopfes



Schienenkopf UIC60

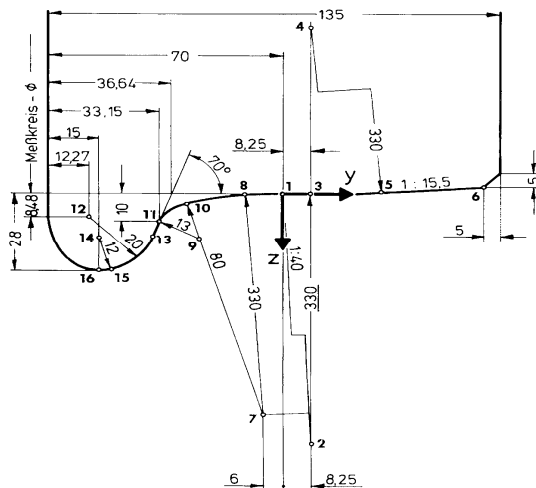
Quelle: Wikipedia



4.1 Einführung

Radprofil DB II

Lauf des Radsatzes Radprofil DB II

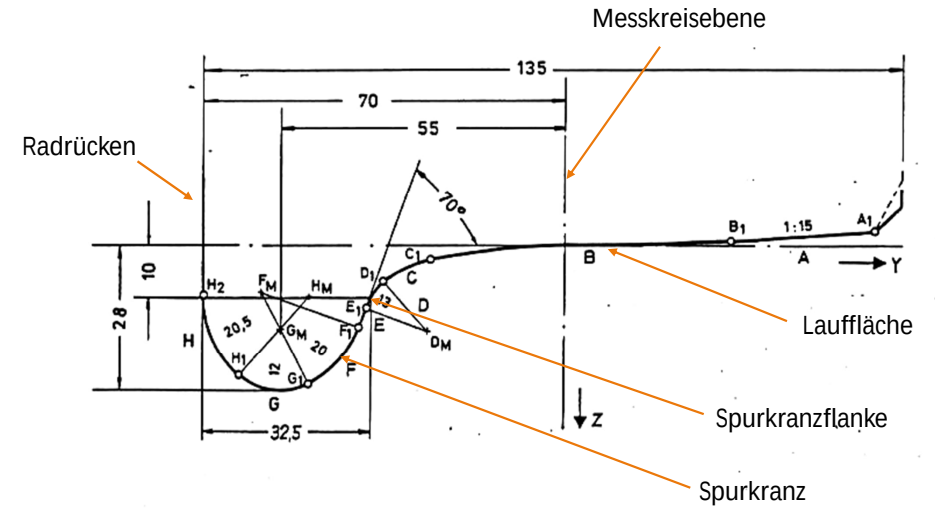


4.1 Einführung

Elemente Einheitsradprofil ORE S1002/3

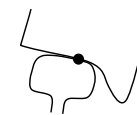
Einheitsradprofil

Siehe EN 13715



4.1 Einführung

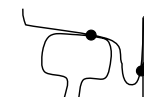
Führungsfälle



Einpunktberührung in der
Laufläche (erwünscht)

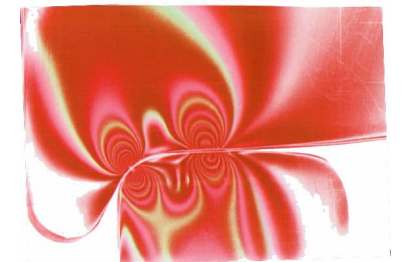


Einpunktberührung in der
Spurkranzstirnfläche
(nicht erwünscht)

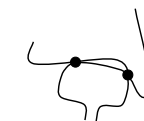


2- Punktberührung
(erwünscht z.B. Weiche!)
Spurkranzrückflächenberührung

Radlenker

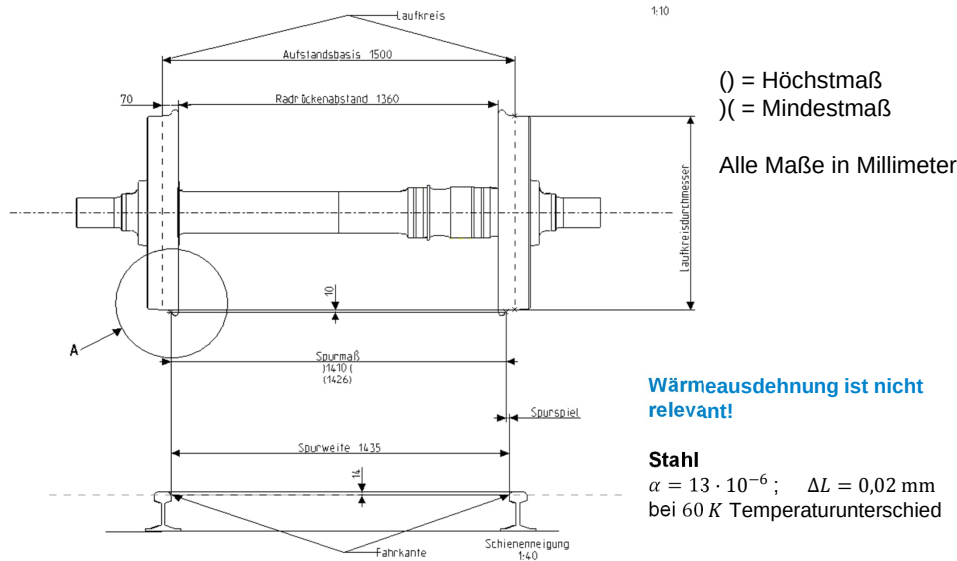


Spannungsoptische Aufnahme einer 2-Punkt-Berührung



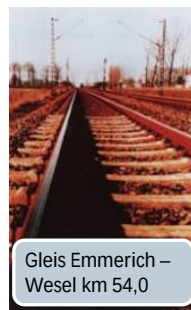
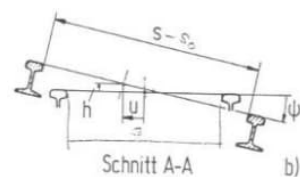
2- Punktberührung
(Bogenlauf)

4.1 Einführung Radsatz

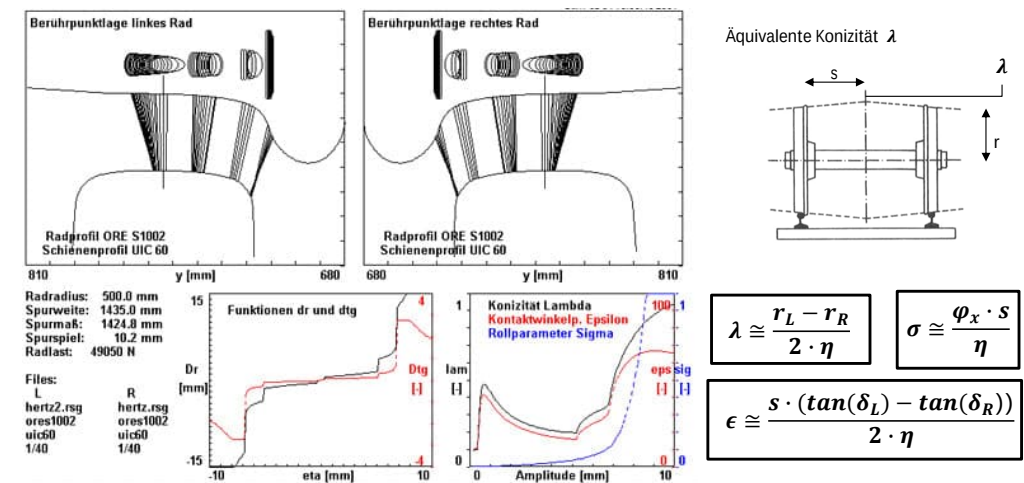


4.1 Einführung Gleislage Abweichungen

Fehlertolerantes Rad-Schiene-System

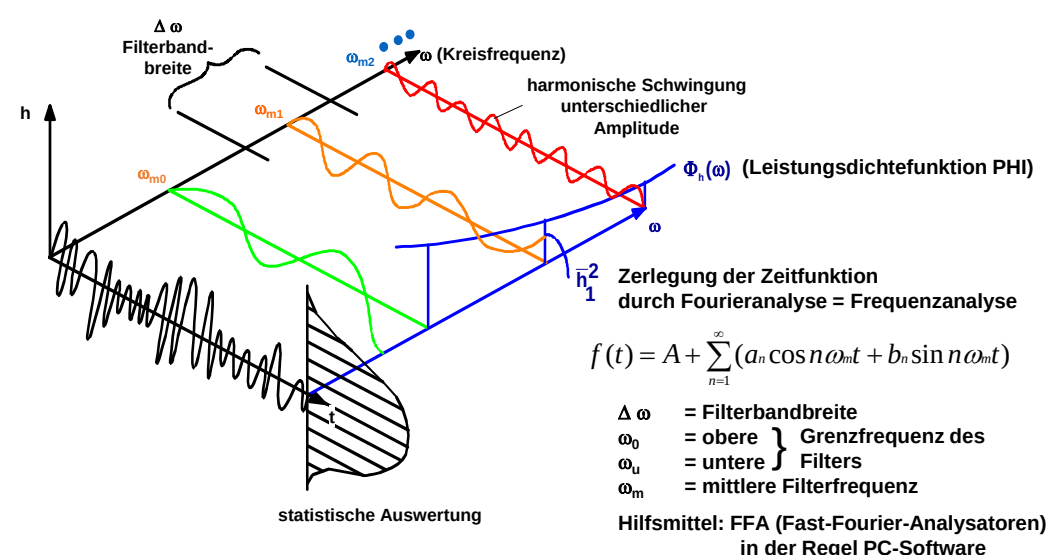


4.1 Einführung Rad / Schiene - Kontakt



Variablen: Kontaktwinkel δ , Querverschiebung η , Wankwinkel φ_x , halber Laufkreisabstand s
Einflussgrößen: Profilgeometrie, Spurweite, Einbauneigung Schienen

4.1 Einführung Fahrbahnunebenheiten, Frequenzverhalten



4.1 Einführung

Spurweiten in der Welt

Spurweite der Normalspur: 1435 mm = 4' (engl. Fuß) + 8,5'' (Zoll)
Toleranzbereich: - 5 mm bis + 35 mm oder 1430 mm bis 1470 mm

Spurweiten und ihre prozentualen Anteile in der Welt:

1435	65%	Normalspur in Europa, USA, Türkei, China usw.
1524	11%	Breitspur in Russland, Finnland, Panama
1067	7,7%	Kapspur im südlichen Afrika, Australien, Taiwan, Japan, Neuseeland
1000	7,5%	Meterspur in Algerien, Brasilien, Vietnam, Thailand, Pakistan, Malaysia
1676	5,7%	Breitspur in Indien, Pakistan, Chile, Argentinien (Portugal, Spanien 1668 mm)
1600	1,2%	Breitspur in Irland, Australien, Brasilien

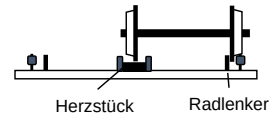
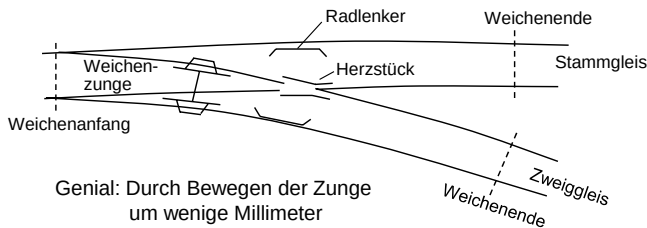
Summe: 98,1%

Insgesamt 35 (!!!) verschiedene Spurweiten

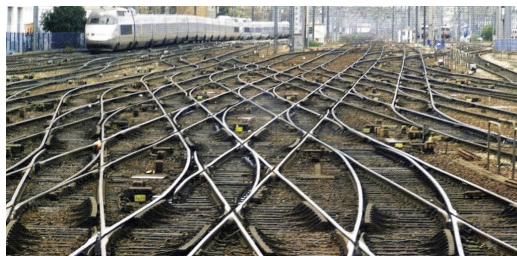
Die breiteste realisierte Spur gab es ab 1833 in England mit einer Spurweite von 7ft (2134 mm). Verbindung „Great Western“ von Paddington nach Bristol und weiter. Geplant und umgesetzt von Isambard Kingdom Brunel. Ab 1869 umgespurt auf Normalspur.

4.1 Einführung

Die Weiche



Bei Hochgeschwindigkeitsweichen gibt es Sonderausführungen mit beweglichen Herzstücken etc. ohne Laufflächenunterbrechung.



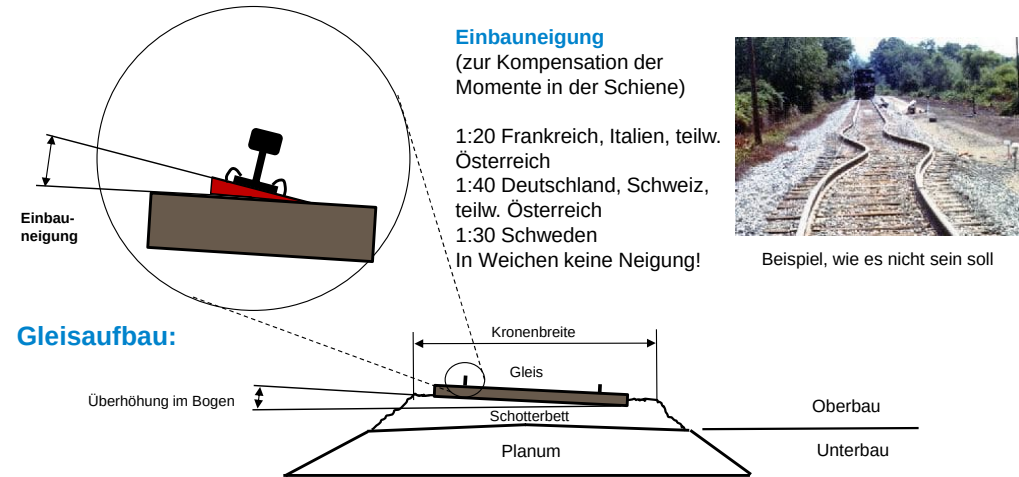
Quelle: Paris-Montparnasse aus dem Artikel 1980-2020, 40 Jahre Entwicklung des französischen Eisenbahnnetzes
Werner Weigand
ETR, März 2016, Nr.3, Seite 33



Zum Vergleich die Weiche beim Transrapid
Quelle:
Internet, 02.05.2017
www.hochgeschwindigkeitszuege.com

4.1 Einführung

Einbauneigung und Überhöhung



Gleisaufbau:

Herstellungskosten für eine zweigleisige Strecke:

ca. 12 – 30 Mio € / km, abhängig von vielen Parametern (Brücken, Tunnel, Schnellfahrstrecke etc.; Anteil Elektrifizierung ca. 2-3 Mio € / km)

4.1 Einführung

Achslasten und Meterlasten

Maximale Achslasten

5 t	Nahverkehr
16 t	einige Nebenbahnen und Neigetechnikstrecken
18 t	Nebenbahnen
20 t	Hauptbahnen
22,5 t	Güterzugstrecken
35 t	Heavy Haul (Amerika)

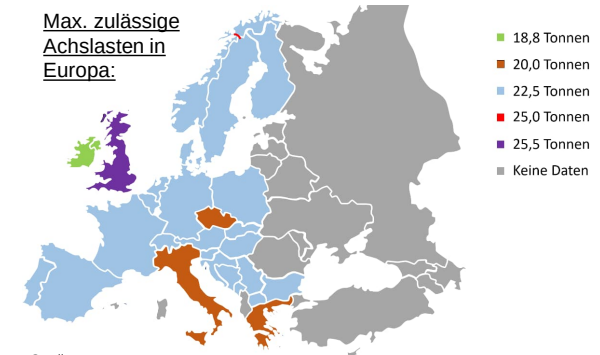
(Begrenzungen verursacht durch den Oberbau)

Meterlasten

6-8 t/m

(Begrenzung verursacht durch Brücken)

Max. zulässige Achslasten in Europa:

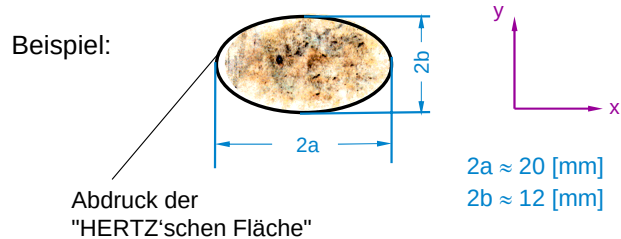


Quelle:
<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/325055/>

4.1 Einführung

Rad / Schiene Berührungsfläche

Durch elastische Verformung von Rad und Schiene entsteht unter der Radlast Q eine Berührungsfläche: "HERTZ'sche Fläche"



$$a \approx k_a \cdot \sqrt[3]{\frac{v^2 Q r}{E}}$$

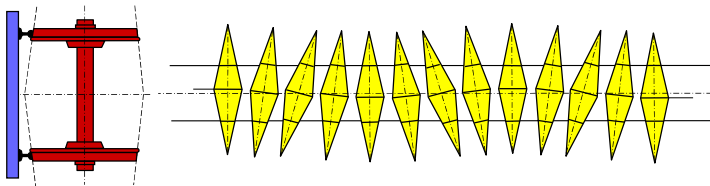
$$b \approx k_b \cdot \sqrt[3]{\frac{v^2 Q r}{E}}$$

Q = Radlast [kN]
 r = Laufkreisradius [m]
 E = E-Modul [N/mm²]
 k_a, k_b = Geometriebeiwerte
 v = Querkontraktionszahl [-]

4.2 Geradeauslauf

Sinuslauf

- Radsatz idealisiert als Doppelkegel
- Masselos



Gliederung

Fahrttechnik

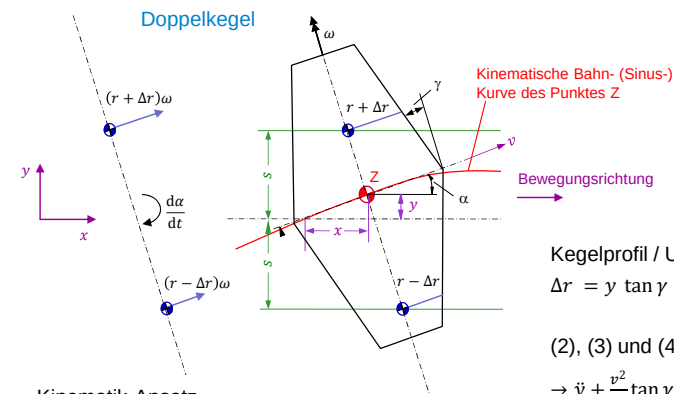
- Einführung
- Geradeauslauf
- Auslegungsrechnung
- Seitenwindwirkung

Systemkinematik

- Wechselwirkung
- Bogenlauf
- Messtechnik

4.2 Geradeauslauf

Sinuslauf



Kegelprofil / Umfangsgeschwindigkeit

$$\Delta r = y \tan \gamma \quad (3) \quad \omega = v/r \quad (4)$$

(2), (3) und (4) in (1)

$$\rightarrow \ddot{y} + \frac{v^2}{sr} \tan \gamma \cdot y = 0 \quad (5)$$

Mit $\Omega^2 := \frac{v^2}{sr} \tan \gamma = (2\pi f)^2$ ergibt sich die
Frequenz f des Sinuslaufs [$y = y_0 \sin(\Omega t)$]

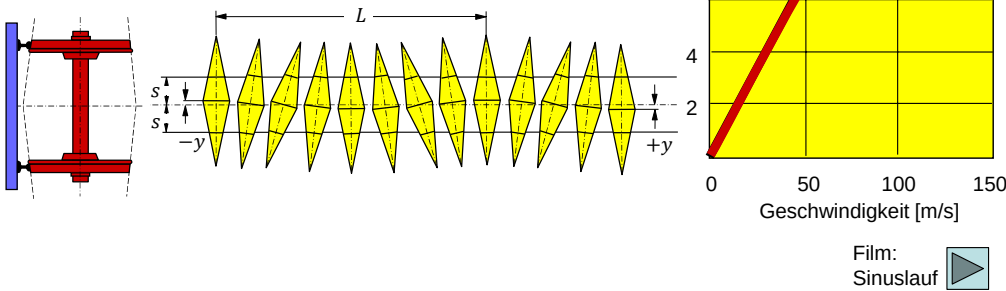
$$f = \frac{v}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\tan \gamma}{sr}} \quad (6)$$

4.2 Geradeauslauf Sinuslauf

Mit $v = Lf$ ergibt sich die
Wellenlänge L des Sinuslaufs zu

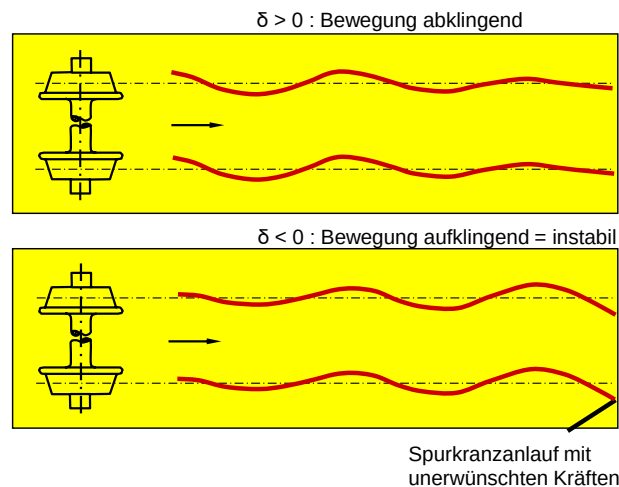
$$L = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{sr}{\tan \gamma}} \quad (7)$$

Die sehr vereinfachende
Formel nach Klingel
gibt nur im niedrigen
Geschwindigkeitsbereich
die Realität wieder.

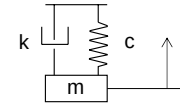


4.2 Geradeauslauf Stabilität des Radsatzlaufes

▪ Radsatzlauf in der Geraden



4.2 Geradeauslauf Grundlagen der Schwingungstechnik



Differentialgleichung:
 $m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = 0 \quad \Sigma F=0$
 (homogene Lineare DGL 2. Ordnung)
 vektoriell gleiche Form!

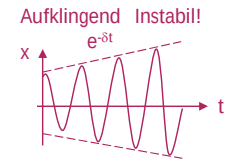
Ungedämpfte
 Kennkreisfrequenz $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$
 Abklingkonstante $2\delta = k/m$

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

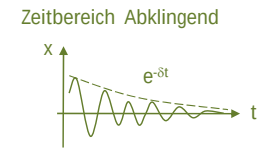
Weitere Größen zur Beschreibung der Dämpfung:
 Dämpfungsgrad Theta (dimensionslos) $\vartheta = \delta/\omega_0 = D$
 auch Lehr'sches Dämpfungsmaß D

Für $\delta < \omega_0$ werden 3 Fälle unterschieden:

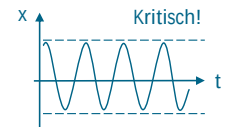
1. Fall: $\delta < 0$



2. Fall: $\delta > 0$

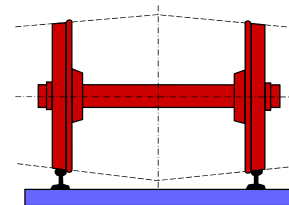


3. Fall: $\delta = 0$



4.2 Geradeauslauf Bedeutung der Spurführung

Neben der Bremstechnik und der Signaltechnik
 ist die Spurführungstechnik eine der tragenden Säulen
 der Sicherheit in der Bahntechnik



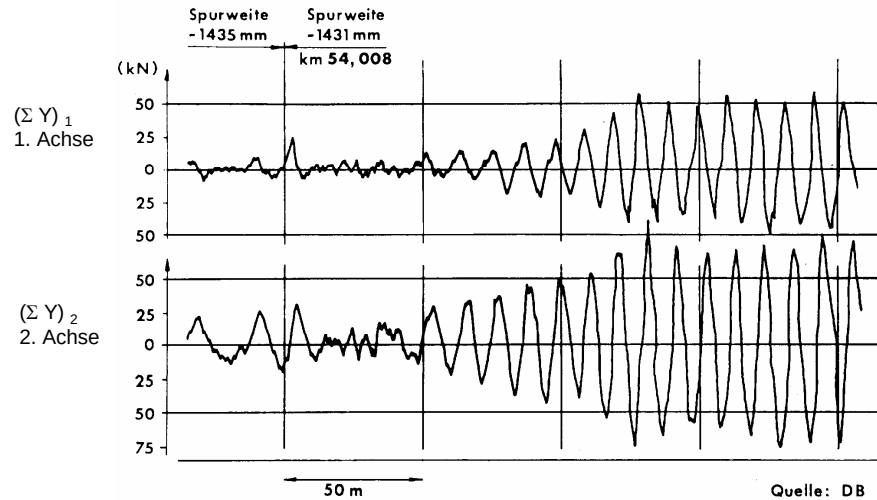
Schwingungseffekte haben einen
 wesentlichen Einfluss auf die
 Fahrsicherheit.



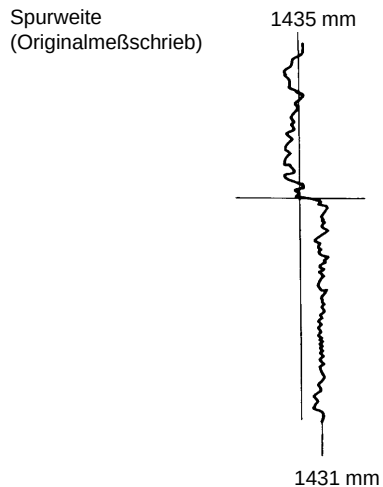
Eine Entgleisung ist der Schrecken jeden Eisenbahners

4.2 Geradeauslauf Spurführungskräfte

Spurführungskräfte Lok 181.2 ohne Drehdämpfer



4.2 Geradeauslauf Berührungsgeometrie Wechsel der Spurweite



Gleis Emmerich - Wesel km 54,0

4.2 Geradeauslauf Wirkung der Drehdämpfer

Spurführungskraft (BR 181.2)

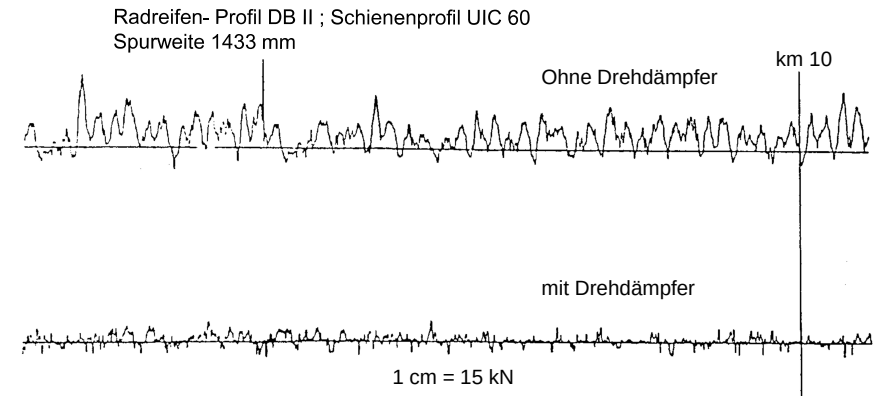
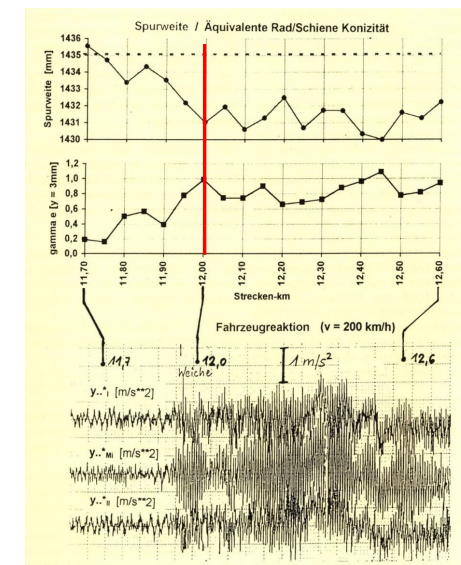


Bild 13. Spurführungskraft eines Rades des führenden Radsatzes,
 $v = 180 \text{ km/h}$, gerades Gleis.

4.2 Geradeauslauf Beispiel Änderung der äquivalenten Konizität

Wagenkastenquerschwingungen als
Funktion von Spurweite und
äquivalenter Konizität

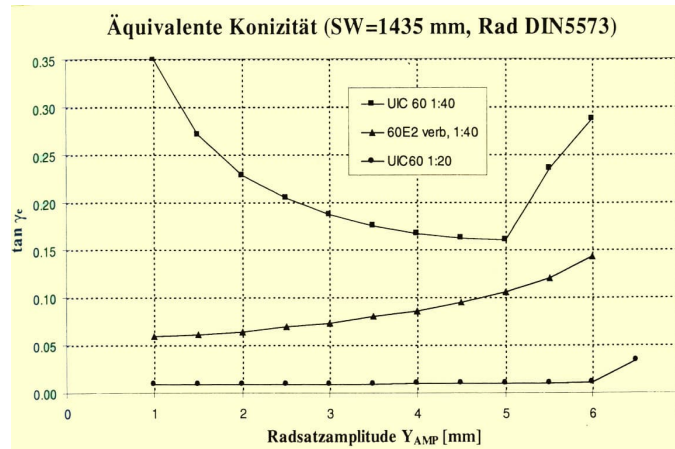


Quelle: ETR 48 (1999), H.9
Dr. von Madeyski
Fahrwerkstechnik-
im Zusammenwirken mit dem
Fahrzeug und dem Fahrzeugkasten

4.2 Geradeauslauf

Beispiel Änderung der äquivalenten Konizität

Verbesserung der äquivalenten Konizität durch geändertes Schienenkopfprofil „UIC 60 E 2 verbessert“



Quelle: ETR 48 (1999), H.9 Dr. von Madeyski Fahrwerkstechnik-im Zusammenwirken mit dem Fahrzeug und dem Fahrzeugkasten

4.2 Geradeauslauf

Wurzelortskurven

Mit Linearisierung geht das Differentialgleichungssystem über in

$$\underline{M} \cdot \ddot{x} + \underline{D} \cdot \dot{x} + \underline{C} \cdot x = 0$$

wobei

$\underline{M}$ = Massenmatrix

$\underline{D}$ = Dämpfungsmatrix

$\underline{C}$ = Steifigkeitsmatrix

Die Dämpfungsmatrix ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit v:

$$\underline{D} = \underline{D}_1 + \frac{1}{v} \cdot \underline{D}_2 + v \cdot \underline{D}_3$$

Das DGL- System ist damit ein System mit konstanten Koeffizienten und der Fahrgeschwindigkeit v als Parameter. Die Lösungen des DGL- Systems, die „Eigenwerte“ haben die Form:

$$\lambda = a \pm i\omega = \text{Re} \pm i \cdot \text{Im} \quad \text{Eigenwert}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \text{Im} \quad \text{Frequenz}$$

$$D = \frac{-\text{Re}}{\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}} \quad \text{Dämpfungsmaß}$$

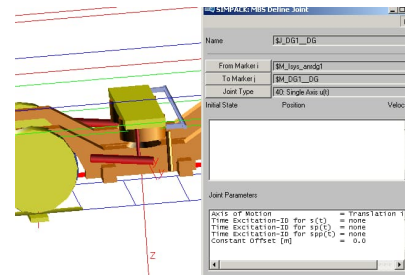
Löst man das DGL- System für schrittweise wachsendes v, erhält man Werte

$\lambda = f(v)$ „Wurzelortskurven“ in komplexer Zahlenebene

4.2 Geradeauslauf

Stabilität (Systemdynamik)

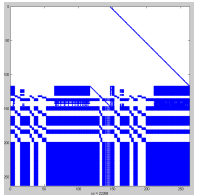
Mechanisches Modell



Linearisierung x- Zustandsvektor,
y Ausgangsvektor
u-Eingangsvektor:
 $\dot{x} = Ax + Bu$
 $y = Cx + Du$

Systemmatrizen und typische Besetzttheits-Patterns

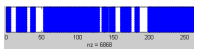
Systemmatrix A



Eingriffsmatrix B



Ausgangsmatrix C



Durchgangsm. D



4.2 Geradeauslauf

Wurzelortskurven

- Wurzelortskurve DG-Sinuslauf im Gesamtsystem (Fahrzeug)

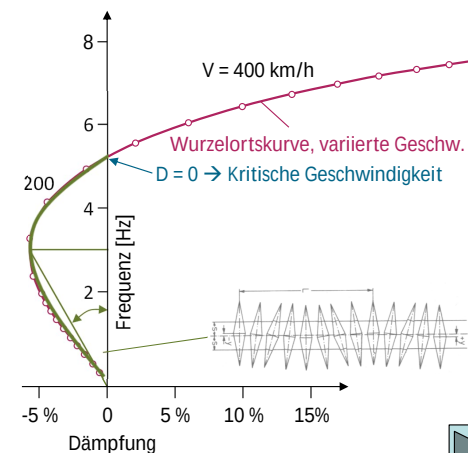
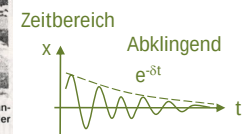
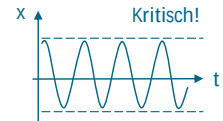
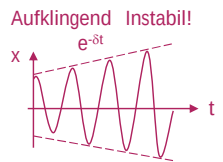
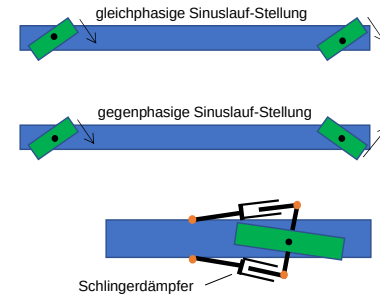
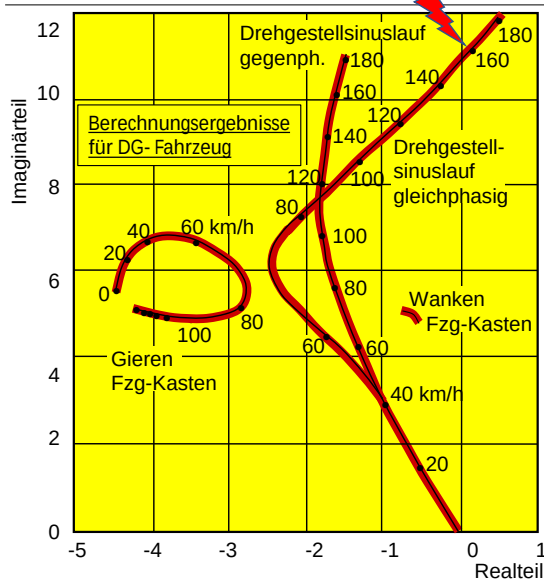


Bild 1: Gleisverwerfung, verursacht durch ein französisches Lokomotivgespann BB 9004 bei der Weltrekordfahrt mit 331 km/h am 29. März 1955.



4.2 Geradeauslauf

Fahrzeugeigenverhalten Wurzelortskurven



Eigenwerte $\lambda = a \pm i\omega$
 Realteil $\text{Re}(\lambda) = a$
 Imaginärteil $\text{Im}(\lambda) = \pm \omega$
 gedämpfte Frequ. $f = \pm \frac{1}{2\pi} \text{Im}(\lambda)$
 Dämpfungsmaß $D = \frac{-\text{Re}(\lambda)}{\sqrt{\text{Re}(\lambda)^2 + \text{Im}(\lambda)^2}}$

Gliederung

Fahrtechnik

- Einführung
- Geradeauslauf
- Auslegungsrechnung
- Seitenwindwirkung

Systemkinematik

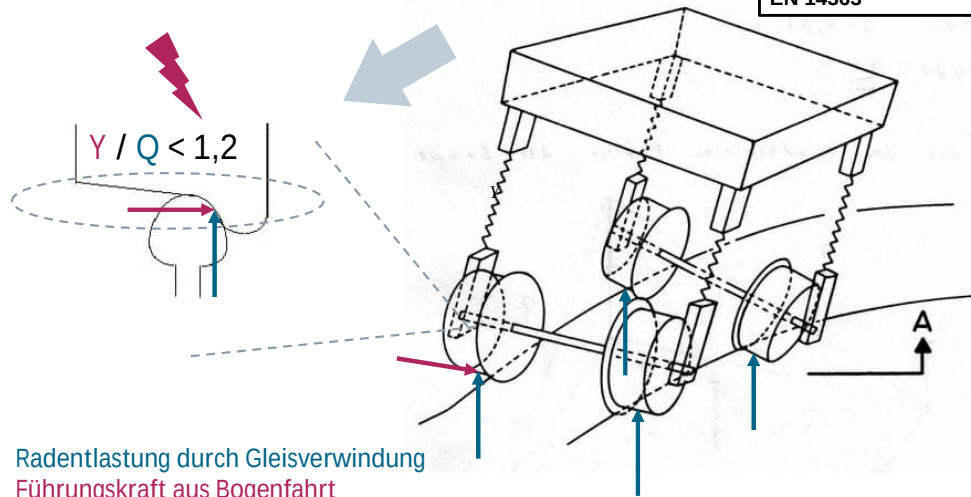
- Wechselwirkung
- Bogenlauf
- Messtechnik

4.3 Auslegungsrechnung

Grenzwerte der Fahrsicherheit

Sicherheit gegen Entgleisung in der Gleisverwindung

Fahrtechnik-Norm
EN 14363

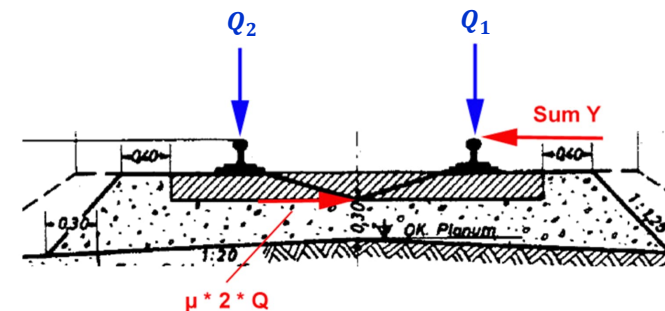


Radentlastung durch Gleisverwindung
Führungskraft aus Bogenfahrt

4.3 Auslegungsrechnung

Grenzwerte der Fahrsicherheit

Prud'homme-Limit Sicherheit gegen Gleisrostverschiebung



$$\sum Y_{\text{lim}} = k \left(10 + \frac{Q_1 + Q_2}{3} \right)$$

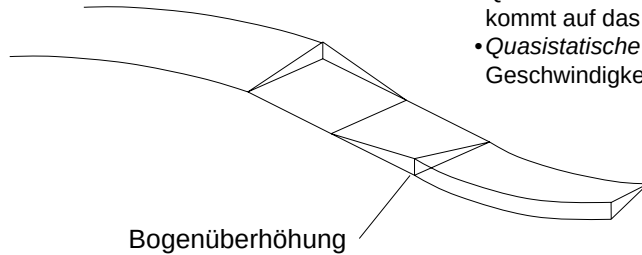


4.3 Auslegungsrechnung Entgleisungssicherheit

EN 14363 Kap. 4.1

Sicherheit
gegen Entgleisen

- Ursachen für Gleisverwindungen sind z.B. Bogenüberhöhungen oder Gleislagefehler
- Gefederte Fahrwerke folgen zwar dem Schienenverlauf, es gibt aber Radbe- und entlastungen
- Radaufstandskräfte dürfen nicht zu klein und Querkräfte dürfen nicht zu groß werden. Es kommt auf das Verhältnis Y/Q an.
- *Quasistatische* Betrachtung bei niedrigen Geschwindigkeiten



Bogenüberhöhung

Durchfahren von Gleisverwindungen

Sicherstellen, dass
beim Befahren von
Gleisverwindungen
Entgleisungen
verhindert werden

4.3 Auslegungsrechnung Entgleisungssicherheit

Y/Q ist ein Maß für die Führungsfähigkeit des Rades.
Welche Y/Q -Werte kann ich erzeugen (und zulassen)?

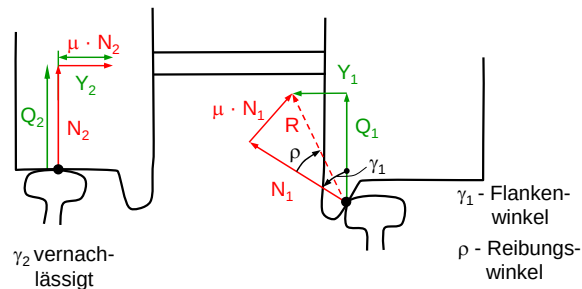
EN 14363 Kap. 4.1,
Sicherheit gegen Entgleisen

$$Y_1 = \mu \cdot N_1 \cos(\gamma) - N_1 \sin(\gamma)$$

$$Q_1 = -N_1 \cos(\gamma) - \mu \cdot N_1 \sin(\gamma)$$

$$\Rightarrow \frac{Y_1}{Q_1} = \frac{\tan(\gamma) - \mu}{1 + \mu \cdot \tan(\gamma)}$$

Grenzwert von Nadal



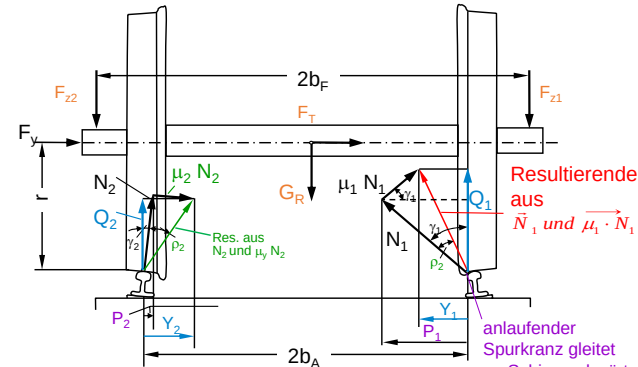
γ_1 - Flanken-
winkel

ρ - Reibungs-
winkel

γ_2 vernach-
lässigt

4.3 Auslegungsrechnung Entgleisungssicherheit

Situation: Anlauf am Rad 1, bei Rad 2 Spiel zwischen Spurkranz und Schiene. In der senkrechten Querebene wirken im Berührungspunkt immer die Normalkraft N und die Gleitkraft μN . Die **Resultierende** daraus kann auch aus **Senkrecht- (Q)** und **Querkraft (Y)** zusammengesetzt gedacht werden.



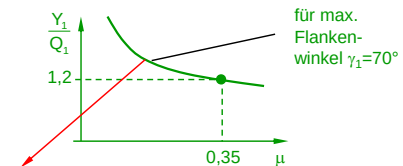
Die Führungskräfte Y_1 und Y_2 beiderseits nach gleisinnen gerichtet wirken auf die Schienen des Gleises spreizend, Gleis wird auf Spuraltefähigkeit beansprucht

anlaufender
Spurkranz gleitet
an Schiene abwärts
→ Gleitwiderstand
 $\mu_1 \cdot N_1$ ist schräg
aufwärts gerichtet

$F_{z1,2}$	Senkrechte vom Fahrzeug ausgeübte Kräfte
F_y	Summe der Lager - Querkräfte
N_1	Normalkraft N_1 in Spurkranzhohlkehle wirkend
$\mu_2 N_2$	Gleitwiderstand des nicht anlaufenden Rades zur Gleisinnenseite gerichtet
G_R	Eigengewicht des Radsatzes
ρ_2	Reibungswinkel
F_T	Massenkraft bei Querbeschl.
$P_{1,2}$	„Richtkräfte“, Horizontal- komponenten von N_1, N_2
$Q_{1,2}$	senkrechte Radkraft = vertikale Komponente der Resultierenden
$Y_{1,2}$	horizontale Komponente der Resultierenden Führungskraft → Wirkt stets nach Radinnenseite

4.3 Auslegungsrechnung Entgleisungssicherheit

Der Grenzwert von Nadal wird nur durch den Spurkranzflankenwinkel des Radprofils und den Reibwert zwischen Rad und Schiene bestimmt.



Die Kurve gibt zu jedem Reibwert μ das zulässige Verhältnis Y/Q an. Bis $\mu=0,35$ ist daher die Spurführung sicher, wenn die Querkraft Y die Aufstandskraft Q um höchstens 20% übersteigt.

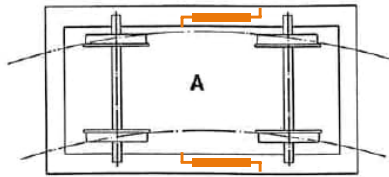
Nach **EN 14363 Kap. 4.1** ist
 $\frac{Y}{Q}$ der Entgleisungssicherheits-
 $\bar{Q}$ Koeffizient bei Gleisverwindungen.
 $\lim \frac{Y}{Q} = 1,2$ nur statische
Betrachtung
am Profil

Nicht dynamisch !
(nur geeignet für
Beurteilung von
Gleisverwindungen)
Dynamik in Kap. 5.3
geregelt.

4.3 Auslegungsrechnung

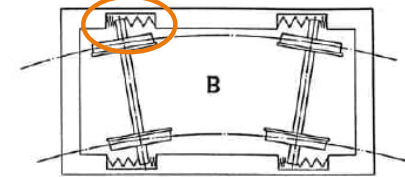
Kritische Geschwindigkeit

- Beispielhafte Drehgestell-Parameter mit wesentlichem Einfluss



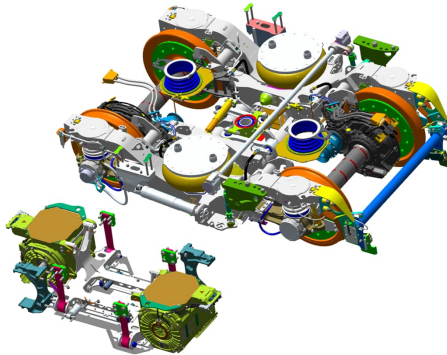
A Drehgestell mit Schlingerdämpfer

B Drehgestell mit weicher Radsatzführung-
Radialsteuerung



Nach: Müller R und Saliger W.

Schlingerdämpfer
Radsatzführung
Aufhängung des Antriebs



Quelle: Siemens

4.3 Auslegungsrechnung

Abkürzungen der Institutionen und Regelwerke

UIC: Union International de Chemin de Fer (Internationaler Eisenbahnverband)
UNIFE: Verband der Eisenbahnindustrie

früher ORE: Office de Recherches et d'Essais (ersetzt durch ERRI)
früher ERRI: European Railway Research Institute
heute ERA: European Railway Agency

Normen:
DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.)
EN (Europäische Normen)
FSF (Fachnormen für Schienenfahrzeuge)

Richtlinien im Gesetzesrang:
TSI (Technical Specification for Interoperability) Verantwortung ERA z.B. anzuwenden ab 01.01.2015
TSI LOC&PAS (Locomotives and passenger rolling stock)
TSI WAG (Rolling stock – freight wagons)
TSI PRM (Persons with reduced Mobility)
TSI SRT (Safety in Railway Tunnels)
TSI NOI (Noise)
TSI INF (Infrastructure)
TSI CCR (Control command and signalling)
TSI ENE (Energy)

Quelle:
Doppelbauer: Die Aktivitäten der
Eisenbahngesellschaft der europäischen
Union, ZEVrail 141(2017) 5 Mai, S175ff

4.3 Auslegungsrechnung

Beispiel Nachweisrechnung

Beurteilungskriterien		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nachweisrechnungen	Eigenverhalten (Grenzzykel)	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Störgrößeneinwirkung	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Quasistat. Verhalten			✗	✗			✗		
	Dynam. Verhalten	✗	✗	✗	✗					
	Quasistat. Verhalten			✗	✗			✗		
1	Eigenverhalten (Grenzzykel)	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
2	Störgrößeneinwirkung	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
3	Quasistat. Verhalten			✗	✗			✗		
4	Dynam. Verhalten	✗	✗	✗	✗					
5	Quasistat. Verhalten			✗	✗			✗		
6	Vertikaldynamik beim Befahren von Brücken				✗		✗	✗		
7	Befahrbarkeit von Gleisverwindungen / ORE BSS									✗
8	Vertikaldynamik beim Befahren von Kuppen und Wannen							✗		

Beurteilungskriterien und dazu notwendige Nachweisrechnungen zum Fahrzeuglauf

Zum Beispiel:
 v_{krit}

✗ beispielhafte Aufstellung:

Die mit Nachweisrechnungen zu belegenden Kriterien werden von Fall zu Fall zwischen dem Lieferanten und der zulassenden Behörde vereinbart.

4.3 Auslegungsrechnung

Beispiel TSI

Beispiel: TSI HS RST
für

Fahrzeuge der Klasse 1: 250 bis 350 km/h
Fahrzeuge der Klasse 2: 190 bis 249 km/h
ab 351 km/h ist die TSI anzuwenden, mit Zusatzspezifikationen auf transeurop. HGV-Bahnsystem gemäß EU-Ri 96/48/EG

TSI – Gliederung:

Teil 1 Gesetzestext
Teil 2 Text der TSI

- Einleitung
- Definition und Funktionen des Teilsystems „Fahrzeuge“
- Grundlegende Anforderungen
- Merkmale des Teilsystems
 - 4.2.1 Allgemeines
 - 4.2.2 Struktur und mechanische Teile
 - 4.2.3 Fahrzeug-Gleis-Interaktion und Fz.-Begrenzungslinie
 - 4.2.4 Bremsanlagen
 - 4.2.5 Fahrgastinformationssysteme und Kommunikation
 - 4.2.6 Umgebungsbedingungen
 - 4.2.7 Systemschutz
 - 4.2.8 Antriebs- und elektrische Ausrüstung
 - 4.2.9 Wartung
 - 4.2.10 Instandhaltung

5. Interoperabilitätskomponenten
6. Bewertung der Konformität und/oder der Gebrauchstglk.
7. Umsetzung der TSI „Fahrzeuge“

Teil 3 Anhänge

4.3 Auslegungsrechnung

Beispiel TSI

Beispiel: TSI HS RST 2006 (Entwurf)

In der umfangreichen Spezifikation finden sich auch systematisch die hier behandelten Themen zur Fahrdynamik. Diese beziehen sich wieder auf Anhänge und Dokumente mit Details wie z.B. UIC 518 etc.

4.2.3 Fahrzeug-Gleis-Interaktion und Fahrzeugbegrenzungslinie	42
4.2.3.1 Begrenzungslinie für den kinematischen Raumbedarf	42
4.2.3.2 Statische Radsatzlast	42
4.2.3.3 Fahrzeugparameter, die stationäre Zugüberwachungssysteme beeinflussen	43
4.2.3.3.1 Elektrischer Widerstand	43
4.2.3.3.2 Überwachung des Zustands der Achslager	43
4.2.3.3.2.1 Züge der Klasse 1	43
4.2.3.3.2.2 Züge der Klasse 2	44
4.2.3.3.3 Heißläuferormung bei Zügen der Klasse 2	45
4.2.3.3.3.1 Allgemeines	45
4.2.3.3.3.2 Funktionale Anforderungen an das Fahrzeug	45
4.2.3.3.3.3 Quermaße und Höhe der Zielfläche über der Schienenoberkante	45
4.2.3.3.3.4 Längsmaße der Zielfläche	45
4.2.3.3.3.5 Grenzwerte für Abstände zur Zielfläche	46
4.2.3.3.3.6 Emissionsvermögen	46
4.2.3.4 Dynamisches Verhalten der Fahrzeuge	47
4.2.3.4.1 Allgemeines	47
4.2.3.4.2 Grenzwerte für Laufsicherheit	48
4.2.3.4.3 Grenzwerte für die Gleisbeanspruchung	50
4.2.3.4.4 Rad-Schiene-Schnittstelle	51
4.2.3.4.5 Auslegung für Fahrzeugstabilität	51
4.2.3.4.6 Definition der äquivalenten Konizität	52
4.2.3.4.7 Werte für Radprofile beim Entwurf	52
4.2.3.4.8 Werte für die äquivalente Konizität im Betrieb	53
4.2.3.4.9 Radsätze	54



4.3 Auslegungsrechnung

Sicherheitsgrenzwerte nach EN 14363 (Auszug)

Fahrtechnische Prüfung und Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen
Ermittlung aus Gesamtfahrzeugsimulation und Bestätigung durch Versuche

Quasistatische Betrachtung : $Y_{lim} = 60 \text{ kN}$
 $Q_{lim} = 145 \text{ kN (wg. Oberbau)}$

dynamisch : $\lim \left(\frac{Y}{Q} \right) = 0,8$

dynamisch : $\sum Y_{max} = k \left(10 + \frac{Q_1 + Q_2}{3} \right)$
 $k = 0,85$ für Güterwagen
 $k = 1,0$ für Triebfahrzeuge, Reisezugwagen
auf 2 m Gleislänge

und diverse Beschleunigungswerte

z.B. $\ddot{Y}_{max} = 2,5 \frac{m}{sec^2}$

$\ddot{Z}_{max} = 2,5 \frac{m}{sec^2}$

am Drehgestellrahmen und im Wagenkasten

Sicherstellen, dass

- der Oberbau nicht überlastet wird

- die dynamische Führungsfähigkeit vorhanden ist.

- dass es nicht zu Gleisrostverschiebungen kommt

- dass sicherheitsrelevante Beschleunigungswerte eingehalten werden

4.3 Auslegungsrechnung

Sicherheit gegen Gleisrostverschiebung

Fahrtechnische Prüfung und Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen
Ermittlung aus Gesamtfahrzeugsimulation und Bestätigung durch Versuche

(nach EN 14363)

$$\sum Y_{max} = k \left(10 + \frac{Q_1 + Q_2}{3} \right)$$

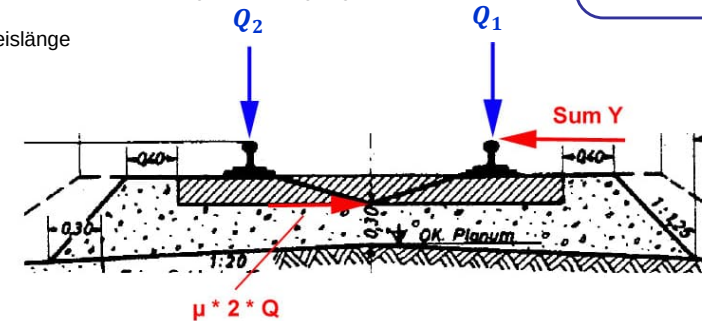
$k = 0,85$ für Güterwagen

$k = 1,0$ für Triebfahrzeuge, Reisezugwagen

Prud'homme – Wert:
Grenze für die Querbelastung des
Gleisrostes im Schotter

Sicherstellen, dass
es nicht zu einer
Gleisrost-
verschiebung
kommt.

auf 2 Meter Gleislänge



Gliederung

Fahrtechnik

- Einführung
- Geradeauslauf
- Auslegungsrechnung
- Seitenwindwirkung

Systemkinematik

- Wechselwirkung
- Bogenlauf
- Messtechnik

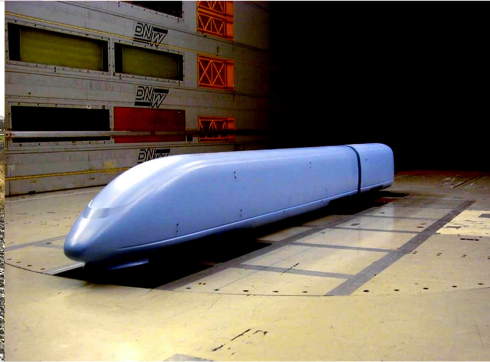
4.4 Seitenwindwirkung

- Seitenwind kann die Sicherheit im Bahnbetrieb erheblich beeinflussen

Von 30 m/s Windböen umgeworfene
Regionalbahn bei Uttendorf /Österreich,
17. November 2002

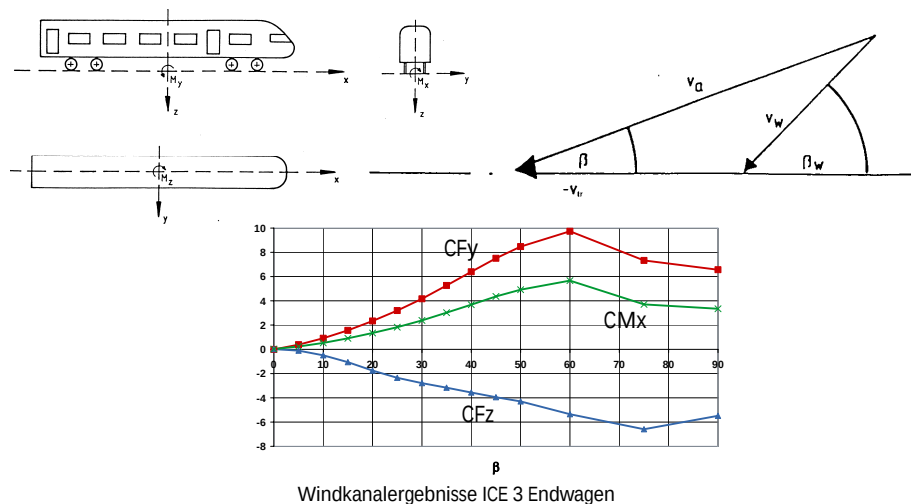


Versuche im Windkanal mit maßstäblichen
Triebzugmodell
(Drehteller, Messeinrichtungen)



4.4 Seitenwindwirkung Kräfte in Abhängigkeit vom Schiebewinkel

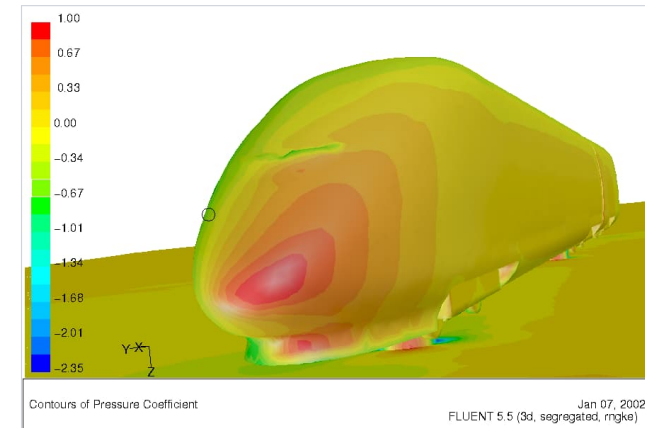
Die Anströmgeschwindigkeit zählt!



4.4 Seitenwindwirkung

- Besonders das führende Fahrzeug wird belastet

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

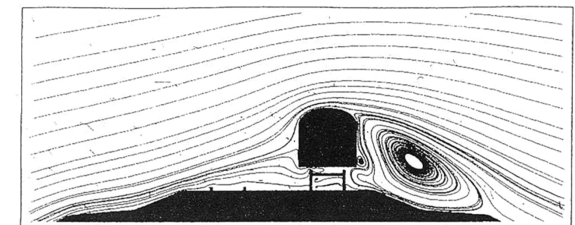


Druckbelastung durch
Seitenwind

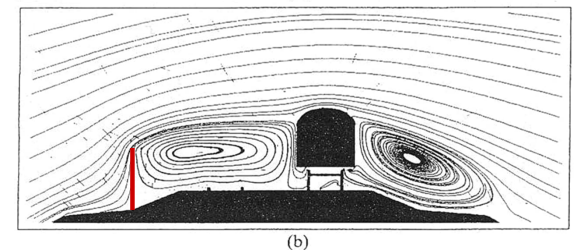
4.4 Seitenwindwirkung Infrastruktureinfluss

Schutzwände als effektiver Windschutz

Ohne Windschutz



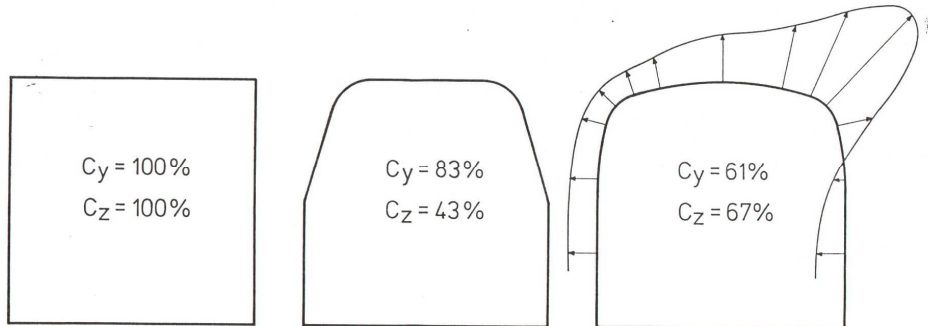
Mit Windschutz
Rollmoment effektiv reduziert



4.4 Seitenwindwirkung

Einfluss Querschnittsform

Einfluss der Querschnittsform eines Wagens auf seine Belastung
(Seitenkraftbeiwert C_y , Auftriebsbeiwert C_z) bei Seitenwind



Gliederung

Fahrtechnik

- Einführung
- Geradeauslauf
- Auslegungsrechnung
- Seitenwindwirkung

Systemkinematik

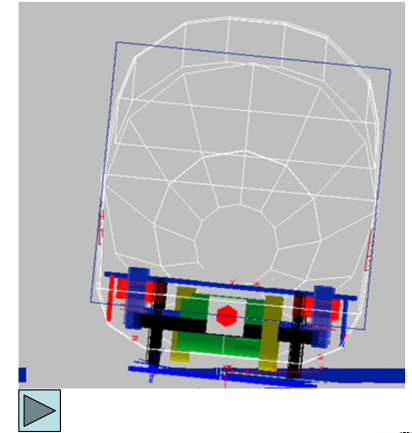
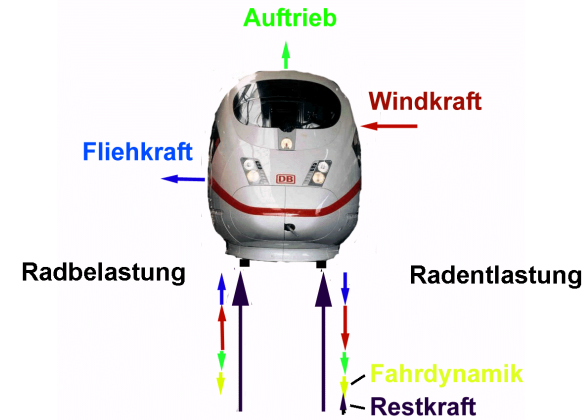
- Wechselwirkung
- Bogenlauf
- Messtechnik

4.4 Seitenwindwirkung

Kraftmodell und Auswirkung

Kraftmodell mit äußeren Einflussfaktoren,
welche die Radaufstandskräfte
erhöhen oder vermindern

Auswirkung auf das Laufverhalten
der Drehgestelle

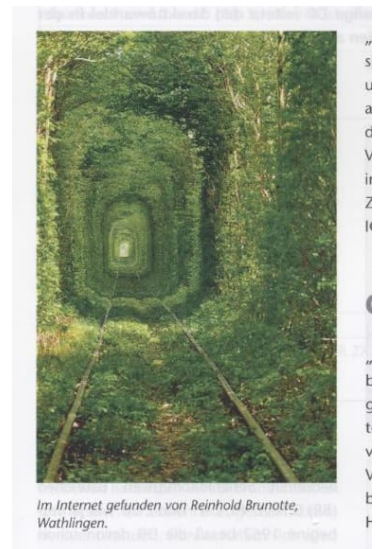


4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur

Basisdefinitionen und Einflussparameter

Kernthema der Fahrzeugbegrenzung

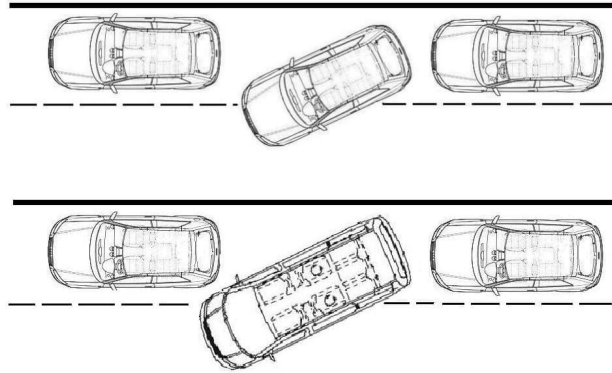
- Warum ...
 - Wozu ...
- benötigt man überhaupt die
Fahrzeugbegrenzung ?



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen und Einflussparameter

Kernthema der Fahrzeugbegrenzung

- **Warum** benötigt man überhaupt die Fahrzeugbegrenzung ?



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen und Einflussparameter

Kernthema der Fahrzeugbegrenzung

- **Warum** benötigt man überhaupt die Fahrzeugbegrenzung:

Straßenverkehr:

*Fahrer sorgt für die ausreichenden Abstände
zu Infrastruktur und anderen Fahrzeugen*

Schienenverkehr:

*Spurführung verlangt eindeutige Regeln für
Infrastruktur & Fahrzeug*

4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen und Einflussparameter

Kernthema der Fahrzeugbegrenzung

- **Warum** benötigt man überhaupt die Fahrzeugbegrenzung ?

Straßenverkehr:

StVZO § 32 Abmessungen von Fahrzeugen [...]

(1) Bei Kraftfahrzeugen und Anhängern [...]

darf die höchstzulässige Breite über alles [...]

**fest vorgegebene
Maße**

1. allgemein 2,55 m,
2. [...]

Schienenverkehr:

EBO § 22 Begrenzung der Fahrzeuge:

[...]

(3) Für die Berechnung der Fahrzeugabmessungen sind die Maße der

**variable
Maße**

Bezugslinien gemäß Anlage 9 einzuschränken.

4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen und Einflussparameter

Wozu benötigt man überhaupt die Fahrzeugbegrenzung:

→ Kernziel der Fahrzeugbegrenzung ist
sicherer Betrieb auf definierter Infrastruktur

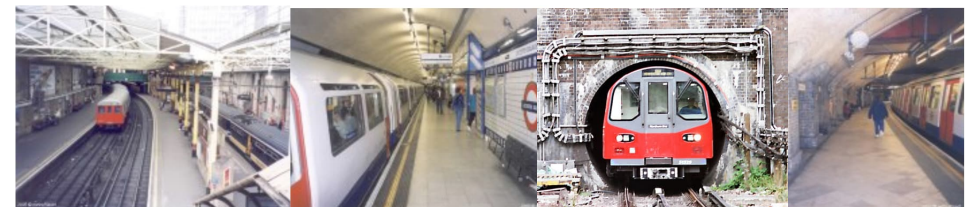
- **ausreichende Sicherheitsabstände**

zwischen dem **Fahrzeug** und den „festen Anlagen“:

Das Fahrzeug muss zu vorhandenen bzw. neu zu errichtenden festen Anlagen „passen“.

- **ausreichende Sicherheitsabstände**

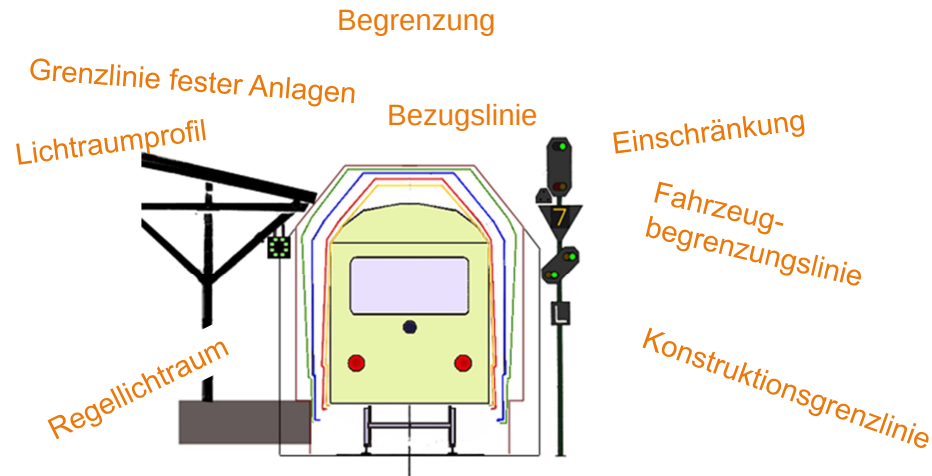
zwischen **zwei Fahrzeugen** bei Vorbeifahrt



Einflussparameter: Bahnsteig, Tunnel und Gleisbogen

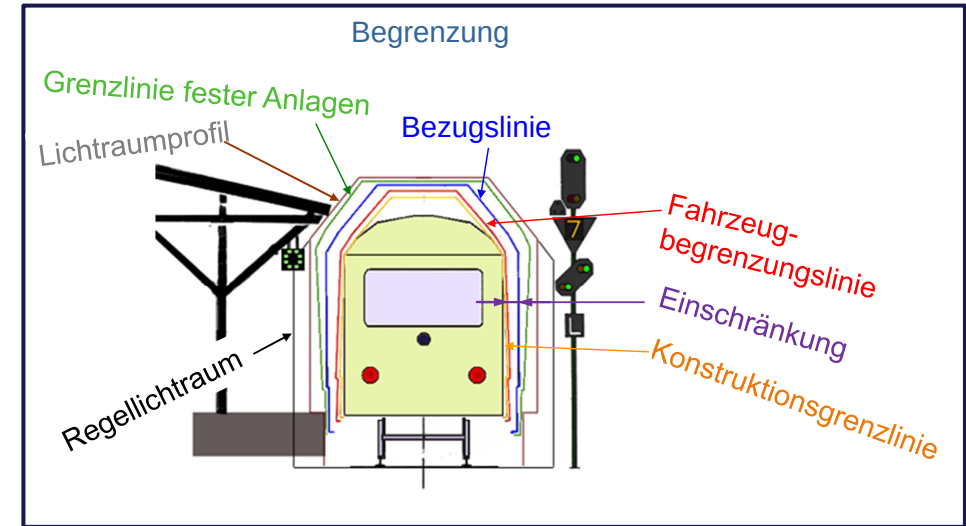
4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Fahrzeugbegrenzungslinie

Fahrzeugbegrenzung: Begriffe (kontinentaleuropäisch, kinematische Begrenzung)



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Fahrzeugbegrenzungslinie

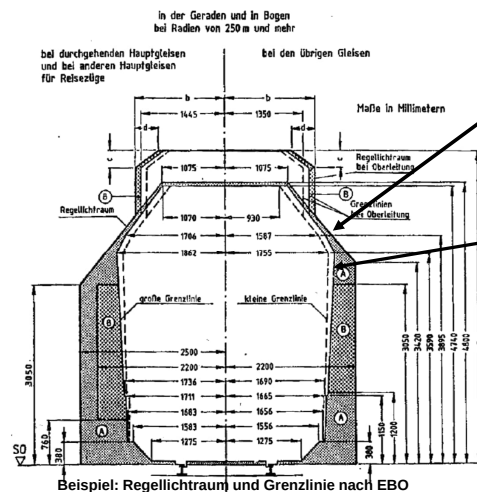
Fahrzeugbegrenzung: Begriffe (kontinentaleuropäisch, kinematische Begrenzung)



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Regellichtraum

Definition der Infrastruktur durch Lichtraum und Grenzlinie

Raum welcher baulich durch die Infrastruktur frei gehalten wird.



Regellichtraum

Soll durch Infrastruktur
frei gehalten werden:
Ausnahmen möglich

Grenzlinie

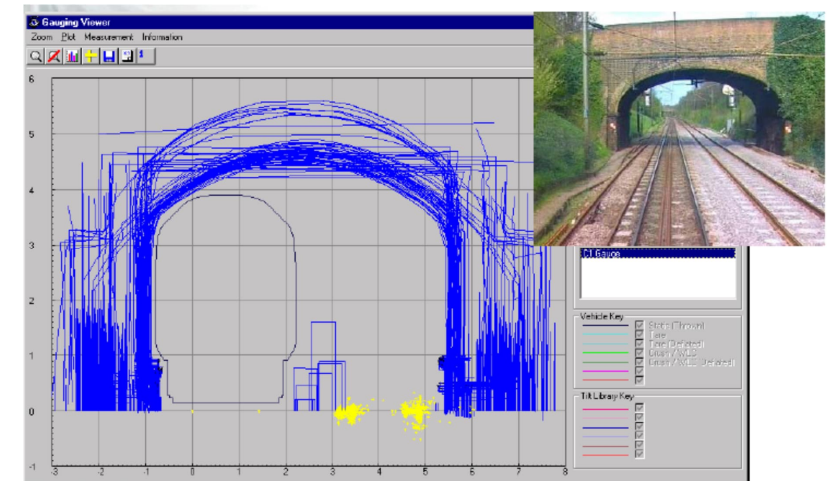
Muss durch Infrastruktur
frei gehalten werden

Die Maße beziehen sich auf
die Verbindungslinie der
Schienenoberkanten (SO) in
Sollage, die Mittellinie steht
senkrecht auf der Verbindungs-
drehlinie.

4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Infrastruktur

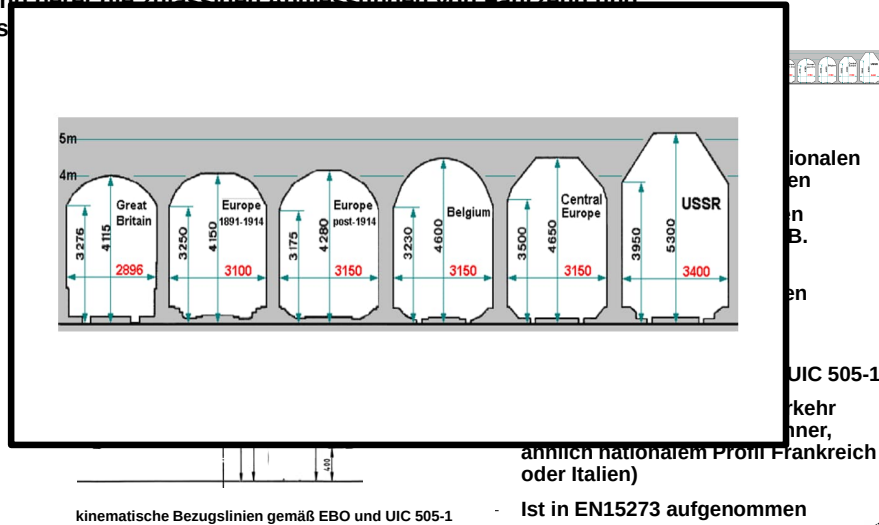
Tatsächliche Infrastruktur („feste Anlagen“)

Bild zeigt einen Vermessungsplot einer vorhandenen Infrastruktur



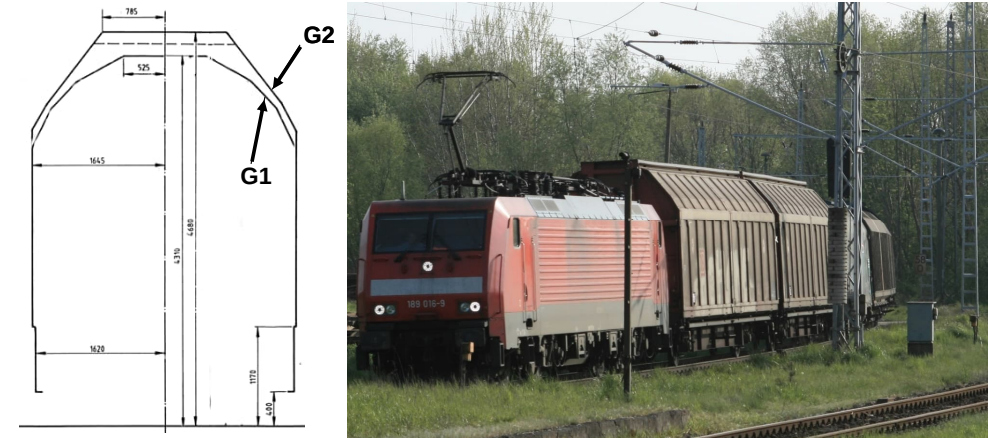
4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Bezugslinie

Definition der Infrastruktur und des Fahrzeuges über eine Bezugslinie
anhand derer die zulässigen Abmessungen von Fahrzeug und
Infrastruktur festgelegt werden können.



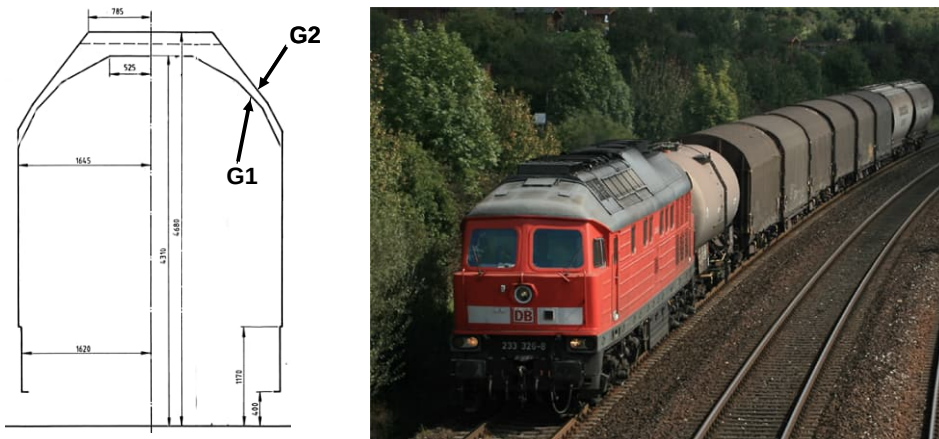
4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Bezugslinie

Definition der Infrastruktur und des Fahrzeuges über eine Bezugslinie
Beispiel: Bezugslinien nach EBO: „G1“ und „G2“



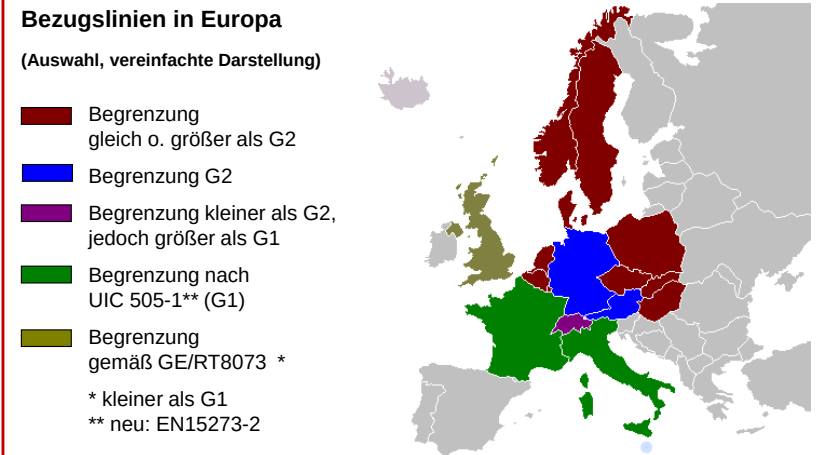
4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Bezugslinie

Definition der Infrastruktur und des Fahrzeuges über eine Bezugslinie
Beispiel: Bezugslinien nach EBO: „G1“ und „G2“



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Bezugslinie

Definition der Infrastruktur über eine Bezugslinie
Die Bezugslinie ist nach TSI ein „Leistungsparameter“ einer Strecke

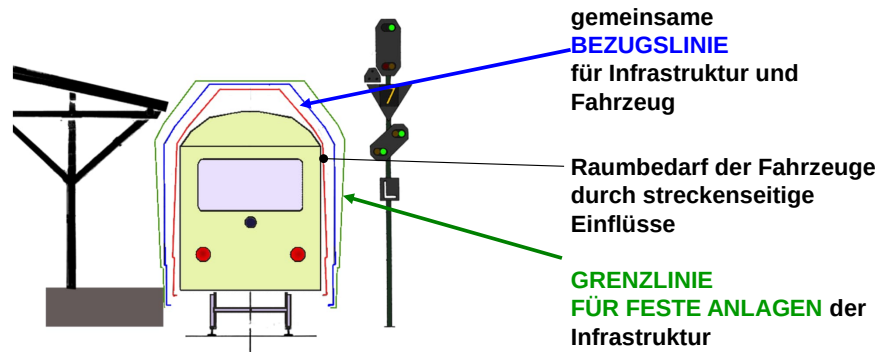


4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen – Grenzlinie für feste Anlagen

Basisdefinition: Bezugslinie - Grenzlinie für Feste Anlagen

Ausgehend von der **Bezugslinie** ergibt sich unter Anwendung von vereinbarten Berechnungsregeln die **Grenzlinie für feste Anlagen**. Sie definiert den Mindest-Lichttraum, welcher baulich "frei" gemacht werden muss.

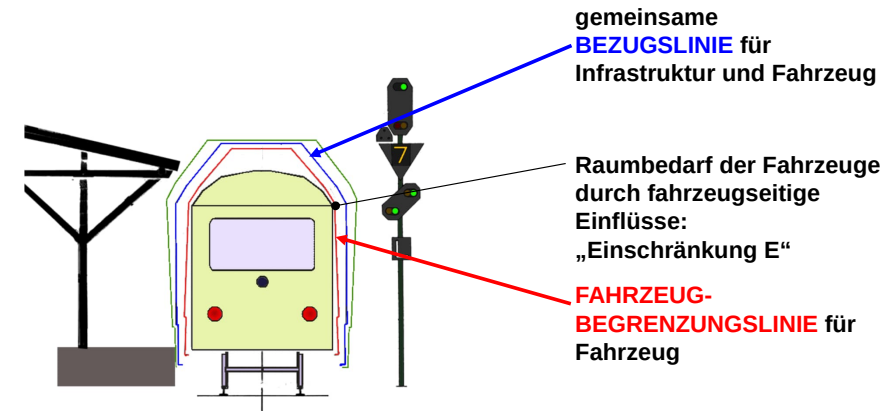
Der Raum zwischen Bezugslinie und Grenzlinie enthält den Raumbedarf des Fahrzeuges durch streckenseitige Einflüsse (z.B. Gleislage, Spurweite, ...)



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Fahrzeugbegrenzungslinie

Basisdefinition: Bezugslinie - Fahrzeugbegrenzungslinie

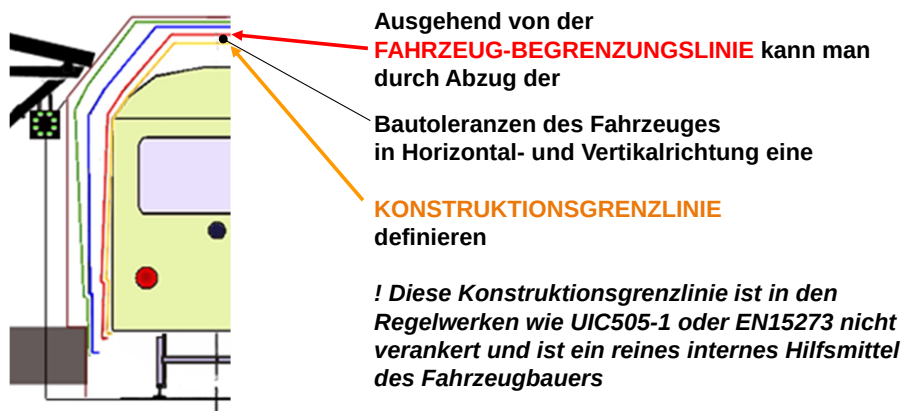
Ausgehend von der **Bezugslinie** ergibt sich unter Anwendung von vereinbarten Rechenregeln die **Fahrzeugbegrenzungslinie**. Sie definiert den maximal zulässigen Fahrzeugumriss, welcher durch den Fahrzeugbauer genutzt werden kann.



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen - Fahrzeugbegrenzungslinie

Basisdefinition: Bezugslinie – Fahrzeugbegrenzungslinie - Konstruktionsgrenzlinie

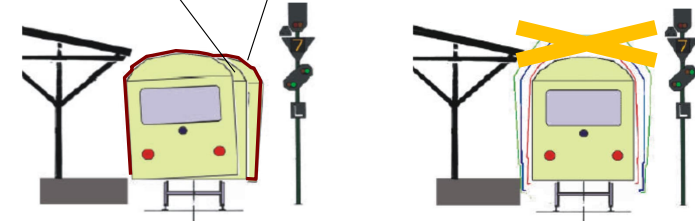
Ausgehend von der **Bezugslinie** ergibt sich unter Anwendung von vereinbarten Rechenregeln die **Fahrzeugbegrenzungslinie**. Sie definiert den maximal zulässigen Fahrzeugumriss, welcher durch den Fahrzeugbauer genutzt werden kann.



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Basisdefinitionen – Alternative Referenzfahrzeug

! Nicht jedes Bahnsystem arbeitet mit dem bis hier vorgestellten System der Begrenzungslinien

➔ **Alternative Beschreibung** einer Infrastruktur über ein **Referenzfahrzeug** + **Hüllkurve** statt einer **Bezugslinie** + **Grenzlinie**



Dies ist typisch für Metros oder Straßenbahnen, ist aber auch im Vollbahnbereich anzutreffen (z.B. UK)

4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur

Einflussparameter – Raumbedarf – statisch/kinematisch/dynamisch

Der Raumbedarf eines **statischen** Fahrzeuges ist durch seinen Umriss beschrieben.

Im Betrieb kann sich das Fahrzeug translatorisch und rotatorisch um seine 3 Koordinatenachsen **bewegen**.

Unterscheidung von Bewegungen in „Spiele“ und „geometrische Bewegungen“

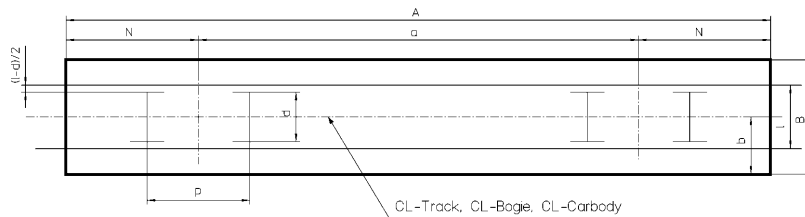


4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur

Einflussparameter - Fahrzeuggeometrie im geraden Gleis

Raumbedarf von Fahrzeugen – Fahrzeuggeometrie im geraden Gleis

Das Bild zeigt die **nominale Fahrzeugstellung im geraden Gleis**.



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur

Einflussparameter – Raumbedarf **gesamt**

Raumbedarf von Fahrzeugen – **gesamt (lateral / vertikal / rollen)**

Bild zeigt den Fahrzeugumriss eines Metrofahrzeuges -> statischer Raumbedarf

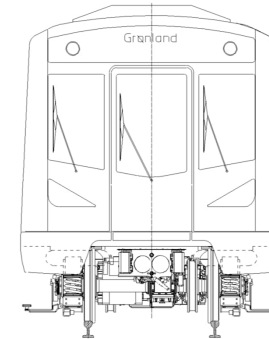
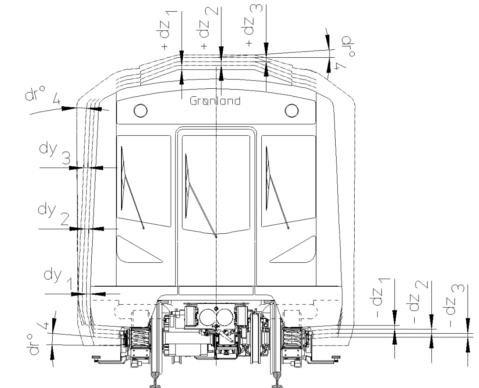


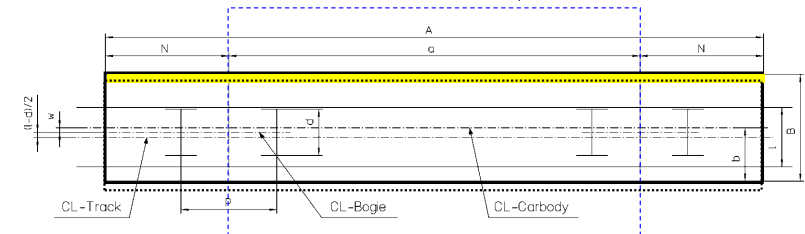
Bild zeigt die gesamte Auswirkung aller möglichen lateralen, vertikalen und rollenden Bewegungen auf den benötigten Fahrzeugraumbedarf



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur

Einflussparameter - Fahrzeuggeometrie im geraden Gleis

Bild zeigt die „**worst-case**“ Fahrzeugstellung für kinematischen/dynamischen Raumbedarf **im geraden Gleis** für Querschnitte **zwischen den Drehgestellmitten**:



Keine zusätzliche geometrische Bewegung: Raumbedarf entspricht „Spiele“

4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Einflussparameter - Fahrzeuggeometrie im geraden Gleis

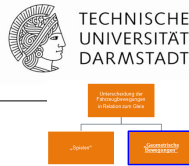
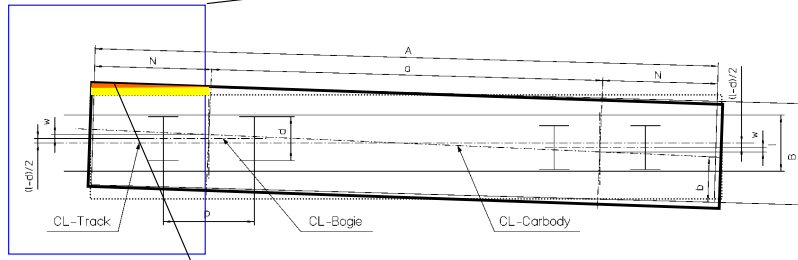


Bild zeigt die „worst-case“ Fahrzeugstellung für kinematischen /dynamischen Raumbedarf im geraden Gleis für Querschnitte außerhalb der Drehgestellmitten:

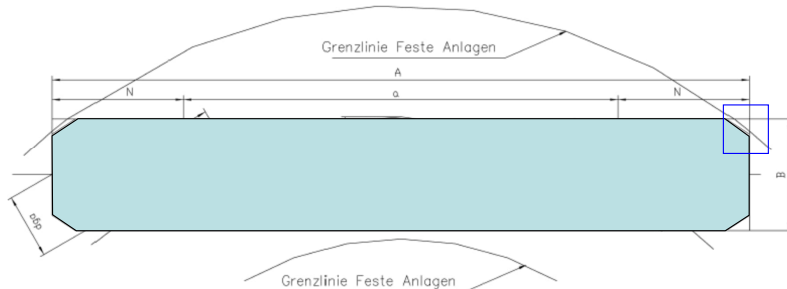


zusätzliche geometrische Bewegung durch die Fahrzeugstellung:
Gesamtbewegung > „Spiele“

4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Einflussparameter - Fahrzeuggeometrie im Gleisbogen

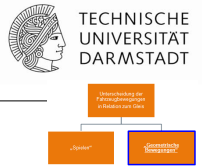
Das Fahrzeug ohne Einzug ragt an den Fahrzeugenden in die Grenzlinie für Feste Anlagen

Bild zeigt den Raumbedarf im Gleisbogen mit eingezogenen Fahrzeugenden

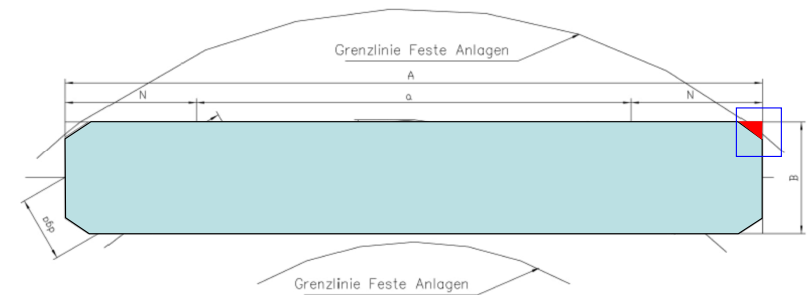


Das Fahrzeug mit Einzug ist im Gleisbogen „FREI“ für die Grenzlinie für feste Anlagen

4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Einflussparameter - Fahrzeuggeometrie im Gleisbogen



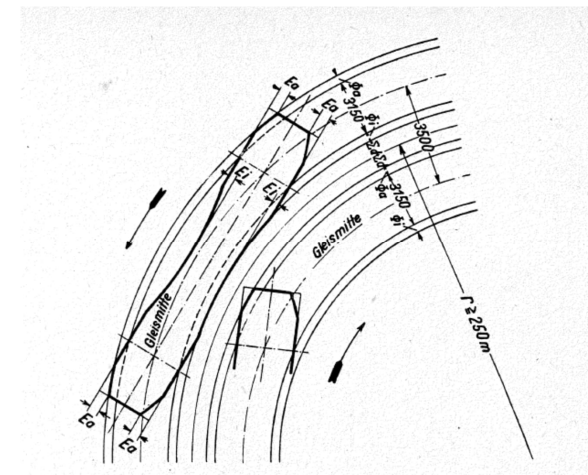
Das Fahrzeug ohne Einzug ragt an den Fahrzeugenden in die Grenzlinie für feste Anlagen



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Einflussparameter - Fahrzeuggeometrie im Gleisbogen

Nominale Fahrzeugstellung im Gleisbogen

Vorbeifahrt zweier Fahrzeuge auf benachbarten Gleisen

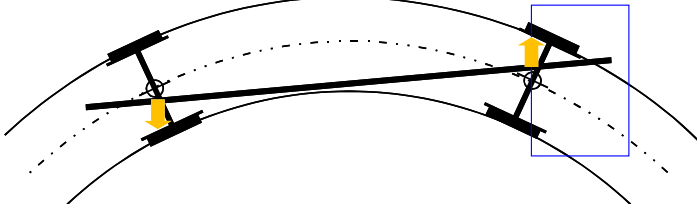


4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur

Einflussparameter - Fahrzeuggeometrie im Gleisbogen

Raumbedarf von Fahrzeugen – Fahrzeugstellung im Gleisbogen

Auch im Gleisbogen sind verschiedene Fahrzeugstellungen möglich. Das Bild zeigt die „worst-case“ Fahrzeugstellung für den kinematischen/dynamischen Raumbedarf im Gleisbogen für Querschnitte außerhalb der Drehgestellmitten:

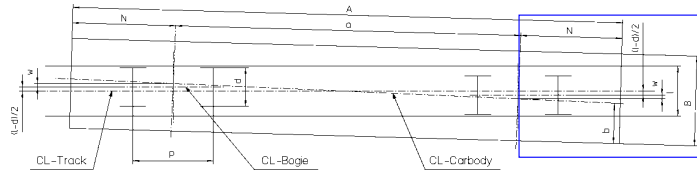


4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur

Einflussparameter - vertikaler Fahrzeugraumbedarf

Wiederholung:

Bild zeigt die „worst-case“ Fahrzeugstellung für kinematischen / dynamischen Raumbedarf im geraden Gleis für Querschnitte außerhalb der Drehgestellmitten:



Analogie für vertikale Bewegungen:

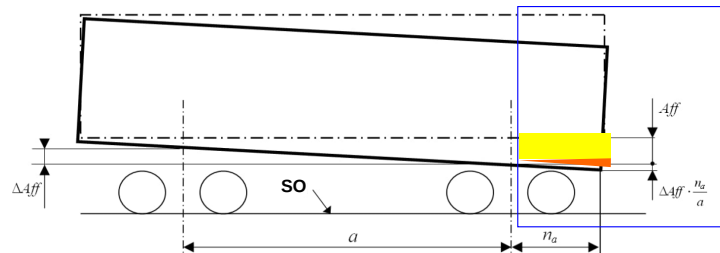


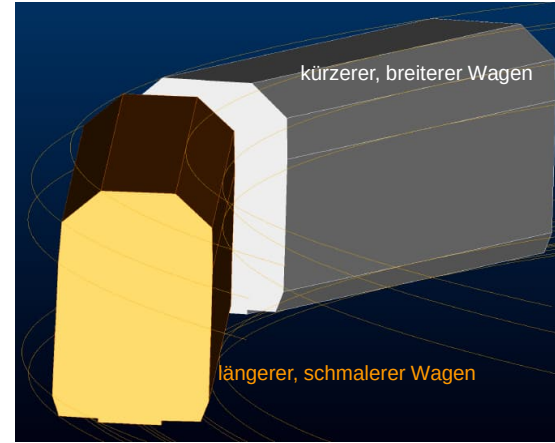
Abb. aus prEN15273-2:2013

4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur

Einflussparameter – Wagenlänge

Einfluss Wagenlänge auf Wagenbreite

3D – Simulation der Fahrzeuggeometrie
unter Zugrundelegung des gleichen Raumbedarfs -> Fahrzeugquerschnitt variiert



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur

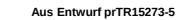
Basisdefinitionen und Einflussparameter – Kuriositäten

Raumbedarf von Fahrzeugen – Kuriositäten

“Sowas passiert, wenn der Einschränker mal einen schlechten Tag hat ...”



Montage



4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Zusammenfassung I



- Eine Begrenzung ist ein **Leistungsmerkmal** einer Strecke.
- Bei der Auslegung der Fahrzeuggeometrie sind **Einflüsse im geraden Gleis und im Gleisbogen** gleichermaßen zu beachten.
- Der Raumbedarf der Fahrzeuge setzt sich aus der **Summation von lateralen, vertikalen und rollenden Bewegungen** des Fahrzeuges zusammen.
- Die **Bewegungen** des Fahrzeuges resultieren sowohl aus Parametern der Infrastruktur als auch des Fahrzeuges.
- Mittels einer **Bezugslinie** kann man für ein Begrenzungsprofil die Verantwortungsbereiche der Infrastruktur und der Fahrzeuge trennen.

Gliederung

Fahrtechnik

- Einführung
- Geradeauslauf
- Auslegungsrechnung
- Seitenwindwirkung

Systemkinematik

- Wechselwirkung
- Bogenlauf
- Messtechnik

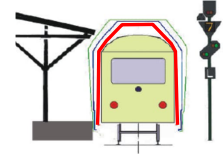
4.5 Wechselbeziehung Fahrzeug-Infrastruktur Zusammenfassung II



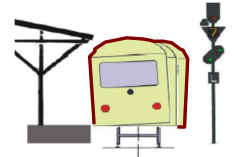
Überblick über die verschiedenen Methoden zur Ermittlung der zulässigen Fahrzeugaußenabmessungen

Es gibt verschiedene, sehr unterschiedliche **Ansätze**, die mit unterschiedlicher Herangehensweise arbeiten:

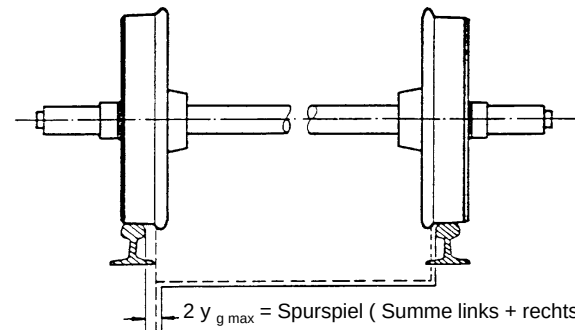
- Verfahren, die auf eine **Fahrzeugbegrenzungslinie** hinarbeiten:
Statische Begrenzungen,
Lademaße,
UIC 505-1/EN15273



- Verfahren, die mit **Hüllkurven** arbeiten (BOStrab, Gauging UK)



4.6 Bogenlauf Querschrumpfung / Spurspiel / Spurkanal



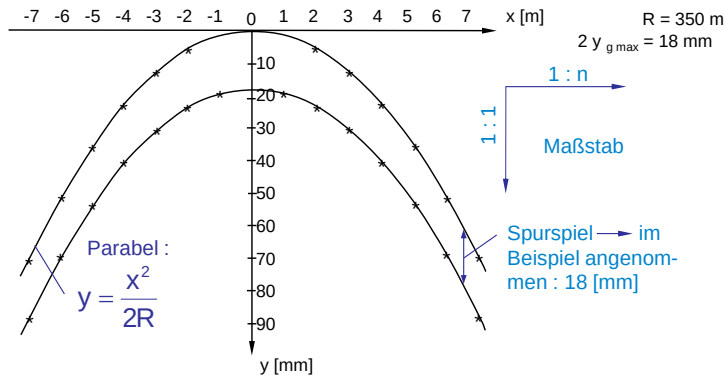
Die Radsätze haben in Querrichtung im Gleis Spiel. Zur Darstellung wird der Radsatz in Querrichtung geschrumpft, so dass die Führungspunkte der beiden Räder zusammenfallen → der Radsatz erscheint als Punkt und von der Spurweite des Gleises bleibt nur das „Spurspiel“ oder der Spurkanal als Summe der Spiele zwischen den Spurkränzen und Schienen übrig

fortlaufend aufgezeichnet :
Spurkanal → ist von der **Spurweite und Spurmaß** abhängig
Darstellung des Radsatzes durch einen Punkt

4.6 Bogenlauf

Darstellung eines Gleisbogens nach VOGEL

Querschrumpfter Gleisbogen → Ellipse → wird angenähert durch Parabel

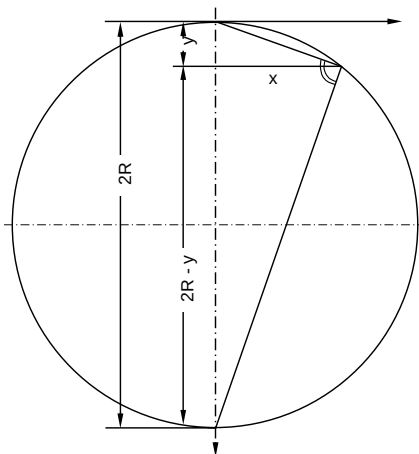


Quelle: Darstellung eines Gleisbogens nach VOGEL, Zeichnerische Untersuchung der Bogenbeweglichkeit von Eisenbahnfahrzeugen, Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 81 (1926), Heft 17

4.6 Bogenlauf

Gleisbogendarstellung nach VOGEL

Ableitung mit Fehlerrechnung



Zur Ableitung der Näherungsgleichung für das Verfahren nach VOGEL
Nach dem Satz des Thales gilt: $x^2 = y \cdot (2R - y)$
Da bei den bei Vollbahnen vorkommenden Bogenhalbmessern y sehr klein gegen $2R$ → y in Klammer vernachlässigt
→ $x^2 = y \cdot 2R$ → $y = x^2 / 2R$ Ansatz von VOGEL
Fehlerbetrachtung : wahrer Wert von y → $y_w = x^2 / (2R - y)$

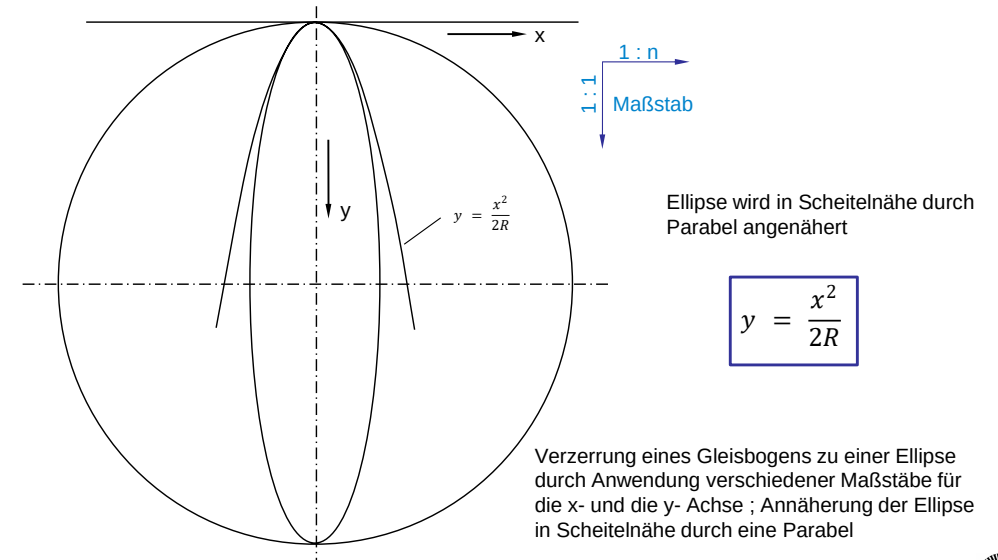
$$\text{Differenz } \Delta y = y_w - y \rightarrow \frac{\Delta y}{y_w} = \frac{y_w - y}{y_w} = 1 - \frac{y}{y_w}$$

$$\frac{\Delta y}{y_w} = 1 - \frac{x^2}{2R} \cdot \frac{2R - y}{x^2} = \frac{y}{2R}$$

- Relativer Fehler für $R = 100 \text{ m}$ und $y = 200 \text{ mm}$
- 0,1% von y , also 0,2 mm
- Größenordnung der Zeichengenauigkeit

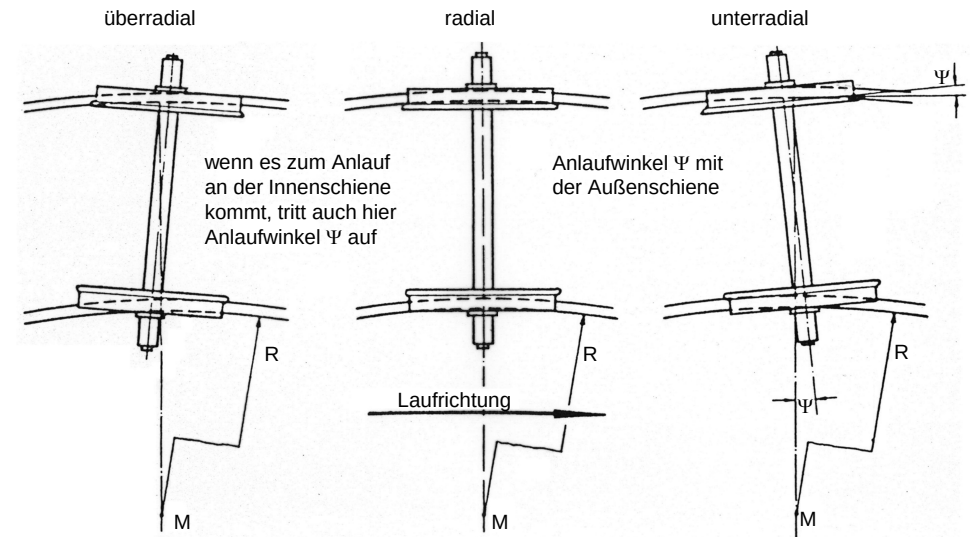
4.6 Bogenlauf

Querschrumpfung des Gleisbogens zur Ellipse



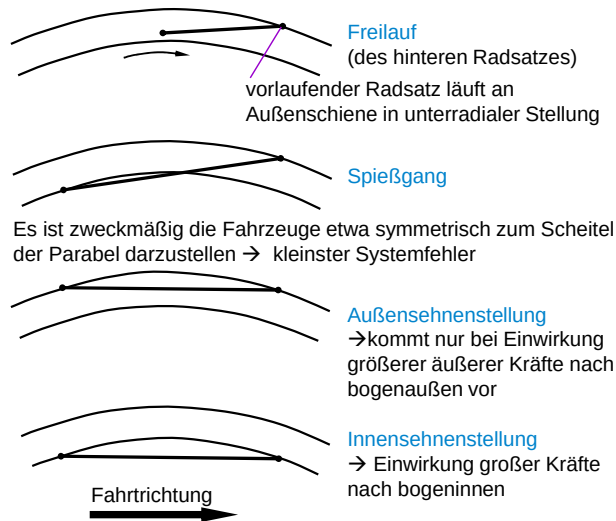
4.6 Bogenlauf

Stellungen des Radsatzes im Gleisbogen



4.6 Bogenlauf

Stellung mit 2 Radsätzen im Gleisbogen

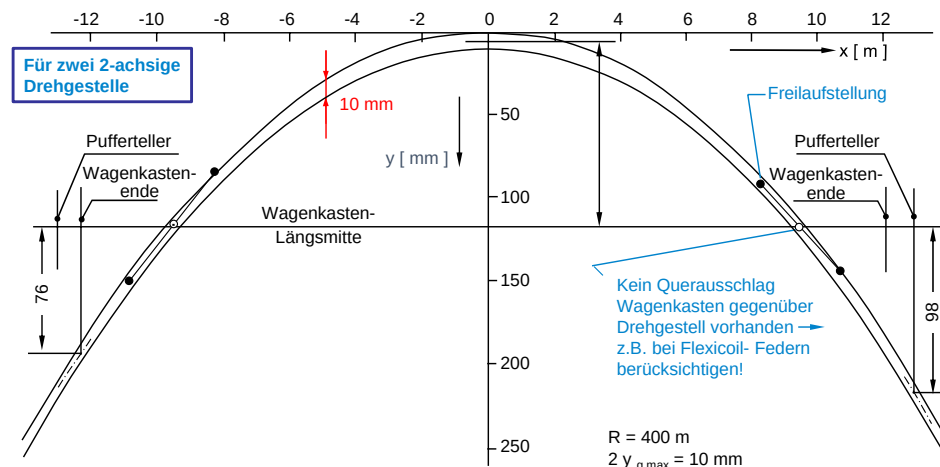


Als einfachster Fall ist ein Fahrzeug
oder Gestell mit 2 Radsätzen
betrachtet, die in den Radsatzlagern
kein Spiel haben und im Rahmen
spielfrei in Längs- und Querrichtung
geführt werden
→ Radsätze können relativ zur
Fahrzeuginnenachse nicht
schwenken
→ rollen in Richtung der
Fahrzeuginnenachse:
„steifachsiges“ Fahrzeug

Bei theoretischen Untersuchungen
kann es zweckmäßig sein zunächst
eine der Extrem- Stellungen
(äußere oder innere
Sehnenstellung) anzunehmen

4.6 Bogenlauf

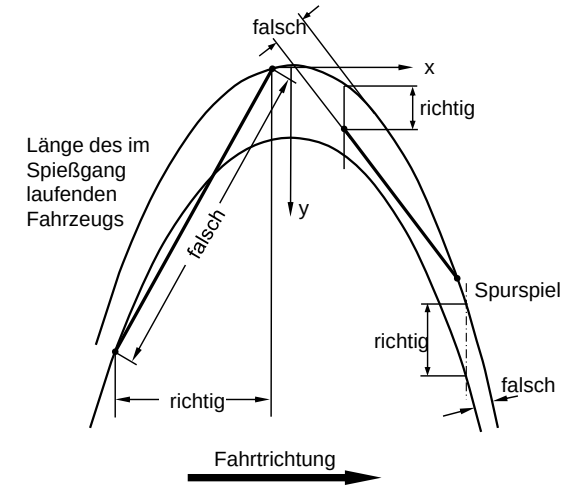
Stellungsbild nach VOGEL



Bestimmung des Überhangs eines Wagens und des Seitenausschlags seiner Puffer im Bogen
Diese Art der Untersuchung eignet sich nicht für die Bestimmung der notwendigen Breitereinschränkung
von Fahrzeugkästen mit Rücksicht auf die Bogenbefahrbarkeit → besonderes Verfahren mit
entsprechenden Vorschriften

4.6 Bogenlauf

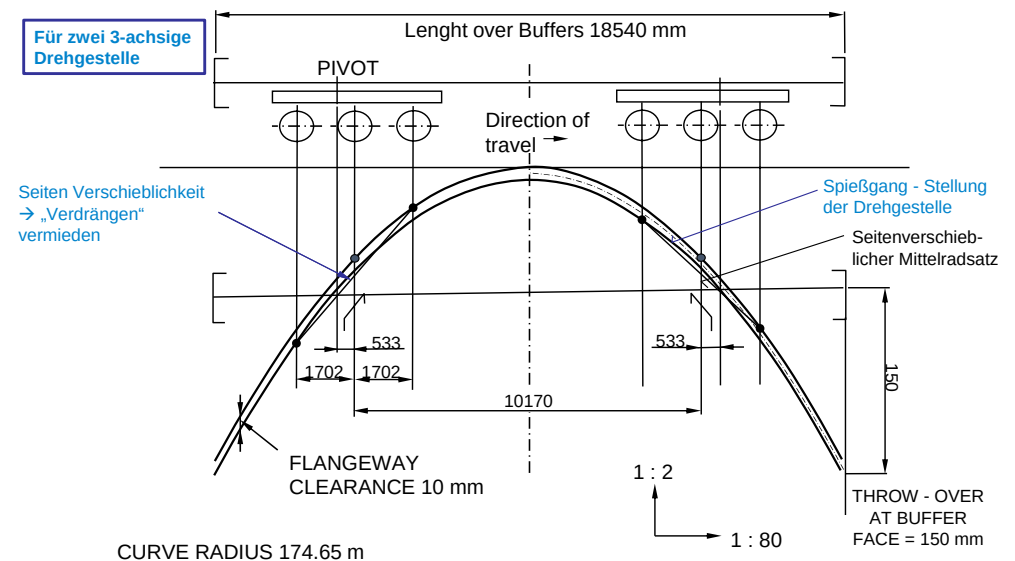
Anwendung des Verfahrens von VOGEL



Richtungen, in denen beim VOGEL- Verfahren zu messen ist
(Koordinatenrichtungen nie „mischen“)

4.6 Bogenlauf

Stellungsbild nach VOGEL



Gliederung

Fahrtechnik

- Einführung
- Geradeauslauf
- Auslegungsrechnung
- Seitenwindwirkung

Systemkinematik

- Wechselwirkung
- Bogenlauf
- Messtechnik

4.7 Messtechnik Profilprüfung

Profilfahrt für Fahrgäste:



4.7 Messtechnik Profilfahrt Schablonenprüfung



Schablonenprüfung Desiro UK EMU

4.7 Messtechnik Quasistatische Versuche Sway Test



Sway Test Desiro UK EMU

4.7 Messtechnik

Infrastruktur – Vermessung von festen Anlagen

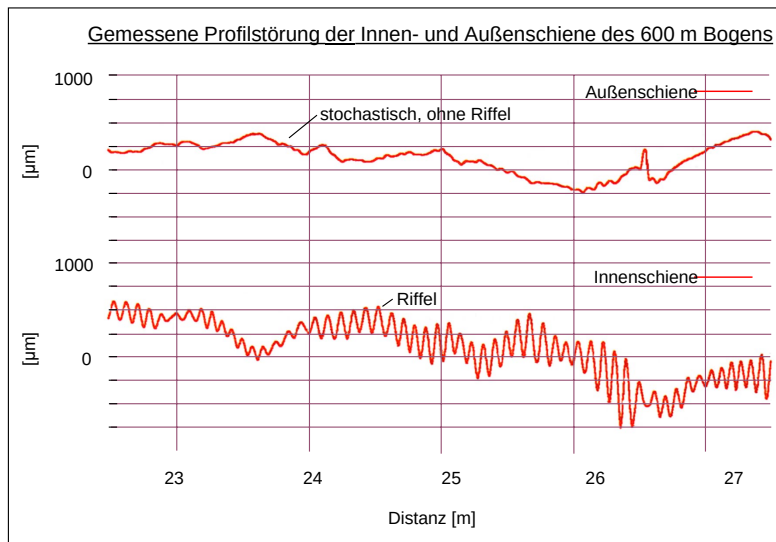
Tunnelmesszug mit mechanischer Abtastung



Tunnelmesswagen DB AG

4.7 Messtechnik

Gemessene Profilstörung der Schiene

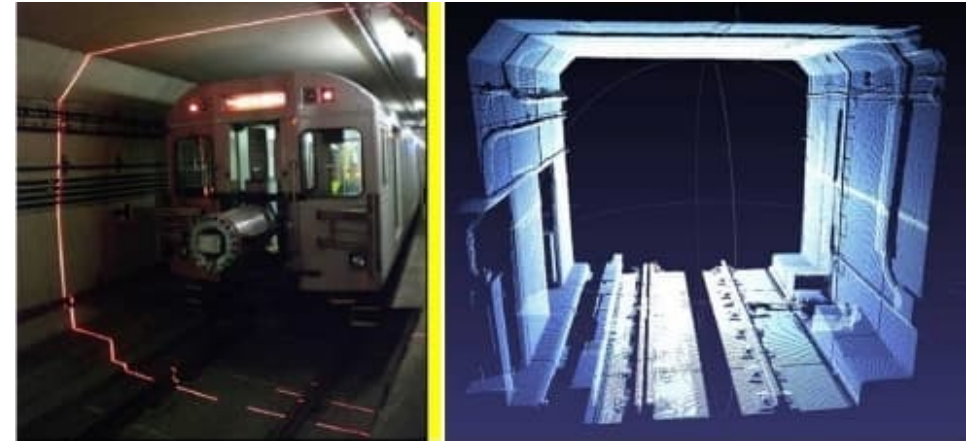


Quelle: Klaus Hempelmann,
Arnold Groß-Thebing, Hans
Zimmer Analyse der Fahrzeug/
Fahrgeweg-Interaktion zur Ableitung
von Maßnahmen mit dem
Simulationswerkzeug SFE
AKUSRAIL Der Eisenbahn
Ingenieur, Februar 2001, 2

4.7 Messtechnik

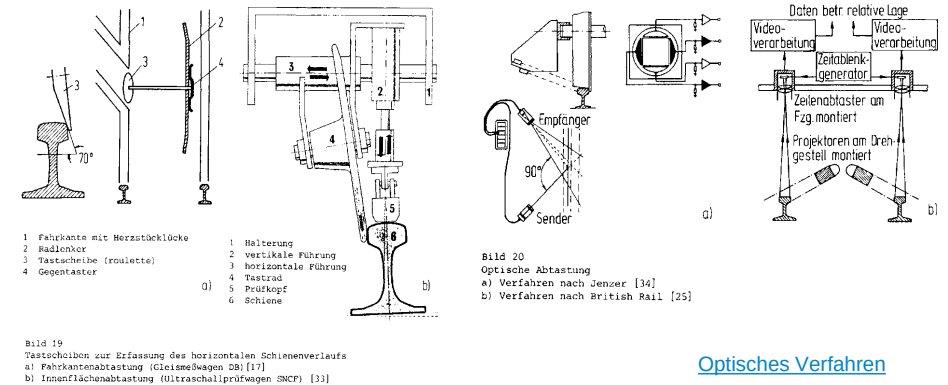
Infrastruktur – Vermessung von festen Anlagen

Lichttraumprofilmesszug mit berührungsfreier Abtastung



4.7 Messtechnik

Gleismessverfahren



Optisches Verfahren

Quelle: Frederick, Hecht
Erfassung der Gleislage auf ÖPNV- Strecken
VDI Verlag, Fortschrittberichte Nr. 64, Reihe 12

4.7 Messtechnik Gleismessverfahren

Dynamisches Beschleunigungsverfahren

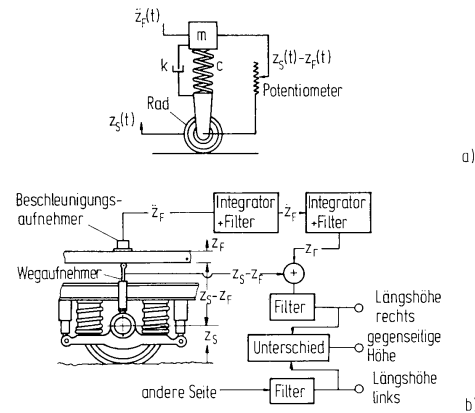


Bild 17
Gleislagemessung mit dem Beschleunigungsverfahren
a) nach Nair [19] und
b) British Rail [25,27]

Quelle: Friedrich, Hecht
Erfassung der Gleislage
auf ÖPNV-Strecken VDI
Verlag, Fortschrittberichte
Nr. 64, Reihe 12

Magnetisches Abtastverfahren

Beispiel für ein Messgerät mit Magnetsensor mittels
magnetischem Wechselfeld
Messlänge 1 m Fahrfläche und Fahrkante



Quelle: Wegner, Damm
Digitale Abnahme von Schienenlängsprofilen
ZEV-Rail, 6-7 2015, S 252 ff

4.7 Messtechnik Gleisprofilmessung / RIL 821.2001

RIL 821.2001 - Gleisprofilmessung mit Beschleunigungssensoren

- Messung der Beschleunigung des Fahrgestells in Längshöhenrichtung
- Zuweisung eines SR-Wertes zur Amplitude des Versatzes:
- **SR_A**: Aufmerksamkeitsgrenze, Einleitung der Instandsetzungsplanung
- **SR₁₀₀**: 100% des Abnutzungsvorrates erschöpft: Instandhaltung bis zur nächsten Regelinspektion
- **SR_{lim}**: Bei Überschreitung – **sofortige Streckensperrung & Instandhaltung**
- SR-Grenzen abhängig von Wartungsintervall / Streckengeschwindigkeit
- Veränderung der Amplitude bei regelmäßiger Wartung gibt Anhaltspunkt für Instandhaltungszeitpunkt (EN 13848)



Linder, C., Lackhove, C. & Schenkendorf, R. (2014). Prognoseverfahren zur Gleislageabweichung bei Einzelfehlern

4.7 Messtechnik Gleismessverfahren

Absolute geodätische Gleismessverfahren

Bezugslinie absolut (Laser)

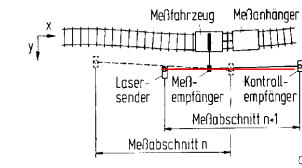
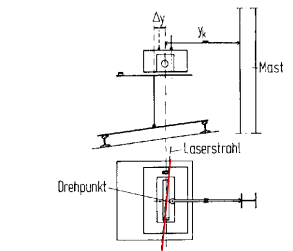
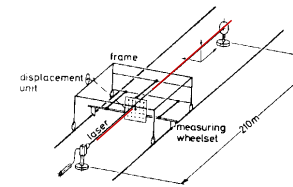


Bild 5
Gleislagemessung nach dem Festpunktverfahren
Abweichung für
a) Überbauinstandhaltung [2]
b) Datenerfassung für Simulationsrechnungen [3]
c) Datenerfassung unter statischer Belastung [4]



Quelle: Friedrich, Hecht
Erfassung der Gleislage auf ÖPNV-Strecken
VDI Verlag, Fortschrittberichte Nr. 64, Reihe 12

Beispiel für ein Lasermessgerät mit Lasereinheit
und verschieblicher Detektoreinheit
Messlänge max 50 m.



Quelle: Wegner, Damm
Digitale Abnahme von Schienenlängsprofilen
ZEV-Rail, 6-7 2015, S 252 ff

4.7 Messtechnik Gleisprofilmessung / RIL 821.2001

Beurteilungsmaßstab	Prüfgröße	Einheit	für die örtlich zugelassene Geschwindigkeit gemäß VzG bzw. VzG NetTech [km/h]				
			V ≤ 80	80 < V ≤ 120	120 < V ≤ 160	160 < V ≤ 230	V > 230
SRA	Längshöhe	[mm]	12	10	8	6	5
SR100	Längshöhe	[mm]	15	13	11	9	7
SRLim	Längshöhe	[mm]	21	17	14	11	9

Klassifizierung von Gleisschäden anhand des SR-Wertes in Abhängigkeit von der Streckengeschwindigkeit

- Je höher die Geschwindigkeit, desto geringer die Toleranz für Abweichungen vom Soll-Wert

Regelinspektionsabstände der Hauptgleise				
V ≤ 80	80 < V ≤ 120	120 < V ≤ 160	160 < V ≤ 230	V > 230
18 Monate	12 Monate	6 Monate	3 Monate	3 Monate

Wartungsintervall in Abhängigkeit der Streckengeschwindigkeit

- Je höher die Streckengeschwindigkeit, desto kürzer der Wartungsintervall

Linder, C., Lackhove, C. & Schenkendorf, R. (2014). Prognoseverfahren zur Gleislageabweichung bei Einzelfehlern

4.7 Messtechnik

Rissprüfung / RIL 821.2007

RIL 821.2007 – Wirbelstromprüftechnik (ET, eddy current testing)

- Unterscheidung zwischen manuellen und On-Board Prüfgeräten
- Da der Schienenstahl R260 ferromagnetisch ist, verlaufen die Wirbelströme an der Oberfläche. Somit können die Risstiefen bestimmt werden. Die Rissgeometrie kann **nicht** bestimmt werden
- Angenommener Risswinkel von 25° durch Hilfe von experimenteller zerstörender Untersuchungen von der DB Systemtechnik
- Anzahl der Sonden abhängig von der Prüfmethode: Manuelle Prüfung, Prüfzug oder Schienenbearbeitungsmaschine



DB Systemtechnik (2014). Maschinelle Schienenbearbeitung nur noch mit integrierter Wirbelstromprüfung!

4.7 Messtechnik

Rissprüfung / RIL 821.2007

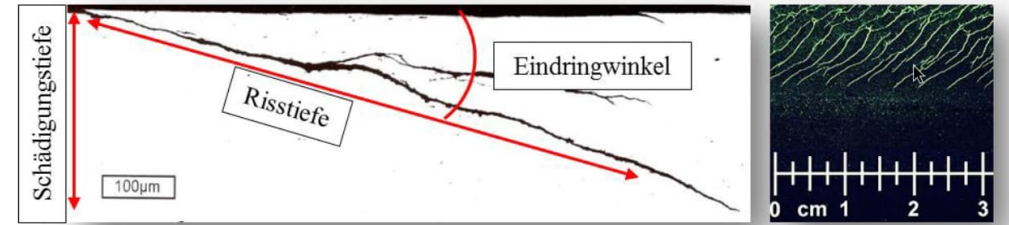


Abbildung einer Gleisschädigung mit einer Schädigungstiefe von ca. $100 \mu\text{m}$ und einem Eindringwinkel von ca. 25°

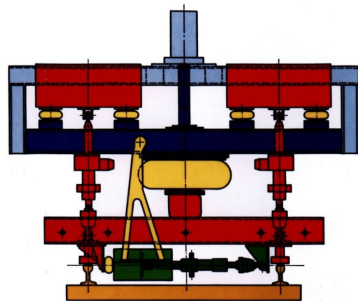
DB Systemtechnik (2014). Maschinelle Schienenbearbeitung nur noch mit integrierter Wirbelstromprüfung!

4.7 Messtechnik

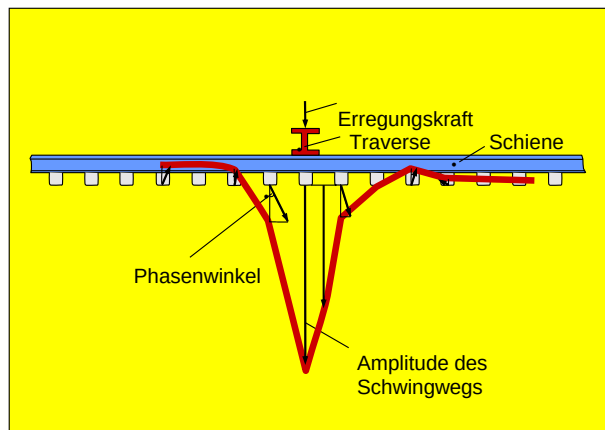
Gleismessverfahren

Belastungs- und Anregungsvorrichtung Gleiselastizität

Dynamische Fahrbahnparameter, Schwingform in Gleislängsrichtung

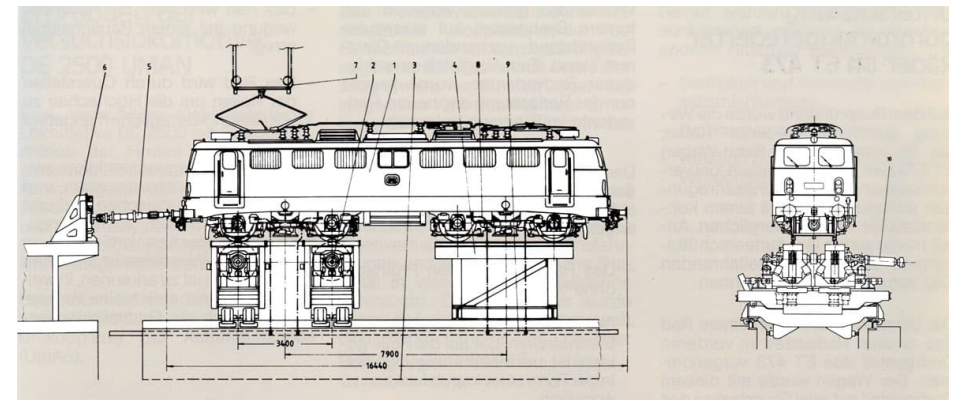


- Rahmen des Meßwagens
- arretierbarer Querträger
- vertikale Erregung
- horizontale Erregung
- Komponenten zur dynamischen Entkopplung



4.7 Messtechnik

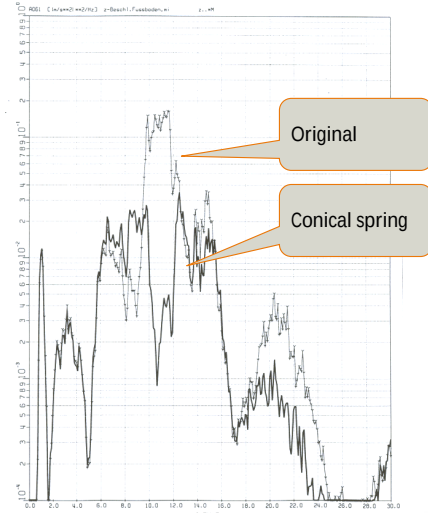
Rollprüfstand



Der Rollprüfstand in München Freimann:
1977 – erste Ausbaustufe
1994 – grundlegende Modernisierung
2003 – Stilllegung
Heute gibt es Rollprüfstände für Einzelachsen (z.B. DB Kirchmöser, IFS RWTH)

Quelle: Broschüre der DB und IABG zum Rollprüfstand „Dynamischer Fahrzeugsimulator für Schienenfahrzeuge“

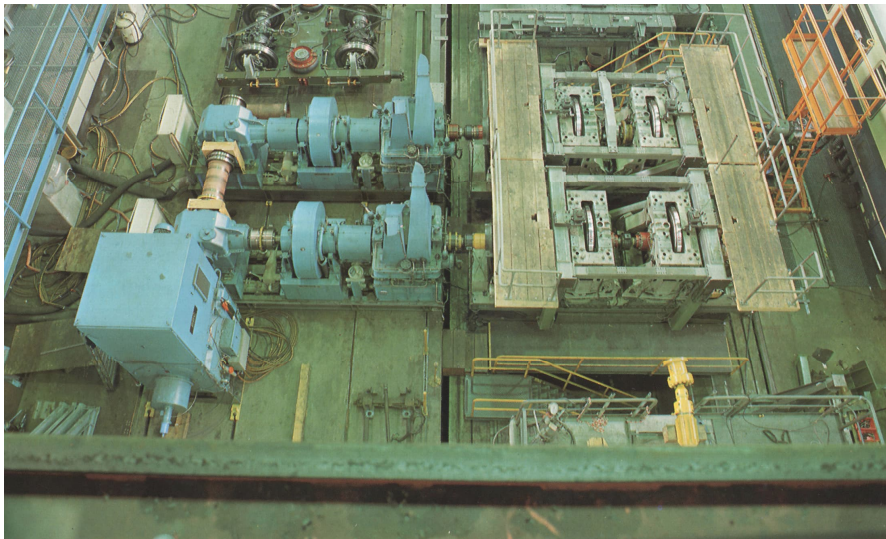
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



SIEMENS
Mobility GmbH 2020 © Frei verwendbar



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle:
Broschüre
der DB
und IABG
zum
Rollprüfsta-
nd „
Dynamisch
er
Fahrzeugsim-
ulator für
Schienen-
fahrzeuge

SIEMENS
Merkuliter GmbH 2020 ©. Ecol van eenendba



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prüfrolle

Scheibenbremsen

Wirbelstrombremse

gekoppelt durch Gleichlaufregelung

Flansch-welle mit Bogenzahnkupplung

1200 KW Motor

1200 KW Motor

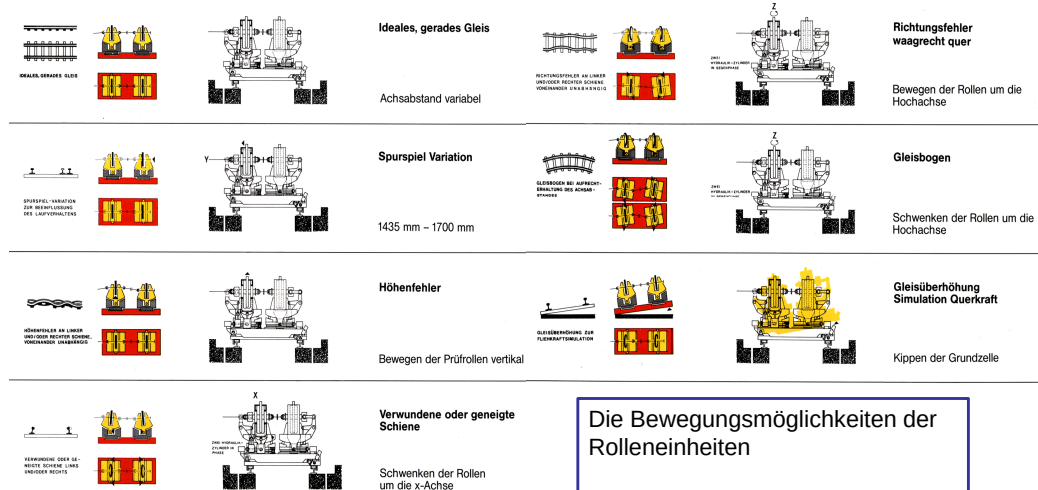
Winkelantrieb 1 : 1,73

Quelle:
Broschüre
der DB und
IABG zum
Rollprüfstand
d „Dynam-
ischer
Fahrzeug-
simulator für
Schienenfahr-
zeuge “

SIEMENS
Mobility GmbH 2020 © Frei verwendbar



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle: Broschüre der DB und IABG zum Rollprüfstand „Dynamischer Fahrzeugsimulator für Schienenfahrzeuge“

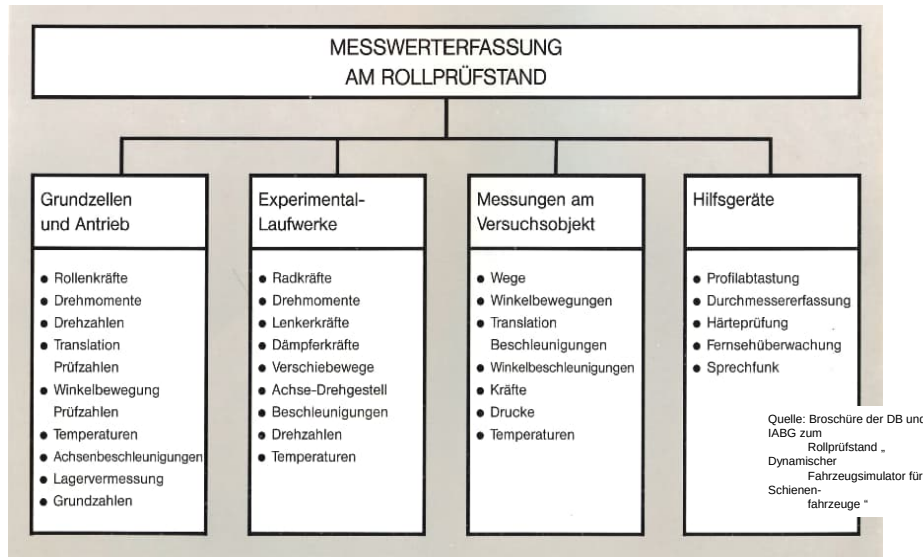
Möglichkeiten der Simulation von Gleislageparametern

SIEMENS
Mobility GmbH 2020 ©. Een verantwoordelijkheid.



4.7 Messtechnik

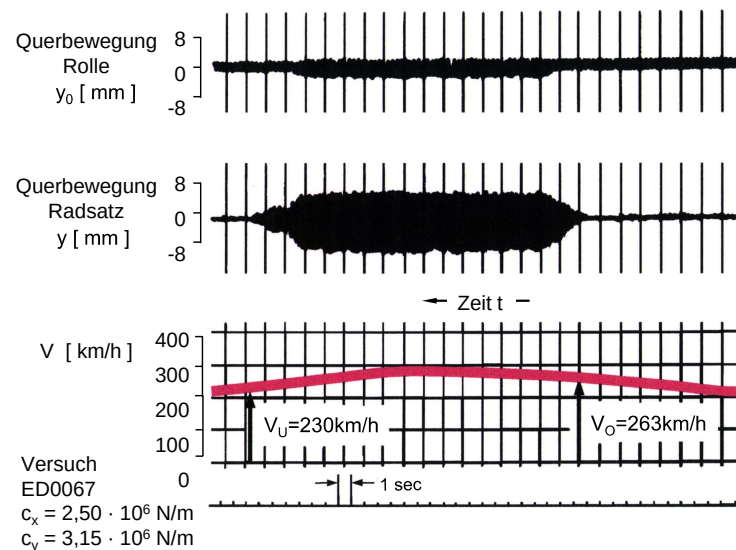
Rollprüfstand



4.7 Messtechnik

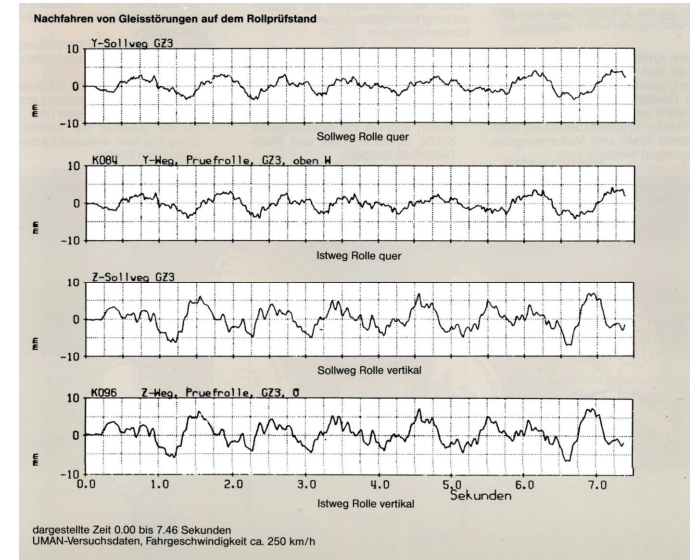
Rollprüfstand - Hochgeschwindigkeitsversuch

Einzelrad



4.7 Messtechnik

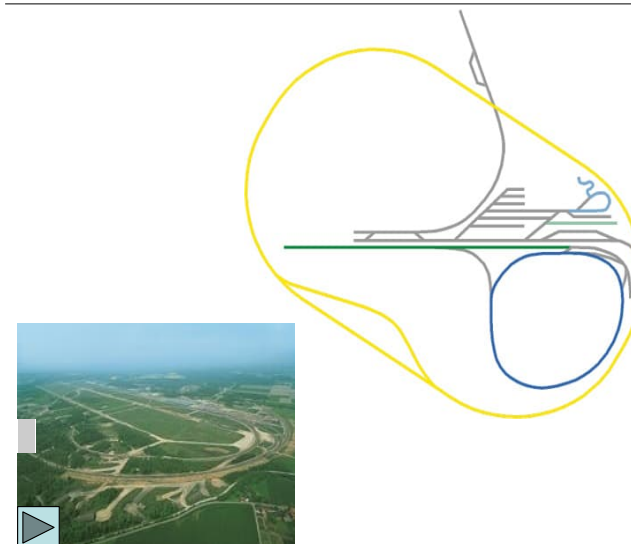
Rollprüfstand



Quelle: Broschüre der DB und IABG zum Rollprüfstand „Dynamischer Fahrzeugsimulator für Schienenfahrzeuge“

4.7 Messtechnik

Prüfcenter Wildenrath



Quelle: Internet

Testring T1	
Länge	6082 m
V_{max}	160 km/h
Testring T2	
Länge	2485 m
V_{max}	100 km/h
Testgleis T3	
Länge	1400 m
V_{max}	80 km/h
Testgleis T4	
Länge	553 m
Radialen	50/25/15 m
Testgleis T5	
Länge	410 m
Max. Steigung	40/70 %

4.7 Messtechnik

Prüfcenter Wildenrath



- Messgleisbogen für die Entgleisungssicherheit

Bestimmung von:

- UIC: Wankpol, Neigungskoeffizient
- UK: Querbewegungen an kritischen Punkten des Kastens

Quelle: Siemens

4.7 Messtechnik

Messfahrten auf der Kundenstrecke

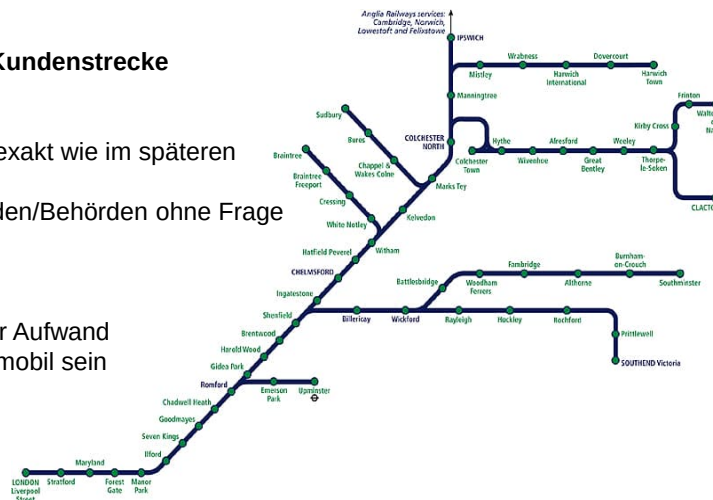
Messfahrten auf der Kundenstrecke

Vorteile:

- Randbedingungen exakt wie im späteren Betrieb
- Akzeptanz bei Kunden/Behörden ohne Frage gegeben

Nachteile:

- sehr hoher zeitlicher Aufwand
- Messtechnik muss mobil sein



4.7 Messtechnik

Prüfcenter Wildenrath



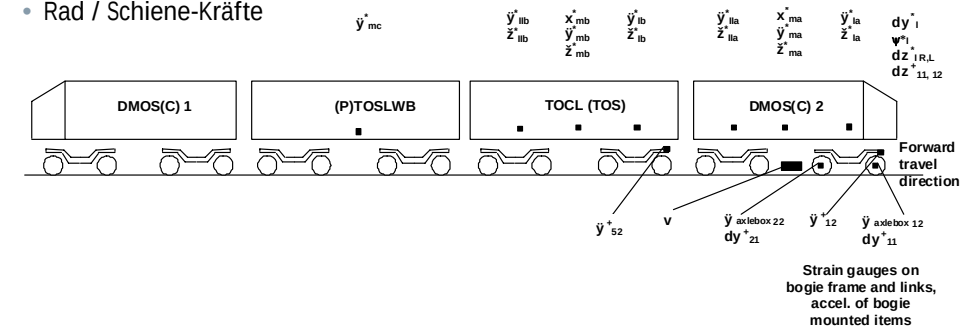
Quelle: Siemens

4.7 Messtechnik

Instrumentierung

Beispielhafte Anordnung der Messinstrumente für fahrtechnische Messungen

- Beschleunigungen
- Federwege
- Rad / Schiene-Kräfte



4.7 Messtechnik

Fahrzeugmessung

Fahrtechnik/Zulassungsmessungen

Messvorschriften:

- Fahrsicherheit (UIC 518 oder länderspezifisch)
- Fahrkomfort (UIC 513 oder kundespezifisch)

Messgrößen:

- Rad/Schiene Kräfte
- Beschleunigungen
- Wege
- Fahrgeschwindigkeit

Instrumentierung: Messradsatz



Instrumentierung: Beschleunigungssensoren

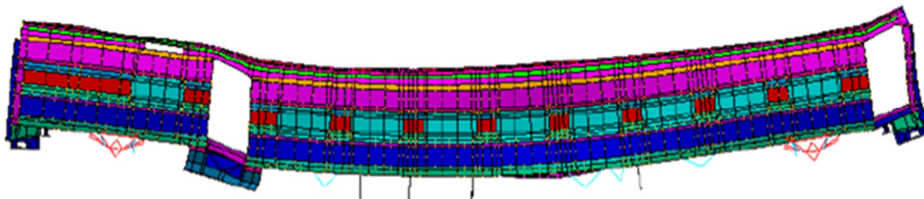


Quelle: Siemens

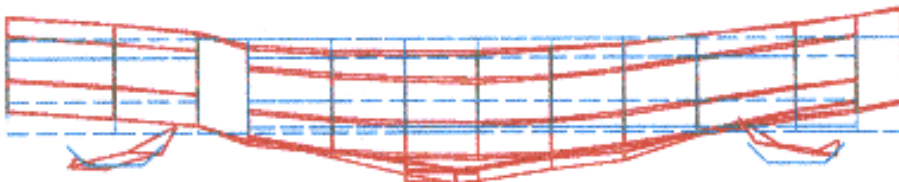
4.7 Messtechnik

Verifizierung der Modelle durch Modalversuch

Vertikale Biegung



Berechnung mit Ansys: $f = 10.75 \text{ Hz}$



Quelle: Siemens

Modalversuch: $f = 11.75 \text{ Hz}$

4.7 Messtechnik

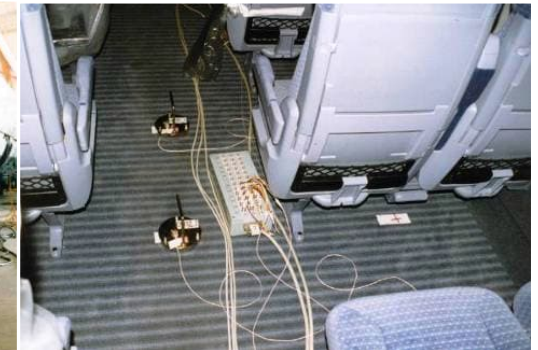
Verifizierung der Modelle durch Modalversuch

Hydraulischer Heber an Anhebestelle eines ICE 2-Wagenkastens



Quelle: Siemens

Messwertaufnehmer im Fahrzeuginnenraum

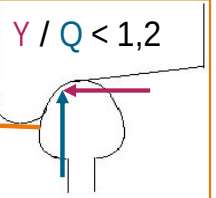


4.7 Messtechnik

Instrumentierung des Messradsatzes



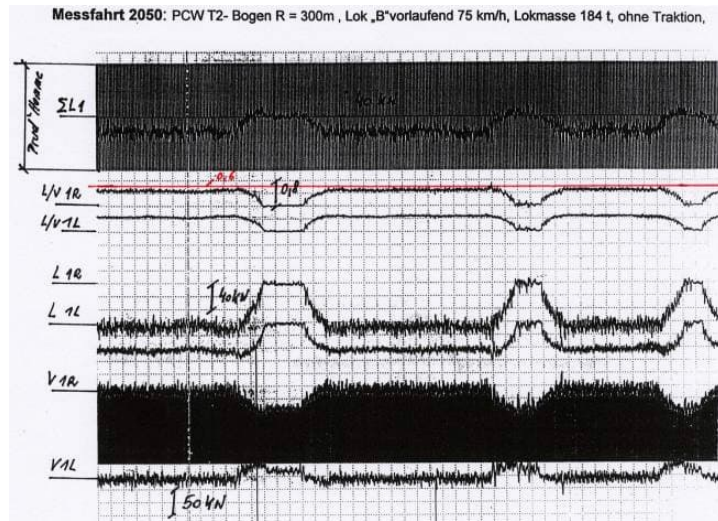
Quelle: Siemens



4.7 Messtechnik

Fahrtechnische Messung

Messergebnisse



Überblick

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

Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik



Quelle: Siemens