



**Kurzvorstellung**  
**Studium Elektrotechnik, Bahnfächer**  
**Referendariat, Staatsprüfung**  
**Lokführerausbildung Bundes-, später Reichsbahn**  
**Ellok (Versuch, Konstruktion, Einkauf)**  
**Diesellok, Gasturbinenlok in Kempten**  
**Wiss. Mitarbeiter Hauptverwaltung, Sonderauftrag**  
**Instandhaltung Ellok, Betriebserprobung E 120**  
**Museumsleiter Nürnberg**  
**Traktionsleiter München**  
**Elektronischer Buchfahrplan**  
**Signal- (KS-System) und Fahrdienstausschuss**  
**Sachverständiger bei Gericht**  
**Über Sonderauftrag: Promotion**



**DMG-Einführungsseminar E1/2023**  
**„Grundlagen der Bahnsysteme“**  
**09.- 11. Mai 2023**  
**„ Kleine Einführung in die**  
**Grundlagen der Fahrdynamik“**  
**dargestellt an Einzelthemen**  
**für DMG-Seminar**

**Dr. Ing. Klaus Huber**  
**i.R. DB**  
**Starnberg**



## Grundbegriffe

- **Fahren** bedeutet rollende Ortsveränderung
- **Dynamik** ist die Lehre von Bewegungen und Kräften
- **Fahrdynamik** ist die Lehre
  - der **Kräfte**, die **Fahren bewirken oder behindern**
  - der **Bewegung von Landfahrzeugen** (hier: nur **Längsbewegung**)
- Fahrdynamik umfasst Betrachtungen zu
  - Antriebs- und Bremskräften, Antriebs- und Bremsleistungen
  - Bewegungswiderständen
  - Weg, Zeit, Geschwindigkeit, Beschleunigung
  - Energieaufwänden
- Fahrdynamik bestimmt u.a.
  - Anfahr- und Bremswege, Fahrzeiten
  - Strecken- und/oder Fahrzeugparameter
- Fahrdynamik beruht auf Physik (Chemie) und nutzt **Mathematik**



### **Vorbemerkung**

**Voraussetzung:**

**Strecke (Infrastruktur) Fahrzeug (Last und Leistung)**

**> Zeit**

**Strecke und Fahrzeug (Leistung) > Transportlast**

**Zeitvorgabe > Strecke und Fahrzeug  
(Deutschlandtakt)**

**Zeitvorgabe, Strecke > Fahrzeug**

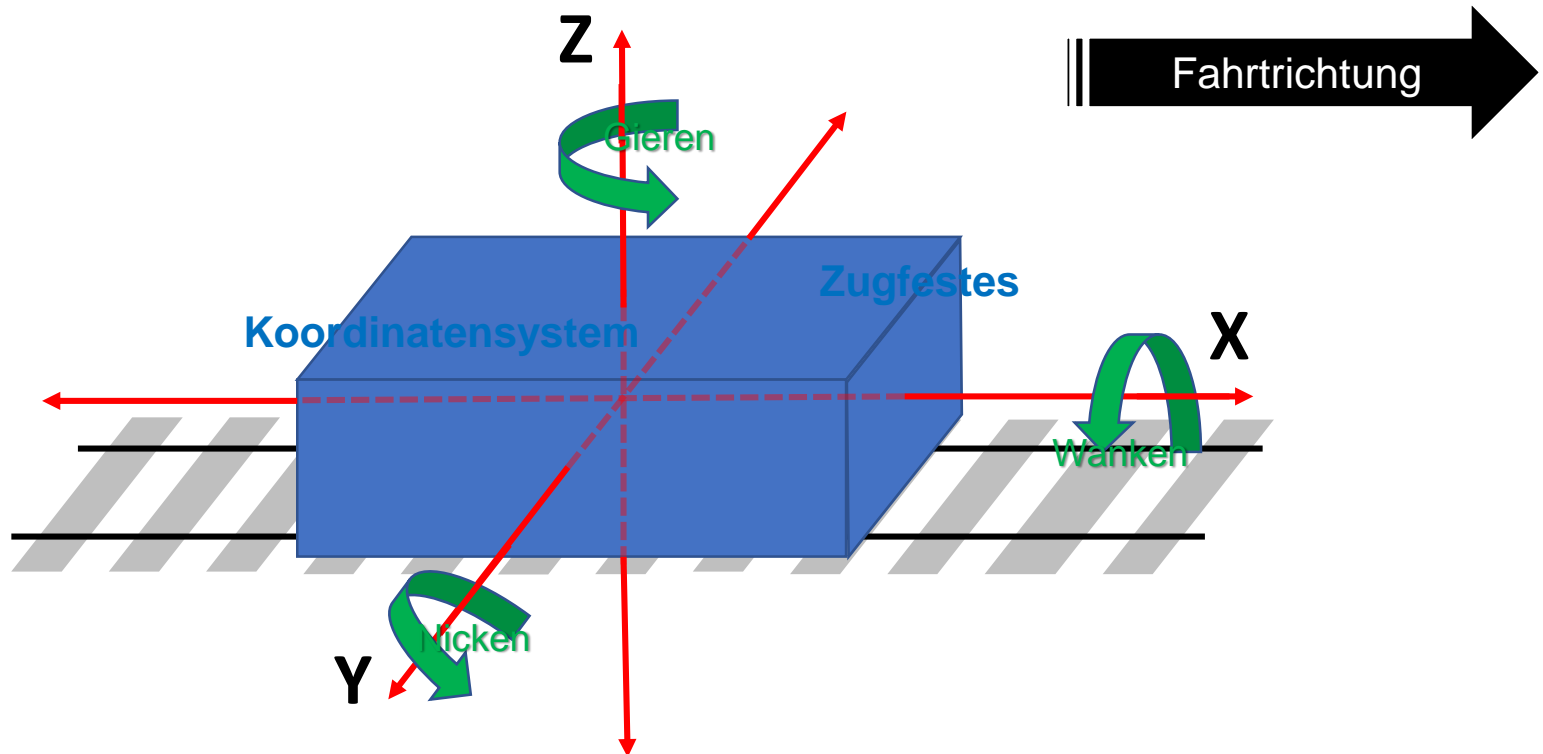
**Fahrdynamik liefert physikalische Daten**

**Eine Festlegung: Zugorientiertes Koordinatensystem**



## Zugfestes Koordinatensystem

F 1



Die Fahrdynamik beschränkt sich i.w. auf die **Bewegungen in X-Richtung**



### **Abschnitt 1**

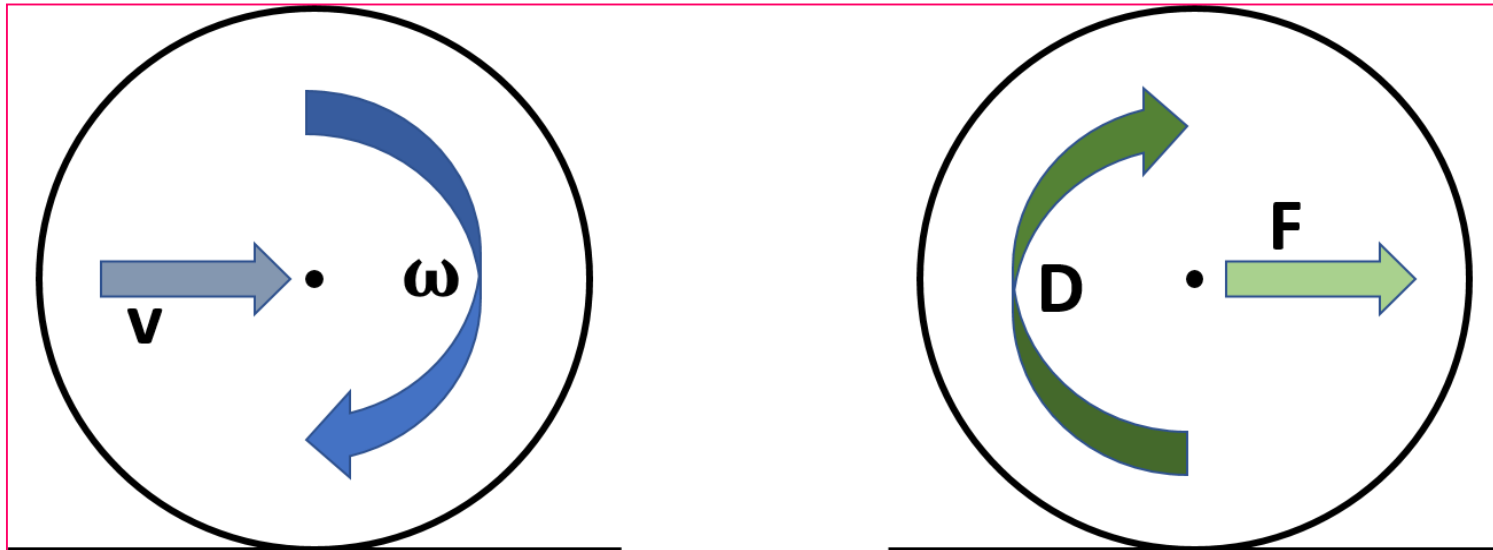
- 1. Kräfte in der Fahrdynamik**
  - 1.1 Kräfte am Rad für die geplante Fahrbewegung**
  - 1.2 Fahrwiderstandskräfte, Kräfte gegen die geplante Fahrbewegung**
  - 1.3 Kräfte am Fahrzeug**
  - 1.4 Zugfestes Koordinatensystem**



### 1.1 Kräfte am Rad von Schienenfahrzeugen

#### 1.1.1 Beziehungen am Rad

F 3



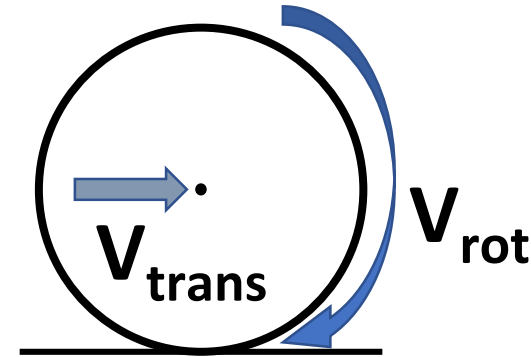
Die **Geschwindigkeit  $v$**  ist proportional der **Drehzahl  $\omega$**

Die **Zugkraft  $F$**  ist proportional zum **Drehmoment  $D$**



### 1.1.2 Schlupf

- $V_{\text{trans}}$  = **translatorische Fahrzeuggeschwindigkeit** („über Grund“)
- $V_{\text{rot}}$  = **Umfangsgeschwindigkeit** eines Rades bzw. Radsatzes
- **Schlupf** bedeutet:  $V_{\text{rot}} \neq V_{\text{trans}}$  d.h. Relativbewegung zwischen Rad und Schiene



- **Schlupf** kann in **km/h** oder in **%** ausgedrückt werden
- **Schlupf** entsteht, wenn **Zugkraft** oder **Bremskraft** den Wert  $\mu \cdot G$  übersteigen
- Er ist **unverzichtbar zur Kraftübertragung** zwischen Rad und Schiene („Nutzschlupf“)
- Der **Nutzschlupf** liegt bei **ca. 2 – 5 km/h**
- Wenn  $V_{\text{rot}} \gg V_{\text{trans}}$  besteht **Schleudern**, wenn  $V_{\text{rot}} \ll V_{\text{trans}}$  besteht **Gleiten**
- Wenn  $V_{\text{rot}} = 0$  (Rad steht) besteht **Blockieren**

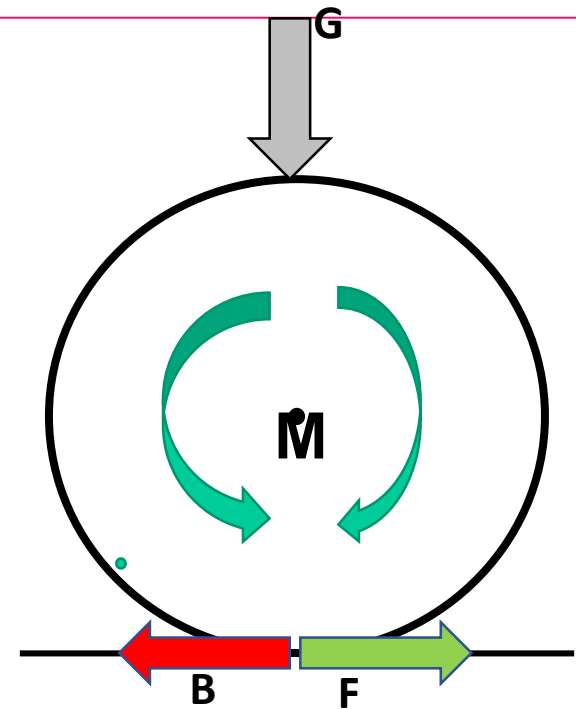




### 1.1.3 Kräfte am Rad

F 5

- $G = g m$  [ kN ]
- $M =$  Drehmoment
- $F = \mu G$  [kN]
- $G =$  Gewichtskraft der Fahrzeug(Rad-)masse
- $\mu =$  KSB
- KSB = Kraftschlussbeiwert



- **Ohne Schlupf und  $KSB >$  Keine Kraft  $F$  oder  $B$  (Lebenserfahrung: Bei Glatteis kein KSB)**



F5a

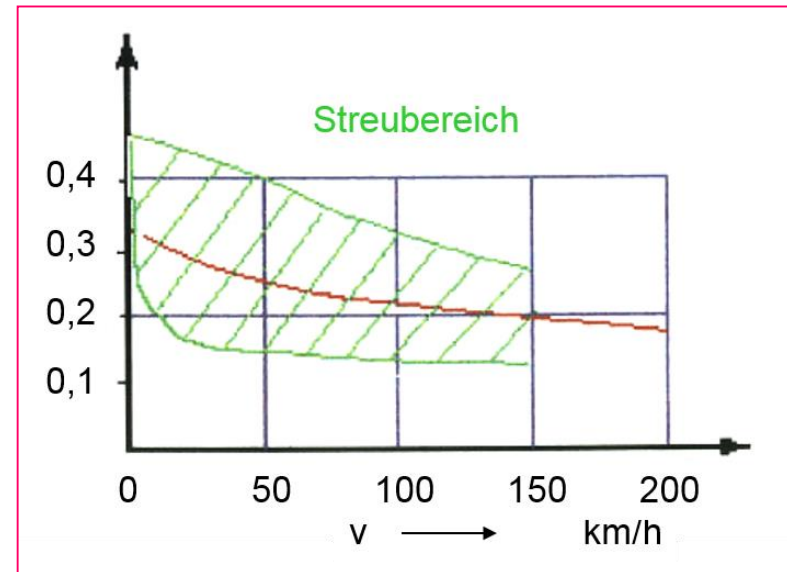
### 1.1.4 Kraftschluss-Beiwert (1)

Der **Kraftschluss-Beiwert**  $\mu$  ist stark umweltabhängig:

- bei Regen ca.  $\mu = 0,2$  ; bei Nieselregen ca.  $\mu = 0,15$
- nach **Curtius-Kniffler** gilt (Versuche mit Lok E 19):

$$\mu = \frac{7,5}{v + 44} + 0,161$$

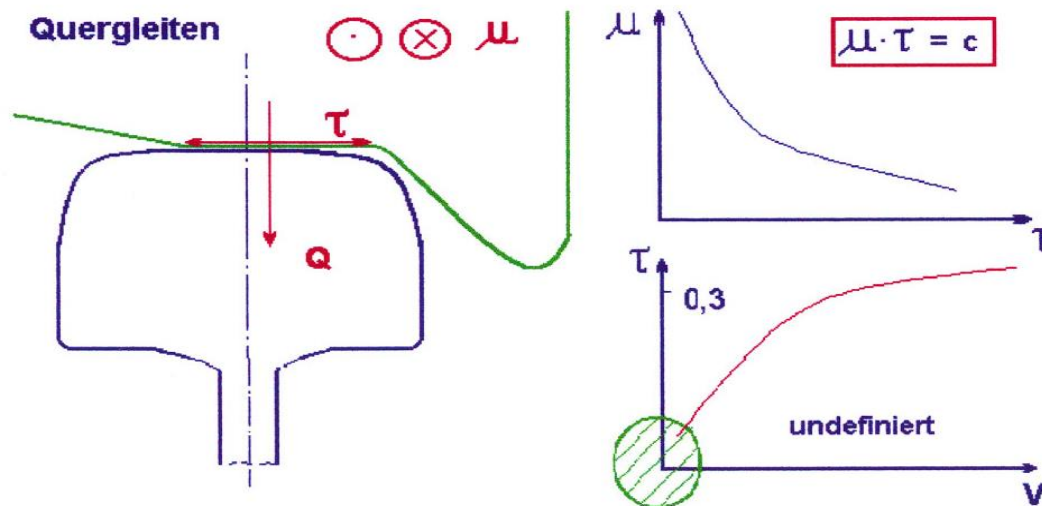
- nach **TSI** gilt beim Bremsen:
  - Intervall von 0 km/h bis 200 km/h:  $\mu = 0,15$
  - Intervall von 200 km/h bis 350 km/h:
    - $\mu = 0,15$  linear abnehmend auf  $\mu = 0,10$





### Geometrie Rad-Schiene und Quergleiten Radsatzführung und Quergleiten

F6



#### Einfluss der Querbeweglichkeit der Radsatzführung

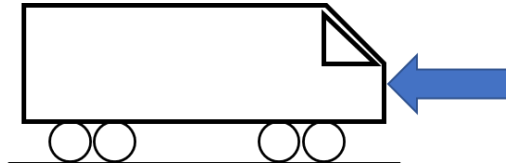
- starr: hohe Gleisbeanspruchung, aber auch hohe Zugkraft
- flexibel: geringere Gleisbeanspruchung, aber Zugkraftverlust (ca. 10 bis 15 %). Folge ist eine geringere Anhängelast (Anfahrergrenzlast).  
>Abschnitt 5.1



### 1.2.2 Fahrwiderstandskraft

F7

**Fahrwiderstandskraft**



Formelzeichen:  $F_w$

Die **Fahrwiderstandskraft** berechnet sich wie folgt:

$$F_w = c_0 \cdot m + c_1 \cdot v + c_2 \cdot v^2$$

Die **Fahrwiderstandskraft** umfasst v.a.

- Rollwiderstandskraft (Rad-Schiene-Berührung)
- Lager- und Getriebewiderstandskräfte
- Stoßwiderstandskräfte (Quer-, Vertikal- und Längsdynamik)
- Impulswiderstandskräfte aus technischen Luftein- und -auslässen
- **Luftwiderstandskraft** → diese ist i.w. für den v-quadratischen Anteil maßgeblich

m = Zugmasse  
v = Geschwindigkeit  
 $c_x$  = zugspezifische  
Koeffizienten

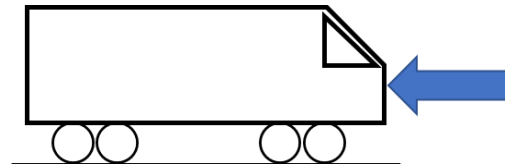
In der Praxis wird oft ein **Zuschlag von 15 km/h** zur Berücksichtigung von Gegenwind berücksichtigt



### 1.2.3 Spezialfall : Luftwiderstandskraft (1)

F8

**Luftwiderstandskraft**



Formelzeichen:  $F_{wl}$

Die **Luftwiderstandskraft** als Teil der **Fahrwiderstandskraft** berechnet sich wie folgt:

$$F_{wl} = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^2$$

$c_w$  = Luftwiderstandsbeiwert  
 $\rho$  = Luftdichte  
 $A$  = Zugquerschnitt  
 $v$  = Geschwindigkeit

Die **Luftwiderstandskraft** umfasst v.a.

- Druckkraft am Bug, Sogkraft am Heck
- Luftspaltkraft zwischen Fahrzeugen
- Flächenreibungskraft entlang Zugoberflächen
- Turbulenzkräfte, v.a. im Fahrwerksbereich



### 1.2.3 Spezialfall: Luftwiderstandskraft (2)

F8a

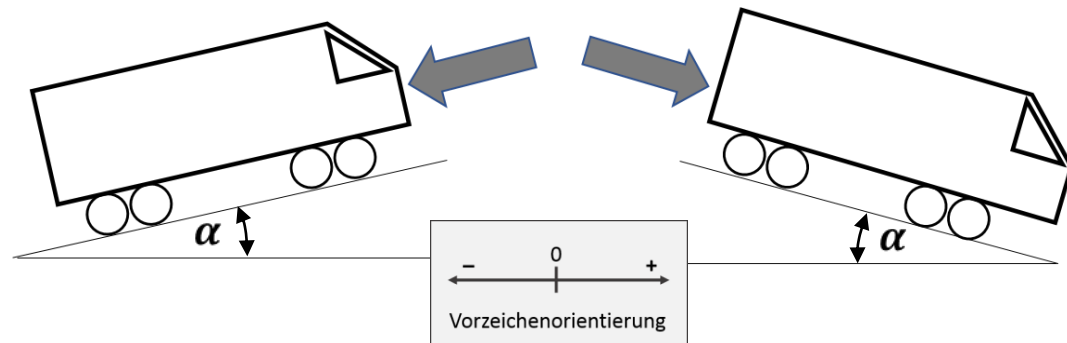




### 1.2.4 Neigungswiderstandskraft

Neigungswiderstandskraft

Formelzeichen:  $F_n$



Die **Neigungswiderstandskraft** kann ein negatives Vorzeichen (**Steigung**) oder ein positives Vorzeichen (**Gefälle**) haben

Die **Neigungswiderstandskraft** berechnet sich wie folgt:

$$F_n = G \cdot \sin \alpha$$

$G$  = Zuggewicht  
 $\alpha$  = Neigungswinkel

Bei kleinen  $\alpha$  ergibt sich mit ausreichender Genauigkeit:  $\sin \alpha = \tan \alpha = i$

mit  $i$  = Neigung [‰]

und damit:

$$F_n = G \cdot i$$



### Beispiele für Neigungswiderstände in Deutschland [‰]

F9

• Schnellfahrstrecken 1991	12,5	Geislinger Steige	24,5
• Köln-Rhein-Main, S-Bahnen	40	S-Bahn	40
• Höllental	55	Rübeland	65
• Strab Würzburg L 5	91	Strab. Augsburg	106
• Strab Lissabon L 28E	135	Strab Linz	116

#### 1.2.5 Bogenwiderstandskraft

#### 1.2.6 Längsdruckkräfte

#### 1.3 Kräfte am Fahrzeug

##### 1.3.1 Innere Kräfte

##### 1.3.2 Äußere Kräfte

**Siehe Begleittext**





### 2.1.1 Beschleunigung und Verzögerung (2)

- Für eine Beschleunigung oder Verzögerung des Zuges gilt allgemein:

$$F_{res} = F + B + F_w + F_n + F_b + F_t \neq 0$$

- Eine **Beschleunigung** erfolgt, wenn gilt:

$$F_{res} = F + B + F_w + F_n + F_b + F_t > 0$$

- Eine **Verzögerung** erfolgt, wenn gilt:

$$F_{res} = F + B + F_w + F_n + F_b + F_t < 0$$

- Für eine **Beschleunigung** **a** gilt allgemein:

$$a = \frac{F_{res}}{m}$$

m = Zugmasse [t]

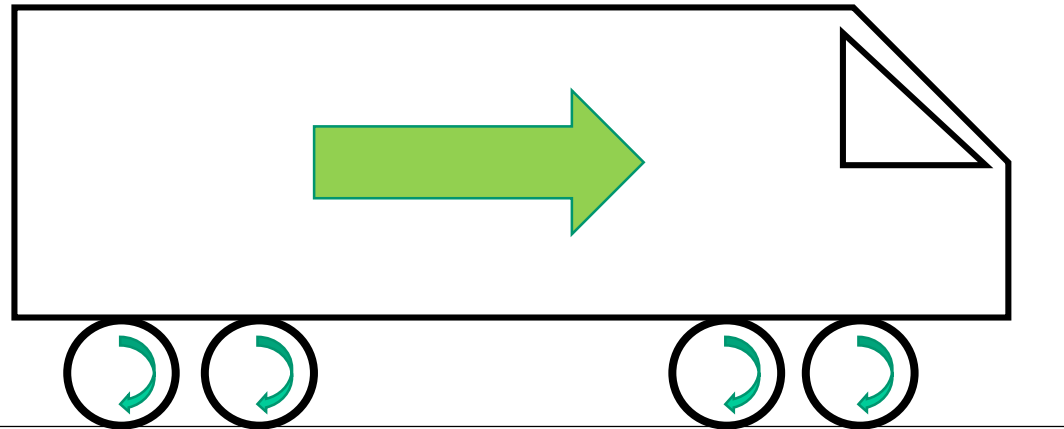
- Für eine **Verzögerung** **b** gilt analog:

$$b = \frac{F_{res}}{m}$$



## 2.1.2 Spezialthema: Rotierende Massen

F10



Bei der Beschleunigung oder Verzögerung eines Zuges muss nicht nur die „statische“ Zugmasse beschleunigt oder verzögert werden, sondern es müssen auch zusätzlich die Drehbewegungen der **rotierenden Massen** der Radsätze, Bremsscheiben, Getriebe und Fahrmotoren verändert werden.

Dies wird durch die Verwendung eines „**Rotatorischen Massenzuschlages**“  $m_{\text{rot}}$  auf die Zugmasse berücksichtigt:



## 4.1 Betrieb einer Schienenbahn

F11

Schienenbahnen haben nur **einen Freiheitsgrad**.

Der geringe Rollwiderstand ist die Ursache für den geringen Energieverbrauch, bedingt aber **lange Anfahr- und Bremswege**. (Anhaltswert : das Zehnfache der Straße).

Zwingt zu einem **stringenten Signalsystem** und strikter Determinierbarkeit (Fahrplan).

Dies ermöglicht eine **weitgehende Risikovermeidung**.

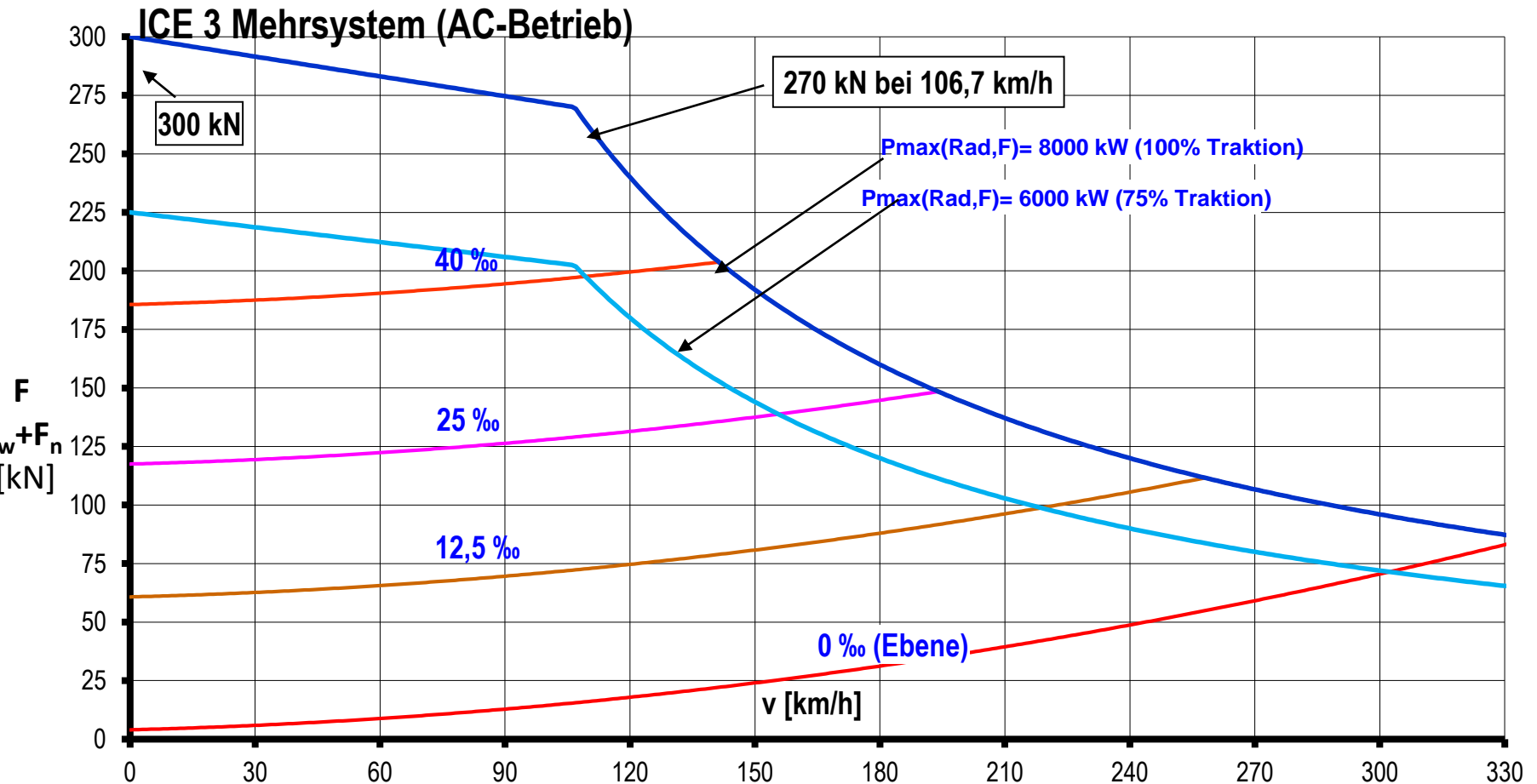
# DMG-Einführungsseminar

## Grundlagen der Fahrdynamik



**F12** Rad (neu): 0,920 m  
 Übersetzung: 2,788  
 Besetztgewicht: 463 t  
 Anzahl Wagen: 8

### 4.2 Zugkraft und Z-V-Diagramm





### 4.8 Grenzlast und Anfahrgrenzlast

#### 4.81 Grenzlast (aktuell)

F13

- Im Betrieb **erwärmen** sich die an der Erzeugung von Zugkraft  $F$  und Bremskraft  $B$  beteiligten Aggregate, z.B.
  - **Antrieb Ellok** (Transformator, Stromrichter, Fahrmotoren)
  - **Bremsen Elektr. Triebzug** (Scheibenbremsen; Antriebskomponenten bei elektr. Bremse)
- Daher sind diese **Komponenten ggf. forciert zu kühlen**, um konstruktiv bedingte Temperatur-Grenzwerte nicht zu überschreiten.
- Bei Lokomotiven sind zusätzlich **Grenzlasten des Lok- und Wagenszuges** zu definieren, die bei bestimmten betrieblichen Randbedingungen (z.B. maximale Steigungen, **Lufttemperatur in langen Tunnel, z.B. Gotthard 40 ° C**) eine Einhaltung der thermischen Grenzen der Aggregate für definierte Zeiträume (z.B. eine Stunde) sicherstellen.
- **Darstellung im Fahrzeitenheft**



### 4.8.2 Signalstandort und Anfahrgrenzlast

F14

- Im Unterschied dazu steht die **Anfahrgrenzlast** als die Last des Lok- und Wagenzuges, (Gesamtzuggewicht) die an jeder Stelle der zu befahrenden Strecke nach einem Halt wieder sicher beschleunigt werden kann. (Gefahrenlage bei Dampflok)
- **Anfahrgrenzlast** als die Last (Gesamtzuggewicht), die an **Signalstandorten (Blockzeichen)** sicher wieder angefahren werden kann. (Ellok, V-Lok)
- Zug kann also an einer ungünstigen Stelle (Steigung) liegen bleiben, obwohl er weniger als die Anfahrgrenzlast hat. (Spessartrampe)
- Im „Der Eisenbahningenieur“ April 2019 wurde berichtet, dass auf der Schnellfahrstrecke Erfurt- Nürnberg vier ETCS-Signalstandorte verlegt wurden, um die **Anfahrgrenzlast von 1035 bzw. 1270 t auf 1500 t** erhöhen zu können. Im Güterverkehr bringen die letzten 10 Wagen den Gewinn. Vgl. Text. Seite 21 > Integrierte Bahn



### 4.8.3 Signalstandort und Bremskraft

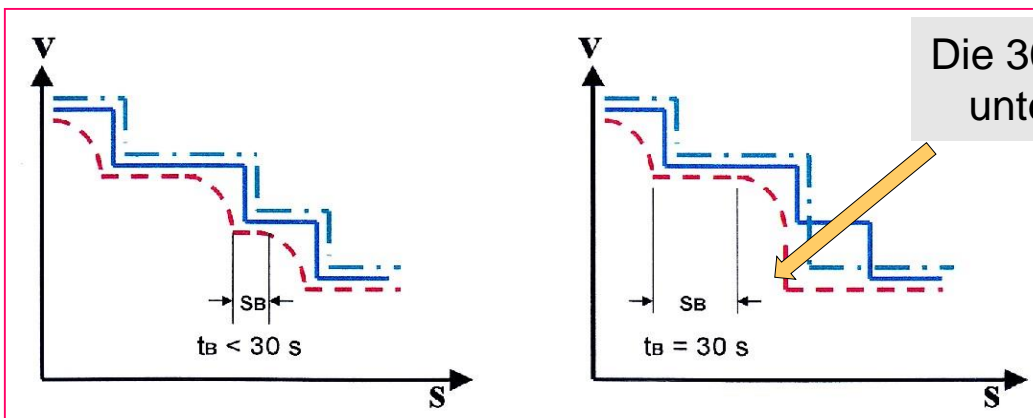
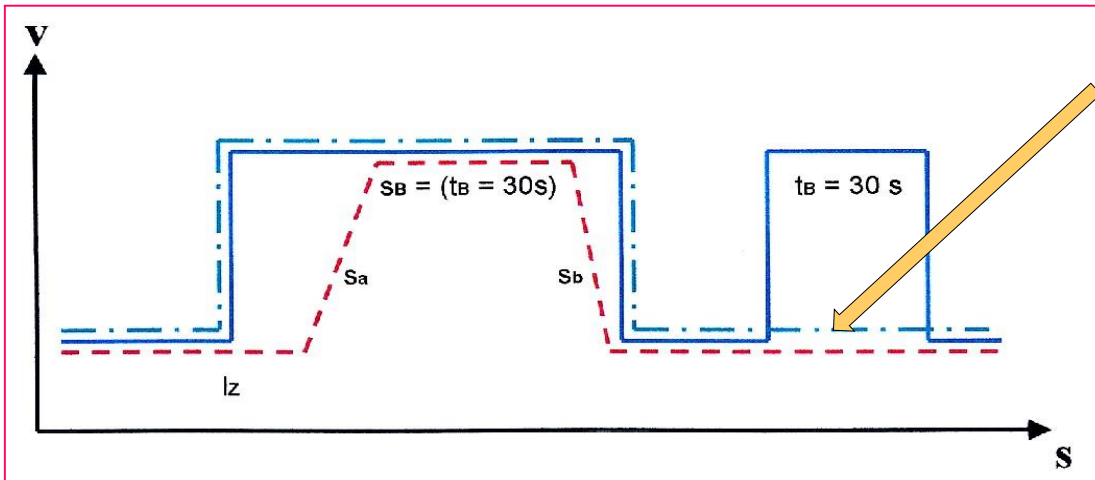
F14a

- Aus der Schnell/Zwangsbremmung ergibt sich für Signalstandorte (ETCS-Blockzeichen) eine fahrdynamische Überlegung ähnlich der für die Anfahrgranzlast aus den **Horizontalkräften**.
- Im „Der Eisenbahningenieur“ Sept. 2021 wurde über die Einleitung von horizontalen Radkräften auf die Schiene berichtet. Bei einem schnell- oder zwangsgebremsten Zug beträgt der KSB zwischen 1 und 0 m/sec auf trockener Schiene 0,33, d.h. die Horizontalkraft 33 % der Normalkraft. Riffelbildung, Wellenbildung auf Straßen
- **Auf zuglangen Brücken entstehen hohe Schubkräfte auf Widerlager.**
- Durch die **Wahl der Signalstandorte** (ETCS-Blockzeichen) lassen sich die besonderen **Horizontalkräfte** aus **Bremmungen** nach Maßgabe der Betriebslage vermeiden werden.
- Beispiel für die komplexe Verzahnung Infrastruktur, LST und Betrieb.



### 4.9 Die „30-Sekunden-Regel“

F15



- Dabei bedeuten:
- örtlich zulässige Geschwindigkeit
  - - - Fahrshaulinie des Zuges
  - · - · Angabe zur Spalte des Buchfahrplanes



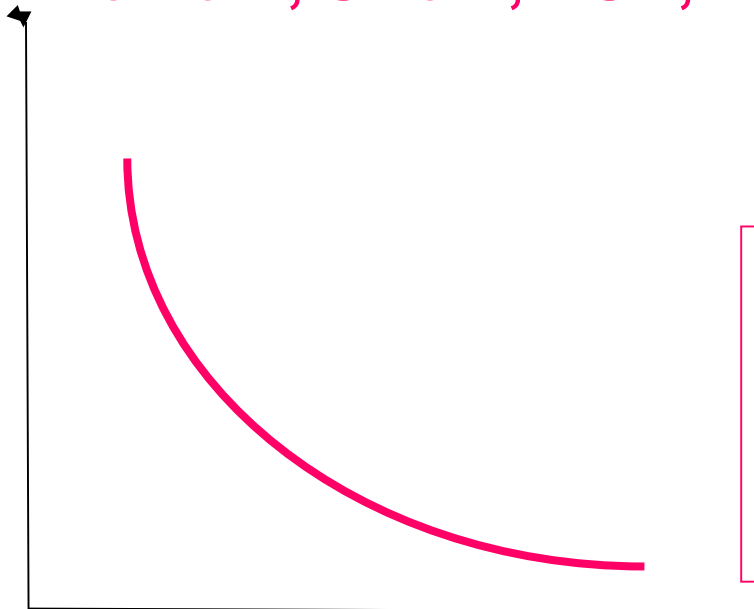


### 5 Sonderthemen

#### 5.0 Warum 16,7 Hz ? (1)

F16

**Moment, Strom, KSB,**



Elektromechanisch: Gesucht:  
Motor mit dieser Kennlinie  
Kleine Drehzahl, starkes Moment  
Höhere Drehzahl, geringeres M.  
**Lösung: Reihenschlussmotor**

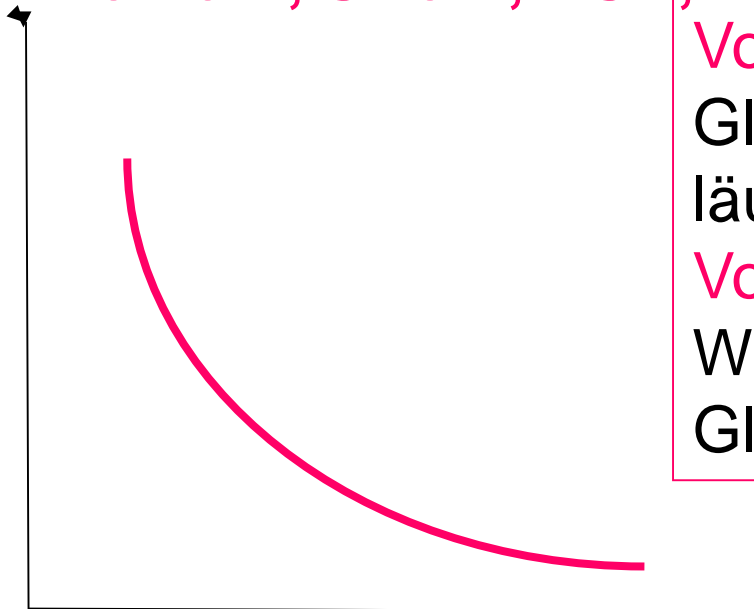
**Drehzahl, Spannung, Geschwindigkeit,**



**5**      **Sonderthemen**  
**5.0**    **Warum 16,7 Hz ? (1)**

F17

**Moment, Strom, KSB,**



**Vortrag Groh:**  
Gleichstrommotor  
läuft mit Wechselstrom  
**Vortrag Möller**  
Wechselstrom statt  
Gleichstrom

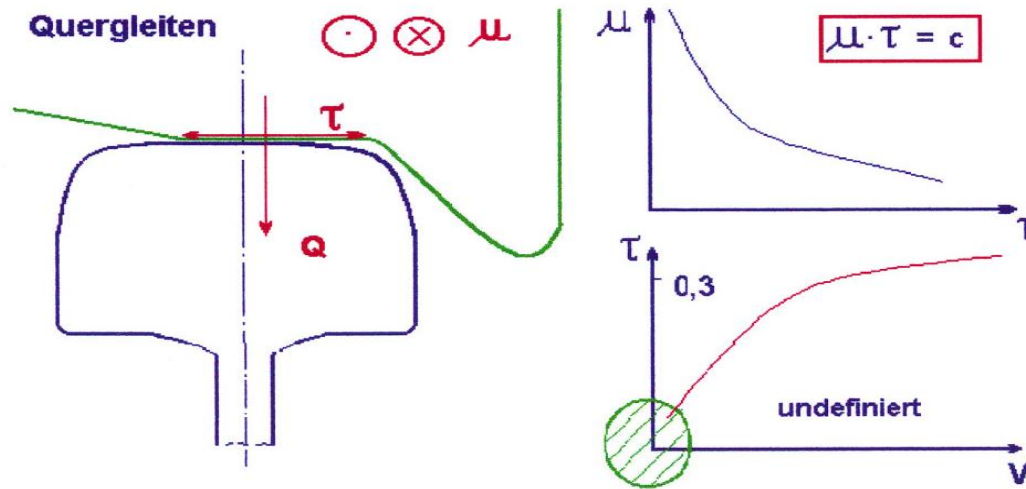
**Drehzahl, Spannung, Geschwindigkeit,**



### 5.1.1 Geometrie Rad-Schiene und Quergleiten

### 5.1.2 Radsatzführung und Quergleiten

F18



### Einfluss der Querbeweglichkeit der Radsatzführung

- starr: hohe Gleisbeanspruchung, aber auch hohe Zugkraft
  - flexibel: geringere Gleisbeanspruchung, aber Zugkraftverlust (ca. 10 bis 15 %). Folge ist eine geringere Anhäng- (Anfahrrenz-) last.
- >Abschnitt 5.1



## 5.3 Energie, Nutzung bei Schienenbahnen

F19

Zunehmende Bedeutung der **Energie als Kostenfaktor und Umweltbelastung**. (Dieselantrieb). Energiekosten und Energiegewinnung (erneuerbare Energie) als Wettbewerbs- und Ausschreibungskriterium.

Parameter für Energie: Masse, Geschwindigkeit, topographische Höhe

Abstimmungsprozess zwischen Höchstgeschwindigkeit (Nahverkehr !) und Energiekosten und Einnahmen. Beispiel: Zwei Städte, Entfernung ca. 100 km, ICE beschleunigt einmal auf 200 km/h, Regionalexpress 5 mal auf 160 km/h: Energiekosten pro Platz, Einnahmen pro Platz.



### 5.4.1 Analytische Bremswegberechnung F20

Aus der Gleichung  $\text{Arbeit} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$  und  $\text{Kraft} = \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung}$  (Verzögerung) läßt sich der **Bremsweg berechnen, wenn die Kraft bekannt ist**. Diese ist vielleicht bei generatorischen Bremsen (E-Fahrzeuge) und Retardern (V-Fahrzeuge) bekannt.

**Praktisch unbekannt** sind diese Parameter bei Druckluftbremsen mit Reibelementen (Klotzbremse, Scheibenbremse) und den vielen Abhängigkeiten wie:

Ansprechzeiten der Steuerventile, Bremsart, Durchschlaggeschwindigkeit der Druckabsenkung, Gestängewirkungsgrad, Kraft der Zylinderrückholfeder usw.



## 5.4.2 Empirische Bremswegberechnung F20a

**Festlegung des Bremsvermögens: 100 %**  
für 950 m Bremsweg (1000-minus 5 %), bei 5 ‰ Gefälle und 120 km/h  
Ausgangsgeschwindigkeit  
Prozente lassen sich nicht addieren. Folge Festlegung:

**100% = Bremsgewicht wie Fahrzeuggewicht**  
**Falsche Gewichtsdefinition, aber geläufig geworden**

Empirische Ermittlung über Bremsversuche (rotierende Massen)  
Durchführung: Alle Bremsgewicht bezogen auf alle Fahrzeuggewichte  
mal 100 ergeben die sog. Bremshunderstel (Bremsprozente)  
Festlegung in Bremstafeln für Bremsarten R/P und G. Geschwindigkeit,  
Streckeneneigung und Bremsprozente



### 5.4.3 Mindener Formel (1)

Aus vielen Versuchen mit Bestimmung von durch Beiwerte korrigierten Parametern eine **mit Tabellen handhabbare**

**Bremswegformel. Vereinfachtes Beispiel:**

Mindener Formel zur Berechnung des Bremsweges bei Angabe der Bremsleistung Beispiel für Reisezüge in Bremsart R/P mit Scheibenbremsen, Tabellenwerte in Spezialhandbüchern

$V$  = Geschwindigkeit in km/h  $\Psi$  = geschwindigkeitsabhängiger Beiwert (ca. 1 für  $70 < V < 160$  km/h)

$\lambda$  = Bremsgewichtshunderstel  $\lambda_r = c_i \lambda$ ;  $\lambda_r$  = rechnerische Bremsgewichtshunderstel

$c_i$  = Für Züge mit 48 bis 60 Achsen 1,00  $s$  = Bremsweg in m

$i_r$  = rechnerische Streckenneigung in ‰ = 0,9 tatsächlicher Wert

$$s = \frac{3,85 V^2}{6,1 \Psi (1 + \lambda_r/10) \pm i_r} \quad [\text{m}]$$



**F22**

## **Praktische Hinweise im Begleittext**

**Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit**