

# Kleine Einführung in die Grundlagen der Fahrdynamik

Dargestellt an Einzelementen für DMG-Seminar

## 0 Vorbemerkung

Was will die Fahrdynamik? Was kann sie ?

Die Fahrdynamik beschreibt die Kräfte, die Fahren (Bewegen eines Fahrzeuges auf einer definierten Unterlage) ermöglichen oder behindern. Sie liefert die dazu notwendige mathematische Berechnung auf physikalischer Basis. Aus der Berechnung kann man unterschiedliche Fragestellungen beantworten. Die häufigste Fragestellung ist die nach der Zeit auf einem vorhandenen, genau beschreibbaren Weg für ein konkretes Fahrzeug oder mehrere Fahrzeuge (Zug). Die Fahrdynamik macht auch Vorgaben gemäß physikalischer Gesetze für die Konstruktion des Weges oder des (der) Fahrzeuge.

Die Antwort zur Zeitfrage führt dann zum Fahrplan, die Antwort zum Weg führt zu Grenzen und Möglichkeiten des Wegebbaus und der Fahrzeugauslegung. Die einzelnen Parameter sind aber kohärent. Die physikalischen Grenzen des einen legen die Kriterien des anderen fest. Praktische Fragestellungen.

- Strecke und Fahrzeug (einschließlich Last) sind bekannt: Zeitbedarf (>Fahrplan)
- Strecke und Fahrzeug sind bekannt: Mögliche Transportlast (> Transportkapazität)
- Zeitvorgabe : Streckentrassierung und Fahrzeugkonzept (> Umwelt)
- Fahrzeug(e) (einschließlich Last), physikalische Grenzen und Zeitvorgabe sind bekannt: Streckentrassierung (>Umwelt)

Die häufigsten Fragestellungen an die Fahrdynamik führen zu den Einzelementen des Fahrplans und in außergewöhnlichen Fällen zu (Brems-) Wegberechnungen, die näher betrachtet werden. Schnelle Rechner helfen der Fahrdynamik. Fahrgastwechselzeiten und der Kraftschlussbeiwertes ändern sich gelegentlich unvorhersehbar, dafür sind Toleranzen vorzusehen.

Fahrdynamik: Fahren ist die rollende Ortsveränderung. Dynamik ist die Wirkung von Kräften nach Richtung und Zeit. Die Fahrdynamik beschreibt folglich Kräfte, die Fahren bewirken oder behindern und bezieht sich hier vorwiegend auf die Längsbewegung von Landfahrzeugen. Die **Fahrzeugdynamik** wird hier nicht dargestellt

Physikalische, gelegentlich auch chemische Grundtatsachen und mathematisch beschreibbare Verlaufsformen lassen dann die quantitative Bestimmung von Kräften, die eine Fahrt behindern, zu. Damit kann man die Kräfte, die eine Fahrt ermöglichen, ermitteln und daraus folgen dann Vorgaben für Leistung bei der Fahrzeugdimensionierung, Arbeit bzw. Energie, Weg und Geschwindigkeit.

Konkret können Wege, insbesondere Brems- und Anfahrwege berechnet werden die zu Fahrzeiten als Basis des Fahrplans führen. Die Abhängigkeit der Infrastruktur- und Fahrzeugparameter bilden ein in sich kohärentes System und die Veränderung eines Parameters hat weitreichende Auswirkungen auf das Gesamtsystem. Das Verbundsystem einer Bahn wird dann deutlich.

Mit einem einstündigen Power-Point-Vortrag und diesem Begleittext dazu soll ein Einstieg in die Fahrdynamik ermöglicht werden. Die Komplexität des Themas gäbe Stoff für eine zweisemestrige Vorlesungsreihe zur wissenschaftlichen Durchdringung. Eine Einführung beschränkt sich auf Ansätze für praktische Anwendungen für Eisenbahnen nach der EBO<sup>1</sup> und vergleichbaren Bahnen (U-Bahnen und Straßenbahnen, soweit sie mit einer EBO-Eisenbahn vergleichbar sind.) Handhabbare Regeln aus den Überlegungen zur Fahrdynamik beziehen sich also auf die in Deutschland für Vollbahnen gültigen Regeln, die technisch auch für ähnliche Bahnen (spanische, russische Breitspur) anwendbar sind. (z.B. Bogenwiderstand). Am Beispiel des 16,7 Hz-Bahnstroms lässt sich die innere Verzahnung des Bahnsystems darstellen. Die fahrdynamische Forderung (große Kraft bei kleiner Geschwindigkeit, kleine Kraft bei großer Geschwindigkeit) fordert den Gleichstromreihenschlussmotor. Gleichstrombahnelektrifizierungen haben enge Grenzen. Elektrophysikalische Abhängigkeiten lassen sich so kombinieren, dass ein Gleichstrommotor doch mit einem besonderen Wechselstrom betrieben und zu einem robusten Bahnmotor entwickelt wird und unbegrenzte Wechselstrombahnelektrifizierung ermöglicht wird.

Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die sich mathematisch beschreiben lassen, müssen im Betrieb praktikabel sein. Dafür werden Regeln in einem Regelwerk als Gesetze, Rechtsverordnungen, Vorschriften oder Richtlinien erlassen. Durch die (teilweise europaweite) Neuorganisation der Eisenbahnen mit der organisatorischen Trennung der Infrastruktur und der Transportleistungserbringung auf der Infrastruktur muss das Regelwerk ebenfalls neu strukturiert werden. Das Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) darf und muss Regeln erlassen, die den sicheren Betrieb auf der Infrastruktur sicherstellen und für alle Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) gelten müssen. Immerhin hat aber der Europäische Gerichtshof festgestellt, dass Netz und Betrieb (EIU und EVU) unter dem Dach einer Holding geführt werden dürfen. Damit könnte auch die Holding die technische Einheit zwischen EIU und EVU herstellen und zeugen, wie technisch vernetzt beim System Bahn die Komponenten sind.

Bei der Beschreibung von Bewegungen sind Richtungsdefinitionen erforderlich. Die Fahrzeugdynamik betrachtet alle linearen Bewegungsmöglichkeiten gemäß den drei Freiheitsgraden und dazu die Drehbewegungen um die drei Achsen. Anschaulich wird dies bei den sog. Achterbahnen auf Volksfesten. Bei den engen Bögen von Straßenbahnen sind die Drehungen um die Z-Achse gelegentlich zu beachten. Bei EBO- Bahnen bezieht sich die Fahrdynamik fast nur auf die Bewegungen in der X-Achse.

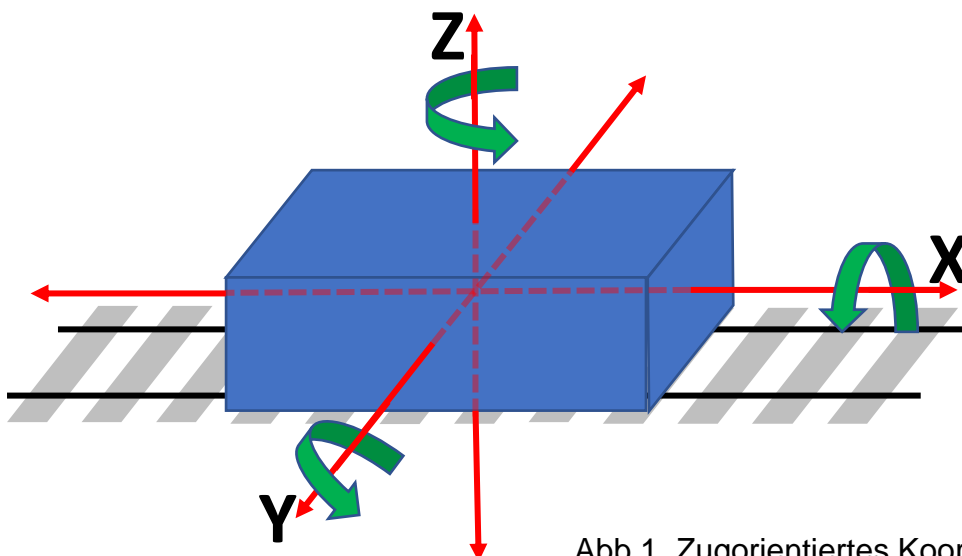


Abb.1 Zugorientiertes Koordinatensystem

<sup>1</sup>) EBO: Bau- und Betriebsordnung, Rechtsverordnung  
Dr.K.Huber KI. Einführung in die Grundlagen der Fahrdynamik

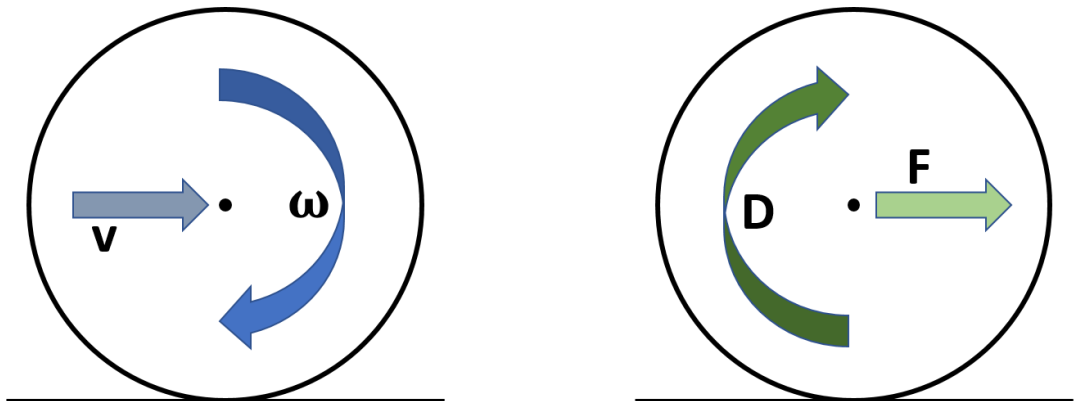
Grundbegriffe werden bei jeweiligen Sachzusammenhang erläutert. „Fahrzeug“ meint immer auch mehrere Fahrzeug im Verbund (Züge), es sei denn es gibt besondere Hinweise. Funktionsbezeichnungen z.B. Lokführer gelten immer für Männer und Frauen. (In dieser Richtung wurden/ werden Regeln neu aufgestellt. Die hier vorgestellten Überlegungen zur Fahrdynamik berücksichtigen hier die zum 11.12.2011 neu erlassene Richtlinie 915 (Bremsen im Betrieb bedienen und prüfen) mit ihren Modulen der DB AG und die ab 10.06.2012 geltende Richtlinie 408.01-09 (früher Fahrdienstvorschrift) der DB Netz AG. (Zuglänge z.B. 700 m und in der Regel mit 250 Achsen, es gibt aber Versuche mit 1000 m langen Zügen). Auf die RiL 418 der DB Fernverkehr AG sei besonders hingewiesen. In ihr werden erstmals alle für den Eisenbahnfahrzeugführer relevanten Bestimmungen zusammengefasst.)

## 1 Kräfte in der Fahrdynamik

### 1.1 Kräfte am Rad für die geplante Fahrbewegung,

Die maßgeblichen Kräfte für eine geplante Fahrbewegung für Anfahren<sup>2</sup> oder Bremsen<sup>3</sup> entstehen zwischen Rad und Schiene.

#### 1.1.1 Abhängigkeiten



Die Geschwindigkeit ist proportional der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  bzw. der Drehzahl  $n$

Die Zugkraft  $F$  (Z) ist proportional dem Drehmoment  $D$

Abb. 2 Abhängigkeiten

#### 1.1.2 Schlupf

Wenn die translatorische Fahrzeuggeschwindigkeit – genauer Radsatzgeschwindigkeit über Grund - nicht genau der Umfangsgeschwindigkeit des Rades (Radsatzes) entspricht, liegt das Phänomen „Schlupf“ vor. Ohne Schlupf gibt es keine Übertragung von Zug- oder Bremskräften, man spricht deshalb vom „Nutzschlupf“.

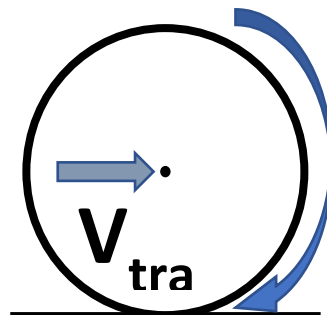


Abb.3 Translation und Schlupf

<sup>2</sup> Ein stillstehendes Fahrzeug fängt an zu fahren oder fährt mit einer Geschwindigkeit, die gesteigert wird

<sup>3</sup> Ein bewegtes Fahrzeug soll langsamer werden oder zu Stillstand kommen.

Hinweis: Bei Asynchronmotoren kennt man ein ähnliches Phänomen: Wenn der „Asynchronmotor“ genau synchron läuft, kann er weder motorisch Drehmoment abgeben noch generatorisch aufnehmen.

Das Rad muss also immer etwas schneller oder etwas langsamer drehen als es der translatorischen Geschwindigkeit entspricht. Dies ist bei sehr exakten Geschwindigkeits- und Wegmessungen zu berücksichtigen. Der Nutzschlupf liegt im Promillebereich, in der Regel unter 1% der translatorischen Geschwindigkeit.

Im Abschnitt über den Kraftschlussbeiwert wird dessen Volatilität dargestellt. Daher kann es durch die Kraft (Drehmoment-)Wirkung zu deutlichen Über- oder Unterschreitungen des Nutzschlupfes kommen. Dazu folgende Definitionen:

**Rollen** meint, dass das Rad auf der Schiene ohne jede Kraftübertragung läuft und die Rotationsgeschwindigkeit des Rades umgerechnet genau der translatorischen Geschwindigkeit des Fahrzeuges entspricht.

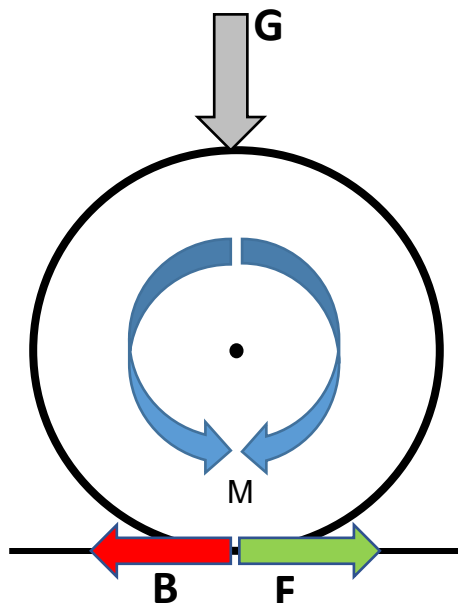
**Gleiten** meint, dass sich das Rad auf der Schiene deutlich langsamer als Rollen bewegt, also die Rotationsgeschwindigkeit des Rades umgerechnet deutlich kleiner ist als die translatorische Geschwindigkeit des Fahrzeuges.

**Quergleiten** (umgangssprachlich Rutschen) meint, dass sich das Rad quer auf der Schiene bewegt. (Vgl. Abb. 9 )

**Schleudern** - als Gegensatz zum Gleiten - meint, dass die Rotationsgeschwindigkeit des Rades umgerechnet deutlich größer ist als die translatorische Geschwindigkeit des Fahrzeuges.

**Blockieren** meint, dass das Rad (der Radsatz<sup>4</sup>) steht (Drehzahl 0), während das Fahrzeug auf den Schienen gleitet.

### 1.1.3 Kräfte am Rad



Auf dem Rad lastet die anteilige Fahrzeugmasse mit ihrer Gewichtskraft

$$G = m g \text{ [kN]}$$

Dabei ist  $g$  die Erdbeschleunigung mit  $9,81 \text{ m/sec}^2$  und  $m$  die Masse in Tonnen.

Wenn das Drehmoment  $M$  wirkt, entsteht die Tangentialkraft  $F$  oder  $B$  als Zug- oder Bremskraft. Für  $F$  oder  $B$  gilt dann:

$$F = \mu m g \text{ [kN]}$$

Der Faktor  $\mu$  ist der Kraftschlussbeiwert (KSB). Ohne ihn und ohne Schlupf entstehen keine Kräfte zwischen Rad und Schiene.

Abb. 4 Antriebs-(F) und Brems(B)-Kraft

<sup>4</sup> Bei einem Radsatz werden durch die Radsatzwelle die beiden Räder starr miteinander verbunden. Bei Sonderkonstruktionen wie z.B. Losrädern muss in anderer Weise eine mechanische Verbindung zwischen den Rädern hergestellt werden.

### 1.1.4 Kraftschlussbeiwert (KSB)

Der Kraftschlussbeiwert (KSB) ist ein sehr viel bestimmender – fast **der** - Parameter der Fahrdynamik. Es gilt:  $G$  [t] als der Masse des Radsatzes (Fahrzeuggewicht) und  $g$  als der Erdbeschleunigung [m/sec<sup>2</sup>].

$\mu$  ist mathematisch der Proportionalitätsfaktor, praktisch von sehr vielen Parametern abhängig, dieser Faktor  $\mu$  bestimmt in vielen Bereichen das Betriebsgeschehen. Deshalb soll er hier ausführlicher behandelt werden, als es im Vortrag möglich ist.

Der KSB wird in der Literatur für den Idealfall mit 0,30 bis 0,40 im Maximum angegeben, der Idealfall ist aber gelegentlich nicht einmal im Labor gegeben. Auf der Innotrans wird gelegentlich erklärt, dass 0,5 möglich seien. Das darf bezweifelt werden, auf die besondere Belastung des Schienenkopfes sei hingewiesen.

### 1.1.5 Reibwert oder Kraftschluss, Allgemeine Überlegungen

Der Kraftschlussbeiwert (KSB) ist eine der wichtigsten Bestimmungsgrößen in der Fahrdynamik. Früher sprach man vom Reibwert zwischen Rad und Schiene.

Die intensivere Forschung der Paarung Rad/Schiene einerseits und der Technologie der Bremsen andererseits hat zu einer begrifflichen Trennung und Klarheit geführt. Von „Reibung“ im physikalisch engeren Sinn kann man z.B. bei der Reibpaarung zwischen Belag und Scheibe bei der Scheibenbremse sprechen. Zwischen Rad und Schiene wird eine Kraft erzeugt. Daher ist es begrifflich eindeutig, einerseits vom Kraftschlussbeiwert und andererseits vom Reibwert zu sprechen (schreiben). Ich schließe mich hiermit diesen Überlegungen an.

Der KSB wird in der Literatur mit dem Formelbuchstaben  $\mu$  bezeichnet. Experimentelle Messungen ergaben, dass die Funktion  $\mu = f(V)$  einen hyperbelähnlichen Verlauf hat, d.h.  $\mu$  ist bei niedriger Geschwindigkeit hoch (0,3-0,5) und nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit auf ca. 0,15 ab. (Vgl. dazu Abb. 5). Diese naturgesetzliche Abhängigkeit ist ein bestimmender Parameter in der Fahrdynamik.

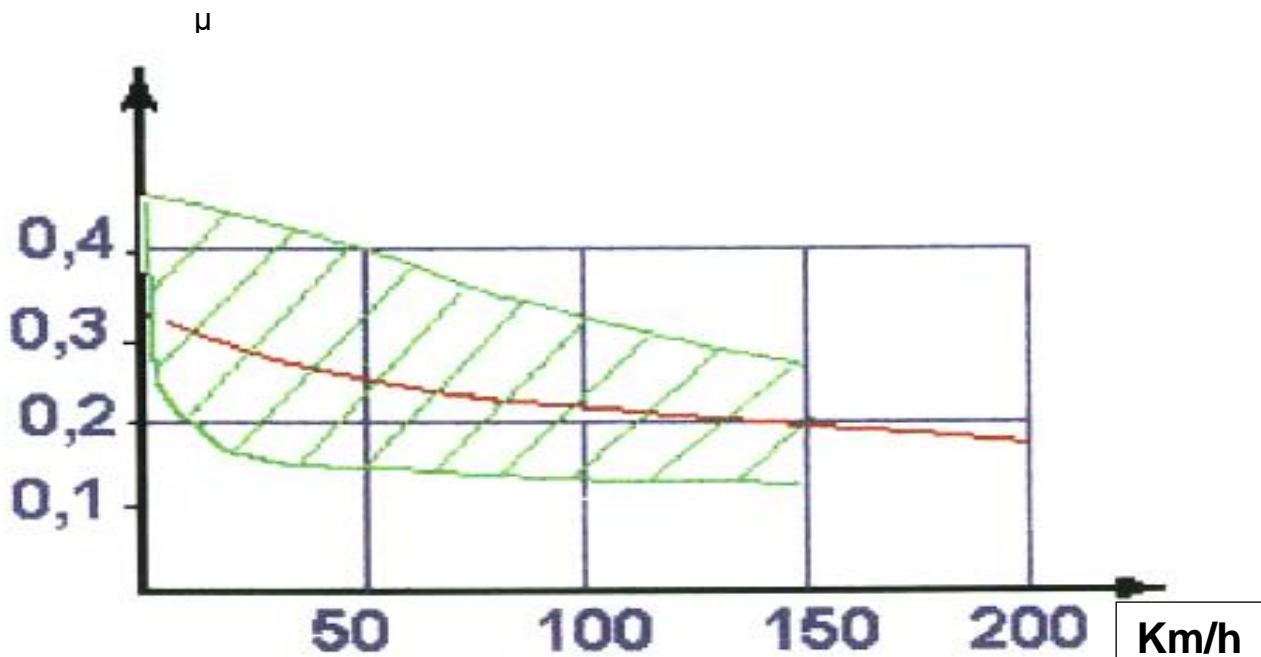


Abb.5 Verlauf von  $\mu = f(V)$  nach Curtius-Kniffler

C

Mit Abbildung 5 wird die Abhängigkeit  $\mu = f(v)$  gezeigt. Zu den praktischen folgen wird weiter unten berichtet. Die mathematische Formel lautet.

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

Für sehr hohe Geschwindigkeiten beträgt dann der KSB etwa 0,15. Im europäischen Rahmen (TSI) wurde für Hochgeschwindigkeitszüge der KSB beim Anfahren und beim Bremsen festgelegt: Beim Bremsen bis 200 km/h  $\mu = 0,15$ , beim Anfahren von 200 bis 350 km/h  $\mu = 0,15$  linear abnehmend auf 0,10

Die Abhängigkeit des KSB von der Geschwindigkeit und die Eigenschaften des Reihenschlussmotors (kann unter Last anlaufen) sind physikalische Ursache für die Entwicklung des 16,7 Hz-Bahnstrom ist. Die ausführliche Darstellung dieses Zusammenhanges sprengt hier den Rahmen.

Zwischen Rad und Schiene gibt es noch eine Querbewegung in Y-Richtung. Der Radsatz kann sich im Rahmen des sog. Spurspieles auch in Y-Richtung bewegen. Im Vortrag über die Fahrzeugkomponenten wird das Spurspiel genau beschrieben. Wenn der Radsatz aber in Y-Richtung gleitet (rutscht) beeinflusst dies den KSB. Es wird diskutiert, ob die Beziehung

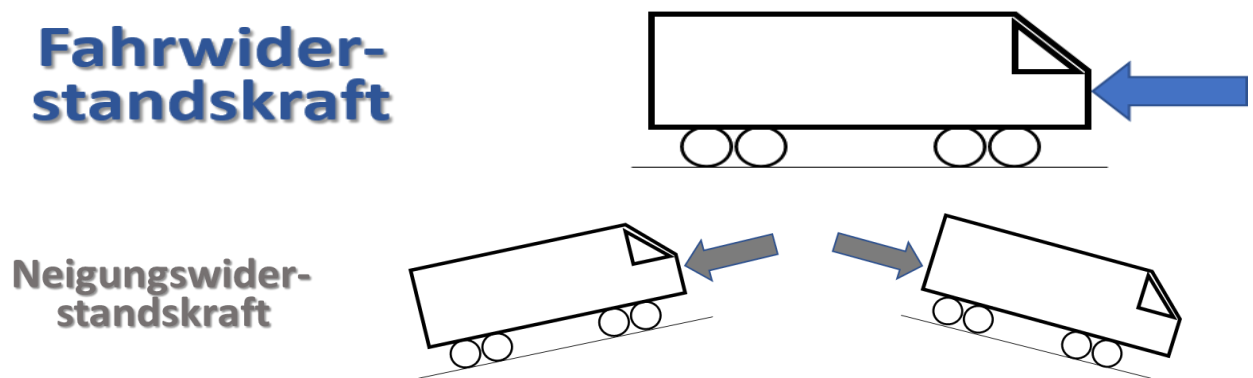
$$\mu T = \text{const}$$

gilt oder eine vektorielle Beziehung nach einem Kräfteparallelogramm gilt. T vermindert  $\mu$  in der Maßgabe, dass bei einem geringeren  $\mu$  die Zug-(Brems-)Kraft geringer wird. Auch darauf wird noch eingegangen.

Die modernere Forschung zeigt den KSB und den Reibwert als resultierender Wert verschiedener Parameter, die ihrerseits von weiteren Einflussgrößen abhängen. Einige werden weiter (Abschnitt 5) unten genannt werden.

## 1.2 Fahrwiderstandskräfte, Kräfte gegen die geplante Fahrbewegung

### 1.2.1 Übersicht



## Bogenwiderstandskraft



## Tunnelwiderstandskraft

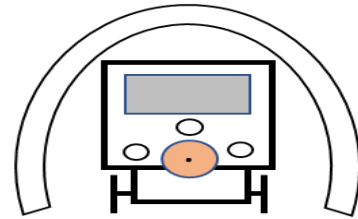


Abb. 6 Vier wichtige Widerstandskräfte

### 1.2.2 Allgemeines

Begrifflich soll „Anhalten“ das durch den Triebfahrzeugführer veranlasste Bremsen bedeuten, „Bremsen“ als alleiniger Begriff den physikalischen Vorgang der Verzögerung.

Dem rollenden – bereits dem gerade anfahrenen - Zug wird „widerstanden“, die einzelnen Widerstände sollen genannt werden.

## Fahrwiderstandskraft

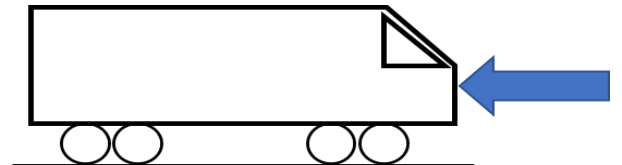


Abb. 7 Fahrwiderstandskraft

Der Fahrbewegung wirken Widerstandskräfte entgegen, die nachstehend beschrieben werden. Die Berechnungsformel für die Fahrwiderstandskraft zeigt ihre Herkunft aus einer Differentialgleichung 2. Ordnung.

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

$m$  = Zuggewicht,  $v$  = Geschwindigkeit  $c_n$  = zugspezifische Koeffizienten

Bei EBO-Bahnen sind maßgebende Kräfte: Rollwiderstandskräfte, Stoßwiderstandskräfte (Quer-,Vertikal und Längskräfte), Impulswiderstandskräfte aus Luftaus- und -eintrittsöffnungen und in ganz besonderer Weise der Luftwiderstand, der für den quadratischen Anteil verantwortlich ist.

Bei Bahnen mit einer Höchstgeschwindigkeit unter 100 km/h ist der Luftwiderstand weniger bedeutsam. Bei insgesamt geringeren Widerstandskräften werden aber Lager- und Getriebewiderstandskräfte wichtig. Hier sei, auf Untersuchungen mit der Mess-Straßenbahn in Dresden hingewiesen. Die bei Straßenbahnen und ähnlichen Fahrzeugen (Niederflurfahrzeuge) auftretenden (temperaturabhängigen) Widerstände in Getrieben sind zu beachten. Ähnliche Überlegungen gelten für den Bogenwiderstand wegen der viel geringeren Radien verglichen mit EBO-Bahnen.

### 1.2.3. Luftwiderstandskraft

$$F_{wl} = c_w \frac{1}{2} \rho A v^2$$

$c_w$	Luftwiderstandsbeiwert
$\rho$	Luftdichte
$A$	Zugquerschnitt (Anströmfläche)
$v$	Geschwindigkeit

(Bei der Tibetbahn auf 5000 m Seehöhe ist die Luftdichte geringer, auch ein Problem für die Verbrennungsmotoren).

Wenn ein Zug gegen die (in der Annahme) stehende Luft prallt, wird kinetische Energie, die vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängt, umgesetzt. Der Summand  $c_2 v^2$  stellt den Luftwiderstand dar.

Im Beiwert  $c_2$  wird die spezifische Dichte der Luft, der Staudruck und ein Formfaktor – der aus dem Automobilbau berühmte  $c_w$ - Wert subsumiert. Diskutiert wird gelegentlich die Frage des Gegenwindes. Da Züge immer und unter verschiedenen Umständen fahren müssen, müsste man Gegenwind in der Qualität Sturm und dann auch in der gleichen Qualität Rückenwind berücksichtigen. Dies ist praktisch nicht zu leisten.

Generell nimmt man einen Gegenwind von 15 km/h pauschal an. Die Werte werden empirisch aus Auslaufversuchen oder im Windkanal für einzelne Baureihen ermittelt.

Die Aerodynamik liefert für höhere Geschwindigkeiten wichtige Hinweise. Bis etwa 100 km/h kann man aerodynamische Überlegungen hinten anstellen, man denke nur an die Form der Ellok BR 151,155 (oder früher 116, 193,194 usw.). Erste aerodynamische Überlegungen führten zur „Bügefalten- E 10“ (später BR 112,115) und dann zur Form der E 03, mit der 1965 erstmals fahrplangemäß 200 km/h zwischen München und Augsburg gefahren wurden. Ihre Kopfform (Parabel 3. Ordnung vertikal und horizontal) wurde im Windkanal gefunden in der Maßgabe, vor allem den Luftwiderstand zwischen Lok und erstem Wagen zu minimieren.

Bei der (zunächst nur für 160 km/h konzipierten) Drehstromlok BR 120 gab es auch Design-Überlegungen mit der Folge, dass der Luftwiderstand der allein fahrenden Lok BR 120 89 % mehr Luftwiderstand vor dem Zug hat als die Lok BR 103 [Mackrodt 1978]. Selbst die BR 112 (Bundesbahn) ist günstiger. Der Wert kann nicht linear auf den Energieverbrauch umgerechnet werden, gibt aber einen Hinweis auf einen erhöhten Energieverbrauch.

Sehr eingehende theoretische Untersuchungen und Messungen im Windkanal zeigen, dass bei hohen Geschwindigkeiten (> 200 km/h) die Anströmverhältnisse zu einer Be- oder Entlastung der Räder (40 kN) führen können. Dies kann Auswirkungen auf das Zugkraft und/oder Schleuderverhalten führen.

Ein Beispiel soll die Problematik der Widerstandsberechnung auf der Basis der Fahrzeugmasse erläutern:

Als der Autotransport nach Sylt ab etwa 1960 eingerichtet wurde, stellte man fest, dass die Züge die nach Maßgabe der Zuglast gerechnete Geschwindigkeit nicht erreichten. Man musste stärkere Lok bzw. Vorspann vorsehen. Eine genauere Beobachtung ergab, dass die Durchschnittswiderstandswerte für Güterzüge, die nur gewichtsabhängig berücksichtigt wurden, zu niedrig angesetzt waren, weil jeder PKW „seinen“ Luftwiderstand hat(te) und bei der vorherrschenden Nordwestwindlage der Wind seitlich eine viel größere relative Angriffsfläche hat(te) als ein frontal auftreffender Wind. In Grenzlastfällen müssen Besonderheiten berücksichtigt werden, z.B. der Luftwiderstand leerer Hochbordwagen.



Anfang Januar 2019 gab es auf der Brücke über den Großen Belt einen Sturm, der leere Container vom Tragwagen blies. Bei der fahrdynamischen Berechnung für Züge auf solchen Strecken sind dann durch besondere Messungen ermittelte Werte zu berücksichtigen. Am 28.12.1879 brach die Brücke am Firth of Tay in Schottland zusammen. Die Lok und 6 Wagen fielen in den Meeresarm. Es gab 72 Tote. Es herrschte Orkan. Die Untersuchungen fanden bauliche Mängel heraus. Die zusätzliche Windlast löste dann vermutlich eine Zusatzbelastung aus. Theodor von Fontane hielt das Ereignis in einem Gedicht fest.

Der spanische Talgozug und ein japanischer Triebzug aber auch der ICE zeigen, wie die „äquivalente Anströmfläche“ verkleinert wird.

Der Luftwiderstand des Stromabnehmers oder/und der Dachaufbauten wird gelegentlich unterschätzt. Bei alleinfahrenden Lokomotiven ohne besonders aerodynamisch gestaltete Frontfläche beträgt der Luftwiderstand des Stromabnehmers rund 25 % des Gesamtwiderstandes der Lok. In Japan wird dieser Luftwiderstand verringert durch besonders gestaltete Bug-Heckkonstruktionen, um für den gehobenen Stromabnehmer die Anströmverhältnisse zu definieren und den gesenkten Stromabnehmer aerodynamisch verschwinden zu lassen. Dies kann man bei Hochgeschwindigkeitszügen generell beobachten.

Im Nah- und Regionalverkehr steigen die Komfortansprüche bezüglich Klimaanlage. Maschinellen Ausrüstungen sollen aber gerade im Nahverkehr keine Fahrgastplätze wegnehmen, folglich werden Aggregate auf dem Dach angeordnet. Gleichzeitig soll aber die Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf 160 km/h erhöht werden. Um den Anstieg des Luftwiderstandes zu begrenzen, ist die aerodynamische Verkleidung der Dachausrüstung nötig, bisher aber – Im Gegensatz zu Hochgeschwindigkeitszügen - noch nicht realisiert.

Am 04. April 2007 erreichte die SNCF einen neuen Weltrekord (über 500 km/h) auf Schienen, über den die Presse berichtete. Sogar In den Presseberichten wurde Zweifel am Sinn eines solchen Versuches geäußert, auch mit dem Hinweis, dass die benötigte Energie mit dem Quadrat der Geschwindigkeit steigt.

#### 1.2.4 Neigungswiderstandskraft

Der Neigungswiderstand ergibt sich aus dem Anstieg der Strecke, in der entgegengesetzten Fahrtrichtung - „negativer Widerstand“ - beschleunigt er den Zug und muss bei der Bremsberechnung beachtet werden.

Mathematisch exakt ist der Sinus des Steigungswinkels. Bei kleinen Winkeln darf der Sinus durch den Tangens ersetzt werden. Als praktikabel und in der Genauigkeit zulässig wird dann die Steigung in Metern pro 1000 Meter, also in Promille angegeben.

Einige Beispiele für Neigungswiderstände für Normalspurbahnen in Deutschland:

Geislinger Steige	24,5 ‰
Höllentalbahn	55 ‰
Rübelandbahn	65 ‰
S-Bahnen der DB	40 ‰
Schnellfahrstrecken	12,5 ‰
Köln-Rhein/Main	40 ‰
Strab. Würzburg	91 ‰
Strab Augsburg	106 ‰ ( auf einem 60 m langen Gleisabschnitt)

Der Gleisabschnitt in Augsburg wird nur talwärts befahren. Jedes Fahrzeug muss aber eine so starke Festhaltebremse haben, dass es bei Energieausfall und zufälligem Halt in diesem Gleisabschnitt festgehalten werden kann.

Da Steigungen in den Mittelgebirgen liegen, sind die Strecken – ausgenommen neugebaute Strecken - auch sehr kurvenreich,; man kann als groben Anhaltswert für das Altnetz bei Radien  $< 600$  m mit rund 3 ‰ Bogenwiderstand rechnen.

### 1.2.5 Tunnelwiderstandskraft

Erst mit Inbetriebnahme der japanischen Shinkansen-Züge bekam das spezielle Tunnelthema Bedeutung. Öffentlich wurden der Tunnelschlag, ein explosions-artiges Geräusch am Tunnelmund und der Druck auf die Ohren bei hohen Durchfahrtschwindigkeiten. Durch trichterförmige Gestaltung der Tunneleingänge und seitliche und vertikale Öffnungen konnte das Phänomen beherrscht werden. Da nach neuer Vorschriftenlage auch für Eisenbahnen nur eingleisige Röhren gebaut werden dürfen, gewinnt die Widerstandskraft im Tunnel mehr an Bedeutung. In langen geraden Tunnel mit Steigungen von mehr als 10 ‰ bremst der Kamineffekt talwärts fahrende Züge.

Zweigleisige Röhren der neueren Schnellfahrstrecken haben rund  $100 \text{ m}^2$  Querschnitt.

Wegen der Wasserführung haben Tunnel in einer Fahrtrichtung bis zum jeweiligen Scheitelpunkt auch eine geringe (3-5 ‰) Steigung. Werte sind noch nicht veröffentlicht, gemäß mündlicher Mitteilung (Besichtigung des Gotthardtunnels) wird mit einem Widerstand von 10-15 ‰ gerechnet. Es liegen noch keine veröffentlichten Erfahrungen vor, aber zu berücksichtigen wird sein, dass bei langen Tunnel die Lufttemperatur in der Regel höher ist als auf freier Strecke. Im Gotthard-Tunnel werden  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht. Hinweis: Im Winter können bei „langsamen“ Zügen ( $< 120 \text{ km/h}$ , Durchfahrtszeit ca. 30 Minuten) Auftau- und Einfriereffekte auftreten.

### 1.2.6 Bogenwiderstandskraft

Der Bogenwiderstand kann bei Radien von 600 bis 300 m pauschal mit 3 ‰ angesetzt, bei großen Radien ( $> 600$  m) in erster Näherung praktisch vernachlässigt werden. Bei Straßenbahnen, U-Bahnen, Bergbahnen und ähnlichen Bahnen muss er berücksichtigt werden.

Der Streckenwiderstand und auch der Bogenwiderstand bei Straßenbahnen und deren Spurführungstechnik werden derzeit auf Veranlassung des VDV erforscht.

### 1.2.7 Längsdruckkräfte

Bei längeren Zügen ( $> 200$  m) kann man das Phänomen der Längsdruckkräfte beobachten, wenn z.B. an der Spitze des Zuges eine Lok dynamisch mit raschem Anstieg der Bremskraft bremst und es keine Bremswirkung bei den Wagen gibt. Die ungebremsten Wagen „laufen auf“. Das gilt auch – wegen der langen Ansprechzeiten – für Bremsungen mit der Druckluftbremse. Im geraden Gleis treten dann weiter keine Längsdruckkräfte auf. Andere Szene:

Ein langer, schwerer Güterzug verlässt über viele Weichen im ablenkenden Strang einen Rangierbahnhof. An der Spitze zwei sechsachsige Lok (240 t), anschließend für etwa 500 m leere zweiachsige Wagen, am Schluss für 200 m mit Coils beladene sechsachsige Wagen. Wenn die Lok entgegen der Ril 915 in Bremsart P fahren, der Güterzug in Bremsart G, kann man davon ausgehen, dass es wegen der Längsdruckkräfte der in den ersten Sekunden(!)

ungebremst rollenden Wagen am Zugschluss bei einer Zwangsbremmung zu einer Entgleisung der leeren ( leichten) Güterwagen in einer engen Weichenkrümmung kommt. Um dies zu verhindern, wird vorgeschrieben dass die Lokomotiven und die ersten 5 Wagen in Bremsart G fahren müssen, selbst wenn der Güterzug in P fahren würde. (Jargonausdruck: „Lange Lok“)

Bei langen Güterzügen, die nicht so straff gekuppelt werden wie Reisezüge, treten beim Bremsen und beim Beschleunigen (gegebenenfalls oszillierend) Längsdruckkräfte auf, die sich der Zugkraft überlagern. Bei kurzen Trieb(wagen) -zügen und Zügen mit der ep-Bremse (elektro-pneumatische Bremse) treten nur geringe Längsdruckkräfte auf oder sie lassen sich durch den gleichzeitigen Bremseinsatz beherrschen.

### 1.3 Kräfte am Fahrzeug

Gelegentlich werden die Kräfte auch anders eingeteilt. Der Vollständigkeit wegen sei diese Einteilung genannt.

#### 1.3.1 Innere Kräfte

Innere Kräfte kann man sich bildlich am besten bei einem Fahrzeug mit Antrieb durch einen Verbrennungsmotor vorstellen. Die Energie ist im Tank gespeichert, der Motor entwickelt Kräfte zum Treiben und Bremsen. Die in der Druckluft gespeicherte Energie dient zum Bremsen. Drehende Elektromotoren – auch bei V-fahrzeugen- können bei magnetischer Erregung aus dem Akkumulator bei Talfahrten Bremskräfte entwickeln und die aus potentieller Energie entstehende kinetische Energie umwandeln (und bei moderner Technologie speichern). Hydraulisch angetriebene Fahrzeuge können kinetische Energie in Wärme umwandeln und dabei Bremskräfte erzeugen.

Die Fahrdynamik liefert die Methoden, um mit diesen Kräften und den entgegenwirkenden Kräften Beschleunigungen, Verzögerungen, Wege, Geschwindigkeiten und den Bedarf (Rückgewinnung) an Energie zu berechnen.

#### 1.3.2 Äußere Kräfte

Äußere Kräfte behindern das Fahren, bei Talfahrten bewirken sie das Fahren, und müssen durch Gegenkräfte kompensiert oder so beschränkt werden, dass das vorbestimmte Fahrziel bezogen auf Beschleunigung, Verzögerung, Geschwindigkeit, Weg und Energieaufwand erreicht wird. Ziel ist ein Gleichgewicht der Kräfte.

## 2 Bewegungen, Fahrspiel, Fahrweg und -zeit,

### 2.1 Definitionen: Geschwindigkeit, Beschleunigung /Verzögerung, Ruck

Zwei wesentliche Bestimmungsgrößen in der Fahrdynamik werden hier mathematisch verknüpft: Weg und Zeit. Man kann in erster Näherung von zeitlich unveränderlichen Zuständen ausgehen, bei genauerer Betrachtung von zeitlich veränderlichen Vorgängen und mit Hilfe der Infinitesimalrechnung arbeiten.

Die erste Ableitung des Weges nach der Zeit liefert die Geschwindigkeit, Dimension Meter pro Sekunde. Geschwindigkeit wird nur relativ – zu einem ortsfesten Bezugspunkt – wahrgenommen. Die Geschwindigkeit der Erdrotation (maximal rund 1830 km/h am Äquator) oder des Erdumlaufes um die Sonne werden nicht wahrgenommen. Insofern kann man auch nicht behaupten, Geschwindigkeit belastet. Belastend wirkt die Änderung der Geschwindigkeit, also die Beschleunigung (Verzögerung) und deren Änderung, der Ruck.

### 2.1.1 Spezialthema Mathematische Beschreibung

Die zweite Ableitung liefert die Beschleunigung oder Verzögerung, also die Änderung der Geschwindigkeit, Dimension Meter pro Sekunde pro Sekunde, also  $m/sec^2$ . Mathematisch völlig klar aber nur schwer vorstellbar. Und die dritte Ableitung, also die Änderung der Beschleunigung (Verzögerung) nach der Zeit mit der Dimension  $m/sec^3$  ist wiederum mathematisch klar, Sekunde hoch 3 kaum vorstellbar, umso deutlicher ist der damit beschriebene Ruck zu spüren, wenn ein Fahrzeug ganz plötzlich zum Stillstand kommt.

### 2.1.2 Spezialthema : Rotierende Massen

Gelegentlich wird übersehen, dass bei jedem Fahrzeug nicht nur die statische Masse jeder Änderung des Zustandes einen Widerstand entgegensetzt und dem jeweiligen Zustand unterliegt sondern eben auch die rotierende Masse. Alle mathematischen Beschreibungen gemäß 2.1.1 gelten auch für die rotierenden Massen. Rotierende Massen haben die Läufer („Rotoren“) von mit dem Radsatz verbundenen Motoren oder Bremsausrüstungen. Wenn – aus verschiedenen Gründen – Güterwagen von der Klotzbremse auf die Scheibenbremse umgerüstet werden, werden sie möglicherweise beim statischen Gewicht leichter bei den rotierenden Massen wegen der Bremscheiben „schwerer“.

Bei der Berechnung darf man die Vereinfachung nehmen, dass man die rotierenden Massen mit einem prozentualen Zuschlag – bei Ellok 10-20 % berücksichtigt. Bei Energiebetrachtungen ist noch die quadratische Abhängigkeit zu berücksichtigen. Die Rotationsenergie beträgt  $J \omega^2$  (Trägheitsmoment, Winkelgeschwindigkeit). Rechnet man von der Motorwelle auf die Radsatzwelle um (oder umgekehrt) ändert sich die Drehzahl (Winkelgeschwindigkeit) nach Maßgabe des Übersetzungsverhältnisses, die Energie ändert sich dann quadratisch.

Das Trägheitsgesetz gilt auch für rotierenden Zustandsänderungen, diese Massenträgheitskräfte werden bei den translatorischen Zustandsänderungen – salopp formuliert – miteinbezogen. Wenn Radbremsen die translatorischen Kräfte des ganzen Fahrzeugs aufnehmen, nehmen sie die rotierenden Kräfte des Radsatzes selbst gleich mit auf. In der Praxis werden die Rotationskräfte mit einem Zuschlag  $\rho$  ( $< 10\%$ ) bei Zügen hinreichend berücksichtigt. Bei einzelfahrenden Lokomotiven oder den vermehrt eingesetzten Triebwagen bzw. –zügen kann man diese Pauschalrechnung schon kritisch hinterfragen. Bei dynamischer Betrachtung ist die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  zu betrachten.

Hier zeigt sich nun eine Tücke:

Betrachtet man vom Rotor eines elektrischen Fahrmotors aus den Radsatz reduziert sich der rechnerische Abstand „ $r$ “ nach Maßgabe des quadratischen Wertes des Übersetzungsverhältnisses Großrad/Ritzel. Bei den vergleichsweise langsam laufenden Wechselstrommotoren war das Übersetzungsverhältnis 2 bis 3 zu 1, die rotierende Masse des Radsatzes verringert sich rechnerisch entsprechend.

Die Mischstrommotoren hatten schon höhere Drehzahlen, das Übersetzungsverhältnis stieg auf 3 bis 4 zu 1. Die Asynchronmotoren haben noch höhere Drehzahlen, das Übersetzungsverhältnis bei „langsamen“ ( $V < 160$  km/h) Triebfahrzeugen beträgt gelegentlich schon 5 zu 1.

Betrachtung aus der Sicht des Radsatzes:

Die mechanische Bremse, die auf den Radsatz wirkt, muss die rotierenden Massenkräfte des Rotors des Fahrmotors auch aufnehmen. Nunmehr aber mit dem jeweiligen

**Übersetzungsverhältnis.** Der Rotor eines großen Wechselstrommotors kann bis zu 1 t Masse haben, die Rotoren der Asynchronmotoren haben rund 500 kg Masse. Vom Radsatz aus betrachtet ist der quadratische Wert des Übersetzungsverhältnisses maßgebend. Dies geht in die Berechnung der Leistung der mechanischen Bremse ein und bringt auch das Problem, dass ein blockierender Radsatz nur schwer wieder zum Rollen gebracht werden kann. Um das Blockieren zu verhindern sind hoch sensible Gleitschutzeinrichtungen nötig.

## 2.2 Fahrzustände, Fahrspiel

Es gibt fünf Fahrzustände:

- a) Stillstand, Geschwindigkeit = 0
- b) Beschleunigung, Geschwindigkeit nimmt Zugkraft bedingt zu
- c) Beharrung, Geschwindigkeit bleibt durch Zug-oder Bremskräfte gleich
- d) Auslauf, Geschwindigkeit nimmt ab oder zu, gemäß der Fahrwiderstände
- e) Verzögerung, Geschwindigkeit nimmt widerstands- **und** bremskraftbedingt ab

Die einzelnen Phasen können nach dem ersten Anfahren in beliebiger Reihenfolge aneinander anschließen.

Wenn von der sog. „straffen“ Fahrweise gesprochen wird, wird keine Auslaufphase berücksichtigt. Bei der DB AG wird die Fahrzeit nach der straffen Fahrweise berechnet.

Die Fahrzeitberechnung als Basis für den Fahrplan muss von Annahmen ausgehen. Für das Anfahren wurde bisher ein- fast immer - darstellbarer Kraftschlussbeiwert von 0,18- 0,20 angenommen. Wenn irgendwelche Umstände diesen Wert nicht zu lassen, gibt es als Rückfallebene immer die Möglichkeit den Zug durch Nachschieben oder Vorspannen zu befördern. Im eigenen Abschnitt über den KSB (siehe 5.1) werden seine Problematik und die Abhängigkeit seines Wertes von weiteren Parametern gezeigt.

Beharrung und Auslauf stellen in der Regel (keine starke Steigung) weiter keine Probleme.

Beim Bremsen muss wieder der KSB berücksichtigt werden, diesmal mit einem Wert, den es sicher an fast allen Tagen des Jahres gibt. Der Wert liegt bei 0,12 – 0,15. Eine Rückfallebene wie beim Anfahren fehlt. Hier können Probleme mit dem KSB die Sicherheit des Systems Eisenbahn beeinträchtigen.

Zur Rückfallebene „Sanden“ siehe Abschnitt 5.1.5

Die einzelnen Zustände können nach dem ersten Anfahren in beliebiger Reihenfolge aneinander anschließen.

## 2.3 Fahrweg

Allgemeine Formeln lassen den Fahrweg berechnen. Praktisch wird der Fahrweg in drei markante Abschnitte geteilt. Fahrweg meint hier die mathematische Größe, nicht die technischer Infrastruktur.

### 2.3.1 Anfahr- und Bremsweg

Die Fahrdynamik stellt ferner die Methode und die Rechenschritte zur Verfügung,

- um den Weg, den ein Zug vom Zustand Stillstand ( $v = 0$ ) bis zu einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit ( $v > 0$ ) oder einer Geschwindigkeit  $v_1$  bis zu einer Geschwindigkeit  $v_2$  ( $v_1 < v_2$ ) zurücklegt und
- um die für diese Zustandsänderung benötigte Zeit zu berechnen.

Während dieser Zustandsänderung wirken unterschiedliche Kräfte auf den Zug ein, die Fahrdynamik beschreibt und berechnet diese Kräfte oder nimmt diese Kräfte als Ausgangsgrößen, um Anfahrweg und Anfahrzeit zu berechnen. Insoweit wird analog bei den Bremswegen vorgegangen.

Besonders erwähnt sei, dass bei Sicherheitsbetrachtungen (z.B. sicherheitliches Abfangen eines Zuges, der unzulässig anfährt) Brems- und Anfahrwege sinngemäß kombiniert werden müssen.

Definiert sei als Anfahrweg und auch im Sinne seiner Berechnung der Weg während der Geschwindigkeitssteigerung von einer Geschwindigkeit  $v_1$  zu einer Geschwindigkeit  $v_2$  ( $v_1 < v_2$ ), analog gilt als Bremsweg der Weg während einer Geschwindigkeitsreduzierung ( $v_1 > v_2$ ).  $V_1$  ist immer die Geschwindigkeit zum Beginn,  $V_2$  die Geschwindigkeit zum Ende einer Geschwindigkeitsänderung. Mit Großbuchstaben werden in der Regel Geschwindigkeiten in km/h, mit Kleinbuchstaben in m/sec angegeben.

### 2.3.2 Beharrungsfahrt

Wenn der Zug mit einer gleichförmigen und unveränderlichen Geschwindigkeit fährt, spricht man von Beharrungsfahrt. Für diese lassen sich Weg und Zeit am einfachsten berechnen.

### 2.3.3 Auslauf

Wenn keine Antriebs- oder Bremskräfte auf den Zug wirken, spricht man vom Auslauf. Zu berechnen sind dann Rollwiderstand und Streckenwiderstände wie beim Bremsweg, weil diese Widerstände die Fahrt verlangsamen, es sei denn, der negative (Gefälle) Streckenwiderstand ist größer und der Zug wird beschleunigt wie bei einer Anfahrt oder Geschwindigkeitssteigerung. Im neuen Stuttgarter Hauptbahnhof mit 16 ‰ Gefälle müssen Züge festgebremst werden sonst fangen sie mit einer Beschleunigung von rund  $0,15 \text{ m/sec}^2$  zu rollen an.

## 3 Energie

### 3.1 Grundsätzliches

Aus verschiedenen Gründen (Umwelt, Kosten) soll Energie eingespart werden. Auch aus Umweltgründen empfiehlt man immer mehr die Benutzung des öffentlichen Verkehrs, der durch höhere (Reise)Geschwindigkeiten attraktiver werden soll. Wenn mit Dieseltraktion bei einer Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h eine Reisegeschwindigkeit von 60-70 km/h (entsprechender Haltabstand) erreicht wird, mag dies unattraktiv gegenüber dem PKW sein. Wenn man die Höchstgeschwindigkeit auf 160 km/h erhöht, verbraucht man bei jedem Erreichen von 160 km/h rund 250 % mehr Energie. Der Zuwachs an Reisenden und Einnahmen kann die Mehrkosten ausgleichen. Bei modernen Elektrofahrzeugen mit Drehstrommotoren kann man in die Kostenrechnung die Energierückgewinnung von rund 40 % einführen. Hier liefern dann fahrdynamische Berechnungen eine Entscheidungshilfe.

Energie tritt in unterschiedlichen Formen auf.

### 3.2 Potentielle Energie

Die potentielle Energie ist die Energie der Lage, die ein Körper relativ zu einem anderen Körper und den wirksamen Kräfte bezogen auf einen Normalzustand hat. Eine Stahlkugel einer bestimmten Masse hat  $h$  Meter über der Erdoberfläche zur Erdkugel nach Maßgabe der Erdanziehung ein bestimmtes Energiepotential nach der Formel:  $E = mgh$  (Energie = Masse mal Erdbeschleunigung mal Höhe). [Die Dimension:  $\text{kgm}^2/\text{sec}^2$  entzieht sich jeder praktischen Vorstellung, mit Wattsekunde kommt man an eine gewohnte elektrische Einheit] Betrachtet man die physikalische Masse eines Zuges in einem Massenpunkt konzentriert, kann man die potentielle Energie mathematisch beschreiben.

Was bedeuten diese theoretischen Überlegungen für die betriebliche und, ökonomische Praxis? In einem Zug, der von Hamburg oder Rostock (der Bahnhof soll 10 m über dem Meeresspiegel liegen) nach München (ca. 510 m über dem Meeresspiegel) fährt, definiert die Höhe die entsprechende Energie. Rechnet man die Erdbeschleunigung in der Näherung mit  $10 \text{ m/sec}^2$  und nimmt man einen Zug mit gerade 720 t so hat dieser Zug in München eine potentielle Energie von 1000 kWh.

Diese Energie muss unabdingbar aufgebracht werden, sie hängt nur von der Masse des Zuges ab. Wenn konstruktiv die Massenverringering gelingt (Leichtbau) kann man unmittelbar Energie sparen.

Technischer Hinweis: Praktisch wird über die Datenverarbeitung und das sog. Streckenband gerechnet. Die Strecke von Hamburg nach München steigt nicht gleichmäßig an, sie hat viele Zwischenanstiege und -abstiege, unterschiedliche Bögen, dazwischen gerade, ebene Streckenabschnitte. Damit kann für Teilabschnitte oder (im Nahverkehr) von Halt zu Halt die potentielle Energie nach Maßgabe des Aufbringens und der Rückgewinnung (im Bremsbetrieb bei dafür ausgerüsteten Fahrzeugen) berechnet werden.

Eine Energieeinsparung bei der potentiellen (Höhenlage bedingten Energie) ist nicht möglich, allerdings eine Energierückgewinnung bei dafür geeigneten Fahrzeugen.

### 3.3 Kinetische Energie

Die Bewegungs- oder kinetische Energie ist die Energie der Geschwindigkeit  $v$ , die ein Körper relativ zu einem stationären Bezugssystem hat. Formel:  $E = \frac{1}{2}mv^2$ . [Die Dimension ist wieder  $\text{kgm}^2/\text{sec}^2 = \text{Ws}$ ]. Wenn der Zug wiederum 720 t Masse hat und mit 50 m/sec ( 180 km/h) fährt, hat er eine kinetische Energie von 50 kWh. Er kann 300 km/h fahren, die kinetische Energie beträgt dann rund 140 kWh, Der Energieverbrauch hängt vom Quadrat der Geschwindigkeit ab!

Diese Energie wird beim Bremsen in Wärme umgewandelt, es sei denn sie wird durch moderne Technologien wenigstens teilweise zurück gewonnen. (Ähnlich wie die potentielle Energie)

Die kinetische Energie fällt bei jeder Anfahrt aus dem Stillstand und jeder Geschwindigkeitsänderung an.

Energieeinsparung hängt in erster Näherung quadratisch von der Höchstgeschwindigkeit ab. Bei 100, 120, 140 oder 160 km/h gelten die Maßzahlen 1,00 oder 1,44 oder 1,96 oder 2,56. Als Beispiel: Wenn ein Nahverkehrszug zwischen zwei Halten statt mit 100 mit 160 km/h fahren soll, erhöht sich der Energiebedarf um rund 250 %. Man muss dann prüfen, ob der Gewinn an Reisegeschwindigkeit (und Reisendeneinnahmen) den Energieaufwand und die Kosten rechtfertigt. Es sei bei dieser Überlegung erlaubt, die anderen linear geschwindigkeitsabhängigen Energiebedarfe zu vernachlässigen.

### 3.4 Reibarbeit

Es sei der ausdrückliche Hinweis gestattet, dass bei 3.1. und 3.2. idealtypisch physikalische Energie dargestellt wird. Für die Energie gibt es noch die bekannte Arbeitsformel  $E = Fs$

(Arbeit = Kraft mal Weg) [Dimension:  $\text{kgm}^2/\text{sec}^2$ ]. Die Arbeit  $E$  berechnet sich als  $E = F_r \cdot s$ . Dabei ist  $F_r$  die Zugkraft, die notwendig ist, die aktuellen Roll- Widerstände (wird an Hand der Bilder genauer erklärt, nicht Steigungswiderstand, aber mit Luftwiderstand) zu überwinden.

## 4 Betrieb, Zugfahrtrechnung und Fahrplan

### 4.1 Betrieb einer Schienenbahn

Der Schienenweg gestattet nur einen Freiheitsgrad, Straßenfahrzeuge haben schon zwei nicht determinierte Bewegungsmöglichkeiten, ein Helicopter kann alle Freiheitsgrade nutzen. Die strikte Determinierbarkeit bietet aber wiederum Vorteile für die räumliche und zeitliche Durchführung der Beförderung von Personen und Gütern und damit die Sicherung einer einzelnen Fahrt gegen Beeinflussungen durch andere Fahrten oder andere Eingriffe. Dieser Vorteil wiederum muss erkaufte werden durch ein strenges Reglement der Transportdurchführung und durch ein leistungsfähiges (Leit- und Sicherungs-)Signalsystem, das Spontanbewegungen nur begrenzt zulässt. Betrieb ist definiert als das Bilden, Befördern und Auflösen von Zügen. Dafür werden komplexe Regeln aufgestellt, die in einem anderen Vortrag erläutert werden. Die Fahrdynamik beschreibt die notwendigen Kräfte, die Betriebsregeln beschreiben, wie diese Kräfte eingesetzt und beherrscht werden.

Für Schmalspurbahnen ( $< 1000 \text{ mm}$ ,  $1000 \text{ mm}$ , Kapspur), Straßenbahnen (kleinere Bogenradien) und Bergbahnen (kleineren Bogenradien und größere Steigungen/Neigungen) gelten besondere Regeln. Formeln müssen anders abgeleitet werden (z.B. Bogenwiderstand). Soweit erforderlich wird darauf hingewiesen.

### 4.2 Zugkraft und Z-V-Diagramm

Die Zugkraft wird bei den neueren Traktionsarten (anders bei Dampflok) als Drehmoment eines Motors erzeugt und wirkt dann über das Drehmoment am Rad als tangentielle Kraft am Radumfang. Die Leistung ist das Produkt aus Zugkraft und Geschwindigkeit, da die Leistung des Fahrzeugs endlich ist, gilt auch:

$$F = P/v$$

Bei niedriger Geschwindigkeit ist die Zugkraft groß, bei hoher Geschwindigkeit klein, mathematisch der Verlauf einer Hyperbel. Grundsätzlich gilt diese Abhängigkeit auch für die motorisch erzeugte Bremskraft, die im unteren Geschwindigkeitsbereich wegen des großen Kraftschlussbeiwertes begrenzt werden muss. Der (Gleichstrom-)Reihenschlussmotor hat diese Charakteristik, **eine** Ursache für den Bahnstrom 16,7 Hz.

Beschrieben wird die Zugkraft mit dem Z-V-Diagramm (in der internationalen Literatur  $F[\text{Force}]-V$ ), das den Verlauf der Zugkraft über der Geschwindigkeit zeigt. (Siehe Abb. 8)

Die Zugkraft entsteht aus dem Drehmoment an der Motorwelle, ist nun diese Zugkraft maßgebend oder die Tangentialkraft zwischen Rad und Schiene, die bereits um einen Getriebewirkungsgrad ( $\eta \sim 0,98 \text{ ./. } 0,99$ ) vermindert ist?

Bei einem Triebwagen ist die Zugkraft am Triebradumfang für die Beschleunigung maßgebend, bei einem Triebkopfbzug (z.B. Baureihe 402 –ICE 2) dann noch, wenn er betrieblich nicht (also nur in der Werkstatt) verändert wird.



Kann ein Triebkopfzug betrieblich verändert werden, nähert er sich dem lokbespannten Zug, bei dem die Zugkraft am Zughaken maßgebend ist und der „Eigenverbrauch“ an Zugkraft durch das Triebfahrzeug selbst die Beschleunigung des Zuges definiert.

Manchmal findet man auch Diagramme, bei denen nur der Zugkraftüberschuss ( $Z_{\ddot{u}}$ ) als Ergebnis der Differenz zwischen Zugkraft und Summe aller Widerstände über der Geschwindigkeit dargestellt wird. (Siehe Abb. 8)

Zugkraft und Geschwindigkeit werden aus dem **Z-V- Diagramm** entnommen. Auf der X-Achse wird die Geschwindigkeit, auf der Y-Achse die Zugkraft aufgetragen. Berücksichtigt man für einen konkreten Zug (Zuglast, Zahl und Bauart von Lok und Wagen oder Triebzug) die zur Überwindung der Widerstände notwendige geschwindigkeitsabhängige Zugkraft, kann man die Differenz an Zugkraft in das Diagramm eintragen. (Differenz zwischen erzeugbarer Zugkraft minus benötigter Zugkraft). Man erhält dann das  $Z_{\ddot{u}}$ -V-Diagramm, d.h. das Zugkraftüberschussdiagramm. Damit kann man feststellen, welche Steigung der konkrete Zug mit welcher Geschwindigkeit bewältigt bzw. Beschleunigung der konkrete Zug bei einer bestimmten Geschwindigkeit hat. Mit dem Z-V- Diagramm bzw. dem  $Z_{\ddot{u}}$ -V-Diagramm kann man die Zug fahrt dann berechnen.

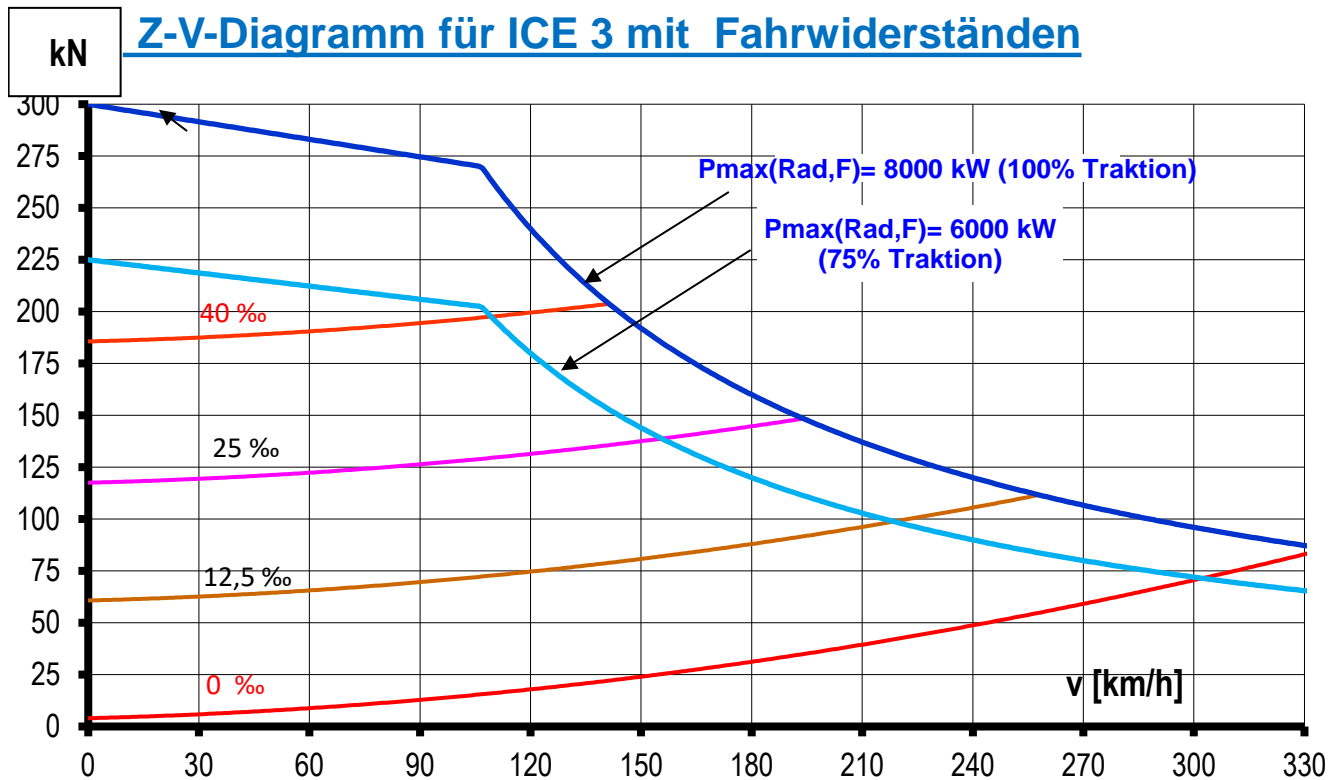


Abb. 8 Zugkraft [kN] über der Geschwindigkeit beim ICE 3 mit Fahrwiderstandslinien

### 4.3 Zugfahrtrechnung

Der Standardfall ist die Berechnung der Zeit, wenn Zuggewicht, Fahrzeugleistung (damit Geschwindigkeit) und die Infrastrukturparameter gegeben sind. Bei Neubauten kann z.B. wegen bestimmter Güterzüge die maximale Streckenneigung und für Hochgeschwindigkeitszüge der minimale Bogenradius Vorgabe sein. Hier sollen alle Berechnungen zur Fahrzeit, die dann zum Fahrplan führen, vertieft werden.

Jede Zugfahrt kann nun aus den Teilelementen Anfahr-, Beharrungs- oder Verzögerungszustand dargestellt werden. Man erhält zwischen zwei Halten die physikalische Fahrzeit für den definierten Fahrweg.

In Ausnahmefällen muss der umgekehrte Weg beschritten werden, etwa wenn im Falle einer Betriebsunregelmäßigkeit ein Zug liegenbleibt oder die eingebauten Zugkräfte nicht mehr oder nur teilweise vorhanden sind und geprüft werden muss, ob der Zug – vielleicht sogar in einer Steigung – aus eigener Kraft weiterfahren kann oder nachgeschoben werden muss.

Wenn ein liegengebliebener Zug geborgen werden muss, bestimmen die durch vorhandene Triebfahrzeuge darstellbaren Zugkräfte, welches und/oder wie viele andere Triebfahrzeuge eingesetzt werden müssen oder ob der liegengebliebene Zug nur in Teilen geborgen werden kann.

Gerade beim Bergen von (in Steigungen) liegengebliebenen Zügen muss nicht nur geprüft werden, ob das Hilfstriebfahrzeug von der Zugkraftdarstellung geeignet ist, sondern auch, ob die Teilaggregate des Hilfstriebfahrzeuges nicht bis zum Ausfall überlastet werden. So ist – als Beispiel – bei einem diesel-hydraulischen Fahrzeug die kleinste Dauerhöchstgeschwindigkeit maßgebend. Diese muss innerhalb einer definierten Zeit erreicht werden, andernfalls das Hilfstriebfahrzeug wegen der Überhitzung des Getriebeöls im hydraulischen Getriebe ausfällt und dann seinerseits geborgen werden muss. Hier ist also zu ermitteln, ob die kleinste Dauerhöchstgeschwindigkeit erreicht werden kann. Bei überschlüssiger Berechnung von liegengebliebenen Zug und Hilfstriebfahrzeug wird gelegentlich übersehen, dass das Hilfstriebfahrzeug sich selbst auch befördern muss.

#### 4.4 Fahrplanerstellung

Die Fahrdynamik stellt die physikalischen Fahrzeiten zur Verfügung. Jede Zugfahrt kann nun aus den Teilelementen Anfahr-, Beharrungs- oder Verzögerungszustand dargestellt werden. Man erhält zwischen zwei Halten die physikalische Fahrzeit für den definierten Fahrweg.

Der Fahrweg als Entfernungsvorgabe ist in vielen Aufgabenstellungen vorgegeben, die Zeit als Fahrzeit die technisch-physikalisch zu berechnende Größe.

Die so ermittelte Fahrzeit ist die Basis für die betriebliche Fahrplankonstruktion, die alle betrieblichen Abhängigkeiten (Zuglänge, Fahrstraßenausschlüsse, Signal- und Weichenstellzeiten, Beobachtungszeiten für Signale, Signalstandorte ...) berücksichtigen muss. Bei sehr dichter Zugfolge kommen verkehrliche Zeiten, besonders die Fahrgast-Wechselzeiten dazu. Auf die hier zu beachtenden Parameter wird nur – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – hingewiesen. Im Vortrag über Bahnbetrieb werden die Details (Fahrzeitentreppe) beschrieben.

Eine Besonderheit ist die sog. 30-Sekunden-Regel, die aus Sicherheitsüberlegungen heraus nach einer Unfallserie 1970 und 1971 eingeführt wurde.(Abschnitt 4.8) Zur betrieblichen Fahrplankonstruktion kommen dann noch verkehrliche Gesichtspunkte des gesamten Marketingspektrums, auf die hier nicht eingegangen wird. Siehe den eigenen Vortrag dazu.

#### 4.5 Verzeichnis der zulässigen Geschwindigkeiten, Geschwindigkeitsheft, Verzeichnis der vorübergehenden Langsamfahrstellen und anderen Besonderheiten („La“)

Im Verzeichnis der zulässigen Geschwindigkeiten (VzG) wird für eine Strecke die zulässige Höchstgeschwindigkeit festgelegt und dann mit Angabe der Streckenkilometrierung

angegeben, wo diese Geschwindigkeit und aus welchem Grund nicht gefahren werden kann. Gründe für Geschwindigkeitsreduktionen sind die Radien von Bögen, Brücken, Bahnhofsdurchfahrten, Einschaltstrecken für (Bahnübergangs-)Signalanlagen, verkürzte Vorsignalabstände oder Neigungen und das tatsächlich vorhandene Bremsvermögen. Das VzG gibt dann einen Hinweis, wo Infrastrukturmaßnahmen erforderlich sind, wenn die generelle Streckenhöchstgeschwindigkeit erreicht werden soll. Aus dem VzG wird dann das Geschwindigkeitsheft abgeleitet. Für Züge mit einer bestimmten Bremsausrüstung (z.B. keine Magnetschienenbremse) werden dann die bremsvermögensbedingten Geschwindigkeitsreduktionen im Geschwindigkeitsheft berücksichtigt. Dies gilt dann für alle Züge einer definierten technischen Ausrüstung. Dies kann dann auch graphisch dargestellt werden.

Insbesondere Baustellen erfordern Abweichungen vom VzG oder andere Maßnahmen. Diese werden dem Triebfahrzeugführer in der „La“ bekannt-gegeben.

#### 4.6 Fahrzeitenheft

Kein Zug darf ohne Fahrplan fahren. Deshalb gibt es für jeden Zug (Zugnummer), allenfalls ähnliche Züge (z.B. getaktete S-bahnzüge), individuell das Fahrzeitenheft mit den Angaben der Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Abfahrtszeiten ohne Ankunftszeit sind Durchfahrtszeiten. Im Fahrzeitenheft sind auch die zulässigen Lasten genannt (Siehe Abschnitt 4.8. Grenzlast und Anfahrngrenzlast). Technisch, betrieblich und verkehrlich gleiche Züge wie z.B. bei S-Bahnen, haben einen Taktfahrplan der auf Minuten abgestellt ist, z.B. Abfahrt zur Minute 14,24,34 usw.

#### 4.7 Elektronischer Buchfahrplan

Geschwindigkeits- und Fahrzeitenheft werden auf einem Display, das von unten nach oben zu lesen ist und selbsttätig weiter schaltet, dargestellt. Geplant ist, dann auch die „La“ zu integrieren.

#### 4.8 Anfahrngrenzlast und Grenzlast

Die beiden Begriffe werden oft verwechselt, weil sie physikalisch ähnlich aber eben nicht identisch sind. Das Thema hat durch die Situation an der Spessartrampe zwischen Laufach und Heigenbrücken (Strecke Aschaffenburg-Würzburg) wieder an Aktualität gewonnen. Dort sind 2019 (!) Güterzüge liegengeblieben, es gibt eine Diskussion zwischen EVU und EIU über die Ursachen und die Verantwortlichkeiten.

##### 4.8.1 Grenzlast

Die Grenzlast wird dem Triebfahrzeugführer im (elektronischen) Buchfahrplan (Fahrzeitenheft) genannt und durch die Fahrzeitenrechner nach den Belastungsmöglichkeiten des (der) eingesetzten bzw. fahrplantechnisch vorgesehenen Triebfahrzeuge festgelegt. Die Grenzlast ist wichtig für den Güterverkehr und berücksichtigt im Wesentlichen die thermischen Grenzen der zugkraftherzeugenden Maschinen eines Triebfahrzeuges. Beispiel: Die Getriebeöltemperatur bei diesel-hydraulischen Lokomotiven, die Trafoöl(kühlmittel-)temperatur oder Kühlmitteltemperatur der Halbleiterelemente bei Ellok. Die nach diesen Kriterien ermittelte Grenzlast gibt eine (Dauer-) Belastungsgrenze für das Triebfahrzeug an und ist nicht identisch mit der Anfahrngrenzlast. Siehe auch die Bemerkung oben im Zusammenhang mit Stuttgart 21.

Eine Antwort auf Fragen früherer Seminare: In der Alltagspraxis kann man (in einem engen Rahmen) für die Grenzlast einen Dispositionsraum nutzen. Wenn die Grenzlast aus

aktuellem Anlass (Wagengruppe soll noch mitgenommen werden) gering überschritten wird ( $< 10\%$ ) und die Lufttemperatur bei  $0\text{ °C}$  oder darunter liegt, ist eine Übererwärmung nicht zu befürchten. Umgekehrt ist es aber auch zweckmäßig bei hohen Außentemperaturen im Sommer unter der Grenzlast zu bleiben. Schulung und Erfahrung hilft hier den Disponenten.

#### 4.8.2 Anfahrrenzlast

Zum Verständnis der Anfahrrenzlast darf etwas in die Geschichte der Bahnen eingedrungen werden. Früher gab es als einziges Traktionsmittel die Dampflokomotive und keines der heute üblichen Kommunikationsmittel wie Funk, Handy oder auch die bis etwa 2000 üblichen Strecken- und Signalfernsprecher.

Wenn nun ein Zug mit einer Dampflok an irgendeiner Stelle der Strecke (gleichgültig aus welchem Grunde) zum Stillstand kam, musste er **genau dort** wieder anfahren können. Wenn der Zug nicht anfahren konnte, war dies gefährlich, wenn es zu Wassermangel kam. Das Herbeirufen von Hilfe war bei den gegebenen Kommunikationsmöglichkeiten schwierig und zeitraubend. Um einer Kesselexplosion wegen Wassermangel vorzubeugen, musste das Feuer gelöscht werden, hier bestand die Gefahr von Bränden - man denke an eine Trockenperiode und Waldgebiete.

Fahrzeugtechnik und Bautechnik stimmten sich ab. Die Steigungsstrecken wurden so trassiert, dass der Steigungsgradient möglichst gleichmäßig war und einen bestimmten Wert nirgendwo überschritt. Dies lässt sich heute noch auf Strecken beobachten, die seit der Dampflokzeit nicht wesentlich umgebaut wurden. Gegenbeispiel: Die neuen Hochgeschwindigkeitsstrecken (Köln-Rhein/Main, Nürnberg-Ingolstadt, Ebensfeld - Erfurt) zeigen stark wechselnde sehr unterschiedliche Steigungs- bzw. Gefällestrrecken.

Bei Diesel- und E-Traktion entfallen die oben genannten Gefahrenüberlegungen, außerdem gibt es parallel mit dem Strukturwandel in der Zugförderung bessere Kommunikationsmöglichkeiten. Wenn ein Zug mit Diesel- oder E-Traktion liegenbleibt, besteht keine Gefahr. Ein Hilfstriebfahrzeug lässt sich schneller anfordern als früher. Restriktionen für die Streckentrassierung wie für die Dampftraktion entfallen.

Für die Anfahrrenzlast gibt es neben den geschilderten dynamischen Grenzen auch selbstverständliche mechanische Grenzen. Wenn drei sechssachsige Lok (360 t) auf trockener Schiene synchron anfahren und bei  $\mu = 0,35$  Zugkraft aufbringen (1.250 kN) reißt die UIC-Schraubekupplung, weil deren Laschen für 850 kN ausgelegt sind. Das überspitzte Beispiel soll die Grenzen der Belastbarkeit der Kupplung aufzeigen. Für Sonderabfuhrprogramme im Güterverkehr mit geschlossenen Wagenumläufen können Spezialkonstruktionen gewählt werden. Die vorwiegend thermisch definierten Grenzlasten, die dynamisch und mechanisch definierten Anfahrrenzlasten zeigen allein die Komplexität der Parameter einer Bahn, deren Probleme nur in der Gesamtbetrachtung erkannt und gelöst werden.

#### 4.8.3 Signalstandorte

Betrieblich unvermeidlich ist aber, dass Züge an Halt zeigenden **Signalen** (gilt für alle programmierten Haltpunkte) zum Stillstand kommen. Die Züge müssen dann bei Fahrt zeigendem Signal (erteilter Fahrterlaubnis) sofort starten können. Aus dieser Überlegung folgt, dass die Streckensituation (Steigung) an Signalen und die Zuglast so aufeinander abgestimmt werden müssen, dass ein Zug **am Signalstandort immer** anfahren kann, die so ermittelte Zuglast ist dann die Anfahrrenzlast und gilt nur und ausschließlich dafür, dass am

fahrdynamisch ungünstigsten **Signalstandort** - nicht am ungünstigsten Standort schlechthin – angefahren werden kann.

Aus dieser Überlegung ergeben sich dann Vorgaben für Signalstandorte, wenn z.B. ein bestimmtes Transportprogramm (Ölverkehr mit standardisierten Zügen) abgewickelt werden können muss oder Vorgaben für die Traktion, wenn die Trassensituation zwingend ist. Interessant zu berechnen sind Wannennprofile der Strecke. Ausdrücklich sei auf eine bautechnische Problemstellung hingewiesen:

Die Einfahrgleise in Rangier-(Güterbahnhöfe) werden oft unter oder über die durchgehenden Streckengleise geführt ähnlich wie bei Autobahnen -, um keine niveaugleichen Kreuzungen mit dem Gegengleis oder anderen Strecken zu haben. An Einfahrgleisen stehen dann das Einfahrsignal für den Bahnhof oder sogar noch Blocksignale. Wenn diese Signale dann an der Steigung stehen, ist genau der Fall gegeben, dass dieser Standort möglicherweise die Anfahrergrenzlast der gesamten Strecke bestimmt.

Die für Diesel- und E-Traktion und nach Maßgabe der vorstehenden Überlegungen ermittelte Anfahrergrenzlast – eben für Signalstandorte - ist in der Regel deutlich höher als die nach den Dampflok-kriterien berechnete Anfahrergrenzlast. In Einzelfällen kann ein Zug an einer ungünstigen ( ungünstiger als an jedem Signalstandort) Stelle liegenbleiben, obwohl er weniger Last als Grenzlast oder Anfahrergrenzlast hat.

Leitsysteme, die keine geographisch definierten Signalstandorte kennen, müssen berücksichtigen, dass Züge (insbesondere schwere Güterzüge) nicht an irgendwelchen kritischen Stellen (z.B. Steigung 40 ‰ der neueren Schnellfahrstrecken) zu Stillstand kommen. Bericht in der Südd. Zeitung Nr. 38 vom 14.02.2019 Seite 21.

Ergänzung gemäß Notiz in „Der Eisenbahningenieur EI April 2019 Seite 56“: Auf der Strecke Nürnberg- Erfurt (VDE 8.1.) werden vier Signalstandort verlegt, um die Grenzlast von 1035 bzw 1270 t auf 1500 t zu erhöhen. Die bisherigen Standorte waren in einer 20 ‰- Steigung. Dies hat auch wirtschaftliche Aspekte. Von einem Vortrag über Güterverkehr ist mir der Satz in Erinnerung geblieben, dass der Gewinn im Güterverkehr von den letzten zehn Wagen eines Zuges erwirtschaftet wird.

Lange Brücken bringen ein weiteres Kriterium für Signalstandorte [ Vgl. „Oberbau trifft KIB(Konstruktiver Ingenieurbau) in „Der Eisenbahningenieur August 2021 Seite 13 ]

Brücken müssen nicht nur vertikale, dynamische, Lasten tragen sondern werden auch durch horizontale Kräfte beansprucht und hier eben die Widerlager. Beim Anfahren ist die Schiene der Gegenkraftpartner zum Rad. Wenn die Schienen die Kraft vom Rad nicht aufnehmen, würden die Schienen verschoben. Beim Bremsen gibt es die gleiche Kraftsituation, die Schienen müssen die Bremskraft aufnehmen.

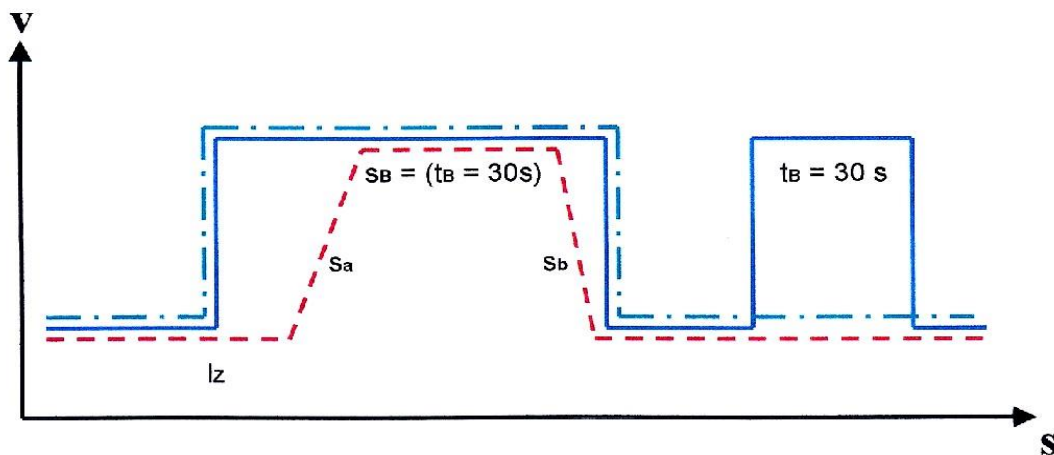
Beim Anfahren wirkt „nur“ die Antriebskraft der angetriebenen Radsätze, ein Güterzug hat meist nur eine (vier-oder sechsachsige) Lok. Beim Bremsen leiten aber maximal 255 Radsätze ihre Bremskraft auf die Schiene. Die eingeleitete Bremskraft hängt vom Kraftschlussbeiwert ab, der bei einer Geschwindigkeit von weniger als 1 m/sec am größten ist. Steht am Ende einer zuglangen Brücke ein Signal, so nehmen die Schienen und damit die Brücke kurz vor dem Stillstand aus einer Schnell-oder Zwangsbremung des Zuges eine Horizontalkraft auf, die etwa 30 % der Normalkraft des Zuges entspricht.

Fasst man die vorstehenden Überlegungen zusammen, zeigt sich einmal wieder die Komplexität des Gesamtsystems Bahn in der Maßgabe von Abstimmungen zwischen Leit- und Sicherungstechnik („Signal“standorte) , Infrastruktur (Streckenparameter, Brücken) und Betrieb (Zuglast, Zugkraft in der Doppelbedeutung von „Zug“).

#### 4.9 30- Sekunden-Regel

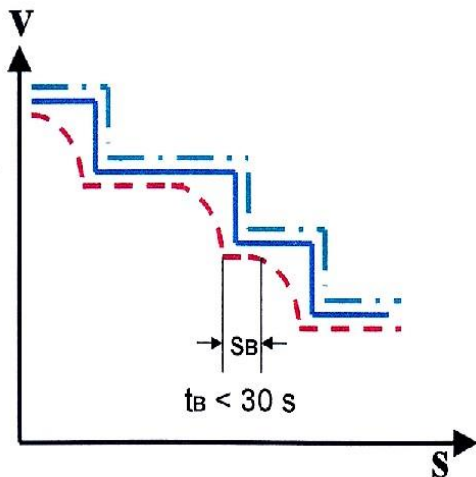
Als rund 15 Jahre nach dem 2. Weltkrieg die zulässigen Geschwindigkeiten nach Baumaßnahmen abschnittsweise erhöht wurden, gab es teilweise kurze Abschnitte mit deutlich höherer Geschwindigkeit als davor bzw. danach. Kurze, leichte Züge konnten dies dann nutzen, lange und schwere Züge nicht. Es gab folglich viele sog. Ständige Langsamfahrstellen, die zwar im Buchfahrplan (Vorgänger des Geschwindigkeitsheftes) angegeben aber an der Stecke nicht signalisiert waren. Es kam zu dramatischen Bahnbetriebsunfällen (Aitrang, Rheinweiler, Alfeld). Eine Abhilfemaßnahme war die Signalisierung dieser ständigen Langsamfahrstellen (Signal Lf 6 und Lf 7). Eine andere Maßnahme war eine fahrdynamische Überlegung, die zur sog. „30-Sekunden-Regel“ führte.

Danach wurde festgelegt, dass nicht die bautechnisch mögliche Geschwindigkeit dem Triebfahrzeugführer angegeben wird sondern die fahrdynamisch mögliche. Die Maßgabe war, dass der ganze Zug nach der Beschleunigung auf die höhere Geschwindigkeit diese mindestens 30 Sekunden in der Beharrung fahren können muss, bevor er wieder auf eine niedrigere Geschwindigkeit abgebremst werden muss. Dies hat zur Folge, dass kurze Streckenabschnitte nicht mit einer höheren Geschwindigkeit befahren werden auch wenn es bautechnisch möglich wäre bzw. die Geschwindigkeit früher vermindert werden muss, obwohl es noch einen Streckenabschnitt gibt, der eine höhere Geschwindigkeit erlaubt.

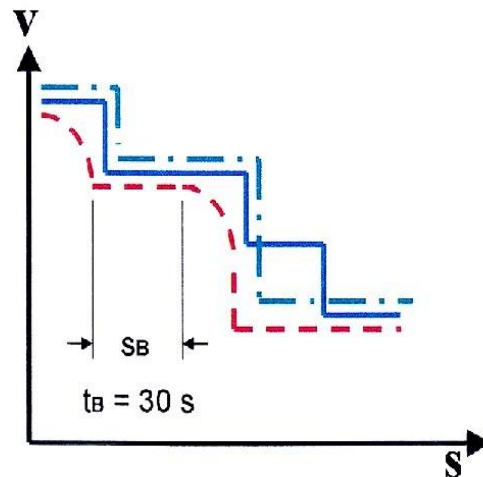


Geschwindigkeit kann gefahren werden

Geschwindigkeit kann nicht gefahren werden



Geschwindigkeit kann nicht gefahren werden



Geschwindigkeit muss früher herabgesetzt werden

Abb.9 30-Sek-Regel

— = bautechnisch möglich — • — gemäß 30 Sekundenregel

— — — = fahrdynamische Fahrplanvorgabe für Modellzug

Nun muss unterschieden werden bezüglich der Zugmasse und der Leistung. Um es deutlich zu machen. Die „30-Sekunden-Regel“ kann nicht gleichmäßig auf eine alleinfahrende Lokomotive oder einen langen, schweren Zug angewandt werden. Hier war die Lösung der Modellzug, d.h. für den schnellsten und (in der Regel) schwersten Reisezug der Strecke wurde die 30- Sekunden-Regel“ angewendet und signalisiert. Man nimmt in Kauf, dass kürzere leichtere Züge an manchen Stellen schneller fahren könnten.

Die „30-Sekunden-Regel“ wurde so zu einem Fahrplankonstruktionselement, allerdings nicht für Züge mit aktiver Neigetechnik.

## 5 Sonderthemen

Für die bisher behandelten Themen werden nähere Erläuterungen gebracht, um eine Art „Hintergrundinformation“ zu geben.

### 5.1 Kräfte zwischen Rad und Schiene

#### 5.1.1 Geometrie zwischen Rad und Schiene

Im Vortrag über die Komponenten der Schienenfahrzeuge wird der Radsatz genau beschrieben. Die Spurweite beträgt 1435 mm, aber nicht der Abstand der Radscheiben und der Spurkränze. Diese haben gegen die Schienenflanke einen Abstand, das sog. Spurspiel. Dazu die Einzelheiten im Vortrag über Fahrzeuge und ihre Komponenten. Die Spurführungstechnik mit der Erforschung der Entgleisungssicherheit ist ein eigenes komplexes Thema.

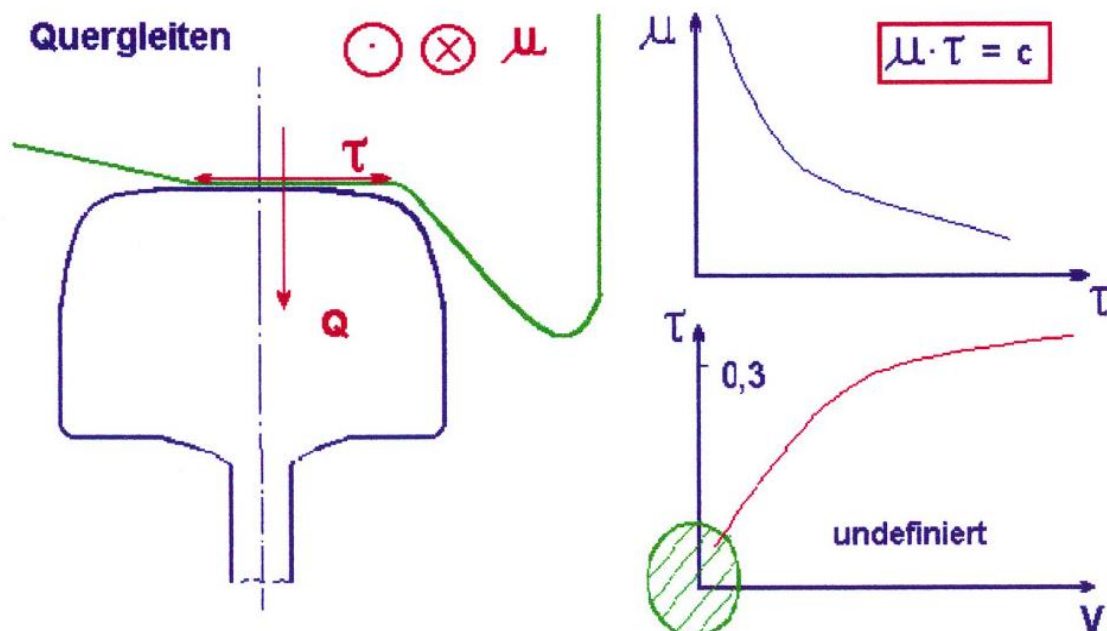


Abb. 9 Geometrie zwischen Rad und Schiene

Das Rad mit definiertem Radius (bei Triebfahrzeugen der DB seit ca. 1955: in der Regel 625 mm bei neuen Radreifen, bei Triebzügen 920 mm) drückt auf die Schiene- genau den Schienenkopf -, die idealtypisch den Radius  $\infty$  hat. Es entsteht eine HERTZ'sche Fläche (ca.  $1 \text{ cm}^2$  in Form einer Ellipse).

Nun könnten der Schienenkopf und die Lauffläche exakt eben sein, es entstünde eine breite Berührungslinie, deren Ausrichtung in Fahrtrichtung von den Materialeigenschaften des Rades – des Radreifens – und des Schienenkopfes abhängt. In erster Näherung darf angenommen werden, dass Rad und Schiene aus ähnlichem Werkstoff (Stahl) mit gleichem Elastizitätsmodul sind. Im Neuzustand hat aber der Schienenkopf eine bestimmte ballige Form und der Radreifen ein konisches oder das sog. korbbogenartige Verschleißprofil. In der Literatur gibt es Veröffentlichungen über die Entwicklung neuer Profile.

Da nach den Konstruktionsbestimmungen (Herzstück-Radlenker-System an Weichen und Kreuzungen) die beiden Räder über die Achswelle zu einem Radsatz starr verbunden sind, ergibt sich beim konischen Profil ein selbstzentrierender Effekt für den Radsatz, zumal die Schiene geneigt ( $1^\circ 30'$ ) eingebaut wird. Der genau geradeaus laufende Radsatz läuft im genau geraden Gleis zentriert, seine Spurkränze laufen nicht an den Schienenflanken an. Tatsächlich läuft der Radsatz nach einer Sinuskurve, deren Wellenlänge aus den Parametern berechnet werden kann. Durch konstruktive Maßnahmen versucht man eine möglichst große Wellenlänge zu erreichen.

Straßenbahnen unterliegen nicht der EBO, oft ist für Niederflur- Fahrzeuge die Voraussetzung ein Fahrwerk mit Einzelrädern, also ohne durchgehende starre Achswelle. Auf dem DMG – Seminar 2010 in Bochum (Seminar F 4 Zusammenwirken Fahrzeug/Gleis sowie Fahrwerks- und Oberbautechnik) wurde gezeigt, dass die Verhältnisse bei Straßenbahnen teilweise komplizierter als bei EBO-Fahrzeugen sind. Dies auch deswegen, weil jedes Straßenbahnnetz geringfügig andere Bestimmungsparameter hat, die wiederum zu speziellen Fahrwerkskonstruktionen führen. Info von einer Exkursion: Eine Straßenbahn mit 1000 m Spurweite nimmt für die Radreifen einen „weicheren“ Stahl als für die Schienen, weil die Radreifenstandhaltung einfacher ist als die Schieneninstandhaltung.

Für die EBO- Bahnen gilt eine stringenter Normierung als für die BO- Strab- Bahnen. Neuerdings gibt es Probleme mit den Fahrwerken der Einzelräder, in der Literatur gab es Hinweise auf den NFD6, einen Niederflurstraßenbahntriebwagen, der u.,a. bei der Bochum-Gelsenkirchener Straßenbahn eingesetzt ist.

Berücksichtigt man aber, dass z.B. bei der Deutschen Bahn knapp 150 000 konzerneigene Fahrzeuge mit rund 1,2 Mio. Rädern ( und noch mal fast 200 000 Fahrzeuge anderer EVU) rollen, lässt sich erklären, dass die Räder auf eine neue Schiene mit idealtypischem Profil ihr Radprofil walzen . Die Schienen nehmen also ein bestimmtes Profil an, das sich nun wiederum auf neue Radsätze einwalzt. Nach der Erfahrung verlieren Radreifen ihr Profil schon nach rund 20 000 km Laufleistung.

Da die Profilberichtigung der Radreifen selbst auf Unterflurdrehbänken teuer und zeitaufwändig ist, wurde bereits vor rund 60 Jahren das sog. Verschleißprofil entwickelt und auf die Radreifen aufgedreht. Damit wurde das konische Profil (z.B. das sog. Heumann-Lotter-Profil mit der Neigung 1:20 und 1:40) und auch der Selbstzentrierungseffekt verlassen.

Im praktischen Betrieb kommt nun ein Radsatz mit einer zeitabhängigen Verschleißgeschichte und dem entsprechenden Profil auf eine Schiene unterschiedlicher Liegezeit und mit unterschiedlich vielen Überrollungen und dem dazu entsprechenden Verschleißbild.



Gelegentlich werden im Gleis die linke und rechte Schiene (z.B. in Bogen) nicht gleichmäßig abgenutzt und daher auch nicht gleichzeitig erneuert. Als Folge davon hat der rollende Radsatz plötzlich für das linke Rad eine andere Berührungsgeometrie als für das rechte Rad. Möglicherweise ergeben sich auch durch Gleislagefehler plötzliche Radsatzent- oder –belastungen bei unverändert aufgebrachtem Drehmoment.

Bezüglich des Radreifenprofils und der Schienenneigung gibt es Unterschiede zwischen Frankreich und Deutschland, was – für Außenstehende unverständlich –komplizierte Zulassungsfahrten für ICE und TGV erforderlich machte. Kurz: Im praktischen Betrieb ist die Berührungsgeometrie undefiniert.

### 5.1.2. Radsatzführung und Quergleiten

Bei genauer Analyse des Vorgangs zwischen Rad und Schiene bei der Kraftübertragung stellt man fest, dass zur Kraftübertragung in der Fahrtrichtung des rollenden Rades noch ein Quergleiten auf der Schienenlauffläche dazu kommt.

Mit  $\mu$  wird der KSB –hier darf er mal Reibwertfaktor für die Haftreibung genannt werden, mit  $\tau$  der Quergleitfaktor beschrieben.

Es gilt:  $\mu \cdot \tau = \text{const}$

Diese bedeutet aber, dass das Quergleiten auf der Schiene  $\tau$  die Reibung für die Zugkraftübertragung  $\mu$  vermindert, der Radsatz also früher zum Schleudern neigt.

Dazu fand ich in der Literatur: Wenn ein Klotz mit der Normalkraft  $N$  über eine ebene Fläche gezogen werden soll, ist dafür die Zugkraft  $Z$  erforderlich, es gilt

$Z = \mu N$ . Wenn bei unveränderten Bedingungen der Klotz genau in  $x$  oder  $y$  Richtung gezogen wird, ergibt sich immer wieder  $Z = \mu N$ . Wenn man nun den Reibwert in  $X$ -Richtung  $\mu$ , in  $Y$ -Richtung  $\tau$  nennt, zeigt sich sofort, dass  $\mu = \tau$  ist. Zieht man den Klotz nun in einem Winkel  $\alpha$  zur  $X$ -Achse ( $90 - \alpha$  zur  $Y$ -Achse) gilt wieder  $Z = \mu N$ . Die Kraft  $Z$  kann vektoriell in eine Komponente  $Z_x$  und  $Z_y$  zerlegt werden, folglich auch der Reibwert  $\mu$  in  $\mu_x$  und  $\mu_y$ .  $\mu_x$  entspricht dann  $\mu$ ,  $\mu_y$  dann  $\tau$  und beide ergeben vektoriell einen konstanten Wert. Ich schließe mich der vektoriellen Auffassung an.

Bei weiterer Durchdringung des Themas findet man mathematisch die Ellipsengleichung, die deswegen angewendet werden darf, weil die Aufstandsfläche des Rades auf der Schiene eine Ellipse ist. Diese theoretischen Überlegungen zeigen aber praktische Auswirkung:

Betrachtet man die Radsatzführungen der Lokomotiven mit Baujahr bis etwa 1950 (Konstruktionsjahre vor dem 2. Weltkrieg) findet man den Radsatz in sog. Achsgabeln des Drehgestellrahmens geführt. Der Radsatz konnte quer und längs gleiten.

Bei nach dem 2. Weltkrieg entwickelten Lok der Baureihenfamilie der E 10 (bis vor kurzem im Einsatz als 110, 113, 115, 139, 140, 141 und 150) hat die sog. Säulenachsführung das Quer- und Längsgleiten praktisch verhindert. Bei dieser Radsatzführung entstehen erhebliche Querkräfte auf das Gleis.

Erstmals erhielten mit der Lokbaureihe E 03.0 und der Serienlok 103 (später auch die Baureihen 111, 120, 146, 147, 151, 152, 184, 185, 189, 193) mit der Lemniskatenachsführung und Flexicoil-federn eine „weichere“ aber definierte Achsführung. Diese Radsatzführung vermindert deutlich die Gleisbelastung in Querrichtung.

In der Praxis zeigte sich nun, dass die – bezogen auf die Zugkraftherzeugung (Motoren und Schaltwerkstufung des Trafo) -- gleichen Lok 110 und 111 ein unterschiedliches Anfahrverhalten haben. In erster Näherung bringt die Lok 110 bei schwierigen Schienenverhältnissen ca. 10% mehr Zugkraft auf als die Lok 111, anders formuliert: Die Lok 111 schleudert bereits bei rund 90% der Zugkraft, bei der die Lok 110 schleudert. Im Betrieb zeigte sich auch ein ähnliches Phänomen beim Vergleich Lok 151 und der mittlerweile ausgemusterten 150, dabei war aber auch ein geringer Gewichtsunterschied der beiden Lokbaureihen zu beachten.

Betrachtet man eine Eisenbahn ganzheitlich – im Rahmen der Organisationsreformen schwierig und teilweise verpönt – entsteht hier ein Optimierungsproblem. Berücksichtigt man das Anfahrverhalten der Lok 111, müsste man deren Anfahrrenzlast bezogen auf die Anfahrrenzlast der Lok 110 um 10% reduzieren, bei einem speziell entwickelten Transportprogramm also rund 10% mehr Züge fahren und rund 10% mehr Zugförderungskosten in Kauf nehmen. Da die Lok 111 das Gleis in Querrichtung deutlich weniger beansprucht, reduzieren sich die Instandhaltungskosten für den Oberbau.

Da die Anfahrrenzlasten im Personenverkehr – von Steigungsstrecken und Signalstandorten abgesehen – keine Rolle spielen und im Güterverkehr bei Transportprogrammen mehr die Grenzlast als die Anfahrrenzlast wirtschaftlich bestimmend ist, konnte man sich zugunsten der Kostenreduzierung des Oberbaus entscheiden und führte die Lemniskatenachsführung ein.

Aktuell kann man hier noch die Frage zwei- oder dreiachsige Drehgestelle erwähnen. Ursprünglich wurden dreiachsige Drehgestelle dann gebaut, wenn die höhere Zugkraft das zwingende Kriterium war ( Baureihe 103, 150, 151, 155, 232, 234 frühere 194,) und das hohe Gewicht der Lok zur Zugkraftherzeugung genutzt werden konnte. Im Bogen belasten dreiachsige Drehgestelle den Oberbau deutlich mehr als zweiachsige Drehgestelle, bei der Lok 103 wurde deshalb sehr auf Reduzierung der Radsatzlast geachtet. Die Erfindung (und Anwendung) der Mehrfachsteuerung führte zur Erkenntnis, dass zwei vierachsige Lok in Doppeltraktion den Oberbau weniger belasten als eine ständig eingesetzte sechsachsige Lok.

In der Schweiz wurde für den Gotthard-Betrieb eine sechsachsige Lok mit drei zweiachsigen statt zwei dreiachsigen Drehgestellen entwickelt. Diese Lok zeigte gute Eigenschaften auf Strecken mit vielen Bögen, schlechte Laufeigenschaften auf gerader Strecke bei Geschwindigkeiten über 100 km/h.

(Prompt kam aber das Marketingargument, dass lasterhöhte Züge mit bis zu 5 400 t im Erzverkehr mit zwei sechsachsigen Lok kostengünstig seien. Ein Beispiel dafür, dass oft Überlegungen zum Preis am Markt und zu den Kosten der Instandhaltung widersprüchlich sind. Dazu ein weiteres Beispiel: Zwischen Kiruna in Schweden und dem Hafen Narvik verkehren 8000-t-Erzzüge gezogen von zwei sechsachsigen Lok.)

Nun werden neuerdings sechsachsige Diesellok entwickelt, um bei der Dieseltraktion zu höheren Leistungen zu kommen. Man darf gespannt sein, wie die Eisenbahninfrastrukturunternehmen hier (über den Trassenpreis?) reagieren. Umweltüberlegungen sprechen nicht für leistungsstarke Diesellok, sondern dafür die Strecken endlich zu elektrifizieren, auf denen diese Diesellok eingesetzt werden (müssen)..

Bei den Überlegungen zur Trennung von Reise- und Güterverkehr zum Hafenhinterlandverkehr oder der Restelektrifizierung (Ulm- Kempten und Ulm-Bodensee, München [Geltendorf] – Bodensee, Westküstenbahn) werden weitere Strecken elektrifiziert werden. Damit schwinden Einsatzstrecken für schwere, sechsachsige Streckenlokomotiven.

### 5.1.3 Polygonisierung der Räder

Früher war die Klotzbremse mit Graugussbremsklötzen die einzige Bremse für Triebfahrzeuge, Reisezug- und Güterwagen. Ihre Nachteile sind bekannt. (Geräusentwicklung, hoher Instandhaltungsaufwand, Verschmutzung durch Bremsabrieb [Eisenstaub], Funken [Brandgefahr] und fahrdynamisch der stark drehzahlabhängige Reibwert zwischen Radlauffläche und Klotz).

Die dynamischen Bremsen bei Triebfahrzeugen (E-Motor als Generator, hydraulische Bremsgetriebe), die ab etwa 1950 im großen Maßstab eingeführt wurden, galten als wichtiger technischer Fortschritt. Aber: Zunächst hatten die Triebfahrzeuge immer noch die Klotzbremse, die deutlich seltener eingesetzt wurde aber mit dem Nebeneffekt, dass die Radlaufflächen gereinigt wurden (Putzeffekt) und die Räder rund blieben. In Frankreich und Japan gibt es Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge, die Klotzbremsen als „Putz“-bremsen haben. Betriebserfahrungen zeigen Bremsprobleme bei scheibengebremsten Lok, die zur Benutzung der Sandanlage führen. Dies führt bei rangierenden Lok zu den beschriebenen Problemen, weil der Putzeffekt der Klotzbremse fehlt.

Als dann die dynamischen Bremsen mit Scheibenbremsen kombiniert wurden, stellte man – bei der Deutschen Bundesbahn erstmalig im größeren Maßstab beim ET 420 ab etwa 1975 - fest, dass die Räder unrund wurden. Dies wiederum führt zur Geräusentwicklung und zu bisher unbekanntem Kräftebeanspruchungen des Laufwerkes und des Gleises möglicherweise auch zu Gleit- oder Blockiervorgängen. Auch hier wird derzeit intensiv geforscht, es bleibt spannend, die Veröffentlichungen zu verfolgen.

Das Phänomen der unrunden Räder zeigt sich nunmehr auch bei Straßenbahnen. In München gab es Beschwerden der Anwohner von Straßenbahnstrecken, auf denen neuere Wagen eingesetzt werden. Als Körperschallübertragung machen sich die unrunden Räder in den Häusern bemerkbar. Die Grauguss-Klotzbremse raut die Lauffläche auf. Folge ist das laute Rollgeräusch. Folge Lärmschutzmaßnahmen, eine Maßnahme: Scheibenbremsen. Folge ist die Unrundheit der Räder mit Körperschallgeräusch. Vielleicht liegt die Lösung des Dilemmas doch in der dosierten Anwendung eines sog. Putzklotzes mit dem weiteren Effekt einer Drehbank. Die Lösung des Problems ist dringend.

### 5.1.4 Medium zwischen Rad und Schiene

Im Idealfall ist nichts zwischen Rad und Schiene. Dieser Zustand ist aber nur im vollkommenen Vakuum möglich. Ein Beispiel möge dies verdeutlichen:

Im Labor der RWTH Aachen wurden Reibwertmessungen mit einer kleinen Rolle (Stellvertreter für das Rad), die auf einer großen Rolle (Stellvertreter für die Schiene) lief, durchgeführt. Die Messanordnung war in einen großen durchsichtigen, abschließbaren Behälter eingebaut.

Dem Messleiter war aufgefallen, dass immer montags die gemessenen Werte deutlich niedriger lagen als gegen Wochenende. Der Messleiter prüfte alle Parameter bezüglich Luftfeuchte, Staubkonzentration usw. konnte aber keine signifikanten Veränderungen über das Wochenende registrieren.

Zufallsbedingt kam er an einem Montag sehr früh ins Labor und sah, wie die Reinigungsfrauen nach dem Wischen des Bodens diesen einwachsten und bohnerten. Die Messanordnung lieferte wieder „Montagswerte“. Nachdem das Einwachsen abgestellt

worden war, gab es keine „Montagswerte“ mehr.[Mündliche Mitteilung des Messleiters, der zeitweise Mitglied im DMG –Fortbildungsausschuss war.]

Da Bahnen grundsätzlich ein offenes System sind und sich der Berührungspunkt zwischen Rad und Schiene überhaupt nicht abkapseln lässt, muss für das Reibverhalten zwischen Rad- und Schiene immer auch der Einfluss von Medien berücksichtigt werden.

Hier ist einmal ein nicht näher definierbarer Staub (Bremsstaub, also Eisenoxyd, Stein- oder Erdstaub) zu nennen. Dieser kann wiederum trocken oder unterschiedlich feucht sein. Abhängig von der Temperatur auf der Schiene kann es dort bereits zu Taupunktunterschreitungen kommen, wenn dies an anderen Stellen noch nicht auftritt.

Wenn wegen der Lärminderung, besonders bei Güterwagen, diese andere Bremsbeläge (statt Graugussklötzen) bekommen, wird es langfristig ein neues Medium geben. Dies wird mit anderen Substanzen und bei unterschiedlicher Feuchtigkeit einen Einfluss haben, der zur gegebenen Zeit zu untersuchen sein wird. Eine besondere Rolle spielt der Putzeffekt bei Klotzbremsen, sowohl für die Radlaufläche als auch die Schienenoberfläche. Gelegentlich werden „Putzklötze“ konstruktiv vorgesehen.

Ausschließlich scheiben- und dynamisch- gebremste Radsätze bilden einen anderen Fahrspiegel auf der Schiene. Hier sind U- und ausschließlich von S-Bahnen benutzte Gleise zu nennen. Hier stehen genauere Untersuchungen noch aus.

Regen, besonders Sprühregen oder Nebelnässen bilden dann mit dem Staub ein Gemenge zwischen Rad und Schiene, das mikroskopisch den unmittelbaren Kontakt zwischen Rad und Schiene verhindert. Im Herbst kommt Laubfall dazu.

Der Bahnbetrieb selbst liefert Zwischenmedien, etwa durch die an den Triebfahrzeugen angebrachte Spurkranzschmierung, die auch bei genauer Einstellung auf die Spurkranzkehle des Rades doch etwas Fett auf die Laufläche bringt. An Bahnübergängen überrollen die ersten Räder eines Zuges straßentypische Verschmutzungen der Schienen.

Oft verringern unbestimmte und unbestimmbare Umwelteinflüsse den KSB. Beispiele sollen dies verdeutlichen:

In der Nähe von Raffinerien oder chemischen Werken kann man sichtbar auf Veränderungen des Reibwertes schließen. Erfahrene Lokführer verhalten sich an dieser Stelle entsprechend.

Bei der Festlegung der Anfahrgranzlast für die Lokbaureihe 120 wurden Anfahrversuche an den Blocksignalen durchgeführt, die an der jeweils steilsten Stelle der Strecke standen. Die Messergebnisse von einer bestimmten Blockstelle streuten erheblich, ohne dass zunächst ein Grund zu erkennen war. Ein gut ortskundiger Lokführer machte den Messleiter auf einen Steinbruch in der Nähe dieser Blockstelle und darauf aufmerksam, dass immer dienstags und donnerstags gesprengt würde. Bei entsprechender Windrichtung wird dann der Staub aufs Gleis geweht. Die Messergebnisse bestätigten dann diese Beobachtung.

Der KSB geht durch die vorgenannten Einflüsse dann zurück bis auf 0,1 , in ungünstigen Fällen auf 0,05.

Wie bereits ausgeführt, gibt es für das Anfahren bei Bedarf eine Rückfallebene, so dass Zuverlässigkeits- und auch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen den Ausschlag für die Annahme des Reibwertes geben. Die Rückfallebene ist einmal eine Hilfslok, zum ändern aber auch die Möglichkeit, den Reibwert(-faktor) durch ein Medium (Sand, Wasserdampf) zu verbessern.

### 5.1.5 Sand

Über den Sand bzw. das Sanden wird in letzter Zeit nach besonderen Ereignissen wieder intensiv diskutiert. Einige Tatsachen sollen hier erwähnt werden. Zunächst zum Sand als technisches Medium. Er soll immer trocken und

- nicht so hart sein, dass er zwischen Rad und Schiene wie ein Kugellager wirkt
- nicht so weich sein, dass er zu Mehl zerrieben wird und bei Feuchtigkeit als Schmiermittel wirkt
- nicht mit anderen Stoffen z.B. Lehmanteilen vermischt sein, um definierte Eigenschaften zu erhalten.

Bei der Beurteilung der Effektivität des Sandens ist auch die Radsatzlast zu berücksichtigen. Der Sand reagiert bei der Überrollung mit dem Rad (Masse etwa 5 t) eines Steuerwagens anders als mit einem Rad einer Lok (10 t). Das kann bedeuten, dass die Sandqualität in Abhängigkeit der Radnormalkraft unterschiedlich sein muss.

Die DB AG hat bei Messfahrten festgestellt, dass nach 15 Überrollungen jeder Sandeffekt verschwindet. D.h., bei Wendezügen muss die Besandungsanlage der nachlaufenden Lok für deren Räder angesteuert werden. (Nachrichtlich: Wenn bei Glatteis Rieselkies auf der Straße gestreut wird, ist dieser nach rund 300 Fahrzeugen weggeschleudert.)

Die ausgebrachte Sandmenge (g/m) muss abhängig von der Geschwindigkeit geregelt werden, bei geringer Geschwindigkeit ist die Sandmenge zu reduzieren.

Zweck des Sandens ist die Verbesserung des KSB beim Anfahren und beim Bremsen. Der Einsatz von Sand belastet immer die Radlauflächen und die Schienenoberfläche. Der Einsatz beim Anfahren kann auf besonders dringliche Fälle beschränkt werden. Das Sanden in schleudernde Radsätze ist zu vermeiden, weil durch die plötzlichen Kraftänderungen Überlastungen an kraftübertragenden Bauteilen entstehen können.

Beim Bremsen mit geringem KSB kann es sicherheitlich notwendig sein, den KSB durch Sanden zu erhöhen. Deswegen gibt es Schaltungen für automatisches Sanden, die aber auch dann wirken, wenn der KSB gut ist. Insofern ist zu prüfen, ob das Sanden nicht in der operativen Entscheidung des Triebfahrzeugführers bleiben sollte in der Maßgabe, eben nur bei niedrigem KSB zu sanden.

Nun gibt es vom EBA eine Allgemeinverfügung, die dem Triebfahrzeugführer eine Meldepflicht an den Fahrdienstleiter auferlegt, wenn er unmittelbar vor dem Halt gesandet hat. Dies gilt dann auch, wenn bei einer Zwangs- oder Schnellbremsung das Sanden automatisch aktiviert wurde. In einer Stresssituation ist sich der Triebfahrzeugführer möglicherweise nicht bewusst, dass automatisch gesandet wurde. Um die Problematik zu beurteilen, muss man die Technik der Gleisfreimeldeanlagen kennen.

Linke und rechte Schiene eines Gleises sind gegeneinander isoliert. Die Isolation wird durch einen Radsatz aufgehoben, dies erkennt ein Relais und meldet den Gleisabschnitt als besetzt. Der Fahrdienstleiter sieht am Stelltisch oder Bildschirm die Rotausleuchtung, die Stellwerkslogik erkennt dies ebenfalls und verhindert das Nachfahren eines anderen Fahrzeuges, das Umstellen einer Weiche usw. Wenn aber ein Einzelfahrzeug (das erste Drehgestell eines Steuerwagens) tatsächlich „auf Sand“ steht, bleibt die Isolation zwischen linker und rechter Schiene aufrechterhalten. Dies gilt aber für die Stellwerkslogik als „Frei“-Meldung und sie reagiert als ob es das Fahrzeug nicht gäbe.

Hier ist noch mal die Sandqualität zu betrachten. Gemäß eigener Beobachtung gibt es Sande, die nach Überrollung nur kleinere Körner bilden – der Vergleich sei erlaubt: Der Sand hat eine Grieskonfiguration. Andere Sande werden förmlich zu Mehl zerrieben. Es gibt auch die Erscheinung, dass nach der Überrollung der (vermutlich mehlig) Sand zu einer Art „Chip“ ausgewalzt wird. (Feststellung der DB AG bei Versuchsfahrten). Diese Chips bilden sich auf 4 - 5 cm in Fahrtrichtung aus und haben eine Dicke deutlich unter 1 mm, dies recht aber zur Isolation des Rades gegen die Schiene.

Als Zwischenergebnis ergibt sich, dass

- der Einsatz von Sand sehr sorgfältig (Personalschulung) erfolgen muss
- das automatische Sanden kritisch zu hinterfragen ist und
- die Sandqualität sogar in Abhängigkeit der Fahrzeugmasse genau zu definieren und die Lieferung streng zu prüfen ist

#### 5.1.6 KSB beim Bremsen

Für das Bremsen fehlt die Rückfallebene Hilfstriebfahrzeug. Aus Sicherheits-gründen nimmt man für das Bremsen einen KSB von 0,12 –höchstens 0,15, es sei denn, es gibt reibwertverbessernde Einrichtungen.

Beim Bremsen ist die Rückfallebene Sand aus den genannten Gründen nicht ohne Probleme. (Vgl.5.1.5).

Beim Bremsen gibt es eine weitere Rückfallebene in Form der Magnetschienenbremse. Diese wirkt einmal parallel zu Rad und Schiene als Reibungsbremse zwischen Drehgestell und Schiene. Für die Berechnung kann man die üblichen Formeln einsetzen.

In der Praxis hat sich aber eine höhere Bremswirkung als theoretisch berechnet gezeigt, als um 1970 eine besondere Hochabbremung (Bremsart RR) bei Reisezugwagen für 160 km/h kurzzeitig eingeführt war. Wagen mit RR liefen gemischt mit Wagen mit Magnetschienenbremsen.

Wenn nun ein Wagen mit Magnetschienenbremse an der Spitze des Zuges lief, veränderte sich das praktische Bremsverhalten des Zuges nach einem Richtungswechsel sehr deutlich – insbesondere auf feuchten Schienen. Die plausible Erklärung dafür ist, dass die Reibung der Magnete die Schienen putzt und trocknet und dadurch für die nachlaufenden Radsätze die KSB- Verhältnisse spürbar verbessert. Praxiserfahrungen zeigen, dass eine Magnet-„schienenbremse“ am jeweils ersten Drehgestell eines Zuges bremsstechnisch zur Verzögerung des Zuges wenig beiträgt, eine hohe Wirkung aber durch den „Schiennenputz“-Effekt hat. Die nachfolgenden Radsätze können auf geputzter Schiene einen besseren KSB nutzen und dadurch besser bremsen.

Mit der Wirbelstrombremse wird auf der Strecke Köln- Rhein/Main gebremst. Praktische Erfahrungen zeigen aber, dass 40 ‰ eine kritische Grenze sind und man besser daran ist, Steigungen für Schnellfahrstrecken auf 20 ‰ zu begrenzen, um nicht zwingend auf das Triebwagen (Triebzug) –Konzept bei der Konstruktion von Zügen festgelegt zu sein. MÖLLER berichtet auf dem Seminar E 1/2021, dass die anfänglich vorhandenen Probleme mit Gleisschaltmitteln für die Schnellfahrstrecken behoben seien. Im Bedarfsfall muss der Einsatz auf Umleitungsstrecken, die nicht ausgerüstet sind, vermieden werden.

Betrieblich kann der Einsatz bei hintereinander herfahrenden Zügen so gesteuert werden, dass es bei (Zwangs-,Not-) Bremsen nicht zu Übererwärmung der Schienen kommt.

Vorteil der WB-Bremse ist ihre Verschleißfreiheit.

Beim Projekt Stuttgart 21 und der Schnellfahrstrecke Stuttgart – Ulm werden diese Erfahrungen bisher nicht berücksichtigt.

#### 5.1.7 Definierter Makroschlupf

Erstmals mit der Einzelachsregelung (nicht zu verwechseln mit dem Einzelachsantrieb) bei der Baureihe 152 der DB AG (nicht zu verwechseln mit der E 52 der früheren Deutschen Reichsbahn) wird der in Fahrtrichtung erste Radsatz gezielt zum Makroschlupf gebracht. Die Regelung lässt den ersten Radsatz gezielt schneller drehen als die Radsätze 2 bis 4, deren Rotationsgeschwindigkeit umgerechnet fast der Longitudinalgeschwindigkeit der Lok entspricht. Zwischen Rad und Schiene entsteht ein Putzeffekt mit dem Ergebnis, dass der Verlust an Zugkraft bei Radsatz 1 wegen eines niederen KSB ausgeglichen wird durch den Zuwachs an Zugkraft der Radsätze 2 bis 4 wegen des deutlich verbesserten KSB.

Beim Bremsen nutzt man den gleichen Effekt. Radsatz 1 dreht deutlich langsamer als die Radsätze 2 bis 4.

Quergleiten (umgangssprachlich Rutschen) meint, dass das sich das drehende Rad quer auf der Schiene bewegt.

#### 5.1.8 KSB-Ausnutzung

Die modernen, schnell reagierenden Steuerungen der Drehstromasynchronmotoren ermöglichen es, im unteren Geschwindigkeitsbereich den Reibwert von  $> 0,3$  auch bei einer schwierigen Anfahrt darzustellen. Nun zeigen Messungen, dass es bei einer länger dauernden und häufigeren Ausnutzung des Reibwertes über  $0,3$  zu Schäden an den Laufflächen der Schienen kommen kann. Der Literatur ist zu entnehmen, dass diese Erscheinung Gegenstand der Forschung ist.

#### 5.1.9 Horizontale Brückenbelastung

Mit der Inbetriebnahme der Schnellfahrstrecke Nürnberg-Erfurt gab es Diskussionen über die mögliche Doppeltraktion zweier ICE 3 (ET 403) auf der Ilztalbrücke. Diese ist 868 m lang und in schwierigem Gelände mit bis 30 m tiefen Bohrpfehlen gegründet. Brücken werden bezüglich ihrer vertikalen Belastung berechnet. Zu berücksichtigen sind auch Schwingungen, Resonanzen müssen vermieden werden. Das ist zunächst kein Thema für die Fahrdynamik.

Im Abschnitt 1.1.3 wird die horizontale Kraft dargestellt, die auf die Schiene nach Maßgabe des KSB wirkt. Die Schiene – die Schienenbefestigung – liefert die Reaktionskraft. Wenn bei hoher Geschwindigkeit beschleunigt oder gebremst wird, ist die Horizontalkraft gemäß einem niederen KSB gering. Ein anderes Ergebnis erhält man bei Betrachtung des unmittelbaren Anhaltvorgangs bei einer Schnell- oder Zwangsbremung. Unter  $1\text{m/sec}$  Geschwindigkeit kann der KSB Werte von  $0,3$  oder mehr ( $0,5$  ? unmittelbar vor Stillstand kaum messbar) annehmen. Dann werden erhebliche horizontale Kräfte von jedem Rad auf die Schiene ausgeübt. Die Schiene – letztlich der Gleisrost – nimmt diese horizontalen Kräfte auf und überträgt sie bei Brücken auf die Auflager. Diese Belastung ist dann besonders zu berechnen und wird ein Kriterium für die mögliche Zuglast. Für die Ilztalbrücke und Doppeltraktion ICE 3 wurde die Situation besonders untersucht.

### 5.2 Bewegung Fahrspiel, Fahrweg und –zeit: Betriebliche Abhängigkeiten

Infrastrukturelemente bestimmen fahrdynamische Parameter, die wiederum den Betrieb beeinflussen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sollen einige Abhängigkeiten beispielhaft genannt werden.

Der Grundriss der Trassierung mit den Bogenradien definiert die maximal zulässige Geschwindigkeit, genauer die Seitenbeschleunigung, die durch die Fahrzeugneigetechnik verringert werden kann und damit zu einer höheren Geschwindigkeit führt. Die Steigungs- (Neigungsgradienten) unterhalb eines Grenzwertes legen Antriebs- und Bremsvermögen und die Zugmasse fest. Die Konstruktion des Fahrweges (Unter- und Oberbau) bestimmen die zulässigen Lasten je Radsatz bzw. des Fahrzeuges, hier sei der Sonderfall Brücken genannt. Eisenbahnen müssen geführt werden. Die Führung durch einen Führer, ortsfeste Signale oder elektronisch übermittelte Vorgaben und der einzuhaltende Bremsweg legen die Bremsausrüstung fest. Im Triebfahrzeug kann nur so viel Leistung wirken wie die elektrisch Streckenausrüstung zulässt. Und die Ladekapazität (wichtig im Güterverkehr) wird durch das Lichtraumprofil begrenzt (man denke an die Doppelstock Containerverladung in USA und Kanada und in Deutschland politisch (!) angestrebt wird). Mit den sog. Neubaustrecken wurden viel längere Tunnel als vorher gebaut und die nach neueren Bauvorschriften nur noch als eingleisige Röhren. Damit gewinnt der aerodynamische Tunnelwiderstand in Verbindung mit der im Tunnel herrschenden Temperatur der Luft als Kühlmittel eine fahrdynamische Bedeutung. Auch hier gilt: Die Veränderung eines Parameters hat Folgen für alle anderen.

In den Abschnitten 4.1 und 4.2 gehen alle Betrachtungen von vorhandenen Strecken und Fahrzeugen aus. Auch hier kann man den umgekehrten Weg einschlagen, wenn – als Beispiel – ein bestimmtes Transportprogramm vorgegeben wird und dafür eine Eisenbahn gebaut werden soll. In Deutschland wurden im 19. Jahrhundert Bahnen für den Kohlen- oder Militärtransport gebaut

Ein jüngeres Beispiel ist die sog. BETUWE- Linie (Rotterdam- Emmerich, der Name kommt von der durchfahrenen Landschaft), die ausschließlich für den Güterverkehr (Geschwindigkeit bis 160 km/h) gebaut wurde und 2007 in Betrieb genommen wurde. Man kann sich heute vorstellen, dass in einem Entwicklungsland ein Erzvorkommen entdeckt wird und das Erz zu einem geeigneten Hafen transportiert werden soll. Denkbar ist auch, dass eine Schienenbahn aus Umweltgründen parallel zu einer Autobahn gebaut werden soll und die Trassenparameter der Autobahn maßgebend sind. Dies trifft z.B. für die Strecke Köln- Rhein/Main, Ingolstadt- Nürnberg, Ebenfeld -Erfurt oder die BETUWE- Linie zu.

Aktuell ist diese Frage auch im Zusammenhang mit „Stuttgart 21“. Auch hier wird eine Bahn parallel zur Autobahn mit dem sog. Alaufstieg geplant. Derzeit werden Güterzüge über die Geislinger Steige (mit 70 km/h) nachgeschoben. Man kann sich vorstellen mit sechsachsigen Lok in Doppeltraktion Güterzüge zu befördern. Es muss aber dann besonders berechnet werden, ob die energieumsetzenden Maschinen der hohen Strombelastung (Erwärmung) standhalten und die Verlustwärme abgeführt werden kann. Eine hohe Leistung bei kleiner Geschwindigkeit bedeutet eine hohe Zugkraft, die wiederum ein Maß für den Motorstrom und damit die Erwärmung (quadratische Abhängigkeit) ist. Eine 240 km/h schnelle Lok mag – leistungsgemäß betrachtet – ein Zugförderungsprogramm für 120 km/ h bewältigen. Eine Lok mit gleicher Leistung und 120 km/h Endhöchstgeschwindigkeit arbeitet aber mit der vollen Motordrehzahl und nur mit dem halben Motorstrom (und in erster Näherung mit 25 % strombedingter Motorerwärmung). Wenn durch Motorkühlung der Effekt kompensiert wird, entfällt die Restriktion. Hier soll nur die Komplexität der Interdependenz aufgezeigt werden.

Die Frage der Endhöchstgeschwindigkeit wird also auch vom Zugförderungsprogramm her entscheiden werden müssen. Ähnliche Überlegungen führten nach 1965 zur Entwicklung der sog. Trafoumschaltung bei der Schnellfahrlokomotive 103.



Aus den bautechnischen Vorgaben der Trassenführung und der Geschwindigkeit lassen sich dann die Widerstände und daraus die benötigten Zugkräfte ermitteln. Zugkräfte, Geschwindigkeit und Fahrzeuggewichte definieren die benötigte Leistung, die auf Einzelaggregate aufgeteilt, die Fahrzeugkonstruktion bestimmt. Bei festgelegtem Transportprogramm und vorgegebenen Fahrzeugen können die Streckenparameter festgelegt werden.

Ein sehr aktuelles Beispiel für die Wechselwirkung zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen findet man auf der sog. Spessarttrampe. Rund 100 Höhenmeter wurden ursprünglich mit einer 20‰-Rampe bis zum horizontalen Schwartz-Kopftunnel überwunden, ab einer bestimmten Last wurde die Züge nachgeschoben. Eine neue Rampe mit 12,5 ‰ mit einem noch in der Steigung liegenden Tunnel sollte das Nachschieben überflüssig machen. Nun bleiben gelegentlich Güterzüge nach Signalhalt liegen, weil es vor dem Signal ein steileres Stück gibt. Hier muss die Anfahrgranzlast ( siehe Abschnitt 4.8) in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse und dem Schienenzustand neu berechnet werden.

Bei Neubauten sind immer und insbesondere die Investitions-, Betriebs- und Life-Cycle-Kosten (LCK) ausschlaggebend. Die oben genannten Berechnungsansätze zeigen dann den Weg, um über die Methoden der Fahrdynamik zu optimierten Lösungen zu kommen. Investitions- und Betriebskosten realisieren sich sehr zeitnah und lassen den Vergleich Soll-/Istkosten zu. LCK beruhen auf vielen Annahmen und lassen einen Vergleich Soll/Ist erst nach langen Zeiträumen zu, wenn die Richtigkeit der Annahmen -auch wegen des eingetretenen Personalwechsels – nicht mehr nachvollzogen werden kann.

Grundsätzlich ist die Lebensdauer von Bauten der Infrastruktur erheblich länger als die Lebensdauer von Fahrzeugen, die sich dann auch in den späteren Konstruktionsperioden immer noch an die Infrastruktur anpassen müssen.

Bei der völligen technischen Neuplanung einer Eisenbahn stehen daher fahrdynamische Überlegungen am Anfang mit den Vielfältigen Verbindungen zwischen Infrastruktur, Fahrzeugen und deren Betrieb.

### 5.3 Energie, Nutzung bei Schienenbahnen

Schienenbahnen verdanken ihren Erfolg einmal der physikalischen Tatsache, dass Räder auf geführten Bahnen einen geringeren Rollreibungswiderstand haben. Schon sehr früh gab es Spurrillenfahrwege, z.B. bei den Römern auf der Via Appia. für schwierige Wegstrecken. Der nächste Fortschritt waren Räder mit Radkränzen auf Holzbalken und schließlich Eisen ( später Stahl-)-Räder auf Eisen ( später Stahl-)-Schienen, jeder dieser Schritte brachte den Erfolg, dass mit der gleichen (Pferde-) Zugkraft eine immer größere Anhängelast befördert werden konnte. Die weitere Entwicklung der Fahrwerke, die Einführung von Drehgestellen, Wälzlager und die Fahrzeuggestaltung bei hohen Geschwindigkeiten usw. hatten immer zum Ziel, den Rollwiderstand zu verringern, die zum Transport notwendige Leistung und Energie zu verringern oder mit der vorhandenen Leistung (Pferd bzw. definierte Leistungsfähigkeit der Maschine(n)) möglichst große Massen und/oder möglichst schnell zu befördern. Derzeit kann z.B. eine 80 t schwere Lokomotive mit rund 6 MW Leistung einen 2500 t schweren Güterzug mit 80-100 km/h energieeffizient befördern. Der geringe Rollreibungswidertand spart Energie. Als Beispiel: Wenn ein ICE von Göttingen nach Hannover fährt (ca. 90 km) und 250 km/h erreicht,, kann der Lokführer bei km 47 abschalten und muss nur noch bremsen, um in Hannover Hbf zum Stillstand zu kommen. Dabei liefern die „Fahr“motoren als Bremsgeneratoren noch Energie ins Netz zurück. Der Vorteil der geringen Rollreibung schafft dann aber Probleme beim Bremsen, auf die später noch eingegangen werden soll.

Aus ökologischen und ökonomischen Gründen werden Überlegungen zum Energieverbrauch immer wichtiger. Die Fahrdynamik liefert dazu die einzelnen Parameter. Hier wird die physikalisch- mathematisch beschreibbare Energie behandelt. Energie und Arbeit(sfähigkeit) sind identisch. Dies kommt auch in den Maßeinheiten zum Ausdruck. Diese sind aus praktischen Gründen unterschiedlich z.B. die Kilowattstunde (KWh, für Verbrauch) oder Megawattstunde (MWh für Erzeugung und Vertrieb) oder die Kilocalorie (Kcal) bei Wärmemessungen oder physiologischen Energiebegriffen (Ernährung). Die Maßeinheiten hängen aber mathematisch über Umrechnungsfaktoren und die Erdbeschleunigung zusammen. [Wattsekunde = Joule = Newtonmeter ; 4,1855 Newtonmeter = 1 cal] .

#### 5.4 Einzelberechnung des Bremsweges

Unter dem Aspekt der Sicherheit ist es wichtiger ein bewegtes Fahrzeug (einen Zug) zum Stillstand als zum Fahren zu bringen.

Da es nach Richtlinie 408 nur Zug- oder Rangierfahrten gibt, Bremswege in der Regel für Züge bedeutend sind, wird zukünftig immer der „Zug“ oder die „Zugfahrt“ betrachtet und bei Bedarf auf die Rangierfahrt besonders hingewiesen.

Definiert sei, dass „Anhalten“ und „Bremsen“ immer den Vorgang der Geschwindigkeitsabnahme, „Halten“ den Stillstand des Zuges z.B. vor einem Halt zeigenden Signal oder am Bahnsteig meint. Damit ist der Bremsweg der Weg, den der Zug in der Zeit zurücklegt, während der die besonderen Bremseinrichtungen wirken. Bremsweg ist nicht der Weg während der Verzögerung eines Zuges durch eine Steigung.

Bei fast allen Bahnen gibt es den sog. Regelbremsweg. Dies ist der Abstand zwischen einem Halt ankündigenden und einem Halt zeigenden Signal, in Deutschland 1000, 700 oder 400 m. Im Regelbetrieb muss ein Zug im Regelbremsweg zum Halten kommen. Umkehrschluss: Er darf nur so schnell fahren, dass er im Regelbremsweg zum Halten kommt.

Moderne Sicherungssysteme, auf die nicht eingegangen wird (European Train Control System [ETCS], Linienzugbeeinflussung [LZB]) sind vom Grundsatz her nicht abhängig vom Regelbremsweg. Da es aber in Deutschland keine Fahrzeuge gibt, die ausschließlich auf ETCS- und LZB- Strecken fahren, müssen Fahrzeuge die Kriterien des Regelbremswegsystems erfüllen. Punktförmige Zugbeeinflussung [PZB] (und die damit zusammenhängenden Geschwindigkeitsüberwachungen [GÜ]) stellen besondere Anforderungen an Berechnungen nach den Methoden der Fahrdynamik.

Die Fahrdynamik kennt den Bremsweg als den Weg, den der Zug aus einer aktuellen Geschwindigkeit ( $v > 0$ ) bis zum Stillstand ( $v = 0$ ) oder einer niederen als der Ausgangsgeschwindigkeit braucht. Bremswegberechnungen sind ein wichtiges Teilgebiet der Fahrdynamik.

##### 5.4.1 Analytische Bremswegberechnung

Wenn man alle technischen Parameter kennt, kann man den Bremsweg nach Formeln berechnen. Vergleichsweise einfach ist die Bremswegberechnung bei neuen, unter bestimmten Bedingungen ausschließlich elektrisch gebremsten Fahrzeugen (z.B. Straßenbahnen, Triebwagenzügen), weil die Verzögerungskraft aus der Motorleistung bekannt ist.

Bei Druckluftbremsen ist es aber schwierig alle technischen Parameter mit wissenschaftlicher Exaktheit zu ermitteln, zumal diese sich zeitlich oder in Abhängigkeit anderer Umstände verändern. So verändert sich die Bremskraft zunächst von 0 bis zu ihrem Höchstwert in Abhängigkeit der Bremszylinderfüllzeit. Dieser vorgelagert ist aber die Eigenzeit des Steuerventils, das seinerseits nach Maßgabe der Durchschlagsgeschwindigkeit der Druckabsenkung in der Hauptluftleitung und der Stellung seines Fahrzeuges im Zugverband überhaupt erst anspricht. Die Bremskraft hängt dann auch ab vom Gestängewirkungsgrad und - bei sehr genauer Betrachtung - vom Schwergang (Pflege – und Schmierzustand) aller mechanisch bewegten Teile und vom Reibwert zwischen Reibelement (z.B. Bremsklotz) und Rad (Bremsscheibe am Radsatz).

Aus dem Druck im Bremszylinder ( maximal 3,8 bar), der Kolbenfläche, der Kraft der Rückholfeder des Kolbens im Bremszylinder, dem Gestängeübersetzungsverhältnis, der daraus resultierenden Kraft des Reibbelages auf das Rad und dessen Normalkraft kann man die Abbremsung bestimmen. Diese ist aber nur eine von vielen Einflussgrößen auf das Bremsgeschehen.

„Abbremsung“ darf nicht mit den Bremsstufen verwechselt werden( siehe Abschnitt 5.4.2)

Andererseits kommen nichttechnische Einflüsse – am häufigsten Umwelt-einflüsse auf den Schienenzustand dazu. Diese nichttechnischen Einflüsse lassen sich kaum vorhersagen, eingrenzen oder genau rekonstruieren. Auch die Digitalisierung bringt keine Änderung. Gerade bei Unfällen muss nachträglich recherchiert werden, die Umfeldeinflüsse zum Unfallzeitpunkt sind oft nicht genau bekannt und lassen sich nachträglich nicht genau quantifizieren.

Wenn eine analytische – mathematisch exakte – Bremswegberechnung einen definierten Bremsweg ergibt und der tatsächliche Bremsweg, wenn er sich überhaupt genau rekonstruieren ließ, davon um bis zu +/- 10 % abweicht, rechtfertigt dies weder Kritik an der Berechnung noch an der Messung.

#### 5.4.2 Empirische Bremswegberechnung ,System der Bremsstufen

Wegen der Komplexität der Bremsberechnung und aus pragmatischen Gründen gingen – vorwiegend die deutschen Bahnen – vor rund 140 Jahren einen anderen Weg. Da beim Bremsen auch noch die Systemzeiten (z.B.: Durchschlagzeit der Druckabsenkung in der Hauptluftleitung, Eigenzeit des Steuerventils, Füllzeit des Bremszylinders) zu berücksichtigen sind, ging man förmlich den Weg, das Problem vom Ergebnis her aufzurollen.

Ein Zug muss vor dem Halt zeigenden Haupt- Signal sicher zum Stillstand kommen, im ungünstigsten Fall kann aber die Bremsung erst am Vorsignal eingeleitet werden. Der Abstand zwischen Vor- und Hauptsignal ist definiert ( in der Regel 1000 m, auf Abweichungen wird hier nicht eingegangen).

Man hat nun festgelegt: Ein Zug (Fahrzeug), der (das) aus 120 km/h in einem Gefälle von 5 ‰ auf 1000 m – einschließlich eines Sicherheitsabschlages von 5 % , also auf 950 m - zum Stillstand kommt, hat ein Bremsvermögen von 100 %. (100 sog. Bremsstufen). Dies ist zunächst eine Definition, die nur schwach physikalisch-technische Parameter (Abbremsung) berücksichtigt.

Nun kann man bei Zügen die Prozente der einzelnen Wagen nicht addieren oder mitteln. Man hat deshalb damals – physikalisch nicht korrekt – einem Fahrzeug mit einem Bremsvermögen

von 100 % ein Brems- "gewicht" in Höhe seines Eigengewichtes zu definiert. „Gewicht“ als Maßeinheit der Masse wurde aus heutiger Sicht falsch verwendet. Der Begriff Brems- "gewicht" ist aber nun so eingefahren, dass er weiter verwendet wird. Bei einem Zug werden nun alle Bremsgewichte und alle Fahrzeuggewichte (einschließlich der Ladung, besetzte Reisezugwagen grundsätzlich mit 5 t [10 t bei Doppelstockwagen] zusätzlichem Gewicht ) addiert und zu einander in Relation gesetzt. Der mit 100 multiplizierte Faktor ergibt das Bremsvermögen des Zuges ausgedrückt in Prozent.

In der RiL 408 finden sich genaue Anweisungen für besondere Zugzusammensetzungen zur Ermittlung des Bremsgewichtes eines Zuges.

Aus der bekannten Gleichung der kinetischen Energie ergibt sich dann die starke Abhängigkeit des Bremsgewichtes von der Geschwindigkeit. Auf weitere Abhängigkeiten wird hier nicht eingegangen. Weil das System in der Praxis gut handhabbar ist, bestimmt man dann auch für die dynamischen Bremsen Bremsprozente.

Im Betrieb hat sich das System der Bremsgewichte bzw. der Bremsprozente als praktikabel erwiesen, die Tabelle dazu (Abhängigkeit der benötigten Bremsprozente von der Geschwindigkeit), die sog. Bremstafeln unterlagen der Zustimmung des Bundesministers für Verkehr.

Das Bremsvermögen eines Fahrzeuges wird empirisch durch Bremsversuche ermittelt. Bei Treibfahrzeugen ist ein endogenes Kriterium zu berücksichtigen. Die rotierenden Massen (Läufer der Fahrmotoren) stellen einen Energiespeicher dar. Der Energieinhalt hängt vom Quadrat der Drehzahl ab. Vergleicht man nun zwei gleich schwere Lok mit gleichen Fahrmotoren usw. aber unterschiedlicher Großrad/Ritzel-Übersetzung (Endhöchstgeschwindigkeit) hat die langsamere Lok auch ein deutlich geringeres Bremsvermögen. Als Beispiel: Die frühere Deutsche Bundesbahn ermittelte als Rotationsbeiwert  $p$  für die BR 110 15,2% für die baugleiche BR 139 23,7%. D.h. das statische Gewicht der BR 110 muss bremstechnisch um 15,2 %, das der BR 139 ( BR 139 hatte wie die BR 110 eine elektrische Bremse mit Bremswiderstand aber nicht die gleiche Übersetzung) um 23,7 % erhöht werden. Praktische Bedeutung: Wenn beide BR die exakt gleiche mechanisch-pneumatische Bremsanlage haben, hatte die BR 139 einen etwa 1,07 fachen (123,7:115,2) längeren Bremsweg aus derselben Ausgangsgeschwindigkeit und deswegen pneumatisch weniger Bremsdruck (Siehe Abschnitt 2.1.2). Dies kann bei niedrigen Ausgangsgeschwindigkeiten bedeutend werden (Rangieren). Man kann es auch als Paradoxon bezeichnen, dass die langsamere Lok den längeren Bremsweg hat.

Bei Reisezugwagen ist der Übergang von der Klotzbremse zur Scheibenbremse praktisch abgeschlossen. Fahrdynamisch bedeutet dies aber: Die Klotzbremse und ihre Einrichtungen sind am Drehgestell befestigt, ihr Gewicht gehört zum Fahrzeuggewicht. Bei scheibengebremsten Fahrzeugen werden die Bremscheiben ( als Wellenbremsscheiben oder Radbremsscheiben) letztlich auf der Radsatzwelle befestigt, ihr Gewicht gehört damit zu den unabgefederten Massen eines Fahrzeuges und sie erhöhen das Trägheitsmoment der rotierenden Massen. Da man aus Vereinfachungsgründen dieses Trägheitsmoment in der Form eines Zuschlages zur Masse des Fahrzeugs berücksichtigt, kann man bei neueren Reisezugwagen hier mit einem Zuschlag von rund 5 % rechnen, will man genauer rechnen, muss man prüfen, ob 2, 3 oder 4 Bremscheiben und mit welchem Gewicht auf der Radsatzwelle sitzen.

Wenn Güterwagen Scheibenbremsen erhalten, tritt das gleiche Phänomen auf. Genauere Berechnungen fehlen. Überschlägig: Beim voll beladenen Wagen kann mit rund 2%, beim leeren mit 7-9 % gerechnet werden.

### 5.4.3 Mindener Formel

Aus vielen Versuchen hat das frühere Bundesbahnzentralamt Minden/Westfalen die sog. „Mindener Bremswegformel“ ermittelt, die sich für eine rasche und - selbst bei Gericht akzeptierte – brauchbare Bremswegberechnung eignet.

Ungefähre Anhaltswerte: Für jeweils höchsten 5 ‰ Neigung und Bremsart R/P + Mg sind

- für 120 km/h ca. 100
- für 140 km/h ca. 140
- für 160 km/h ca. 210 Bremsminderwert nötig.

Auch hier gilt: Eine Abweichung von ca. 10% zwischen gerechnetem und gemessenem Bremsweg ist kein Kriterium für falsche Rechnung oder falsche Messung.

Mindener Formel zur Berechnung des Bremsweges bei Angabe der Bremsminderwert 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)

$\lambda$  = Bremsminderwert

$\lambda_r = c_i \lambda$

$\lambda_r$  = rechnerische Bremsminderwert

$c_i$  = Für Züge mit 48 bis 60 Achsen 1,00

$s$  = Bremsweg in m

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

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

Die Formel für Güterzüge und die Münchner Formel, die die rotierenden Massen berücksichtigt und die Tabellen für die verschiedenen Beiwerte für unterschiedliche Geschwindigkeiten finden sich in den einschlägigen Handbüchern.

## 5.5 Fahrzeugdimensionierung am Beispiel ICE 3

Wenn man ein neues Fahrzeugsystem schaffen will, geht man zunächst einmal vom Fahrzeug aus und legt dessen Daten fest z.B. Anzahl der Plätze, Fahrzeuggewicht, Länge usw. Nach den Widerstandsformeln lässt sich die Widerstandskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit in ein Diagramm als Funktion der Geschwindigkeit eintragen. Für Steigungen von 5,10 usw. Promille zeichnet man die parallelen Kurven. (Siehe Abschnitt 4.2)

In dasselbe Diagramm zeichnet man die Zugkraft nach dem KSB ein bis zu dem Punkt, an dem die Zugkraft nach dem KSB mal Geschwindigkeit die maximale Leistung des (der) Triebfahrzeugs erreicht. Ab diesem Punkt verläuft die Kurve nach der Formel Zugkraft mal Geschwindigkeit gleich Fahrzeugleistung. Diese Kurve schneidet dann z. B. die Kurve der Fahrwiderstände für 20 Promille bei der Geschwindigkeit  $v_x$  d.h. dieser Zug kann diese Steigung mit er so ermittelten Geschwindigkeit befahren. Die Z-V-Kurve kann man auch für 75,50,25 % der Fahrzeugleistung berechnen, etwa für einen Triebzug, bei dem die Motoranlage von einem, zwei oder drei Drehgestellen ausfällt.

Wenn das Diagramm erstellt ist, kann man den umgekehrten Weg gehen d.h. wenn man Fahrzeuggewicht und damit Widerstandskraft kennt und eine bestimmte Geschwindigkeit

bei einer bestimmten Neigung erreicht werden soll, kann man aus dem Diagramm die benötigte Leistung ablesen und dann auf die Drehgestelle (Anzahl der Motoren) verteilen.

Die Bilder des Vortrages zeigen die Diagramme für den ICE 3 (Abschnitt 4.2 ET 403)

## 5.6 Warum 16,7 Hz Frequenz

**Vorbemerkung.** Da die tiefere physikalische Ursache mit dem Kraftschlussbeiwert zusammenhängt, müsste diese Ursache im Vortrag beim KSB erläutert werden. Es würde aber dort den Rahmen sprengen, den Gesamtkomplex darzustellen. Hier wird das Thema auf der Fahrzeugseite erklärt, Herr Th. Groh geht in seinem Vortrag ausführlich auf die Energieversorgungsthematik des Bahnstroms ein.

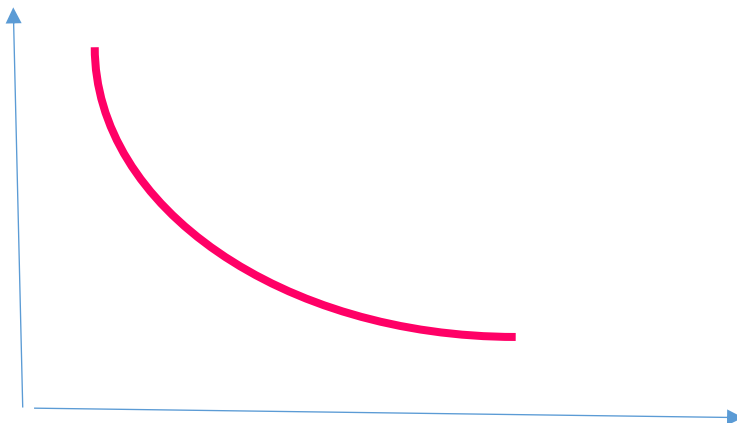
### 5.6.1. Anlass

Bei einem früheren DMG- Seminar fragte ein Teilnehmer, warum die Deutsche Bahn überhaupt mit 16,7 Hz Stromversorgung fährt. Die Frage zeigte den langjährig im Bahnsystem Tätigen, dass junge Kollegen die technischen und geschichtlichen Zusammenhänge nicht kennen. Weil letztlich fahrdynamische Gegebenheiten die Ursache für  $16 \frac{2}{3}$  Hz sind, soll hier die Erklärung gegeben werden. Erst durch die statischen Umrichter und bestimmte elektrophysikalische Vorgänge wurden aus  $16 \frac{2}{3}$  Hz 16,7 Hz, die Differenz von 0,03 Hz hilft elektrophysikalisch.

### 5.6.2. Verlauf des KSB $\mu$ abhängig von der Geschwindigkeit, Reihenschlusskennlinie

Im Abschnitt 1.1.5 wird der hyperbolische Verlauf des KSB  $\mu$  in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt. Es mag eine Zufallserscheinung der Physik sein, dass die Drehmoment – Drehzahlkennlinie von Reihenschlussmotoren, also  $M = f(n)$ , auch hyperbolisch ist. Drehmoment ist immer ein Maß elektrisch für Strom und mechanisch für Zugkraft, Drehzahl elektrisch für Spannung und mechanisch für Geschwindigkeit. Der KSB  $\mu$  gibt also an, welche Zugkraft bei gegebener Normalkraft des Triebfahrzeuges dargestellt werden kann. Durch Veränderung der Motorparameter kann man die Drehzahlkennlinie des Reihenschlussmotors dem naturgegebenen Verlauf des KSB  $\mu$  anpassen.

Drehmoment, Strom, KSB



Elektromechanisch gesucht:  
Motor mit dieser Kennlinie  
Kleine Drehzahl > starkes Moment  
Hohe Drehzahl > geringes Moment  
Lösung:  
**Reihenschlussmotor**

Abb. 10 Physikalische Abhängigkeiten

Drehzahl, Spannung, Geschwindigkeit

### 5.6.3. Wechselstrom – Gleichstrom

Die erste von Siemens auf der Gewerbeausstellung 1879 in Berlin gezeigte „Lokomotive“ wurde mit Gleichstrom betrieben, die ersten Bahnen waren Straßenbahnen mit kleinem Netz. Der Gleichstromreihenschlussmotor war gut beherrschbar. Schwierigstes Bauteil war der Kommutator. Bei der Stromversorgung gab es aber bei langen Strecken das Problem des Spannungsabfalls, d.h. wenn der Strom über eine lange Strecke erst zum Fahrzeug gelangt, nimmt die Spannung gemäß dem OHM'schen Gesetz ab, damit letztlich auch die Fahrzeugleistung.

Wenn man aber die Spannung erhöht, muss man den Motor für die höhere Spannung isolieren. Mit Schalt Aufwand (Reihenschaltung) kann man die Spannung wieder reduzieren, usw.: Die Variante Gleichstrom schied aus, weil vor mehr als 100 Jahren aus technischen Gründen allenfalls 3000 V Gleichstrom möglich waren. Höhere Spannungen führen zu erheblichen Isolationsproblemen auf den Fahrzeugen. Gleichzeitig sind die Übertragungsverluste auf längeren Strecken einmal elektrophysikalisch aber auch wirtschaftlich sehr erheblich.

Alle Bemühungen in dieser Richtung ergaben Probleme für Fernstrecken, es gab nur den Ausweg des transformierbaren Wechselstroms. Man konnte dann mit hoher Spannung (einige kV) einen geringen Strom über weite Strecken transportieren und auf dem Fahrzeug durch Transformation den Isolieraufwand für den Motor begrenzen. Folglich brauchte man einen Wechselstrom –Reihenschluss- Kommutator –Motor. Im Vortrag ANTRIEBE wird diese Problematik eingehen dargestellt.

### 5.6.4 Probleme des Einphasen- Wechselstrom- Reihenschluss- Kommutator- Motors (EWRKM).

Ausführlicher wird das Thema im Vortrag über Bahnstrom behandelt.

Der EWRKM ist der zweitkomplizierteste Elektromotor überhaupt und wird nur noch vom Drehstrom- Reihenschluss- Kommutator- Motor übertroffen. Das hier wichtigste Problem ist die Erscheinung der sog. transformatorischen EMK (elektromotorische Kraft).

$$E = c_f f n \Phi \quad [\text{Volt}]$$

Die vorstehende Formel stellt die EMK und ihre Parameter dar. Welches Problem verbirgt sich dahinter?

In dem logischen Augenblick des Einschaltens verursacht die Wechselspannung in der Erregerwicklung im Ständer des Motors eine Spannung. Diese Spannung induziert im Läufer des Motors nach den elektrischen Gesetzmäßigkeiten des Transformators wiederum eine Spannung, eben die EMK. Der Läufer stellt also die Sekundärwicklung dar, an neben einander liegenden Kommutatorlamellen kann die induzierte Spannung abgegriffen werden.

Nun werden zwei Lamellen immer von einer Kohlebürste überbrückt, es entsteht ein Kurzschluss, der zerstörerische Folgen haben könnte, weil er von der im Netz verfügbaren Energie gespeist werden kann. Es entsteht das sog. Bürstenfeuer.

Um es zu diesen Folgen nicht kommen zu lassen, muss der entstehende Kurzschlussstrom begrenzt werden. Dies geschieht im Wesentlichen nur durch Begrenzung der Spannung, also hier der EMK.

Der Formfaktor  $c_f$  berücksichtigt einmal eine mathematische Abhängigkeit ( $2\pi$  durch  $\sqrt{2}$ ) und Maschinenkonstanten, die so klein wie möglich durch die Konstruktion gehalten werden.

Die Sekundärspannung beim Transformator wird begrenzt durch die Anzahl der Wicklungen ( $n$ ), weniger als 1 ist aber unmöglich. Versuche mit einer halben Wicklung – Folge je ein Kommutator auf jeder Seite der Wicklung auf der Motorwelle – scheiterten.

Der magnetische Fluss  $\Phi$  soll möglichst gering sein, das bedeutet, das magnetisch aktive Eisen wenig auszulasten. Folge: Viel magnetisch aktives Eisen im Ständer und Läufer, der Motor wird schwer. Alle die vorgenannten Parameter kann man auf 1 heruntersetzen oder prozentual vermindern. Die größte Verringerung konnte man aber eben nur durch die Reduzierung der Frequenz  $f$  erzielen, die Versuche begannen mit 15 Hz. Diese Reduzierung führte zu einer gerade noch transformierbaren Wechselspannung. Da die Umformer damals mit mechanischen Getrieben ausgerüstet waren, nahm man eben ein Drittel von 50 Hz und kam so auf  $16 \frac{2}{3}$  Hz. (Die historische Entwicklung wird hier übersprungen)

Mit all diesen Maßnahmen gelingt es, diese EMK auf rund 3 Volt zu begrenzen. Der daraus entstehende Kurzschlussstrom lässt sich so begrenzen, dass er kurzzeitig keine Zerstörungen anrichtet. (Bürstenfeuer).. Eine weitere Begrenzungsmaßnahme war die Einführung der sog. Spaltkohle und deren Beschichtung, so dass ein Stromfluss quer in der Kohlentasche behindert wird.

Im Augenblick des Einschaltens muss sich der Läufer des Motors mit dem Kommutator drehen können, damit die Kohlebürsten nicht über genau zwei Lamellen stehen bleiben. Würde dies geschehen, erwärmen sich die Kommutatorlamellen, dehnen sich aus – sie würden förmlich radial wachsen. Dies wiederum hätte zur Folge, dass der Kommutator nicht mehr glatt ist und die Kohlebürsten abraspeln würde, der Motor wäre zerstört. Das ist auch der elektrische, zwingende Grund für einen elastischen Antrieb

Alle Versuche mit 50 Hz- Direktmotoren scheiterten. Gerade die französischen Bahnen unternahmen viele Versuche mit Direktmotoren, erinnert sei an die Versuche auf der Höllentalbahn während der französischen Besatzungszeit nach dem 2. Weltkrieg mit den später sog. E 244. Die Erkenntnisse führten dazu, dass bei 50 Hz- Stromversorgung auf dem Fahrzeug die Spannung umgeformt (umgerichtet) werden muss. Alle Versuche mit 50 Hz- Direktmotoren (EMK 9 Volt !) scheiterten.

Zusammengefasst: Die Reduzierung der Frequenz ermöglichte den Bau leistungsstarker EWRKM als Bahnmotoren und damit die Fernstreckenelektrifizierung. Der Motor wurde dann durch die Kompensationswicklung, die Wendefeldwicklung und durch den Wendefeldparallelwiderstand nach WINTER- EICHBERG zu einem robusten Bahnmotor. In Deutschland wurde der WBM 368 von Siemens **der** Standardmotor, zuerst eingebaut in der damaligen E 10 und E 40 (später 110, 140, rund 1200 Lok). Die Lokbaureihen 111 und 151 erhielten andere Drehgestelle und Federung, um die Laufeigenschaften zu verbessern und die Seitenkräfte zu verringern. Der Motor aber war wiederum der WBM 368. Mit einer anderen Getriebeübersetzung konnten die Lok für 160 bzw. 120 km/h ausgelegt werden. Der Motor konnte das Zugförderungsprogramm abdecken. Die Lokauslegungsgeschwindigkeiten: BR 140 mit 107 km/h, BR 151 mit 120 km/h; BR 110 mit 150 km/h und BR 111 mit 160 km/h.

Man kann (mit geringen Einschränkungen) angeben, dass im WBM 368 für den EWRKM das Optimum erreicht wurde. Der WBM 372 für die E 03 und später E 103 hatte etwas mehr als 3 Volt EMK, hier wurde das Optimum für ein Maximum verlassen.



### 5.6.5 Versuchsstrecke und –kraftwerk, Geschichte

Die Passionsspiele in Oberammergau und der Badebetrieb in Bad Kohlgrub waren Ende des 19. Jahrhunderts Anlass für den Bau einer Bahn von Murnau nach O-gau. Erste Versuche mit Gleichstrom waren nicht erfolgreich. Man testete, den Gleichstromreihenschlussmotor mit Wechselstrom niederer Frequenz (damals 15 Hz) zu betreiben. Es gelang. Nach einem Zeitungsausschnitt der „Augsburger Allgemeinen“ gab es am 30.12.1904 eine Pressevorführung mit einem Triebwagen, der mit dem neuen „Bahnstrom“ fuhr und ab 01.01.1905 einen stabilen Betrieb.

Die Energie lieferte das nun mehr historische Bahn- Wasserkraftwerk Kammerl im Ammergebirge (bei Saulgrub an der Bahnstrecke nach Oberammergau). Die ersten 5 Lokomotiven sind museal erhalten, zwei sind betriebsbereit, ebenso soll das Kraftwerk besuchergerecht erhalten werden. Am 09. September 2018 wurde es erstmals der Öffentlichkeit am „Tag des offenen Denkmals“ präsentiert.

Der Betrieb auf der Strecke Murnau-Oberammergau und die Stromversorgung durch das Wasserkraftwerk Kammerl waren sehr erfolgreich. 1912 kam es auf Veranlassung der damaligen „königlich-bayrischen“ Staatsbahn mit den Staatsbahnen von Preußen, Baden und Württemberg zu einer (deutschen) Übereinkunft für die 16 2/3-Hz-Elektrifizierung, der sich dann –noch vor dem 1. Weltkrieg – Österreich, Norwegen, Schweden und die Schweiz anschlossen. In heutiger Sprache: Länder mit Wasserkraft als erneuerbare Energie.

### 5.6.6. Vor- und Nachteile des 16,7 Hz-Systems.

Das Einphasensystem kommt mit zwei Leitern im Energietransport aus, das Drehstromsystem braucht drei Leiter. Da der Strom in den beiden Leitern um 180° elektrisch versetzt fließt, haben die Leiter der Hochspannungsleitungen nur eine Spannung von 55 kV gegen Null-Potential (Erde), gegeneinander von 110 kV. Dies erleichtert die Isolation.

Das gesamte Bahnstromnetz (Hochspannungsleitungen und Oberleitung) läuft synchron und ist – von Bauzuständen und den Kuppelstellen ins Ausland abgesehen- galvanisch ein durchverbundenes Netz. Damit ist es möglich, Bremsenergie ins Netz zurück zu speisen, weil immer Verbraucher am Netz sind. Bei der Bahnstromversorgung aus dem Drehstromnetz mit Umformern oder Umrichtern wird ein Unterwerkabschnitt immer von einer Phase gespeist. An den Trennstellen muss isoliert werden, weil in den jeweils angrenzenden Oberleitungen keine Phasengleichheit vorliegt. Betrieblich: Der Hauptschalter des (der ) Fahrzeugs(e) muss ausgelegt bis das (die) Fahrzeug(e) alle unter der Oberleitung mit der anderen Phase sind.

Da nicht sichergestellt werden kann, dass in demselben Unterwerkabschnitt immer gleich große Verbraucher sind, kann nicht zurückgespeist (-gewonnen) werden. Die elektrische Bremse muss auf einen Widerstand im Fahrzeug (Gewicht) arbeiten.

Das 16,7 –Hz- Netz mit der 110 kV und 15 kV –Ebene ist ein in sich geschlossenes Netz. Es ist mit Österreich galvanisch, mit der Schweiz (andere Spannung in den Übertragungsleitungen) induktiv verbunden. Damit ist die Bahnstromversorgung unabhängig von technischen, aber auch wirtschaftlichen Problemen der allgemeinen Energieversorgung. Diese trägt nur zum Teil (über Umrichterwerke) zur Bahnstromversorgung bei. Die Verringerung der Frequenz führte für die Fahrzeuge zu schwereren

Fahrmotoren und zu schwereren Transformatoren in Fahrzeugen, Kraft- und Unterwerken und letztlich zu höheren Preisen.

### 5.6.7 Asynchronmotor

Durch regelbare Spannung und Frequenz und Ansteuern bestimmter Leistungspunkte kann der Asynchronmotor zum „Bahn“-Motor werden und behält seine unschlagbaren Vorteile.

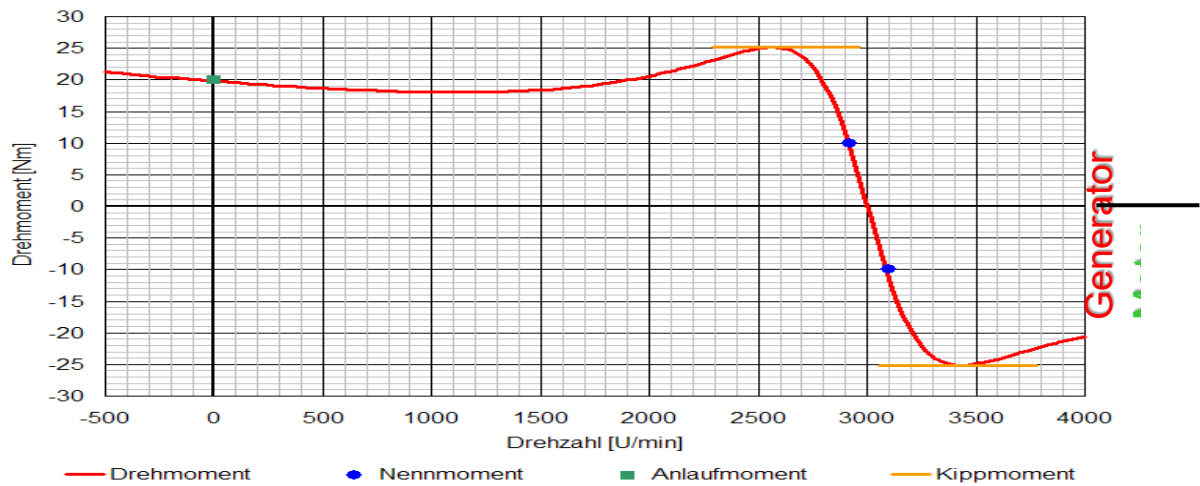


Abb.10 a

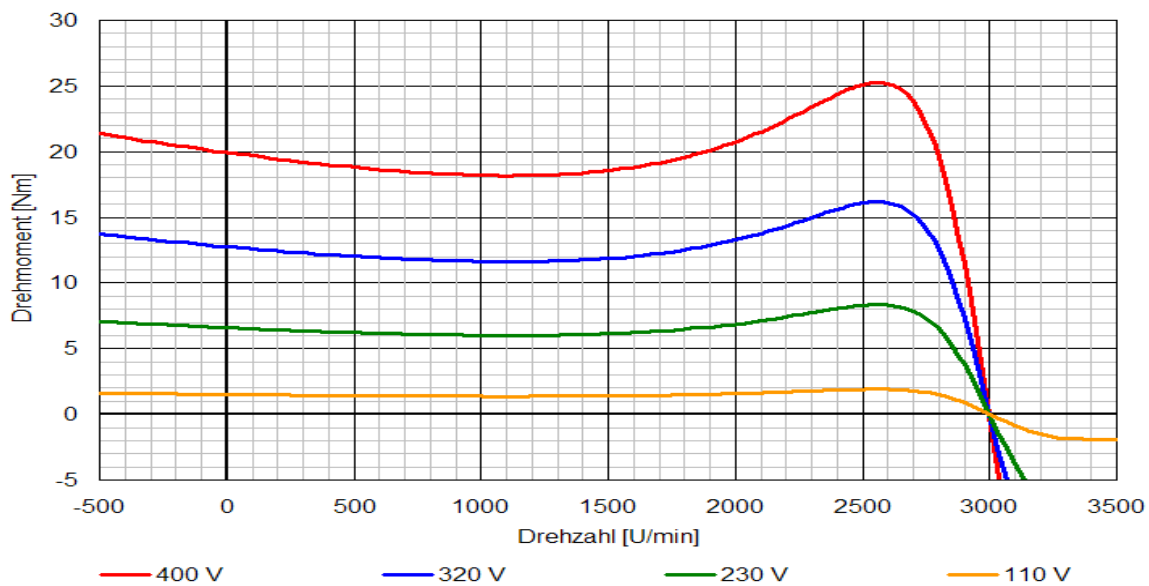


Abb. 10 b

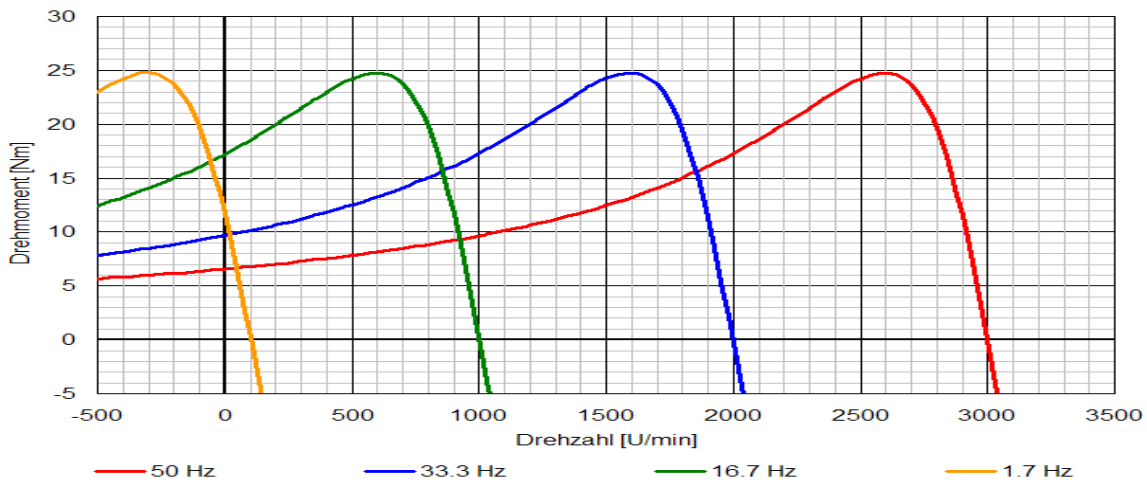


Abb.10c

Abb.10a zeigt die Kennlinie eines Asynchronmotors. Nach dem Einschalten läuft er auf die synchrone Drehzahl hoch und unter Last „schlüpft“ er und gibt ein Drehmoment ab, Belastet man ihn weiter, kommt man zum sog. Kippmoment.

Abb.10 b zeigt Kennlinien bei geänderter Spannung, Abb.10 c bei geänderter Frequenz. Schnelle Schalter und Rechner steuern nun Leistungspunkte nach einer Reihenschlusskennlinie an. Die Frequenzsteigerungen kann man hören. Beim ICE 1 (ET 401) steigt die Frequenz bis 200 km/h auf etwa 200 Hz.

Der Drehstromasynchronmotor ist in seiner Einfachheit nicht zu unterbieten, er **war** als Bahnmotor wegen seiner Nebenschlusscharakteristik und bei nur einer Betriebsfrequenz untauglich.

Dank der schnellen elektronischen Schalter (GTO, IGBT) und der leistungsfähigen Rechner kann man aus vielen Nebenschlusskennlinien durch Veränderung der Motorspannung und Motorfrequenz einzelne Arbeitspunkte so ansteuern, dass die Punkte zur Linie verbunden eine Reihenschlusscharakteristik ergeben. Damit wurde der Asynchronmotor (Kurzschlussmotor) ein Bahnmotor. Es kann als Ironie gelten: Das gleiche physikalische Prinzip, das beim EWRKM die EMK mit allen Folgen verursacht, ermöglicht beim Asynchronkurzschlussläufermotor viele technische Vorteile.

Er kann mit höherer Drehzahl betrieben werden, ist deshalb und wegen seiner Konstruktion kleiner und leichter. Die Getriebeübersetzung ist höher, die rotierenden Trägheitskräfte sind – besonders beim Bremsen – zu berücksichtigen. Umgekehrt kann bei gleichen Maßen und gleichem Gewicht mehr Leistung erzeugt werden. Der Wegfall des Kommutators macht ihn im Bau einfacher (preiswerter) und dramatisch weniger Instandhaltungsaufwendig.

Der Asynchronmotor braucht allerdings im Gleichstromzwischenkreis Kondensatoren mit viel Raum und Gewicht, schnelle Schalter und leistungsfähige Rechner. Andererseits: Die Fahrzeugtransformatoren werden kleiner, weil der Regeltrafo und das komplizierte Schaltwerk entfallen. Damit entfällt wiederum Instandhaltungsaufwand. Kurz. Die Zeit des EWRKM ist abgelaufen.

### 5.6.8. Ausblick

Ganz neu sind Stromtransportüberlegungen: Der Transport hoher Leistungen wird als HGÜ (Höchstspannungsgleichstromübertragung) angedacht. Gleichstrom hat Schalterprobleme.

In der Literatur [Zeitschrift Elektrische Bahnen] wurde eine Studie veröffentlicht, die Einphasenwechselstrom und als Übertragungsfrequenz 16,7 Hz statt HGÜ vorschlägt. Das ist ein neuer Aspekt. Wechselstrom – noch dazu ein „langsamer“ – bietet die Möglichkeit im Spannungsnulldurchgang leistungslos zu schalten. Es bleibt abzuwarten, wie sich dieser Vorschlag entwickelt.

Wenn es überhaupt keinen einzigen EWRKM mehr am Netz gibt – geben sollte - könnte man das Netz auf 50 Hz umstellen, alle Transformatoren werden dann kleiner (preiswerter), es sei denn, das Einphasensystem mit 16,7 Hz findet eine völlig neue Anwendung.

## 6 Praktische Anwendungen

### 6.1 Notwendige Zugkraft

In einer S-Bahn-Tunnelstrecke mit 40 ‰ bleibt ein Langzug voll besetzt mit Fahrgästen wegen eines Oberleitungsschadens liegen. Die Schienen sind nass (Taeffekte, wenn außerhalb des Tunnels Frost herrscht). Enger Kurvenradius.

Wie kann der Zug geborgen werden, zur Verfügung stehen 218,245 oder 29x.

Lösung:

Ein S-Bahn-Kurzzug wiegt ca. 200 t , die 218, 245 oder 29x rund 80 t.

Benötigte Zugkraft für den Kurzzug: ca. 80 kN Hangabtrieb, für Kurvenwiderstand usw. ca. 20 kN.

Bei einem KSB von ca. 20 ‰ bringen die 218, 245 oder 29x ca. 160 kN Zugkraft auf. Sie brauchen rund 40 kN Zugkraft selbst.

Folge: auf nasser Schiene und unter ungünstigen Bedingungen kann **eine** 218,245 oder **eine** 29x **einen** Kurzzug bergen. Ein Langzug muss auf jeden Fall getrennt werden, für den Vollzug sind zwei V-Lok nötig.. Die Reibwertverhältnisse können aber ungünstiger sein, hier empfiehlt es sich, auf den Rat erfahrener Praktiker zu hören.

### 6.2 Ungefährer Bremsweg

Ein Reisezug mit Magnetschienenbremsen prallt auf einem Bahnübergang mit einem Straßenfahrzeug zusammen. Die Strecke ist unübersichtlich, kurvenreich und darf mit höchstens 120 km/h an der Stelle befahren werden.

Für den Lokführer ist der BÜ erst auf 200 m zu erkennen. Die Boulevardzeitung empört sich darüber, dass der Zug auf 200 m nicht,, sondern erst 150 m nach dem BÜ zum Stillstand kommt. Trifft dies zu? Lösung:

Definitionsgemäß reichen 100 Bremsprozent bei 5 ‰ für 120 km/h Ausgangsgeschwindigkeit und 950 ( also ca. 1000) m Bremsweg. Ein Zug mit Mg- bremsen hat 210- 220 Bremsprozent. Bei 200 Bremsprozent betrüge der Bremsweg rund 550 m (10 ‰ geschätzter Zuschlag für den zurückgelegten Weg während der Bremsentwicklungszeit), bei 210-220 Bremsprozent rund 500 m. Der Zug kann also nicht auf 200 m zum Stillstand kommen. Wenn der Zug rund 150 m nach dem BÜ bereits stand, ist er langsamer gefahren.

Anderer Lösungsweg: 210-220 Bremsprozent reichen für 160 km/h auf 1000 (950)m. Nach der kinetischen Energie aus 160 bzw. 120 km/h beträgt der Bremsweg  $144/256$ stel ( quadratischer Wert von  $12/16$ tel) von 1000 also rund 580 m.

### **6.3 Streckenneigung und Widerstand**

Aus einem Grundtriebfahrzeug wird im Rahmen der Entwicklung einer Baureihenfamilien eine neue Konfiguration entwickelt. (Beispiel: aus einem vierteiligen Triebzug ein dreiteiliger).

Die Laufwiderstände des vierteiligen Zuges sind umfangreich ermittelt worden, Messungen, Auslaufversuche ... . Aus Kostengründen (u.a. wegen der Fahrzeugknappheit) wird keine Einheit des dreiteiligen ET(VT) für Messzwecke zur Verfügung gestellt. Es sollen aber hinreichend genau die Laufwiderstände ermittelt werden. Lösung:

Im normalen, täglichen Betriebseinsatz wird auf langen geraden Strecken mit definiertem und bekanntem Gefälle das Auslaufverhalten beobachtet. Wenn keine Geschwindigkeitsabnahme bei einer bestimmten und bekannten Streckenneigung und gleichen Windverhältnissen zu beobachten ist, liefert das Gefälle einen Anhaltswert für die Laufwiderstände.

---