

Lehrbrief „Fahrdynamik“ (Teil 02), Sommersemester 2020

Dr.-Ing. Martin Kache

3. Mai 2020

Vorwort

Dies ist nun der zweite Lehrbrief im Fach „Fahrtechnik“ im Sommersemester 2020. Ich hoffe, Sie sind mit dem ersten Lehrbrief gut zurechtgekommen und haben auch im OPAL keine Probleme gehabt, sich zurechtzufinden. Sollte dem nicht so sein, zögern Sie bitte nicht, mich über die unten angegebene E-Mail-Adresse zu kontaktieren.

Dieser Lehrbrief steht ganz im Zeichen der fahrdynamischen Widerstandskräfte. Die Kenntnis der auf den folgenden Seiten dargestellten Zusammenhänge ist enorm wichtig, um zu verstehen, wie sich insbesondere der Leistungs- und Energiebedarf von Zugfahrten beeinflussen lassen.

Wie Sie sicher schnell herausfinden werden, ist die Berechnung der Kräfte mathematisch gesehen vergleichsweise trivial. Die Fallstricke liegen vielmehr in der Verwendung der „richtigen“ Einheiten (insbesondere bei der Verwendung empirischer Gleichungen) sowie in der vollständigen Bilanzierung aller Kräfte.

Nehmen Sie sich deshalb bitte auch Zeit für die Bearbeitung einiger Rechenaufgaben. Sobald Sie ein wenig Routine bekommen haben, sollte die rechnerische Bestimmung von Fahrwiderstandskräften kein Problem für Sie darstellen.

Viele Grüße aus dem „Home Office“

Dr.-Ing. Martin Kache

E-Mail: martin.kache@tu-dresden.de

Dresden im April 2020

Abbildungsnachweis:

Alle Abbildungen in diesem Lehrbrief stammen, sofern nicht anders angegeben, vom Autor selbst.



Schlüssel zu den verwendeten Textelementen



Rechenbeispiele

Die mit einer Glühlampe versehenen Kästen enthalten Rechenbeispiele.



Herleitungen

Die mit einer Lupe versehenen Kästen enthalten Herleitungen von Zusammenhängen, die im Text selbst nur in abgekürzter Form behandelt werden.



Definitionen

Die mit einem Achtungszeichen versehenen Kästen enthalten wichtige Definitionen und Merksätze.



Zusatzinformationen

Die mit einer Heftklammer versehenen Kästen enthalten Zusatz- und Hintergrundinformationen, die für das Verständnis des Textteils nicht zwingend nötig sind.



Arbeitsmaterialien

Die mit dem „Baustellenschild“ versehenen Kästen enthalten Hinweise auf weitere Arbeitsmaterialien, die zu dem in diesem Dokument behandelten Themen passen.



Rechenaufgaben

Die mit einem Schraubenschlüssel versehenen Kästen enthalten Rechenaufgaben zum selber rechnen.

$x + y = z$ Gleichungen, die von zentraler Bedeutung sind, werden gerahmt (0.1)

Inhaltsverzeichnis

4. Fahrwiderstandskräfte	7
4.1. Einteilung der Fahrwiderstandskräfte	7
4.2. Spezifische Kräfte	8
4.3. Fahrzeugwiderstandskräfte	10
4.3.1. Grundwiderstandskräfte	10
4.3.2. Anfahrwiderstand	20
4.3.3. Luftwiderstandskräfte	24
4.3.4. Tunnelwiderstandskraft	41
4.3.5. Empirisch ermittelte Fahrzeugwiderstandskräfte	44
4.4. Streckenwiderstandskräfte	50
4.4.1. Charakterisierung und Einordnung des Streckenwiderstandes	50
4.4.2. Der Längsneigungswiderstand	51
4.4.3. Der Bogenwiderstand	53
4.4.4. Der effektive Streckenwiderstand	57
4.4.5. Gesamtwiderstand	62
5. Verständnisfragen	65
A. Praxisbeispiele Aerodynamik	71
A.1. Kopfparten verschiedener Fahrzeuge	71
A.2. Verkleidungen zur Reduktion des Luftwiderstandes	75
A.3. Sonstige Gestaltungsaspekte mit Bezug zur Luftwiderstandsreduzierung	79
B. Gleichungen zum spezifischen Bogenwiderstand	81
B.1. Vergleich der Berechnungsergebnisse für Werksgleise und Nebenstrecken	81
B.2. Vergleich der Berechnungsergebnisse für Hauptstrecken	82
B.3. Vergleich der Gleichungsvarianten von Hanker und Protopapadakis (Hauptstrecken)	83

4. Fahrwiderstandskräfte

4.1. Einteilung der Fahrwiderstandskräfte

Unter dem Begriff „Fahrwiderstandskräfte“ werden alle Längskräfte zusammengefasst, die die Bewegung eines Fahrzeuges entlang des Gleises hemmen. Je nachdem, ob die Kräfte vor allem von den Fahrzeugeigenschaften (z.B. der Formgebung oder der Art der Fahrwerke) abhängig sind oder von Trassierungselementen, werden sie jeweils dem Komplex der Fahrzeug- oder der Streckenwiderstandskräfte zugeschlagen (siehe Abb. 4.1). Als Faustregel gilt, dass Fahr-

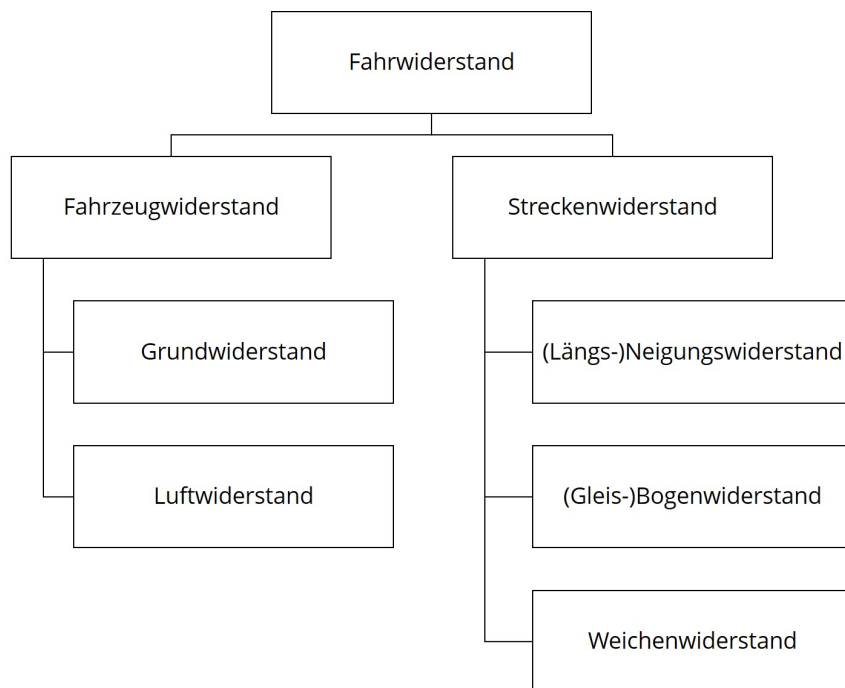


Abbildung 4.1.: Einteilung der Fahrwiderstandskräfte bei Schienenfahrzeugen

zeuge gleicher Masse an einem beliebigen Ort einer Eisenbahnstrecke weitgehend denselben Streckenwiderstand erfahren. Der auftretende Fahrzeugwiderstand wird hingegen maßgeblich von der Geschwindigkeit und der konkreten Fahrzeugkonstruktion beeinflusst. Die effektive Wirkrichtung der Fahrzeugwiderstandskräfte ist immer der Bewegungsrichtung entgegengesetzt, während sie bei Streckenwiderstandskräften in starken Gefällen auch mit der Fahrtrichtung identisch sein kann.

4.2. Spezifische Kräfte

In der Fahrdynamik wird häufig mit spezifischen Kräften gerechnet. „Spezifisch“ bedeutet dabei in diesem Kontext: auf die Gewichtskraft der Fahrzeuge bezogen. Der Sinn dieser Vorgehensweise liegt in der Abstrahierung von konkreten Fahrzeugen und der Realisierung einer besseren Vergleichbarkeit der Fahrwiderstände unterschiedlicher Fahrzeuge und Fahrzeugkategorien.

Man ging überdies lange Zeit vereinfachend davon aus, dass die Fahrzeugwiderstände direkt proportional zur Masse eines Fahrzeuges sind, sodass sich beispielsweise der Fahrzeugwiderstand eines Güterwagens verdoppelt, wenn sich dessen Masse verdoppelt. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass diese einfache Beziehung die Realität nur ungenügend widerspiegelt.

Die Definition der spezifischen Kräfte wird in Gleichung 4.1 noch einmal mathematisch formuliert. Spezifische Kräfte werden in der Fahrdynamik mit den gleichen Symbolen wie die absoluten Kräfte belegt, allerdings wird ein Kleinbuchstabe statt eines Großbuchstabens verwendet. Der absoluten Kraft F ist somit eine spezifische Kraft f zugeordnet.

$$f = \frac{F}{mg} \quad (4.1)$$

Ein wichtiger und stets zu beachtender Aspekt bei der Rechnung mit spezifischen Kräften ist die Dimension (Einheit), in der diese angegeben werden. Je nachdem, ob die spezifische Kraft in „Newton“ oder „Kilonewton“ angegeben und die Fahrzeugmasse in „Kilogramm“ oder „Tonnen“ ausgedrückt wird, ergeben sich unterschiedliche Einheiten für die spezifischen Kräfte (siehe Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1.: Mögliche Einheiten der spezifischen Kraft

Einheit von F	Einheit von m	Einheit von f
N	kg	1
kN	kg	t/kg
N	t	N/kN = kg/t = 1/1000 = ‰
kN	t	1

Die Angabe spezifischer Kräfte in der Dimension N/kN (= N/(1000·N) = ‰) hat den Reiz, dass der Betrag von Fahrzeugwiderstandskräften anschaulich mit einer Längsneigung verglichen werden kann, die an dem jeweiligen Fahrzeug dieselbe Widerstandskraft erzeugen würde (siehe Beispiel im Infokasten).

Im Rahmen der Lehrveranstaltung (siehe auch Formelsammlung) wird die einheitslose Angabe von spezifischen Widerstandskräften bevorzugt (in Tabelle 4.1 fett hervorgehoben). Diese hat den Vorteil, dass die absolute Widerstandskraft sowohl in N als auch in kN berechnet werden kann, je nachdem, in welcher Einheit (kg oder t) die Fahrzeugmasse in Gleichung 4.1 eingesetzt wird.



Spezifische Kräfte

In der Fahrdynamik ist es üblich, mit spezifischen, das heißt auf die Gewichtskraft der betrachteten Fahrzeuge bezogenen, Kräften zu arbeiten. Diese sind entweder dimensionslos oder sie weisen bei einem um den Faktor 1000 erhöhten Zahlenwert die Einheit N/kN auf.

💡 Zum Umgang mit spezifischen Kräften

Betrachtet wird der Mittelwagen eines ICE 1 (siehe Bild). Er weist eine Masse von 51,8 t auf.



Aus Versuchen ist bekannt, dass ein solcher Wagen der Bewegung auf geradem, ebenem Gleis bei geringen Geschwindigkeiten eine Kraft von ca. 310 N entgegensetzt. Welcher spezifischen Widerstandskraft entspricht dies nun?

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{F}{mg} \\
 &= \frac{310 \text{ N}}{51800 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,00061 \\
 &= \frac{0,31 \text{ kN}}{51,8 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,00061 \\
 &= \frac{310 \text{ N}}{51,8 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,61 \text{ N/kN}
 \end{aligned}$$

Wie ersichtlich ist, unterscheiden sich die Zahlenwerte bei der Angabe in der bezogenen Dimension „N/kN“ um den Faktor 1000 von den dimensionslosen Angaben der spezifischen Kräfte. Dies ist im praktischen Umgang unbedingt zu beachten. Im Rahmen dieser Lehrveranstaltung werden Ihnen spezifische Kräfte immer in der einheitenlosen Form als „Widerstandszahlen“ begegnen.

Mit Hilfe der folgenden simplen Überlegung können Sie aber ggf. selbst eine Umrechnung vornehmen:

$$0,001 \hat{=} 1/1000 \hat{=} 1 \text{ ‰} \hat{=} 1 \text{ N/kN}$$

Der betrachtete ICE-Mittelwagen weist also bei geringen Geschwindigkeiten eine Fahrzeugwiderstandskraft auf, die ca. 0,6 ‰ seiner Gewichtskraft entspricht. Anders ausgedrückt würde die selbe Widerstandskraft entstehen, wenn man den Wagen in eine Längsneigung von 0,6 ‰ stellen würde.

Umgekehrt bedeutet dies aber, dass ein solcher Wagen, würde er ungebremst und unsichert in einem sehr kleinen Gefälle von nur einem Promille abgestellt werden, von selbst entrollen würde. (Wenn Sie sehr gute Augen haben, können Sie vielleicht die Hemmschuhe an dem in Blickrichtung hinteren Drehgestell auf dem Foto erkennen...)

4.3. Fahrzeugwiderstandskräfte

4.3.1. Grundwiderstandskräfte

Gemäß der in Abschnitt 4.1 dargestellten Fahrwiderstandshierarchie (Abbildung 4.1) lässt sich der Fahrzeugwiderstand F_{WF} in die Unterkategorien **Grundwiderstand** F_{WF0} und **Luftwiderstand** F_{WFL} aufteilen. Der Grundwiderstand ist an das rollende Rad bzw. die rollenden Radsätze gebunden und spielt vor allem im unteren Geschwindigkeitsbereich eine Rolle, während bei höheren Geschwindigkeiten die Luftwiderstandskräfte dominieren. Abbildung 4.2 demonstriert dies beispielhaft für die Zugarten Hochgeschwindigkeitszug (HGV), lokbespannter IC-Zug (IC), elektrischer Nahverkehrs-Triebzug (NV) und Güterganzzug (Gz).

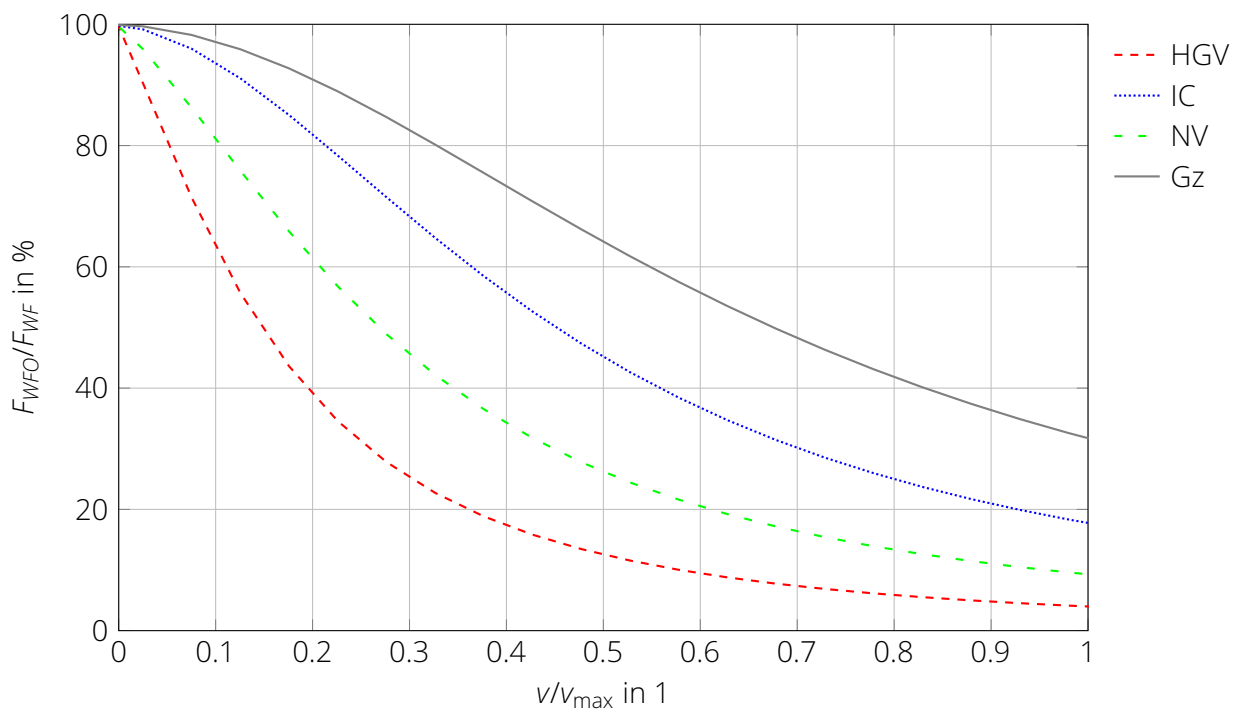


Abbildung 4.2.: Anteil des Grundwiderstandes am gesamten Fahrzeugwiderstand in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Hochgeschwindigkeitszüge sind für hohe Geschwindigkeiten und geringe Fahrzeugwiderstände ausgelegt. Dies betrifft sowohl die Formgebung (Luftwiderstand) als auch die Fahrwerke (Grundwiderstand). Da sie in sehr hohe Geschwindigkeitsbereiche vorstoßen, sinkt der Anteil des Grundwiderstandes am Fahrzeug-Gesamtwiderstand im oberen Geschwindigkeitsbereich auf unter 10 % ab. Eine weitere Optimierung dieser Züge bezüglich ihres Fahrzeugwiderstandes läuft deshalb auf eine Verbesserung ihrer aerodynamischen Eigenschaften hinaus.

Nahverkehrszüge weisen häufig Jakobs-Drehgestelle auf, wodurch sich der Grundwiderstand mittels Reduktion der Anzahl von Radsätzen verringern lässt. Bei ihnen ist deshalb auch ein vergleichsweise starker Abfall des anteiligen Grundwiderstandes festzustellen.

Am anderen Ende des in Abbildung 4.2 dargestellten Spektrums befinden sich die Güterzüge. Diese weisen im Allgemeinen eine große Anzahl von Radsätzen sowie hohe Radsatzlasten auf und erreichen im Vergleich die geringsten Geschwindigkeiten. Deshalb ist der Anteil des Grundwiderstandes am gesamten Fahrzeugwiderstand im Vergleich am höchsten.

Der Grundwiderstand selbst lässt sich auf Basis der Ursachen seiner Entstehung wiederum in drei Teilkkräfte aufteilen (siehe Abbildung 4.3). In den folgenden Unterabschnitten werden die

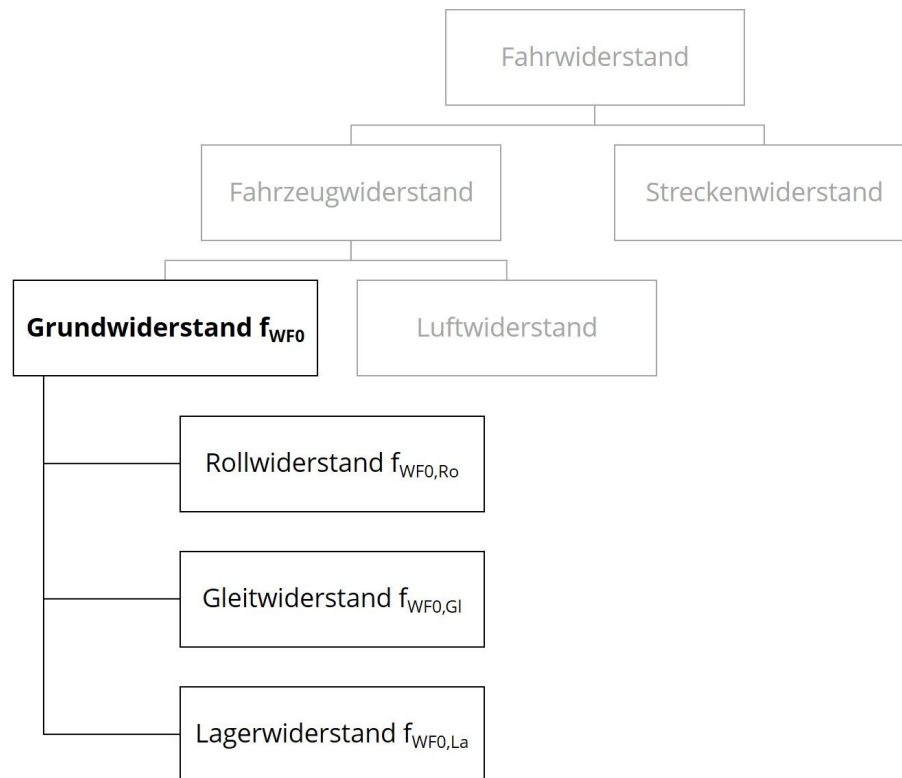


Abbildung 4.3.: Komponenten des Grundwiderstandes bei Eisenbahnfahrzeugen

Entstehungsursachen dieser drei Teilwiderstandskräfte skizziert und Anhaltspunkte für ihre rechnerische Abschätzung gegeben.

Zunächst wird aber der in Abbildung 4.3 dargestellte Zusammenhang in Gleichung 4.2 nochmal mathematisch formuliert:

$$F_{WF0} = mg \cdot f_{WF0} = mg \cdot (f_{WF0,Ro} + f_{WF0,Gl} + f_{WF0,La}) \quad (4.2)$$

Ermittlung des Grundwiderstandes

Die Berechnung des Grundwiderstandes aus den drei Teilkomponenten Roll-, Gleit- und Lagerwiderstandskraft ist eher akademischer Natur. Sie ist vor allem dann sinnvoll, wenn es im Kontext einer Optimierung etwa darum geht, den Grundwiderstand von Fahrzeugen zu verringern. Dazu müssen die Einflussfaktoren auf die Teilwiderstandskräfte und ihr Anteil am gesamten Grundwiderstand analysiert werden.

Für praktische Berechnungen, beispielsweise im Kontext der Analyse von Rangierbewegungen, wird der Grundwiderstand summarisch ermittelt. Eine Möglichkeit, dies zu tun, haben Sie bereits im ersten Lehrbrief kennengelernt, als der Versuch zur Bestimmung des Massenfaktors dargestellt wurde.

Die zweite Möglichkeit, den Grundwiderstand von Schienenfahrzeugen zu ermitteln, stellt der „Seilwindenversuch“ dar. Ein Fahrzeug wird dabei auf geradem, ebenem Gleis (vorzugsweise in einer Halle) mit konstanter, geringer Geschwindigkeit an dem Seil einer Seilwinde gezogen, die sich in Gleismitte befindet. Über das an der Seilwinde aufgebrachte Drehmoment oder die Zugkraft im Seil kann auf die Grundwiderstandskraft geschlossen werden.

Rollwiderstandskräfte

Rollwiderstandskräfte haben ihre Ursache in den Wechselwirkungen zwischen den mit Gewichtskräften belasteten Rädern/Radsätzen und dem Fahrweg, auf dem sie sich bewegen. Bei einem ideal runden und unbelasteten Rad, das sich auf einem unelastischen Fahrweg entlang bewegt, würden Radaufstandspunkt und Momentanpol (blauer Punkt in Abb. 4.4) zusammenfallen (und genau auf der senkrechten Symmetrieachse des Rades liegen), wie der linke Teil von Abbildung 4.4 illustriert.

Tatsächlich werden die Räder jedoch mit der Gewichtskraft mg beaufschlagt und verformen sich dadurch elastisch. Die Berührung von Rad und Schiene ist deshalb nicht punktförmig sondern flächig und weist eine näherungsweise elliptische Form auf. Der Momentanpol, um den das Rad rotiert (abrollt) „wandert“ deshalb bei einem belasteten Rad aus der senkrechten Symmetrieachse des heraus und verlagert sich in ein Stück weit nach vorn (bezüglich der Fahrtrichtung). Auf diese Weise entsteht ein Hebelarm e (siehe mittlerer Teil von Abbildung 4.4 mit dem die Reaktionskraft ein Gegendrehmoment (um den Radmittelpunkt) zum Antriebsmoment aufbaut. Dieses „Widerstandsdrehmoment“ ist umso höher, je größer der Hebelarm e ist. Dieser Hebelarm vergrößert sich weiter, wenn der Untergrund elastisch ist und sich un-

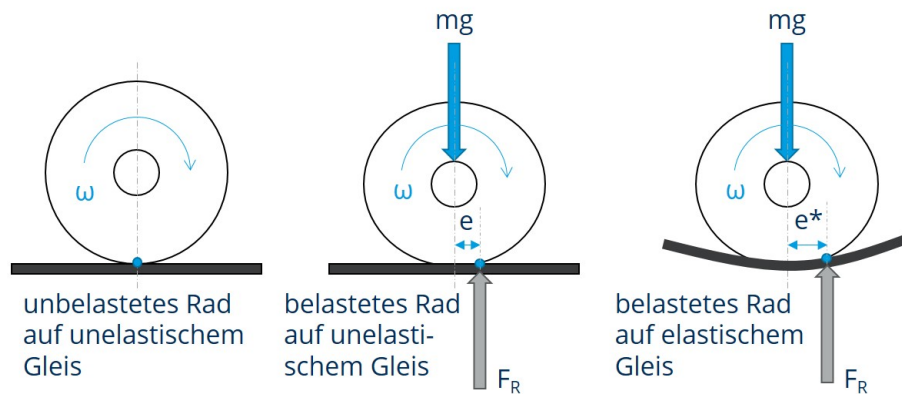


Abbildung 4.4.: Vereinfachte Darstellung der Mechanismen bei der Entstehung des Rollwiderstandes

ter der Last der Radsätze ebenfalls verformt (rechter Teil der Abbildung 4.4 mit Hebelarm e^*). Damit ist der Rollwiderstand nicht nur von Fahrzeugparametern, sondern streng genommen auch von der Beschaffenheit des Oberbaus abhängig. Tatsächlich haben Versuche gezeigt, dass sich der Grundwiderstand derselben Fahrzeuge verändert, wenn sie auf unterschiedlichen Gleiskörpern fahren (z.B. sandiger Untergrund und Holzschwellen vs. Betonschwellen und stark verdichteter Untergrund vs. Fahrt auf fester Fahrbahn).

Ferner ist zu beachten, dass die periodische elastische Verformung von Fahrzeug und Fahrweg nicht vollständig verlustlos erfolgt, sondern durch die innere Reibung in den beteiligten Körpern ein Teil der Energie in Wärme umgesetzt wird und somit dem Transportprozess entzogen wird. Bezüglich der Räder spricht man deshalb auch vom „Walkwiderstand“, weil die Räder beim Abrollen unter Last „durchgewalkt“ werden. Bei Schienenfahrzeugen mit ihren stählernen Rädern spielt dieser Widerstandsanteil eine sehr geringe Rolle, bei gummiereiften Straßenfahrzeugen erwärmen sich jedoch die Reifen während der Fahrt unter Umständen merklich. Bei zu geringem Reifendruck kann die Reifentemperatur sogar soweit ansteigen, dass sich der Gummi zersetzt (Qualmbildung) und die Reifen schlussendlich in Flammen aufgehen, wie auf Autobahnen vor allem bei havarierten Lkws regelmäßig beobachtet werden kann.

Wende gibt in [19] unter Bezugnahme auf Prüfstandsversuche von Sauthoff folgende Gleichung:

chung für den Rollwiderstand von Schienenfahrzeugen an:

$$f_{WFO,R0} = f_{WFO,R0,0} + 0,0006 \left(\frac{v}{100} \right)^2. \quad (4.3)$$

Die Geschwindigkeit ist in diese empirische Gleichung mit der Einheit km/h einzusetzen. Das quadratische Glied der Gleichung 4.3 wird in der Praxis meist ignoriert, da eine grobe Abschätzung des vergleichsweise sehr geringen Rollwiderstandes häufig vollkommen ausreichend ist.

Das konstante Glied $f_{WFO,R0,0}$ in Gleichung 4.3 ist nicht für alle Fahrzeuge gleich, sondern hängt von weiteren Parametern ab. Zu diesen Parametern zählen der Nenndurchmesser der Räder, die auf die Räder wirkende Gewichtskraft und der Radius der Schienenkopfrundung r_{SK} . In Abbildung 4.5 wird beispielhaft gezeigt, wie $f_{WFO,R0,0}$ von der Radfahrmasse und damit von der auf das Rad wirkenden Gewichtskraft abhängt. Die als Parameter genutzten Werte für den Radius der Schienenkopfrundung r_{SK} spiegeln den praktisch auftretenden Wertebereich ab. Somit ergibt sich aus dem Diagramm ein Band von Werten, die der spezifische Rollwiderstand bei der Geschwindigkeit 0 $f_{WFO,R0,0}$ bei einem Fahrzeug mit dem Rad-Nenndurchmesser von 1000 mm annehmen kann.

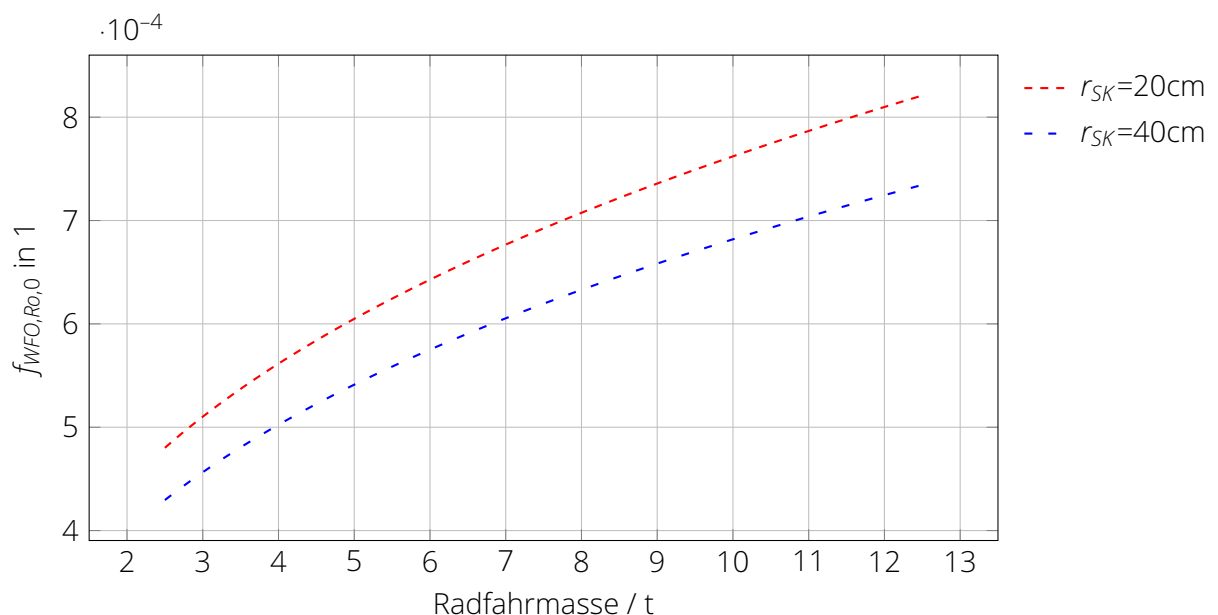


Abbildung 4.5.: Abhängigkeit des Rollwiderstandes von der Radfahrmasse nach Wende [19]

Anmerkung: Es wurde ein Radnenndurchmesser von 1000 mm zugrunde gelegt.



Rollwiderstand

Der Rollwiderstand von Schienenfahrzeugen ist aufgrund der Paarung von Stahlschienen und Stahlrädern sehr gering (ca. Faktor 10 gegenüber Straßenfahrzeugen).

Mittels bei Prüfstandsversuchen ermittelter empirischer Gleichungen lässt sich der spezifische Rollwiderstand von Schienenfahrzeugen abschätzen.

Zu den Parametern, die Einfluss auf den Rollwiderstand haben, zählen die Geschwindigkeit (meist vernachlässigt), der Raddurchmesser, die auf das Rad wirkende Gewichtskraft sowie die Rundungsradius der Schienenköpfe.

Gleitwiderstandskräfte

Gleitwiderstandskräfte entstehen hauptsächlich dadurch, dass die Radsätze auf dem Gleis nicht optimal abrollen können und dadurch in der Rad-Schiene-Kontaktfläche kleine und kleinsten Relativ- bzw. Gleitbewegungen entstehen. Die Ursache dafür sind in den folgenden Umständen zu suchen:

- eine Schrägstellung des Radsatzes bezüglich der Gleisachse (siehe Abbildung 4.6),
- eine Drehzahlkopplung von Radsätzen (siehe Abbildung 4.7) sowie
- Querkraftwirkungen auf die Radsätze, die aus der Spurführung und Gleislagefehlern resultieren.

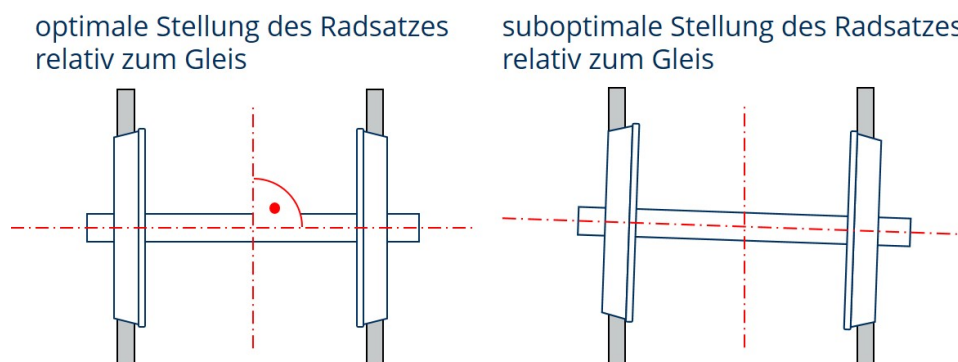


Abbildung 4.6.: Entstehung des Gleitwiderstandes durch suboptimale Stellung der Radsätze bezüglich des Gleises

Von einer Schrägstellung des Radsatzes bezüglich des Gleises kann im Grunde immer ausgegangen werden. Durch die geschickte Konstruktion der Fahrwerke eines Schienenfahrzeuges ist es jedoch möglich, diese Schrägstellung und damit die Gleitwiderstandskomponente des Grundwiderstandes zu minimieren. Insbesondere die Radsatzführung, also die mechanische Anbindung der Radsätze (selten: der Räder) an den Drehgestellrahmen (selten: den Wagenkasten) spielt hier eine wichtige Rolle. Allerdings wird auch die beste Konstruktion Toleranzen und Spiele aufweisen, die dazu führen, dass die Rotationsachse der Radsätze nicht in einem exakten rechten Winkel zur Gleisachse steht (Anmerkung: es geht um Winkel $\ll 1^\circ$). Diese werden sich durch den unvermeidlichen Verschleiß der mechanischen Komponenten der Radsatzanbindung in der Regel vergrößern und von Fahrzeug zu Fahrzeug unterschiedlich sein. Es ist deshalb damit zu rechnen, dass die Gleitwiderstandskräfte (und damit auch der gesamte Grundwiderstand) von Fahrzeugen innerhalb weitgehend baugleicher Flotten streuen kann. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor auf die entstehende Gleitwiderstandskraft ist der Grad der Drehzahlkopplung bei Radsätzen. Bei nicht angetriebenen Fahrzeugen spielt dies keine Rolle, sodass diese im Vergleich zu Triebfahrzeugen tendenziell geringere Gleitwiderstandskräfte aufweisen.

Die Kopplung der Radsatzdrehzahlen kann bei angetriebenen Fahrzeugen auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Einerseits ist die „klassische“ Variante denkbar, bei der Kuppelstangen genutzt werden, um ein Drehmoment auf alle Treibräder zu übertragen (Dampflok, Altbau-Rangierlokomotiven), wobei diesen auch gleichzeitig dieselbe Drehzahl aufgeprägt wird. Andererseits ist auch bei den Antriebssträngen dieselhydraulischer Triebfahrzeuge ein ähnlicher Effekt zu beobachten. Die mechanische Kopplung der Radsätze erfolgt hier über Gelenkwellen und Radsatzgetriebe.

Ferner ist neben der mechanischen auch eine elektrische Kopplung von Radsätzen denkbar, wenn verschiedenen Fahrmotoren durch die Leittechnik oder die Drehzahlsteuerung gleiche

Drehzahlen zugewiesen werden.

Allen wie auch immer gruppierten Antrieben ist gemein, dass verschiedenen Radsätzen, deren Durchmesser immer geringe Abweichungen voneinander aufweisen werden, dieselbe Drehzahl aufgeprägt wird (siehe Abbildung 4.7). Die Tangentialgeschwindigkeit v_T in der Radaufstandsfläche ergibt sich stets als Produkt aus Winkelgeschwindigkeit (bzw. Drehzahl) und dem jeweiligen Raddurchmesser:

$$v_T = \omega \cdot r = 2\pi n \cdot r \quad (4.4)$$

Die durch die Radienabweichungen auf Gleisebene hervorgerufenen Weg- und Geschwindigkeitsdifferenzen müssen durch Gleitbewegungen im Rad-Schienenkontakt kompensiert werden, wodurch Gleitwiderstandskräfte entstehen.

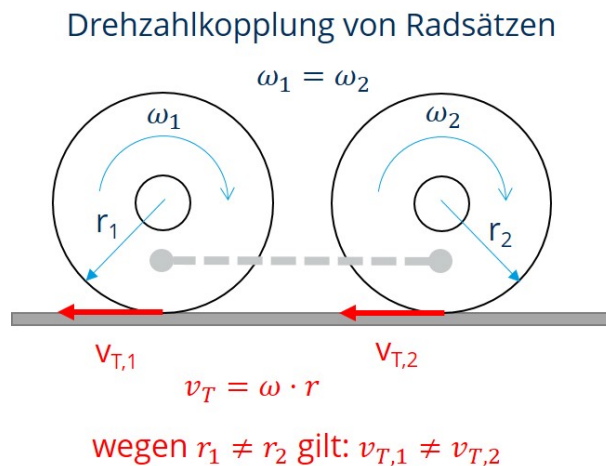


Abbildung 4.7.: Entstehung des Gleitwiderstandes durch Drehzahlkopplung von Radsätzen

Der spezifische Gleitwiderstand kann in der Regel nur experimentell ermittelt werden. Für verschiedene Fahrzeugkonfigurationen existieren überdies Erfahrungswerte. So gibt Wende in [19] für Wagen und dieselhydraulische Lokomotiven folgende Wertebereiche für die spezifische Gleitwiderstandskraft $f_{WF0,GI}$ an:

- Wagen: $f_{WF0,GI} = 0,0005 \dots 0,0010$
- dieselhydraulische Lokomotiven: $f_{WF0,GI} = 0,0020 \dots 0,0025$

An gleicher Stelle sind auch die experimentell ermittelten Werte für die Baureihen 143 und 346 der DB AG erwähnt (siehe Abbildung 4.8).



Gleitwiderstand

Die Entstehung des Gleitwiderstandes ist auf das imperfekte Abrollen der Radsätze auf den Schienen zurückzuführen. Die Ursache dieser Imperfektionen liegt u.a. in der (minimalen) Schrägstellung der Radsätze im Gleis oder in der Drehzahlkopplung von angetriebenen Radsätzen. Der Gleitwiderstand kann einen beträchtlichen Anteil am Grundwiderstand von Schienenfahrzeugen haben und durch geeignete Fahrwerkskonstruktionen (Radsatzanlenkung) und Antriebskonfigurationen (Vermeidung von Gruppenantrieben) minimiert werden. Der Gleitwiderstandsanteil von Wagen ist generell niedriger anzusetzen als bei Triebfahrzeugen.



(a) BR 143 - spezifischer Gleitwiderstand: 0,0015 (entspricht ca. 1,2 kN)



(b) BR 346 - spezifischer Gleitwiderstand: 0,0030...0,0040 (entspricht ca. 1,3...2,2 kN)

Abbildung 4.8.: Experimentell ermittelte spezifische Gleitwiderstandskräfte (zitiert nach [19])

Lagerwiderstandskräfte

Die Schnittstelle zwischen den (rotierenden) Radsätzen und den lediglich translatorisch bewegten Teilen der Fahrwerke sind die Radsatzlager (bei Einzelradfahrwerken trifft dies sinngemäß zu). Bis in die Mitte des vorigen Jahrhunderts war die Lagerung von Eisenbahnradsätzen durch Gleitlager geprägt. Diese waren wartungsaufwendig und hatten die betrieblich unangenehme Eigenschaft, dass sich ein optimaler Schmierzustand physikalisch bedingt erst einstellen konnte, wenn eine bestimmte Radsatzdrehzahl erreicht wurde¹.

Nahezu alle heute verkehrenden Schienenfahrzeuge (Museumsfahrzeuge ausgenommen) weisen Wälzlager auf. Diese sind nicht nur sehr wartungsarm und sehr zuverlässig, sie weisen zudem auch nur sehr geringe Verluste im gesamten relevanten Drehzahlspektrum auf.

Wende gibt in [19] für die beiden genannten Lagertypen folgende Werte an:

- Wälzlager: $f_{WF0,La} = 0,0002$
- Gleitlager: $f_{WF0,La} = 0,0006$.

Bei einem voll beladenen Güterwagen mit 4 Radsätzen und 22,5 t zulässiger Radsatzfahrmasse ergäbe sich damit eine durch die Wälzlager verursachte Teilwiderstandskraft von:

$$F_{WF0,La} = mg \cdot f_{WF0,La} = 4 \cdot 22,5 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,0002 = 0,176 \text{ kN} \approx 180 \text{ N}$$

Zu beachten ist ggf. die Temperaturabhängigkeit der Lagerwiderstandskraft. Insbesondere bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen kann es dazu kommen, dass die in den Lagern verwendeten Schmierstoffe nicht mehr optimal wirken können (z.B. durch die Zunahme der Viskosität) und ein erhöhter Lagerwiderstand auftritt. Dies ist insbesondere bei Rangiervorgängen im Winter zu beachten.



Lagerwiderstand

Der Lagerwiderstand ist auf die innere Reibung in den Radsatzlagern zurückzuführen. Die in den Lagern dissipierte Energie wird dem Transportvorgang entzogen und muss deshalb mit berücksichtigt werden. Es gilt zu beachten, dass Radsatzlager bei sehr niedrigen Temperaturen höhere Widerstandskräfte generieren können.

¹Näheres hierzu finden Sie in der einschlägigen Maschinenbau-Fachliteratur, wenn Sie nach „Hydrodynamischen Gleitlagern“ und „Stribeck-Kurve“ suchen

Zusammenfassung: Grundwiderstand

In den vorstehenden Unterkapiteln wurden die den Grundwiderstand von Schienenfahrzeugen konstituierenden Teilwiderstände diskutiert. Die Regionen der Fahrwerke, wo die genannten Widerstandskräfte entstehen, sind in Abbildung 4.9 abschließend noch einmal dargestellt.

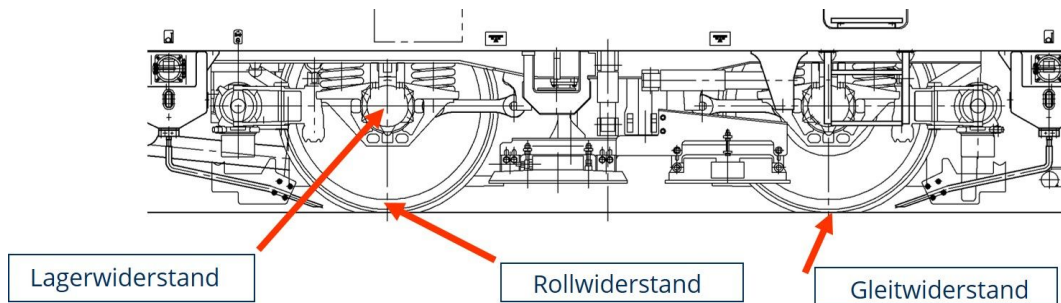


Abbildung 4.9.: Entstehung der Grundwiderstandsanteile

Für fahrdynamische Berechnungen sind in der Regel nicht die Teilwiderstandskräfte von Bedeutung, sondern die summierte Grundwiderstandskraft. Aufgrund der vielfältigen Einflussgrößen ist in der Realität mit einer breiten Streuung der spezifischen Grundwiderstandskräfte zu rechnen. In der Rangiertechnik wird explizit zwischen „Gutläufern“ (Wagen mit geringem Grundwiderstand) und „Schlechtläufern“ (Wagen mit hohem Grundwiderstand) unterschieden. Zudem wird bei der Modellierung von Rangierbewegungen mit einer Zunahme des spezifischen Grundwiderstandes „bei Minusgraden“ um 0,0005 je 5 K Temperaturdifferenz zu 0 °C gerechnet (siehe [19], S. 114).

Da der Grundwiderstand maßgeblich von der Fahrwerksbauart und auch von der Bauart des Oberbaus beeinflusst wird, sind die älteren der in der fahrdynamischen Fachliteratur vorzufindenden Anhaltswerte für den summierten Grundwiderstand kritisch zu hinterfragen. Neuere Untersuchungen stammen zum Beispiel von Lukaszewicz [10] und Szanto [18] (siehe Infokästen).

Versuche in Australien mit Schüttgutwagen

Szantos hat 2016 auf einer Konferenz die Ergebnisse von Untersuchungen veröffentlicht, die unter anderem dazu dienen, die Gültigkeit älterer empirischer Gleichungen für die Widerstandskräfte von Wagenzügen an dem aktuellen Fahrzeugmaterial zu überprüfen [18].

Untersuchungsgegenstand waren Eisen-Erz und Kohle-Züge in Australien. Im Rahmen der Studie wurden das Geschwindigkeitsprofil sowie der zeitliche Verlauf der generierten Zugkräfte aus der Fahrzeuggleittechnik ausgelesen und dokumentiert. Anschließend wurde mittels fahrdynamischer Simulation versucht, die Fahrtverläufe nachzuvollziehen. Dabei wurden die Fahrzeugwiderstandskräfte so lange variiert, bis simulierter und aufgezeichneter Geschwindigkeitsverlauf möglichst gut übereinstimmten.

Für Eisenerzwagen mit 4 Radsätzen wurde im beladenen Zustand (160 t Gesamtmasse **eines** Wagens) bei niedrigen Geschwindigkeiten eine Grundwiderstandskraft von 1120 N ermittelt. Das entspricht einem spezifischen Grundwiderstand von 0,00071.

Für unbeladene Wagen (23 t) gleichen Typs wurden hingegen ca. 493 N ermittelt, was einem spezifischen Grundwiderstand von 0,00218 entspricht.

Dies ist ein Indiz dafür, dass die bei der Definition spezifischer Widerstandskräfte postulierte Annahme, dass die Fahrzeugwiderstandskräfte direkt proportional zur Gewichtskraft der Fahrzeuge sind, nicht uneingeschränkt zutrifft. Während die Fahrzeugmasse des unbeladenen Fahrzeuges im erwähnten Beispiel um etwa den Faktor 7 geringer ist als die des voll

beladenen Fahrzeuges, verringert sich dessen Grundwiderstand nur um den Faktor 2,3.

Versuche in Schweden mit verschiedenen Zugkategorien

Im Rahmen einer Dissertation hat Lukaszewicz in Schweden umfangreiche Versuche zur Ermittlung der Fahrzeugwiderstandskräfte von Zügen des Personen- und Güterverkehrs durchgeführt [10, 11].



Für die schwedischen Hochgeschwindigkeitszüge X2 (siehe Bild) wurde im Rahmen der Versuche eine spezifische Grundwiderstandskraft von $f_{WFO} \approx 0,00054...0,00059$ ermittelt. Auf einer anderen Strecke, die sich hinsichtlich der verbauten Schienen (50 kg/m statt 60 kg/m) sowie der Schienenunterlagen (Hartgummi statt Weichgummi) von der erstgenannten Strecke unterschied, stieg dieser Wert auf $f_{WFO} \approx 0,00064$.

Ähnliche Ergebnisse traten zutage, als ein lokbespannter Reisezug aus 9 Schnellzugwagen einmal auf einer Strecke mit geschweißten Schienen (50 kg/m) und Betonschwellen (Strecke 1) und einmal auf einer Strecke mit gelaschten Schienen (43 kg/m) und Holzschwellen (Strecke 2) vermessen wurde. Auf Strecke 1 wurde für den gesamten Zug ein spezifischer Grundwiderstand von $f_{WFO} \approx 0,00094$ ermittelt, während dieser auf Strecke 2 $f_{WFO} \approx 0,0011$ betrug.

Die schwedischen Versuche stützen damit die These, dass sich die Art (und wohl auch die Qualität) des Oberbaus auf den Grundwiderstand der Fahrzeuge auswirken können, auch wenn dies in den Berechnungsansätzen meistens nicht widergespiegelt wird.

Bezüglich des Grundwiderstandes von Güterwagen lassen sich auch aus den Ergebnissen von Lukaszewicz ähnliche Schlüsse ziehen wie aus den Versuchen von Szanto. Bei den schwedischen Versuchen wurde der Grundwiderstand derselben Güterwagen für die Zustände „leer“, „teilbeladen“ und „vollbeladen“ ermittelt. Auch hier zeigte sich, dass der spezifische Grundwiderstand der vollbeladenen Wagen mit $f_{WFO} \approx 0,0010$ am geringsten war und bei den leeren Wagen auf einen Wert von $f_{WFO} \approx 0,0014$ anstieg (der Wert für die teilbeladenen Wagen: $f_{WFO} \approx 0,0012$).

Es zeigt sich also auch hier wieder die Notwendigkeit, bei fahrdynamischen Berechnungen die Randbedingungen genau zu analysieren bzw. zu definieren und dann nach geeigneten Anhaltswerten für die Fahrwiderstände zu suchen.



Rechenbeispiel Grundwiderstand

Es soll ermittelt werden, welche Leistung beim Rangieren ($v_{\max}=25 \text{ km/h}$) einer Wagengruppe aus 10 voll beladenen Güterwagen (jeweils mit 4 Radsätzen) benötigt wird. Die maximal zulässige Radsatzlast der Wagen beträgt 20 t.

1. Ansatz für den Leistungsbedarf:

$$P_{WFO} = F_{WFO} \cdot v$$

2. Ansatz für den Grundwiderstand der Wagengruppe:

$$F_{WFO} = m_{WG} \cdot g \cdot (f_{WFO, Ro} + f_{WFO, Gl} + f_{WFO, La})$$

3. Abschätzung des Rollwiderstandes:

- Die Radfahrmasse beträgt 10 t. Unter Nutzung des Diagrammes in Abbildung 4.5 wird $f_{WFO, Ro, 0}$ auf 0,00072 geschätzt. (Eigentlich weisen Güterwagenräder kleinere Durchmesser als 1000 mm auf, aber das soll an dieser Stelle vernachlässigt werden.) Damit ergibt sich für den Rollwiderstand bei 25 km/h (vgl. Gl. (4.3)):

$$f_{WFO, Ro} = 0,00072 + 0,0006 \left(\frac{25}{100} \right)^2 \approx 0,00076$$

4. Abschätzung des Gleitwiderstandes:

- Es handelt sich um Wagen, deren Fahrwerke (im Vergleich zu denen von Reisezugwagen) verhältnismäßig einfach ausgeführt sind. Es wird deshalb ein Wert im oberen Teil des auf S.15 aufgeführten Spektrums gewählt:

$$f_{WFO, Gl} \approx 0,00085$$

5. Abschätzung des Lagerwiderstandes (alle Wagen weisen Wälzlager auf):

$$f_{WFO, La} = 0,0002$$

6. Berechnung der Grundwiderstandskraft der gesamten Wagengruppe:

$$\begin{aligned} F_{WFO} &= 10 \cdot 4 \cdot 20 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (0,00076 + 0,00085 + 0,0002) \\ &= 800 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,00181 \\ &= 14,2 \text{ kN} \quad (1,42 \text{ kN je Wagen}) \end{aligned}$$

7. Ermittlung des Leistungsbedarfes:

$$\begin{aligned} P_{WFO} &= 14,2 \text{ kN} \cdot \frac{25 \text{ km/h}}{3,6 \frac{\text{km/h}}{\text{m/s}}} \\ &= 98,6 \text{ kW} \end{aligned}$$

Der Leistungsbedarf für das Rangieren der Wagengruppe mit einer Gesamtmasse von 800 t beträgt knapp 100 kW.

4.3.2. Anfahrwiderstand

Der Anfahrwiderstand F_{WFA} ist ein transienter Zusatzwiderstand, der nur unmittelbar beim Anfahren von Zügen in Erscheinung tritt, innerhalb der ersten zurückgelegten Meter abklingt und dann in den normalen Grundwiderstand übergeht. Er wird prinzipiell dem Grundwiderstand zugeordnet, ist aber nicht Bestandteil desselben, wie Abbildung 4.10 verdeutlicht.

Ein Sonderfall des Anfahrwiderstandes ist der *Losbrechwiderstand*. Dieser tritt unmittelbar zu Beginn des Anfahrprozesses bei $v \approx 0$ und $s \approx 0$ auf.

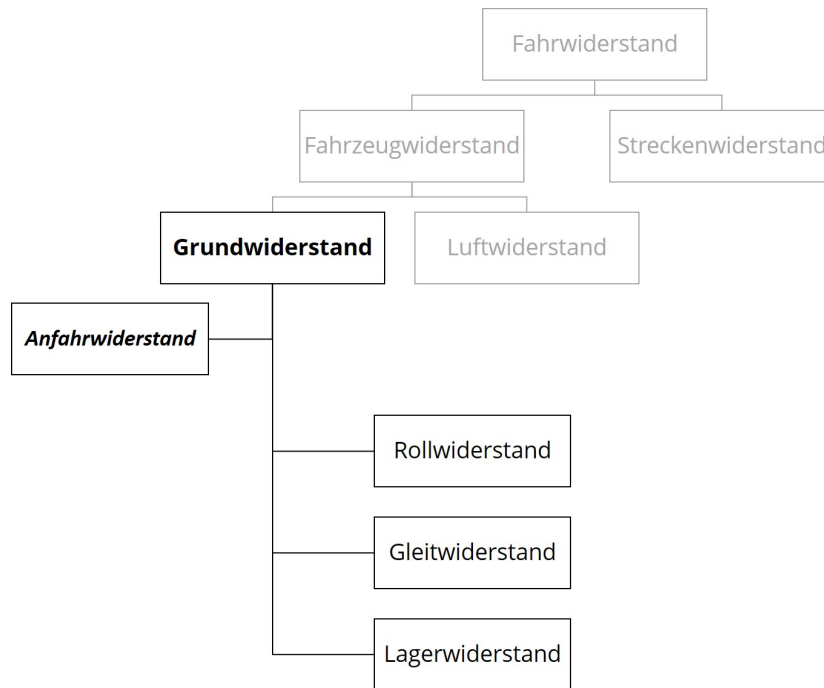


Abbildung 4.10.: Einordnung des Anfahrwiderstandes

Bei der Betrachtung von Anfahrwiderstandskräften spielen zwei Betrachtungsebenen eine Rolle: die Betrachtung von Anfahrwiderständen auf Fahrzeugebene und die Betrachtung von Anfahrwiderständen auf Zugebene. Beginnen wir zunächst mit der Betrachtung der Anfahrwiderstandskräfte auf Fahrzeugebene.

Anfahrwiderstandskräfte auf Fahrzeugebene

Wenn ein Fahrzeug in Bewegung gesetzt wird, kann es sein, dass für kurze Zeit zusätzliche bewegungshemmende Kräfte und Drehmomente zu überwinden sind, die im Laufe der anschließenden Fahrt keinerlei Rolle spielen. Die nachfolgend aufgezählten Aspekte können dabei eine Rolle spielen.

- Das Restbremsmoment von mechanischen Bremsen: Bremsklötze oder Bremsbeläge haften im Moment des Anfahrens noch an den Radreifen bzw. Bremsscheiben an, weil die Rückstellkräfte im Bremsgestänge nicht ausreichen, um sie vollständig zurückzuziehen. Dies kann insbesondere bei Fahrzeugen, deren Bremsanlage sich in einem suboptimalen Wartungszustand befindet, passieren. Im Winter, wenn das Bremsgestänge aufgrund von Vereisung und der höheren Viskosität der Schmiermittel schwerer beweglich ist, kann dieser Effekt verstärkt werden.
- Im Winter ist es möglich, dass die Bremsklötze oder Bremsbeläge an den Radreifen oder Bremsscheiben festfrieren und dann beim Anfahren losgebrochen werden müssen.

- Während der ersten Drehbewegungen der Radsätze ist es möglich, dass die Radsatzlager suboptimal geschmiert werden und sich das Schmiermittel erst wieder gleichmäßig verteilen muss. Dies ist ggf. nach langer Stillstandszeit von Wagen zu beachten. Bei der Verwendung hydrodynamischer Gleitlager, wie sie vor allem in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts möglich war, liegt im Moment des Anfahrens überdies Festkörperreibung zwischen Lagerschalen und den Naben der Radsatzwellen vor. Ein tragender Schmierfilm bildet sich physikalisch bedingt erst ab einer bestimmten Drehzahl aus.
- Kommen Züge in (überhöhten) Gleisbögen zum Stehen, ist bei einer erneuten Anfahrt mit einem im Vergleich zum geraden Gleis erhöhten Anfahrwiderstand zu rechnen. Die Gründe hierfür sind im Anlaufen der Radsätze in die Schienen im Gleisbogen zu suchen, sodass sich eine Zweipunktberührung der Radsätze mit den Schienenköpfen ergibt. Überdies wirkt in überhöhten Bögen eine Kraft nach bogen-innen, die im Moment des Anfahrens nicht durch die Fliehkraft kompensiert wird und damit die Spurkränze tendenziell an die bogen-inneren Schienenköpfe drückt.

Wende hat in [19] vorgeschlagen, die spezifische Anfahrwiderstandskraft auf Fahrzeugebene mit einer e-Funktion zu beschreiben, die das Abklingen der Anfahrwiderstandskraft nach wenigen zurückgelegten Metern Fahrwegs plausibel nachzubilden vermag. Für die spezifische Anfahrwiderstandskraft f_{WFA} wird bei Fahrzeugen mit Wälzlager folgender funktionaler Zusammenhang angenommen:

$$f_{WFA} = 0,002 + 0,004 \cdot e^{-3 \cdot s} \quad (4.5)$$

Der konstante Faktor (erste Summand) in Gleichung 4.5 ist als beispielhaft anzusehen und sollte dem ermittelten spezifischen Grundwiderstand des jeweils betrachteten Fahrzeuges entsprechen.

Im Falle von Fahrzeugen mit Gleitlagern verändern sich die Parameter der Gleichung (siehe Formelsammlung). In Abbildung 4.11 wird der Verlauf der spezifischen Anfahrwiderstandskraft über dem zurückgelegten Weg für beide Radsatzlagerarten graphisch dargestellt.

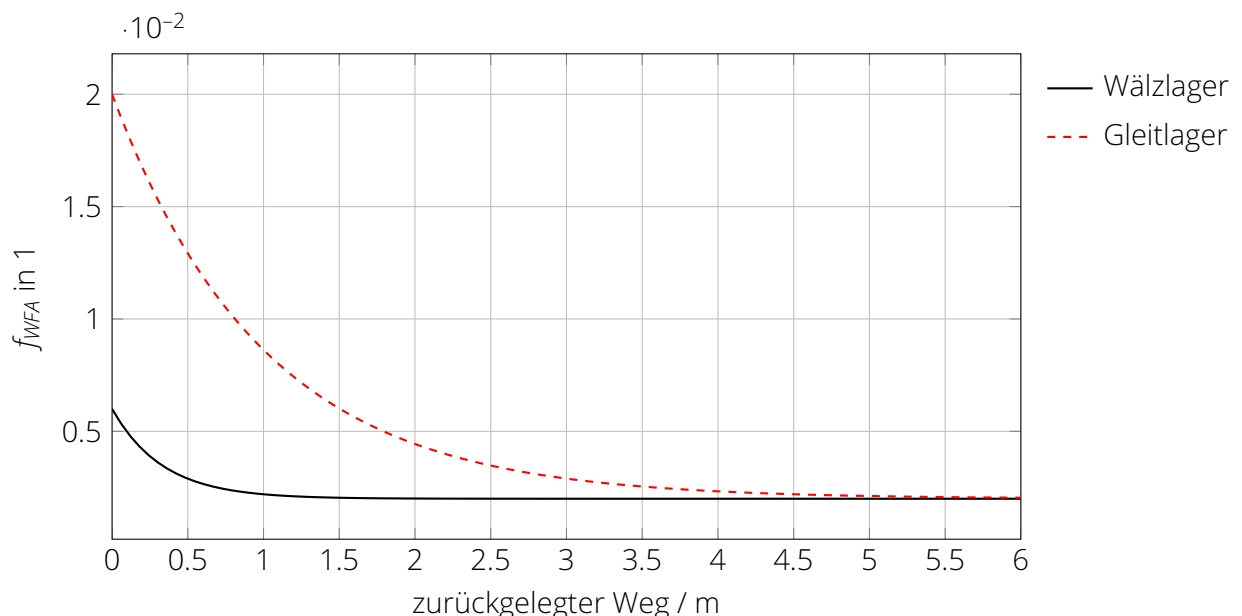


Abbildung 4.11.: Modellierung der spezifischen Anfahrwiderstandskraft von Fahrzeugen mit Wälz- oder Gleitlagern nach Wende [19]



Anfahrwiderstandskräfte im historischen Kontext



Moderne Radsatzlager weisen, wenn überhaupt, nur eine sehr geringe Erhöhung des Widerstandsrehmomentes beim Anfahren auf (siehe auch Abbildung 4.11). Hinzukommt, dass Triebfahrzeuge heute in der Regel Anfahrzugkräfte im Bereich von 250...320 kN bereitstellen. Damit liegt selbst bei schweren Güterzügen (günstige Kraftschlussverhältnisse zwischen Rad und Schiene vorausgesetzt) ein relativ hoher Zugkraftüberschuss bei geringen Geschwindigkeiten vor.

Noch vor 70 Jahren lagen die Verhältnisse etwas anders. Die meisten Wagen (und Triebfahrzeuge) waren damals mit Gleitlagern ausgerüstet, die generell einen höheren Lagerwiderstand verursachten, der sich im Falle des Anfahrens um ein Vielfaches erhöhen konnte (vgl. Abb. 4.11). Dem standen bei Dampflokomotiven auch im Vergleich zu heutigen Triebfahrzeugen deutlich geringere Anfahrzugkräfte gegenüber. Diese bewegten sich im Bereich von 60 bis 190 kN, je nach Größe und Konfiguration der Lokomotiven. Damit fiel der Zugkraftüberschuss bei Anfahren schwerer Güterzüge wesentlich geringer aus und wurde im Falle schwieriger Kraftschlussbedingungen zwischen Triebrädern und Schiene weiter reduziert.

Der genauen Abschätzung der Kräfteverhältnisse beim Anfahren der Züge kam deshalb in dieser Zeit, insbesondere bei der Festlegung maximal zu befördernder Zugmassen, betrieblich eine größere Bedeutung zu als heute.

Anfahrwiderstandskräfte auf Zugebene

Die im vorstehenden Abschnitt diskutierten Gleichungen kommen sinnvollerweise immer dann zu Anwendung, wenn Anfahrprozesse, zum Beispiel bei der Modellierung von Rangiervorgängen, möglichst genau abgebildet werden sollen. Im Rahmen der Simulation von Streckenfahrten sind transiente Anfahrwiderstandskräfte zu vernachlässigen.

Eine andere Motivation, sich mit Anfahrwiderstandskräften auseinanderzusetzen, ist die Vorherbestimmung der maximalen Zugmassen, die von einem bestimmten Triebfahrzeug in einer Steigung angefahren werden können. Hierbei spielen Aspekte eine Rolle, die bei der Betrachtung von Einzelfahrzeugen nicht beachtet werden.

Werden Eisenbahnfahrzeuge zu einem Zugverband zusammengekuppelt, weist dieser aufgrund der Konstruktion der Zug- und Stoßeinrichtungen eine gewisse Längselastizität auf. Die in Mitteleuropa üblichen Schraubenkupplungen ermöglichen eine gezielte Beeinflussung dieser Elastizität, weil sie sich über die Kupplungsspindel das „Spiel“ zwischen den Wagen und die Vorspannung der Zugeinrichtung variieren lässt.

Aufgrund der Längselastizität ist es in der Ebene möglich, Züge so anzufahren, dass nicht alle Wagen im Zugverband zum gleichen Zeitpunkt in Bewegung gesetzt werden müssen. Vielmehr wird angestrebt, dass die Wagen bzw. Wagengruppen gestaffelt nacheinander anfahren und somit nicht der Losbrechwiderstand aller Wagen auf einmal überwunden werden muss.

Falls die Züge jedoch in einer Steigung stehen, wird die Elastizität des Zugverbandes ggf. stark verringert, weil sich der Wagenzug nach dem vollständigen Lösen der Bremsen ggf. „streckt“. Man geht davon aus, dass dieser „Streckungseffekt“ mit zunehmender Neigung der Strecke immer mehr zunimmt.

Verschiedene Bahnverwaltungen haben deshalb Näherungsgleichungen entwickelt, die den Anfahrwiderstand von Zügen in Abhängigkeit der Steigung i , in denen sie stehen, abschätzen sollen. Die Deutsche Reichsbahn (DR) der DDR nutzte beispielsweise folgende Gleichung für die Ermittlung des spezifischen Anfahrwiderstandes von Güterzügen:

$$f_{WFZA} = 0,006 + 0,3i. \quad (4.6)$$

Es handelt sich um eine empirische Gleichung, der höchstwahrscheinlich auch ein Geltungsbereich zugeordnet werden müsste², der jedoch in der Quelle [19] nicht erwähnt wird.

An anderer Stelle [9] lässt sich auch ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem spezifischen Anfahrwiderstand von Zügen und der Neigung finden (siehe Abbildung 4.12).

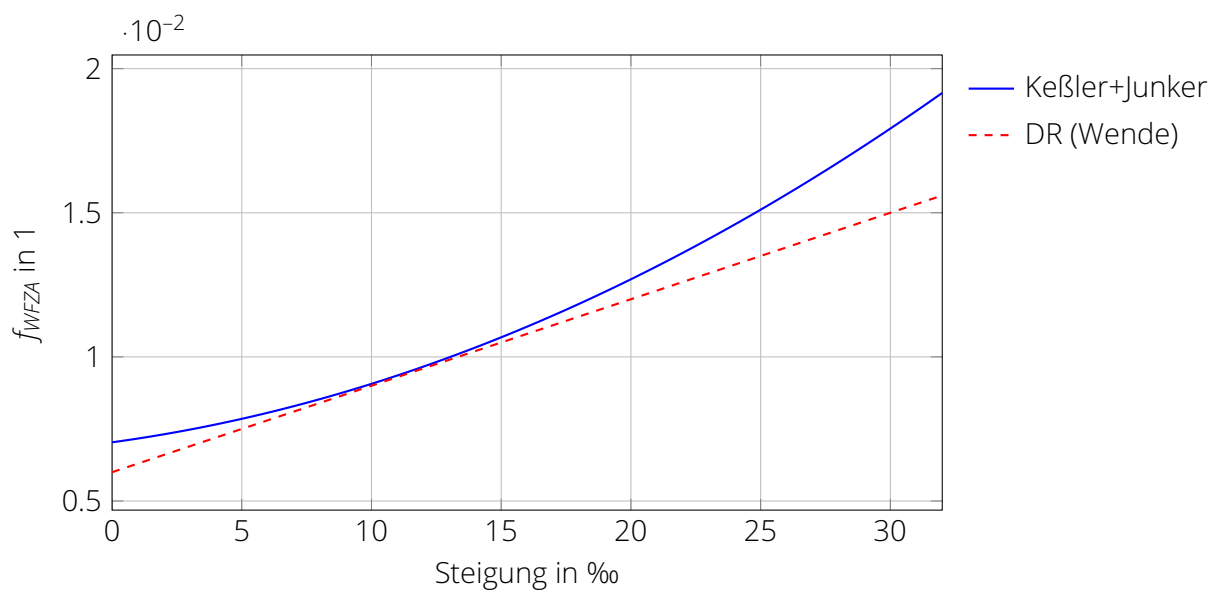


Abbildung 4.12.: Modellierung der spezifischen Anfahrwiderstandskraft von Zügen mit Wälzlager in Steigungen nach unterschiedlichen empirischen Gleichungen

Im Bereich von Neigungen zwischen 7 und 15 ‰ liefern beide Ansätze in etwa gleiche Werte. Außerhalb dieses Intervalls liefert der Ansatz von Keßler und Junker stets größere Werte als die Gleichung der DR. Eine unmittelbare Erklärung für diese Abweichungen gibt es nicht. Es zeigt sich vielmehr, dass empirische Gleichungen kritisch zu hinterfragen sind.



Anfahrwiderstandskraft

Anfahrwiderstandskräfte sind transiente (Zusatz-)Widerstandskräfte, die dem Grundwiderstand von Schienenfahrzeugen zugeschlagen werden und nur auf den ersten Metern einer Zugfahrt auftreten. Sie spielen insbesondere bei Rangierbewegungen (Modellierung auf Fahrzeugebene) und bei der Bestimmung der maximalen Zugmassen, die in Steigungen angefahren werden können (Modellierung auf Zugebene) eine Rolle. Bei der Berechnung von Streckenfahrten sind sie zu vernachlässigen.

²Das ergibt sich aus der einfachen Überlegung, dass es eine Grenzneigung geben müsste, ab der die Elastizität der Züge aufgebraucht ist und keine weitere neigungsbedingte Steigerung des Anfahrwiderstandes mehr erfolgt.

4.3.3. Luftwiderstandskräfte

Exkurs: zur Relevanz des Luftwiderstandes

Wie aus Abbildung 4.2 hervorgeht, dominiert der Luftwiderstand den Fahrzeugwiderstand von Schienenfahrzeugen im Bereich höherer und hoher Geschwindigkeiten.

Die Beschäftigung mit der Aerodynamik hat bei der Eisenbahn eine lange Tradition. Während die Motivation für die Auseinandersetzung mit aerodynamisch bedingten Widerstandskräften in der ersten Hälfte des 20. Jahrhundert vor allem mit dem Wunsch verbunden war, höhere Geschwindigkeiten zu erreichen, steht heute die Effizienzerhöhung im Sinne einer Einsparung von Traktionsenergie im Zentrum der Bemühungen um die Verringerung des Luftwiderstandes von Eisenbahnfahrzeugen.

Soll die Höchstgeschwindigkeit von (Schienen-)Fahrzeugen gesteigert werden, gibt es zwei wesentliche Optionen zur Erreichung dieses Ziels: 1. die Erhöhung der Traktionsleistung und 2. die Verringerung des Fahrzeugwiderstandes. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde die Dampftraktion zwar immer weiter verbessert, näherte sich jedoch hinsichtlich der Leistungsdichte der Lokomotiven immer mehr der Grenze des physikalisch Möglichen an. Sowohl die elektrische als auch die Diesel-Traktion stand jeweils noch am Anfang eines langen Entwicklungsprozesses und konnten nur einen Bruchteil der heute üblichen Traktionsleistung generieren. Solange hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Antriebstechnik keine qualitativen Sprünge möglich waren, musste man sich also um die Verringerung des Luftwiderstandes kümmern, um die Geschwindigkeit der Fahrzeuge erhöhen zu können.

Basierend auf dieser Erkenntnis und gestützt durch erste Versuchsreihen in den damals neuartigen Windkanälen entstanden weltweit in den 1920er und 1930er Jahren (in den USA setzte sich diese Entwicklung auch in den 1940er Jahren fort) „stromlinienförmige“ Fahrzeuge und es wurden neue Geschwindigkeitsrekorde mit für damalige Verhältnisse aerodynamisch optimierten Lokomotiven und Zügen eingefahren. Insbesondere in den USA und in Frankreich wurden Erkenntnisse der damals noch jungen Ingenieursdisziplin „Strömungsmechanik“ von Designern aufgegriffen und in eine Formsprache übersetzt, die den Begriff der „Stromlinie“ immer weiter popularisierte. Der Wettstreit von Designern und Aerodynamikern um die Definition der „optimalen“ Formgebung von Schienenfahrzeugen prägt die Entwicklung insbesondere von Rollmaterial für den Personenverkehr bis heute.

Spätestens mit dem Einzug der Drehstromantriebstechnik wurde die Bereitstellung großer Traktionsleistungen zunehmend zu einer Selbstverständlichkeit. Die Steigerung der spezifischen Leistung von Triebfahrzeugen ermöglichte die Entwicklung von Hochgeschwindigkeitszügen und eine allgemeine Anhebung der Fahrgeschwindigkeiten im Personenverkehr. Heute werden selbst im Nah- und Regionalverkehr im Vollbahn-Bereich bis zu 160 km/h (in Ausnahmefällen auch 200 km/h) erreicht und der hochwertige Fernverkehr ist in den Geschwindigkeitsbereich von 200-330 km/h vorgedrungen. Aufgrund ökonomischer und ökologischer Erfordernisse ist es jedoch geboten, Fahrten in den genannten Geschwindigkeitsintervallen mit einem möglichst geringen Aufwand an Traktionsenergie zu realisieren. Dies kann vor allem dadurch erreicht werden, dass der Fahrwiderstand der Fahrzeuge minimiert wird.

Insbesondere der Betrieb von Hochgeschwindigkeitszügen ist auf Dauer nur dann rentabel und ökologisch vertretbar, wenn die dazu aufzuwendende Traktionsenergie begrenzt werden kann.

In diesem Kapitel werden zunächst die wesentlichen Ursachen der Entstehung des Luftwiderstandes diskutiert, bevor eine nähere Betrachtung der Möglichkeiten zur rechnerischen Abschätzung von Luftwiderstandskräften und der konstruktiven Einflussmöglichkeiten zu ihrer Verringerung erfolgt.

Abschließend sei hier noch festgehalten, dass der Luftwiderstand nur *ein* Aspekt der Fahrzeug-aerodynamik ist. Bei modernen Schienenfahrzeugen stellen sich noch andere aerodynamische Fragestellungen, wie zum Beispiel die aerodynamische Lärmerzeugung, die Reaktion der Fahr-

zeuge auf starken Seitenwind, die Druckentwicklung bei der Zugbegegnung und die Befahrung von Tunneln mit hohen Geschwindigkeiten. Auch die genannten Aspekte können u.a. durch die Formgebung der Fahrzeuge oder ihrer Anbauteile beeinflusst werden. Die Reduzierung des Luftwiderstandes steht also nicht immer im Fokus der Bemühungen, wenn Schienenfahrzeuge aerodynamisch optimiert werden.

Komponenten des Luftwiderstandes

Schienenfahrzeuge bewegen sich nicht im luftleeren Raum, sondern sie werden während der Fahrt kontinuierlich von einer Luftströmung umflossen. Die Luftmassen um das Fahrzeug herum werden in Bewegung versetzt, sobald sich das Fahrzeug selbst bewegt (Annahme: absolute Windstille).

Ein Fahrzeug in Bewegung muss die vor ihm liegenden Luftmassen verdrängen. Ein Teil der Luft wird wie eine „Luftsäule“ vor dem Fahrzeug hergeschoben und ein Teil umfließt das Fahrzeug. An der Stirnseite des Fahrzeuges bildet sich ein sogenannter „Staupunkt“ (siehe Abbildung 4.13), von dem ausgehend sich die Stömung in verschiedene Anteile aufteilt, die entweder über das Fahrzeug hinweg, unter dem Fahrzeug hindurch oder seitlich an dem Fahrzeug vorbeiströmen. Die Luft vor dem Fahrzeug wird mit verdichtet, sodass sich ein Überdruck aufbaut, der als **Staudruck** auf den Fahrzeugkopf wirkt, und dort eine der Fahrtrichtung entgegengesetzte Teilwiderstandskraft verursacht.

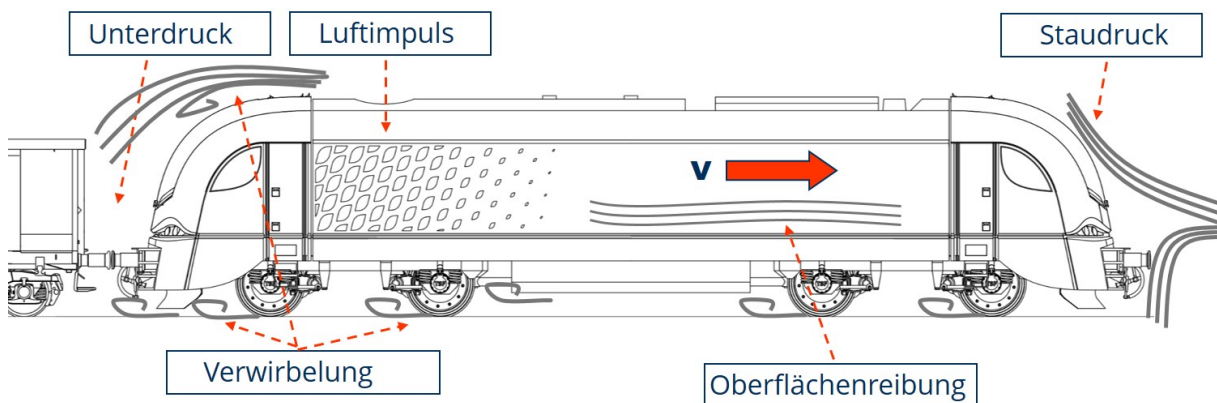


Abbildung 4.13.: Komponenten des Luftwiderstandes

An der Rückseite des Fahrzeuges entsteht demgegenüber ein **Unterdruck-Bereich** (siehe Abbildung 4.13), da die Strömung aufgrund der abrupten Reduktion der Fahrzeugquerschnittsfläche entlang der x-Achse und ihrer eigenen Trägheit wegen der Fahrzeugkontur nicht schnell genug folgen kann. Dieses Unterdruckgebiet kann vereinfacht mit einer Sogkraft assoziiert werden, die ebenfalls entgegen der Fahrtrichtung wirkt und damit ebenfalls zur Luftwiderstandskraft beiträgt.

Sofern die Fahrzeugkontur keine starken Unstetigkeiten aufweist, folgt die Strömung der Fahrzeugkontur und verläuft weitgehend wirbelfrei. Um das Fahrzeug herum bildet sich eine keilförmige Luft-Grenzschicht, deren Dicke mit zunehmender Zuglänge immer weiter zunimmt. Innerhalb dieser Grenzschicht bewegen sich Luftschichten mit unterschiedlicher Relativgeschwindigkeit zueinander. In unmittelbarer Fahrzeugnähe wird die Luft vom Fahrzeug mitgerissen und bewegt sich somit annähernd mit der Fahrzeuggeschwindigkeit. Je weiter entfernt die Luftschichten von der Fahrzeugoberfläche sind, desto mehr wird sich ihre Geschwindigkeit der der Umgebungsluft angleichen. Der stehende Beobachter wird dies als „Fahrtwind“ wahrnehmen, der umso heftiger ist je näher der Beobachter am Gleis steht. Die Anschauung lehrt, dass der „Fahrtwind“ vorbeifahrender Züge bei großen Abständen von der Gleismitte gar

nicht mehr und bei mittleren Abständen etwas zeitverzögert wahrgenommen wird (Keilform der Grenzschicht, die den Beobachter erst nach einer gewissen Zeit erfasst).

Das Geschwindigkeitsgefälle in der Grenzschicht sorgt jedenfalls dafür, dass es durch Reibungs- und Zähigkeitseffekte zwischen den verschiedenen Luftschichten zu einer resultierenden Widerstandskraft kommt, die mit den Oberflächen der Fahrzeugen assoziiert wird. In Abbildung 4.13 wird dieses Phänomen unter dem Begriff der **„Oberflächenreibung“** zusammengefasst. An allen Stellen am Fahrzeug, wo sich keine stationäre (also anliegende) Strömung ausbilden kann, besteht die Gefahr der Wirbelbildung. Dies betrifft alle Bereiche mit „zerklüfteten“ Oberflächen und dabei insbesondere die Fahrzeugunterseite und den Bereich der Fahrwerke. Die Fahrzeugkanten (und dabei vor allem die waagerechten und senkrechten Kanten am Kopf und Heck des Fahrzeuges) sind weitere potentielle Orte, an denen sich Verwirbelungen bilden können. Die Energie zur Aufrechterhaltung dieser Wirbel wird dem Fahrprozess entzogen und manifestiert sich so in der Teilwiderstandskraft, die als **„Verwirbelungswiderstand“** bezeichnet wird (siehe Abbildung 4.13). Typisch ist auch die Ausbildung großräumiger Wirbel im sogenannten Nachlaufgebiet der Fahrzeuge, also hinter dem letzten Fahrzeug im Zugverband.

Wende gibt in [19] außerdem noch die **„Luftimpulswiderstandskraft“** als Komponente der Luftwiderstandskraft an. Diese resultiert aus der Tatsache, dass von Triebfahrzeugen größere Luftmassenströme (v.a. für die Kühlung des Antriebsstranges) quer zur Fahrtrichtung angesaugt und ausgestoßen werden. Die eintretenden Luftmassen müssen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit beschleunigt werden, während die ausgestoßenen Luftmassen als „Luftsäulen“ quer aus dem Fahrzeug herausragen und somit die Fahrzeugumströmung negativ beeinflussen. Der aus dem Luftimpuls resultierende Teilwiderstand ist deshalb in Abbildung 4.13 im Bereich der Lüftungsgitter verortet.

Wird das Fahrzeug idealisiert direkt von vorn angeströmt, sind damit alle äußeren Luftwiderstandsanteile erfasst. Erfolgt jedoch eine Queranströmung in Form von Seitenwind, so ist zu berücksichtigen, dass die durch den Luftdruck an den Seitenflächen der Fahrzeuge erzeugte Querkraft durch eine gleich große Kraft im Rad-Schiene-Kontakt kompensiert werden muss (sonst würden die Fahrzeuge aus dem Gleis „driften“). Es wird modellhaft angenommen, dass die Seitenwindkraft bei fahrenden Fahrzeugen ein Anlaufen der Spurkränze an den Schienenköpfen und damit eine zusätzliche Reibungskraft provoziert, die als **„Seitenwindreibungskraft“** bezeichnet wird. Da der Luftwiderstand in vielen Fällen nur bezüglich der Anströmung entgegen der Fahrtrichtung modelliert wird, entfällt die Berücksichtigung dieser Komponente jedoch häufig. Sie ist deshalb in der Fahrwiderstandshierarchie mit den Luftwiderstandsanteilen (Abbildung 4.14) in einem gestrichelten Kästchen aufgeführt.

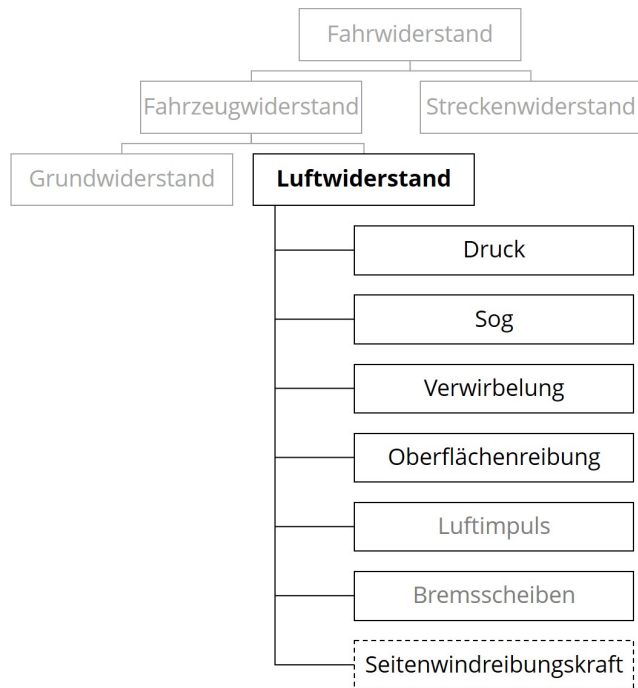
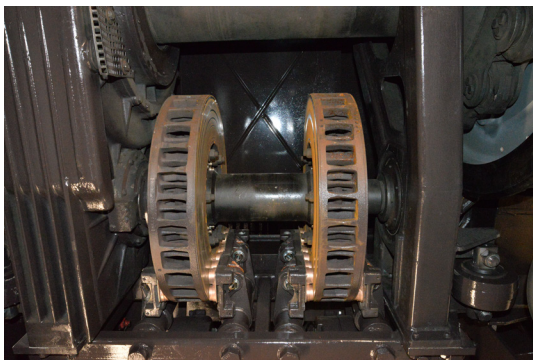
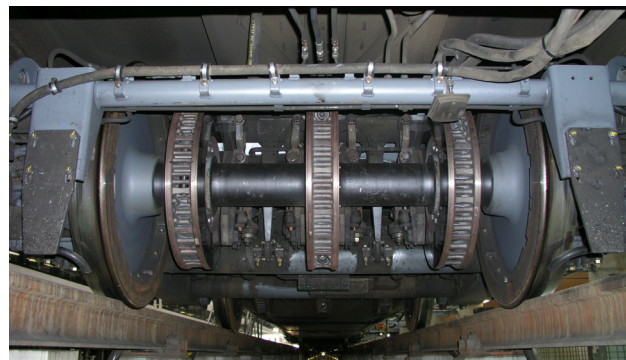


Abbildung 4.14.: Fahrwiderstandshierarchie mit Luftwiderstandsanteilen

Eine weitere Komponente des Luftwiderstandes, die ggf. mit berücksichtigt werden muss, ist der durch die Bremsscheiben verursachte Luftwiderstand. Dies trifft selbstverständlich nur auf Fahrzeuge zu, die über diese Art der Bremsausrüstung verfügen und auch nur dann, wenn selbstbelüftete Bremsscheiben zur Anwendung kommen, was bei Scheibenbremsen jedoch die Regel ist. Selbstbelüftete Bremsscheiben (siehe Abbildung 4.15) sind so konstruiert dass sie, wenn sie in Rotation versetzt werden, einen Luftstrom generieren, der durch die Brems-scheiben hindurchgeführt wird und die Reibringe während der Fahrt kühlt. Diese Luftströmung und alle mit ihr verbundenen Nebeneffekte (z.B. Verwirbelungen) generieren eine zusätzliche Widerstandskraft, die, beispielsweise Im Falle von Hochgeschwindigkeitszügen, geschwindigkeitsabhängig mehrere Kilonewton betragen kann.



(a) Bremsscheiben auf separater Bremswelle



(b) Bremsscheiben auf einer Radsatzwelle (ICE-T)

Abbildung 4.15.: Beispiele für selbstbelüftete Bremsscheiben

Dieser Abschnitt gibt nur einen groben Überblick über die bei der Fahrt von Schienenfahrzeugen auftretenden aerodynamischen Phänomene. Für die vertiefende Lektüre sei auf die einschlägige Fachliteratur (z.B. [3, 4, 5, 8, 19]) verwiesen.

Abschätzung des Luftwiderstandes

Dieses Kapitel ist bewusst mit „Abschätzung des Luftwiderstandes“ und nicht mit „Berechnung des Luftwiderstandes“ überschrieben, weil die hier vorgestellten Gleichungen der Komplexität von Fahrzeugumströmungen nicht in vollem Umfang gerecht werden. Fahrdynamische Berechnungen müssen jedoch für die Praxis handhabbar bleiben, sodass die detaillierte Berechnung des Luftwiderstandes bei variierenden Anströmwinkeln den Aerodynamikern vorbehalten bleiben soll. Die im folgenden vorgestellten Gleichungen gehen vereinfachend von einer Anströmung des Fahrzeuges parallel zur jeweiligen Fahrtrichtung aus.

Der Luftwiderstand F_{WL} von Fahrzeugen ist von der Luftdichte ρ_L , der angeströmten Querschnittsfläche A , der Geschwindigkeit v sowie dem Luftwiderstandsbeiwert c_W abhängig. Er kann vereinfacht (Anströmung nur parallel zur x-Achse) mit Gleichung 4.7 abgeschätzt werden.

$$F_{WL} = \frac{\rho_L}{2} c_W A v^2 \quad (4.7)$$

Im Gegensatz zu den vielen in der Fahrdynamik gebräuchlichen empirischen Gleichungen handelt es sich hierbei um eine physikalische Gleichung, in der alle Parameter in SI-Einheiten einzusetzen sind.

Die **Luftdichte** ist eine Funktion von Luftdruck, -temperatur und -feuchte. Sie ist bei gleichem Druck (1,013 bar) im Winter (-20 °C) um ca. 20 % höher als im Sommer (+30 °C). Üblicherweise wird mit einem Wert $\rho_L = 1,225 \text{ kg/m}^3$ gerechnet.

Für die **angeströmte Querschnittsfläche** wird bei Schienenfahrzeugen nicht der tatsächliche Wert für die projizierte Fahrzeugquerschnittsfläche, sondern ein genormter Wert angesetzt. Dieser beträgt $A_{\text{norm}} = 10 \text{ m}^2$ und die meisten für Schienenfahrzeuge ermittelten Luftwiderstandsbeiwerte beziehen sich auf ihn.

Im Schienenverkehr sind einzeln fahrende Fahrzeuge eher die Ausnahme. Häufig verkehren die Fahrzeuge in Verbänden (Zügen) und dies wird von der mathematischen Formulierung des **Luftwiderstandsbeiwertes** reflektiert. Dieser wird, anders als bei Straßenfahrzeugen, als kumulierter Luftwiderstandsbeiwert angegeben. Dieser setzt sich aus dem Luftwiderstandsbeiwert des ersten Fahrzeuges $c_{W,T}^3$, dem Luftwiderstandsbeiwert des ersten Folgewagens $c_{W,W1}$, dem Luftwiderstandsbeiwert der (n-2) Mittelwagen $c_{W,Wm}$ sowie dem Luftwiderstandsbeiwert des letzten (n-ten) Wagens $c_{W,Wn}$ zusammensetzt. Es gilt damit:

$$c_W = c_{W,T} + c_{W,W1} + (n-2)c_{W,Wm} + c_{W,Wn}. \quad (4.8)$$

Ist nur der Luftwiderstandsbeiwert der einzeln fahrenden Lokomotive $c_{W,Te}$ bekannt, gilt vereinfacht:

$$c_{W,T} \approx c_{W,Te} - c_{W,Wn}. \quad (4.9)$$

Dies ergibt sich aus der Überlegung, dass der Luftwiderstandsbeiwert des letzten Wagens die Sog- und Verwirbelungskomponenten am Zugende erfasst, die bei dem Luftwiderstandsbeiwert der Lokomotive vor dem Zug nicht, bei dem der einzeln fahrenden Lokomotive aber sehr wohl berücksichtigt sind.

³Der Index T steht hier für Lokomotive, da diese klassischerweise das führende Fahrzeug ist.

Die erweiterte Gleichung für die Abschätzung des Luftwiderstandes von Zügen lautet somit:

$$F_{WL} = \frac{\rho_L}{2} [c_{w,T} + c_{w,W1} + (n - 2)c_{w,Wm} + c_{w,Wn}] A v^2. \quad (4.10)$$



Luftwiderstand

Der Luftwiderstand von Schienenfahrzeugen ist die bei hohen und höheren Geschwindigkeiten dominante Komponente des Fahrzeugwiderstandes. Der Reduzierung des Luftwiderstandes kommt damit eine große Bedeutung bei der Verringerung des Energiebedarfes von Zugfahrten sowie der Erreichung höherer Geschwindigkeiten bei gegebener Leistung zu. Unter der vereinfachenden Annahme einer geraden und störungsfreien Anströmung von vorn ist der Luftwiderstand vor allem vom Quadrat der Geschwindigkeit, der Luftdichte und dem Produkt aus Luftwiderstandsbeiwert und angeströmter Querschnittsfläche abhängig. Letztere ist bei Schienenfahrzeugen auf einen Wert von 10 m^2 normiert. Der Luftwiderstandsbeiwert widerspiegelt dabei die Formgebung der Fahrzeuge und kann somit konstruktiv und gestalterisch beeinflusst werden.

💡 Luftwiderstand Schnellzug I



Der Luftwiderstand des oben abgebildeten Zuges soll für $v=160 \text{ km/h}$ abgeschätzt werden. Der Zug besteht aus einer Lokomotive, deren Luftwiderstandsbeiwert nicht genau bekannt ist, sowie 9 IC-Wagen. Es wird dabei von folgenden Prämissen ausgegangen:

- Der Luftwiderstandsbeiwert der Lokomotive vor dem Zug wird auf $c_{w,T} = 0,51$ geschätzt.
- Der Luftwiderstandsbeiwert des ersten Folgewagens $c_{w,W1}$ betrage 0,23.
- Der Luftwiderstandsbeiwert der Mittelwagen $c_{w,Wm}$ betrage 0,14.
- Der Luftwiderstandsbeiwert des letzten Wagens $c_{w,Wn}$ betrage 0,3.

$$\begin{aligned}
 F_{WL} &= \frac{\rho_L}{2} [c_{w,T} + c_{w,W1} + (n-2)c_{w,Wm} + c_{w,Wn}] A v^2 \\
 &= \frac{1,225 \text{ kg}}{2 \text{ m}^3} [0,51 + 0,23 + 7 \cdot 0,14 + 0,3] \cdot 10 \text{ m}^2 \cdot (44,4444 \text{ m/s})^2 \\
 &= 0,6125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2,02 \cdot 10 \text{ m}^2 \cdot 1975,3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \\
 &= 24439 \text{ N} = 24,4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Der Luftwiderstand des Zuges bei 160 km/h wird auf 24,4 kN geschätzt.

Auswirkung der Unsicherheit bei der Festlegung des Luftwiderstandsbeiwertes der Lokomotive vor dem Zug:

$c_{w,T}$	F_{WL}	Abweichung
0,51	24,4 kN	-
0,46	23,8 kN	-2,5 %
0,56	25,0 kN	+2,5 %

Eine relativ große Schwankung des geschätzten Luftwiderstandsbeiwertes für die Lokomotive vor dem Zug um $\pm 10 \%$ hätte demnach einen verhältnismäßig geringen Einfluss auf das Ergebnis ($\pm 2,5 \%$).

Einfluss des Windes

Selbstverständlich ist die Luft, durch die sich die Fahrzeuge während der Fahrt bewegen, häufig selbst bewegt. In der Regel wird also eine Anströmung der Fahrzeuge durch Wind mit dem Windangriffswinkel β_W (siehe Abbildung 4.16) erfolgen. Dieser ist von der lokalen Windrichtung sowie der Ausrichtung der Fahrzeuge im Raum abhängig, die sich bei der Befahrung von Gleisbögen verändert.

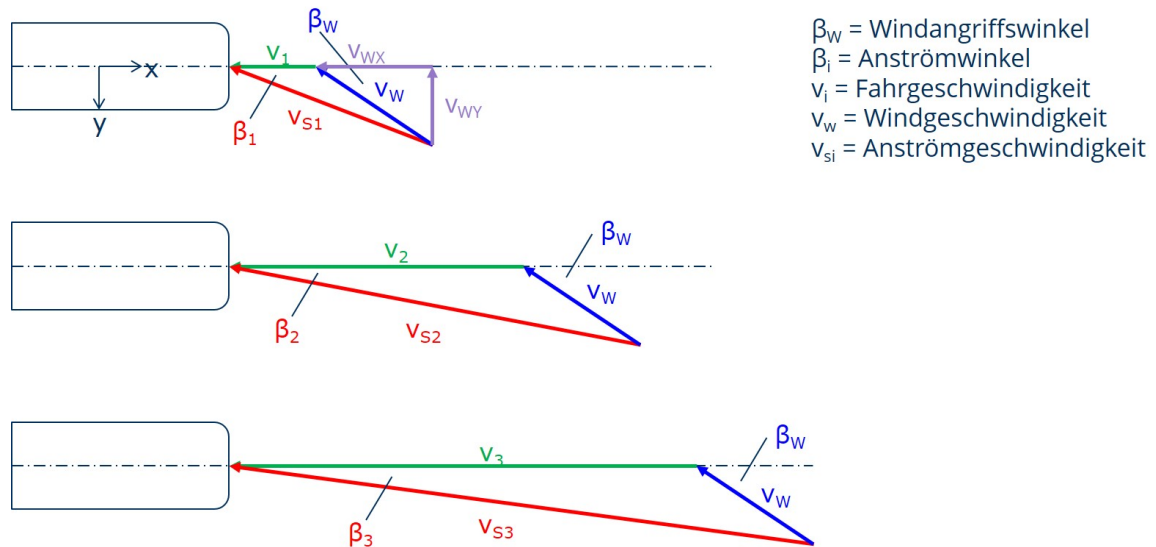


Abbildung 4.16.: Entwicklung der Anströmwinkel β_i in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit bei konstanten Windangriffswinkel β_W

Um den Einfluss des Windes auf den Luftwiderstand zu berücksichtigen, wird vereinfacht eine vektorielle Zerlegung des Windgeschwindigkeitsvektors in jeweils einen Anteil längs und quer zur Fahrtrichtung vorgenommen (siehe Abbildung 4.16). Somit gelten für die Windgeschwindigkeit in oder entgegen der Fahrtrichtung $v_{W,x}$ und für die Windgeschwindigkeit quer zur Fahrtrichtung $v_{W,y}$ folgende Zusammenhänge:

$$v_{W,x} = v_W \cos \beta_W \quad (4.11)$$

$$v_{W,y} = v_W \sin \beta_W. \quad (4.12)$$

Für die Relativgeschwindigkeit v_{rel} der Luftströmung bezüglich der Fahrtrichtung gilt somit:

$$v_{rel} = v + v_{W,x} = v + \underbrace{v_W \cos \beta_W}_{=\Delta v}. \quad (4.13)$$

Die in Gleichung 4.13 angegebene Geschwindigkeitsdifferenz Δv wird häufig als „**Gegenwindzuschlag**“ in die Berechnung des Luftwiderstandes integriert, sodass Gleichung 4.10 entsprechend erweitert wird:

$$F_{WL} = \frac{\rho_L}{2} [c_{w,T} + c_{w,W1} + (n-2)c_{w,Wm} + c_{w,Wn}] \cdot A \cdot (v + \Delta v)^2. \quad (4.14)$$

Abbildung 4.17 zeigt die Abhängigkeit des Windzuschlages Δv von der Windgeschwindigkeit und dem Windangriffswinkel. In der Regel wird Δv zu 10...15 km/h gewählt.

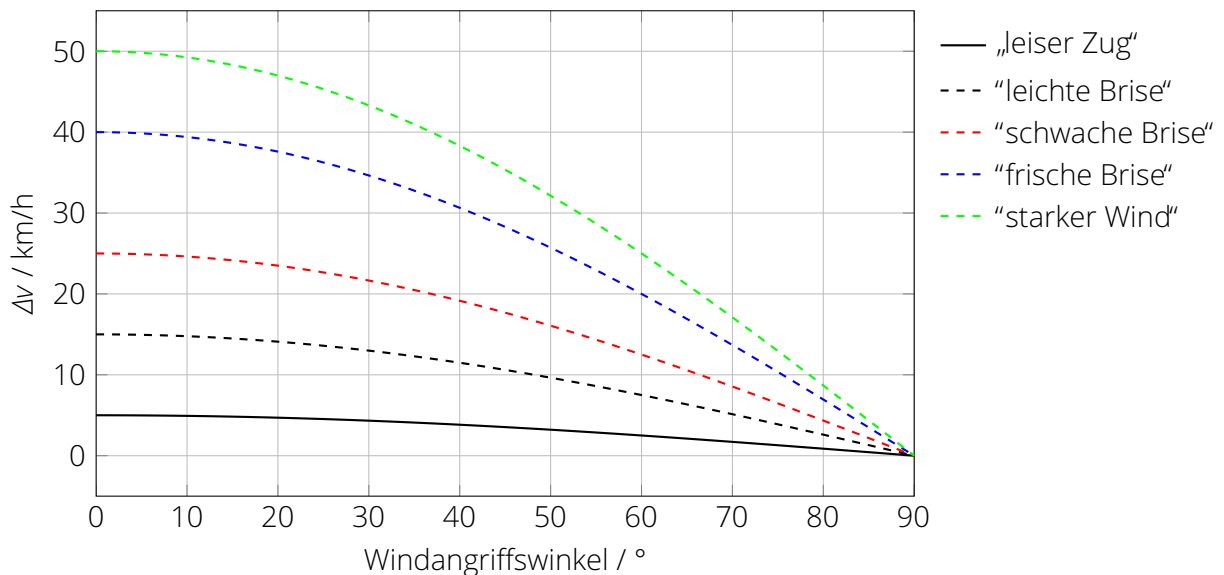


Abbildung 4.17.: Theoretischer Gegenwindzuschlag Δv für verschiedene Windstärken und Windangriffswinkel



Typische Windgeschwindigkeiten

Wie in diesem Abschnitt dargelegt wird, hat die Windgeschwindigkeit und -richtung einen gewissen Einfluss auf die Luftwiderstandskraft von Schienenfahrzeugen.

Was aber sind nun „typische“ Windgeschwindigkeiten, mit denen gerechnet werden sollte? „Wind“ ist schließlich ein sehr allgemeiner Begriff, der sowohl für einen „leisen Zug“ mit Windgeschwindigkeiten zwischen 2 und 9 km/h, als auch für „stürmischen Wind“ ($v_W = 66 \dots 74$ km/h) stehen kann.

Typische Windgeschwindigkeiten im Sinne eines langjährigen Jahresmittels können den Windkarten des → Deutschen Wetterdienstes entnommen werden. Diese zeigen für die nördlichen Bundesländer mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 4 und 6 m/s (14...22 km/h) und für den größten Teil Deutschlands Werte zwischen 2 und 4 m/s (7...15 km/h).

Alternativ zu Gleichung 4.14 existieren auch Berechnungsansätze [7], die den Luftwiderstand mit der Anströmgeschwindigkeit v_S berechnen und zusätzlich einen „Seitenwindkorrekturfaktor“ k_{SW} nutzen. Es ergibt sich somit die folgende mathematische Formulierung:

$$W_{WL} = \frac{\rho}{2} \left(c_W + k_{SW} \cdot \beta^2 \right) A_{\text{norm}} \cdot v_S^2 \quad (4.15)$$

Gleichung 4.15 ist gemäß [7] für Anströmwinkel $\pm 10^\circ$ gültig. Für den Seitenwindkorrekturfaktor k_{SW} ist im Falle eines aus Reisezugwagen gebildeten Zuges ein Wert von 0,0007 und für Güterzüge Werte zwischen 0,001 und 0,002 einzusetzen, je nachdem, wie zerklüftet die Oberflächen der Wagen ausgebildet und die groß die Wagenzwischenräume sind. Die effektive Anströmgeschwindigkeit v_S ergibt sich aus der vektoriellen Addition von Relativgeschwindigkeit und Querrichtungskomponente der Windgeschwindigkeit:

$$v_S = \sqrt{v_{\text{rel}}^2 + v_{W,y}^2} \quad (4.16)$$

Die Abhängigkeit der Windanströmgeschwindigkeit v_s vom Windangriffswinkel ist in Abbildung 4.18 beispielhaft für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von $v=160$ km/h dargestellt.

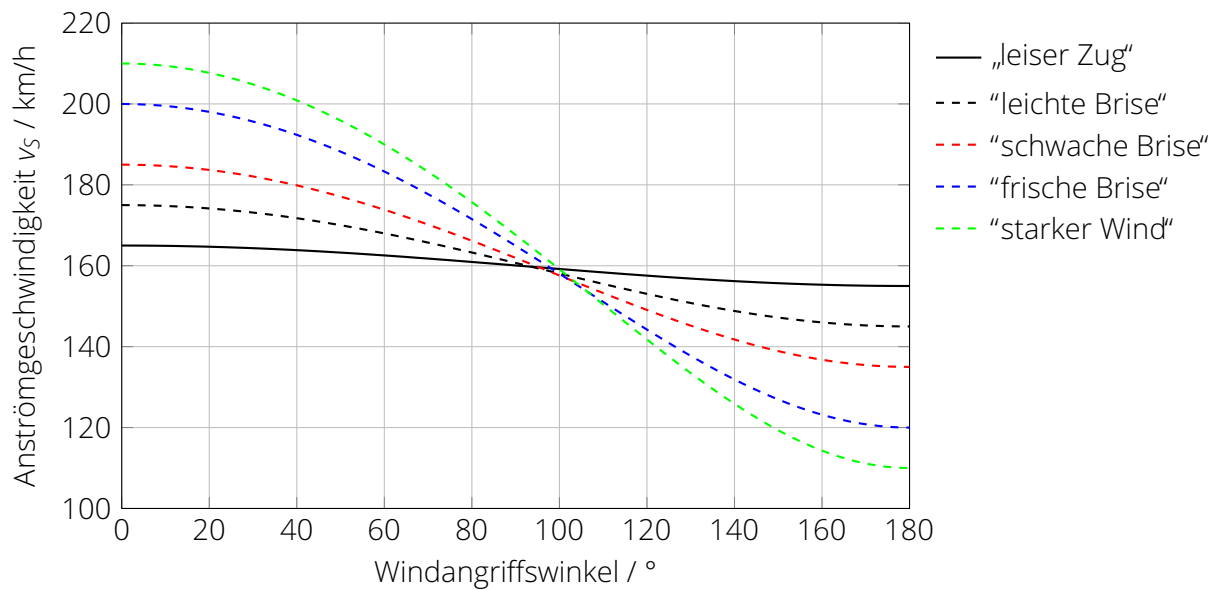


Abbildung 4.18.: Effektive Windanströmgeschwindigkeit für verschiedene Windstärken und Windangriffswinkel bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 160 km/h

Für den Winkel β , unter dem das Fahrzeug bei Berücksichtigung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung effektiv angeströmt wird, erhält man schließlich:

$$\beta = \arctan \frac{v_W \sin \beta_W}{v + v_W \cos \beta_W}. \quad (4.17)$$

Die Abbildungen 4.19 und 4.20 stellen die Abhängigkeit des Anströmwinkels von der Windgeschwindigkeit (qualitativ), dem Windangriffswinkel β_W und der Fahrzeuggeschwindigkeit dar. Um eine bessere Auflösung bei hohen Geschwindigkeiten zu erreichen, zeigt Abbildung 4.19 nur den Geschwindigkeitsbereich von 0-160 km/h und Abbildung 4.20 das für dem Hochgeschwindigkeitsverkehr relevante Geschwindigkeitsintervall von 160-300 km/h.

es ist ersichtlich, dass der Anströmwinkel stark von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig ist. In den Geschwindigkeitsbereichen, die für die Betrachtung der Luftwiderstände am interessantesten sind ($v > 60 \dots 80$ km/h) liegt der Anströmwinkel außer in dem nicht-repräsentativen Fall einer reinen Queranströmung mit starkem Wind bei unter 20° . In dem Geschwindigkeitsbereich, in dem hochwertige Reisezüge und Hochgeschwindigkeitszüge verkehren, beträgt der Winkel sogar wesentlich weniger als 10° .

Es kann damit in guter Näherung der Berechnungsansatz nach Gleichung 4.14 gewählt werden und auch Gleichung 4.15 stünde zur Verfügung (wäre gültig), wenn detaillierter gerechnet werden müsste.

Auf die Berücksichtigung extremer Windverhältnisse wurde bewusst verzichtet, da Orkane und orkanartige Stürme einerseits vergleichsweise selten auftreten und weil im 21. Jahrhundert bei derartigen Wetterereignissen auch keine Züge mehr verkehren...

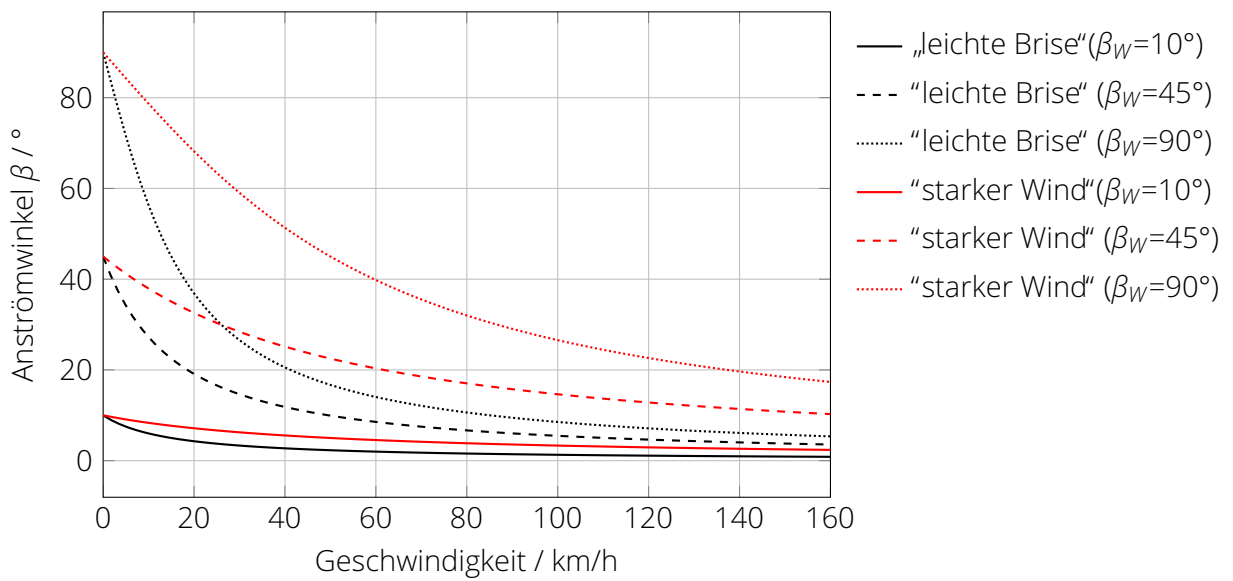


Abbildung 4.19.: Effektiver Anströmwinkel für verschiedene Windangriffswinkel bei schwachem und starkem Wind in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit

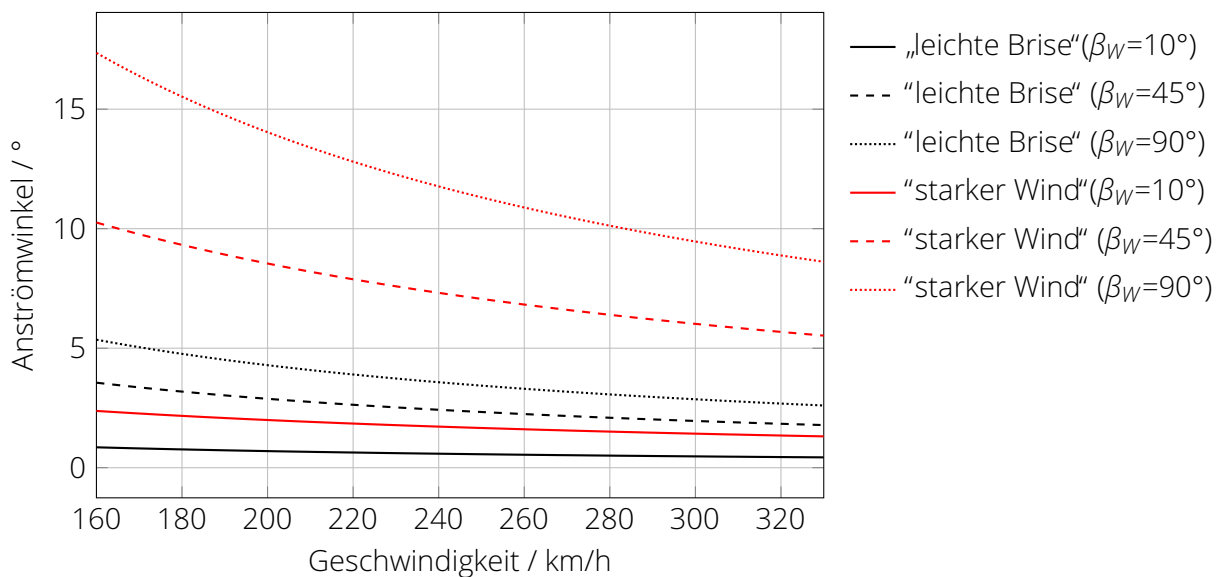


Abbildung 4.20.: Effektiver Anströmwinkel für verschiedene Windangriffswinkel bei schwachem und starkem Wind in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit

💡 Luftwiderstand Schnellzug II



Der Luftwiderstand des im Zuge der letzten Beispielrechnung schon einmal betrachteten Schnellzuges soll nocheinmal ermittelt werden, diesmal unter Berücksichtigung eines Windes (Windgeschwindigkeit $v_W = 15 \text{ km/h}$), der den Zug schräg von vorn in einem Winkel β_W von 30° anbläst.

1. Berücksichtigung eines pauschalen Gegenwindzuschlages Δv :

- a) Bestimmung von Δv :

$$\Delta v = v_W \cos \beta_W = 15 \text{ km/h} \cdot \cos 30^\circ \approx 13 \text{ km/h} = 3,6 \text{ m/s}$$

- b) Bestimmung des Luftwiderstandes mit Hilfe von Gleichung 4.14:

$$\begin{aligned} F_{WL} &= \frac{\rho_L}{2} [c_{w,T} + c_{w,W1} + (n-2)c_{w,Wm} + c_{w,Wn}] \cdot A(v + \Delta v)^2 \\ &= \frac{1,225 \text{ kg}}{2 \text{ m}^3} \cdot 2,02 \cdot 10 \text{ m}^2 \cdot (44,4444 \text{ m/s} + 3,6 \text{ m/s})^2 \\ &= 28559 \text{ N} = 28,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

2. Berücksichtigung des Seitenwindkorrekturfaktors (Gleichung 4.15)

- a) Aufstellung der Gleichung für Reisezug:

$$W_{WL} = \frac{\rho}{2} (c_W + 0,0007 \cdot \beta^2) A_{\text{norm}} \cdot v_S^2$$

- b) Ermittlung des Anströmwinkels:

$$\beta = \arctan \frac{v_W \sin \beta_W}{v + v_W \cos \beta_W} = \arctan \frac{15 \text{ km/h} \sin 30^\circ}{160 \text{ km/h} + 15 \text{ km/h} \cos 30^\circ} = 2,48^\circ$$



Luftwiderstand Schnellzug II (Fortsetzung)

c) Ermittlung der Anströmgeschwindigkeit:

$$\begin{aligned} v_S &= \sqrt{(v + v_W \cos \beta_W)^2 + v_W^2 \sin^2 \beta_W} \\ &= \sqrt{(160 \text{ km/h} + 15 \text{ km/h} \cos 30^\circ)^2 + 15 \text{ km/h}^2 \sin^2 30^\circ} \\ &= 173,2 \text{ km/h} = 48,1 \text{ m/s} \end{aligned}$$

d) Abschätzung des Luftwiderstandes:

$$\begin{aligned} W_{WL} &= \frac{\rho}{2} \left(c_W + 0,0007 \cdot \beta^2 \right) A_{\text{norm}} \cdot v_S^2 \\ &= \frac{1,225 \text{ kg}}{2 \text{ m}^3} \left(2,02 + 0,0007 \cdot 2,48^2 \right) \cdot 10 \text{ m}^2 \cdot 48,1^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \\ &= 28686 \text{ N} \approx 28,7 \text{ kN} \end{aligned}$$

Beide Ansätze liefern sehr ähnliche Ergebnisse. Berücksichtigt man den Einfluss des Windes, erhält man mit 28,6 kN eine um 17 % vergrößerte Luftwiderstandskraft gegenüber der idealisierten Luftwiderstandskraft bei Windstille (→ Rechenbeispiel „Luftwiderstand Schnellzug I“ auf Seite 30).

Beeinflussung des Luftwiderstandes

Bezugnehmend auf die in Abschnitt 4.3.3 diskutierten Komponenten des Luftwiderstandes soll im Folgenden auf die konstruktiven und gestalterischen Möglichkeiten, den Luftwiderstand von Schienenfahrzeugen zu beeinflussen, eingegangen werden. Ergänzende Beispiele und Erläuterungen enthält Anhang A.

Aerodynamische Detailuntersuchungen (vgl. z.B. [1]) zeigen, dass sich der Luftwiderstand konventioneller Schnellzüge zu jeweils etwa einem Drittel auf die folgenden Effekte zurückführen lässt:

- Oberflächenreibungskraft (ca. 35 %),
- die Gestaltung von Bug und Heck (ca. 29 %) sowie
- die Verwirbelungen an der Fahrzeugunterseite, den Fahrzeugübergängen, den Fahrwerken und den Stromabnehmern (ca. 36 %).

Es kann ferner festgehalten werden, dass sich der Luftwiderstand von Reisezügen durch eine Veränderung des Fahrzeugkonzeptes (lokbespannter Zug vs. Triebzug) sowie der aerodynamischen Optimierung der Fahrzeugkonturen und -oberflächen in einer Größenordnung von 40...50 % reduzieren lässt [1].

Bei **Hochgeschwindigkeitszügen** sind Bug und Heck in der Regel hinsichtlich eines möglichst geringen aerodynamischen Widerstandes optimiert. Der Anteil anderer Komponenten am Luftwiderstand erhöht sich dadurch, wenngleich die absoluten Teilwiderstandskräfte natürlich deutlich unter dem Niveau konventioneller Züge liegen.

Wenngleich Verallgemeinerungen schwierig sind, lässt sich doch festhalten, dass die Widerstandsanteile bei Hochgeschwindigkeitszügen anders gewichtet sind als bei konventionellen Zugverbänden. Grob sortiert nach der Größenordnung ihres Anteils am Luftwiderstand von Hochgeschwindigkeitszügen können je nach Quelle und konkreter Triebzugkonfiguration folgende Regionen an den Fahrzeugen aufgeführt werden:

1. Unterböden und Drehgestelle (ca. 25...50 % Anteil am Luftwiderstand)
2. Oberflächen(reibungskraft) (ca. 30...40 % Anteil am Luftwiderstand)
3. Bug und Heck (ca. 10...15 % Anteil am Luftwiderstand)
4. Stromabnehmer und Dachausrüstung (ca. 7...15 % Anteil am Luftwiderstand)
5. Wagenübergänge (ca. 3...5 % Anteil am Luftwiderstand)

Generell lassen sich folgende Faktoren zur Beeinflussung des Luftwiderstandes sowohl von Reise- als auch von Güterzügen festhalten:

- die Zuglänge,
- die Formgebung von Bug und Heck,
- die Gestaltung der Wagenübergänge bzw. die Größe der Lücken zwischen den Aufbauten der Wagen,
- die Anzahl und Anordnung der Querschnittswechsel über der Zuglänge,
- der Umfang der Dachausrüstung,
- die Art und der Umfang von Verkleidungen,
- die Gestaltung der Fahrzeugunterseiten,
- die Anzahl und Art der Fahrwerke

Im Folgenden werden diese Faktoren kurz diskutiert und mit Praxisbeispielen unterlegt.

Zuglänge Die Zuglänge wirkt sich sowohl auf die Komponente „Oberflächenreibung“ als auch auf den Verwirbelungswiderstand aus. Je mehr Fahrzeuge in einem Zugverband eingestellt wird, desto größer wird die Oberfläche der Züge und desto mehr Möglichkeiten (Fahrwerke, Wagenübergänge, Dachaufbauten usw.) zur Wirbelbildung entstehen. Diese Zusammenhänge sind einigermassen trivial, weshalb von Bildbeispielen abgesehen wird.

Formgebung von Bug und Heck Die Formgebung von Bug und Heck ist die augenfälligste Möglichkeit, den Luftwiderstand zu beeinflussen. Gleichwohl spielt ihr Anteil, insbesondere im Vergleich zu den wesentlich kürzeren Straßenfahrzeugen⁴ eine geringere Rolle.

Insbesondere bei der Entwicklung reiner Güterzuglokomotiven wurde und wird aufgrund der geringen gefahrenen Geschwindigkeiten und des hohen Kostendrucks beim Bau der Fahrzeuge wenig Wert auf eine aerodynamisch vorteilhafte Formgebung gelegt (siehe zum Beispiel die Lokomotive TEM10 in Abbildung 4.21).

Die Formgebung von Bug und Heck ist im Allgemeinen dann als „aerodynamisch günstig“ anzusehen, wenn die Zunahme des Fahrzeugquerschnittes entlang der Fahrzeuglängsachse stetig und allmählich erfolgt. Bei Triebzügen oder anderen dauerhaft gekuppelten Fahrzeugverbänden ist dies relativ problemlos zu realisieren. Bei Lokomotiven, die als Zweichrichtungsfahrzeuge konzipiert werden, ergibt sich jedoch potentiell ein Zielkonflikt (siehe Abbildung 4.22).

Eine eher „kantige“ Formgebung der Lokomotive (obere Hälfte der genannten Abbildung) hat den Nachteil eines erhöhten Luftwiderstandes, der aus dem Staudruck vor der Lokomotive und eventuellen Verwirbelungen an scharfen Fahrzeugkanten resultiert. Allerdings gestaltet

⁴Bei Straßenfahrzeugen spielt hingegen der Effekt der Oberflächenreibung eine eher geringe Rolle.



(a) Kopfparte einer kasachischen TEM10-Güterzuglokomotive - Bei der Gestaltung dieser Fahrzeuge in der damaligen Sowjetunion dürften aerodynamische Erwägungen kaum eine Rolle gespielt haben.



(b) Kopfparte der BR 101 der Deutschen Bahn AG - Die Front der Lokomotive ist erkennbar angeschrägt, der Winkel jedoch steil gehalten, damit die Lücke zum ersten Folgefahrzeug nicht zu groß wird.

Abbildung 4.21.: Vergleich der Frontpartien unterschiedlicher Lokomotiven

sich die Luftströmung zwischen der Lokomotive und dem ersten Folgefahrzeuge tendenziell günstiger als bei einer Lokomotive mit angeschrägtem/abgerundetem Fahrzeugkopf (unter Teil der Abbildung 4.22). Wird die durch die „rundere“ Kopfform hervorgerufene Lücke zwischen Lokomotive und erstem Folgefahrzeug zu groß, bilden sich in diesem Bereich im ungünstigsten Fall Verwirbelungen sowie zusätzliche Unter- und Überdruckzonen, sodass der positive Effekt am Kopf der Lokomotive kompensiert (im schlimmsten Fall: überkompensiert) werden könnte. Es muss also ein sinnvoller Kompromiss bei der Optimierung gefunden werden, der zur Minimierung des Gesamtluftwiderstandes von Lokomotive *und* Wagenzug führt. Abbildung 4.21 zeigt vergleichend die Kopfformen einer Güterzuglok und einer Lok für den hochwertigen Reisezugverkehr. Weitere Beispiele für die Gestaltung der Frontpartien verschiedener Schienenfahrzeuge enthält Anhang A.1.

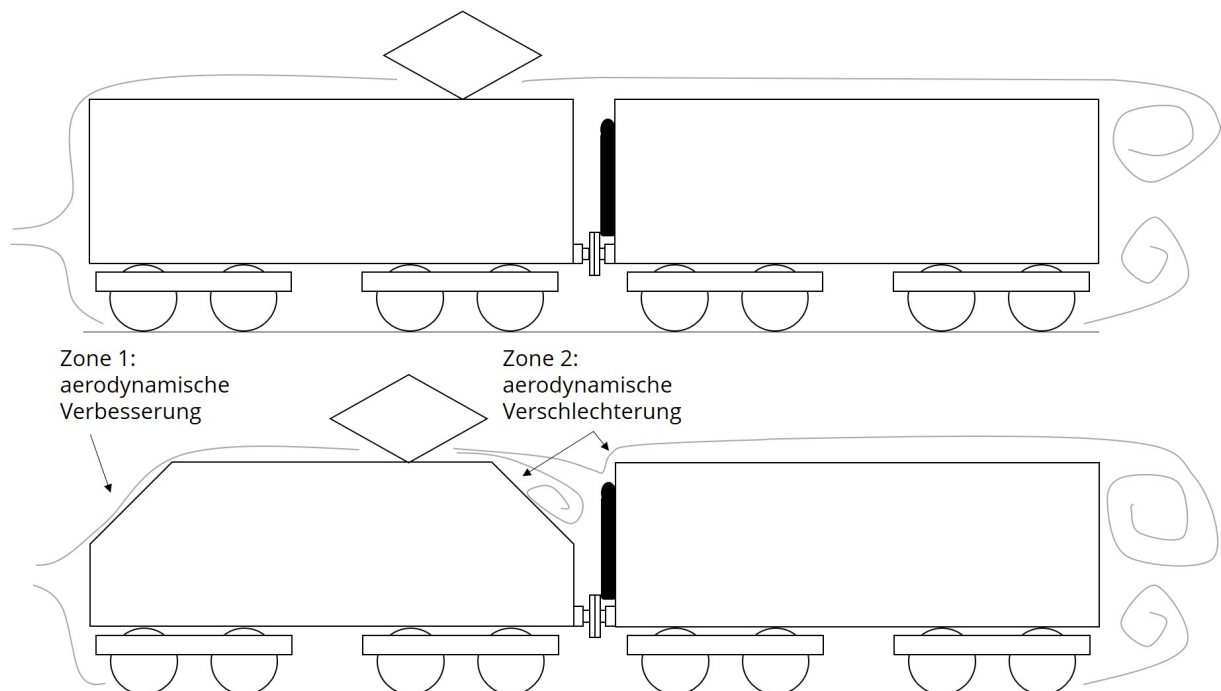


Abbildung 4.22.: Zielkonflikt bei der Gestaltung der Kopfform von Lokomotiven

Wagenübergänge Die Wagenübergänge sollten aus aerodynamischer Sicht so gestaltet werden, dass Einzüge und Lücken minimiert oder ganz vermieden werden. Bei Hochgeschwindigkeitszügen ist es üblich, die Wagenübergänge bündig mit dem Wagenkasten zu gestalten (siehe Abbildung 4.23). Das generelle Ziel bei der Gestaltung der Außenkonturen insbesondere von Fahrzeugen, die mit höheren Geschwindigkeiten verkehren, ist eine bestmögliche „Führung“ der Strömung. Sie soll am Fahrzeug anliegen und nicht durch größere Unstetigkeiten (dazu zählen unter Umständen auch schon Griffstangen oder Einzüge für die Türen) abreißen oder zur Bildung von Verwirbelungen angeregt werden.

Spalte, Lücken und Querschnittswechsel können spätestens dann hinsichtlich der erzeugten Zusatzwiderstände an Bedeutung gewinnen, wenn Züge nicht direkt von vorn sondern schrägt angeströmt werden und die Luftströmung durch eine ungünstige Gestaltung der Wagenzwischenräume neue Angriffsflächen findet oder an scharfen Kanten abreißt.



(a) Wagenübergang bei einem klassischen Wagenzug - Es ist ein deutlicher Spalt zwischen den Dächern der Wagen erkennbar und die beiden Gummibälge des Überganges schließen nicht bündig mit dem Wagenkasten ab.



(b) Wagenübergang bei einem AGV-Hochgeschwindigkeitszug - Der Spalt zwischen den Wagen ist auf ein Minimum reduziert und die elastischen Verbindungselemente dadurch von außen praktisch kaum noch sichtbar.

Abbildung 4.23.: Vergleich der Wagenübergänge im konventionellen Verkehr und im Hochgeschwindigkeitsverkehr

Querschnittswechsel Querschnittswechsel können schon bei „normalen“ Wagenübergängen eine Rolle spielen, sind aber insbesondere bei gemischten Güterzügen und Containerzügen mit unvollständiger Beladung zu beachten (siehe Abbildung 4.24). Jede größere Lücke, die im Höhenprofil des Zugverbandes entsteht, führt dazu, dass im Windschatten der größerer Querschnitte ein lokaler Unterdruck oder gar Verwirbelungen entstehen und jede zusätzliche Stirnfläche, die sich der Strömung erneut entgegenstellt erzeugt zusätzliche Druckwiderstandskräfte. Im schlimmsten Fall ist die Oberfläche des Zuges so zerklüftet, dass sie eigentlich nur eine Aneinanderreihung von Störstellen für die Luftströmung darstellt. Die Zahl der Querschnittswechsel entlang der Längsachse von Zügen ist deshalb aus fahrdynamischer Sicht zu minimieren und die Wagen sortiert nach abfallender Querschnittsfläche hinter der Lokomotive anzuordnen. Dass dies aus logistischen Gründen nicht immer möglich ist, liegt auf der Hand, trotzdem sollte die Notwendigkeit einer aerodynamisch sinnvollen Wagenreihung immer mitgedacht werden, wenn es um die Verminderung der Luftwiderstandskräfte von Zügen geht.

Dachausrüstung Damit sich auch im Dachbereich der Züge eine verlustarme Luftströmung ausbilden kann, ist es notwendig, den Umfang der Ausrüstungsgegenstände auf dem Dach zu



(a) Ausschnitt aus einem gemischten Güterzug - Die jeweils unterschiedlichen Querschnitte der drei aufeinanderfolgenden Wagen sind deutlich erkennbar.



(b) Containertragwagen - Durch die unvollkommene Beladung des Wagens entsteht eine Lücke und dadurch ein zusätzlicher doppelter Querschnittswechsel.

Abbildung 4.24.: Beispiele für Querschnittswechsel entlang der Längsachse des Zuges im Güterverkehr

minimieren. Bei Hochgeschwindigkeitszügen wird diese Maßnahme weitgehend befolgt, so dass dort, maximal Stromabnehmer und eine minimale Anzahl von Isolatoren zu finden sind. Insbesondere bei Nahverkehrsfahrzeugen mit hohem Niederfluranteil ist es allerdings mangels alternativer Einbauräume häufig unabdingbar, zusätzliche Elemente auf dem Dach unterzubringen. Diese sollten mindestens seitlich mit Schürzen versehen, am besten jedoch voll verkleidet werden.

Verkleidungen und Gestaltung der Fahrzeugunterseite Verkleidungen sind, historisch gesehen, die älteste und vermeintlich einfachste Möglichkeit den Luftwiderstand von Schienenfahrzeugen zu verringern. Sie stellen aber auf der anderen Seite auch immer eine zusätzliche Masse sowie ein Hindernis für die Wartung und Instandhaltung der dahinter oder darunter liegenden Baugruppen dar. Zudem verteuern sie das Fahrzeug in der Anschaffung. Bei Fahrzeugen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs werden umfangreiche Verkleidungen und Einhausungen auf dem Dach, im Bereich der Fahrwerke und unter dem Fahrzeug nicht infrage gestellt, weil sie bei diesen Fahrzeugen eine absolute Notwendigkeit darstellen. Neben den Fahrwerken ist insbesondere die Fahrzeugunterseite eine bedeutende Störquelle bei höheren Geschwindigkeiten, weshalb heute eine großflächige Abdeckung/Verkleidung dieser Fahrzeugregion bei schnell fahrenden Fahrzeugen angestrebt wird (vgl. Abbildung 4.25). Bei Fahrzeugen, die im mittleren Geschwindigkeitsbereich (100-200 km/h) verkehren, sind jedoch häufig nur Teilverkleidungen oder lediglich seitliche Schürzen im Dachbereich und zwischen den Fahrwerken anzutreffen.

Auch für den Güterverkehr gab und gibt es Ansätze [2], durch gezielte konstruktive Maßnahmen, den aerodynamischen Widerstand der Wagenzüge zu verringern, allerdings stehen dort insbesondere Kostenfragen und die für den Lade-, Entlade- und Rangierbetrieb nötige Robustheit im Vordergrund, sodass nicht alle theoretisch vorhandenen Potentiale auch ausgeschöpft werden.

Anzahl und Art der Fahrwerke Jedes Fahrwerk ist eine potentielle Ursache für Verwirbelungen in der Luftströmung. Fahrwerke zu verkleiden bzw. einzuhausen stellt einen nicht unerheblichen Aufwand und eine Behinderung bei der Wartung und Instandhaltung dar (siehe oben). Wenn es gelingt, die Anzahl der Fahrwerke zu verringern, kann das Ziel, den durch sie verursachten Luftwiderstand zu verringern, sehr elegant gelöst werden. Jakobsdrehgestelle bieten



(a) Unterseite eines IC-Wagens - Es ist deutlich zu erkennen, wie zerklüftet die Flächen unter dem Fahrzeug sind. Zahlreiche Elemente der Druckluftbremse und der Klimaanlage sind ohne weitere Verkleidung montiert und sorgen für Verwirbelungen.



(b) Unterseite eines ICE-T-Triebzuges - Es wurde eine großflächige Verkleidung nahezu der gesamten Fahrzeugunterseite vorgenommen.

Abbildung 4.25.: Beispiele für unterschiedlich gestaltete Fahrzeugunterseiten von Fernverkehrsfahrzeugen

die Möglichkeit, zwei Wagenkastenenden auf einem Drehgestell abzustützen und damit ein Drehgestell (und auch dessen Masse) pro Fahrzeugteil einzusparen. Allerdings erfordern sie ein hohes Maß an Leichtbau, weil die Anzahl der Radsätze, auf die die Fahrzeugmasse verteilt wird, naturgemäß geringer ist, als wenn konventionelle Drehgestelle zum Einsatz kommen. Der Einsatz von Jakobsdrehgestellen trägt somit sowohl zur Reduzierung des aerodynamischen Widerstandes, als auch zur Verminderung der Fahrzeugmasse bei.

4.3.4. Tunnelwiderstandskraft

Bewegen sich Schienenfahrzeuge durch Tunnel, die wesentlich länger sind, als sie selbst, ist ein deutlicher Anstieg des Luftwiderstandes zu beobachten. Dieser Zusatzwiderstand wird in der Fahrdynamik (wenig überraschend) als Tunnelwiderstand bezeichnet und dem Luftwiderstand zugeordnet, obwohl Infrastrukturparameter (Tunnellänge, Tunnelquerschnittsfläche, u.a.) eine wesentliche Rolle spielen.

Die Entstehung des Tunnelwiderstandes erklärt sich aus der Tatsache, dass die Luftströmung im Tunnel im Vergleich zur freien Strecke gestört ist. Drei im Folgenden erläuterte wesentliche Umstände kommen dabei zusammen.

1. Erschwerte Luftverdrängung und Aufbau einer Luftsäule vor dem Fahrzeug/Zug:

Die Strömung der von den Fahrzeugen verdrängten Luftmassen wird durch die Tunnelwände behindert, sodass diese vornehmlich in Richtung des Tunnelausgangs gerichtet sind und sich vor dem Zug eine Luftsäule aufbaut. Die für die Verdrängung dieser Luftsäule zum Tunnelausgang hin benötigte Kraft steigt mit der (Rest-)Länge des Tunnels an, da der Luftmassenstrom mit der Tunnelwand interagiert, die einen Strömungswiderstand darstellt.

Anmerkung: Die Luftsäule vor Zügen, die einen Tunnel befahren, kann „erfühlt“ werden. Wenn Sie in einem unterirdischen U-Bahnhof auf die U-Bahn warten, kündigt sich der herannahende Zug durch eine deutlich wahrnehmbare Luftströmung auf dem Bahnsteig an.

2. Erhöhung der Sogwiderstandskraft am Ende des Zuges

Aus den gleichen Gründen, warum sich die Druckkraft vor dem Fahrzeug/Zug im Tunnel

erhöht, wird auch die Sogwiderstandskraft gesteigert, weil der Druckausgleich hinter dem Fahrzeug durch die erschwerten Strömungsbedingungen im Tunnel verzögert wird.

3. Erhöhter Oberflächenreibungswiderstand im Spalt zwischen Zug und Tunnelwand

Die im Luftspalt zwischen (stillstehender) Tunnelwand und (fahrendem Zug) befindliche Luftmasse erfährt im Vergleich zur offenen Strecke erhöhte Reibungsverluste, die sich in einer erhöhten Oberflächenreibungskomponente im Luftwiderstand des Zuges niederschlagen.

Aus den vorstehend aufgelisteten und erläuterten Phänomenen ergeben sich die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Tunnelwiderstand:

1. die **Tunnellänge**: Je länger ein Tunnel ist, desto größer ist die Erhöhung des Luftwiderstandes bezüglich der Fahrt auf freier Strecke, die sich beim Befahren dieses Tunnels einstellt. Die Abhängigkeit ist nichtlinear und weist einen degressiven Verlauf auf (vgl. Abbildung 4.26).
2. die **Tunnelquerschnittsfläche**: Je enger ein Tunnel gebaut ist, desto größer fällt die Erhöhung des Luftwiderstandes im Tunnel aus (siehe Abbildung 4.26). Somit besteht bei der Bohrung neuer Tunnel ein Zielkonflikt bezüglich der Gewichtung der Baukosten (großer Querschnitt = großer Aushub = hohe Baukosten) und der Betriebskosten (geringer Querschnitt = höherer Fahrzeugwiderstand = höherer Energiebedarf) - siehe dazu auch [17].
Der Tunnelquerschnitt A_{Tu} wird üblicherweise ins Verhältnis zur (genormten) Querschnittsfläche der Fahrzeuge gesetzt, woraus sich der sogenannte **Versperrungskoeffizient** k_V wie folgt ergibt:

$$k_V = \frac{A_{norm}}{A_{Tu}} \quad (4.18)$$

Der Versperrungskoeffizient variiert von Tunnel zu Tunnel (siehe Abbildung 4.27) und muss deshalb stets fallbezogen ermittelt werden.

3. die **Rauhigkeit der Tunnelwände**: Um die Reibungsverluste der Luftströmung an den Tunnelwänden so gering wie möglich zu halten, wird bei Tunneln eine Auskleidung mit Materialien angestrebt, die die gewünschten Oberflächeneigenschaften aufweisen. Die Auswirkungen der Rauhigkeit der Tunnelwände auf den Tunnelwiderstand ist im Vergleich am geringsten (siehe Abbildung 4.26), sollte jedoch bei der Gestaltung von Tunneln trotzdem nicht vernachlässigt werden.

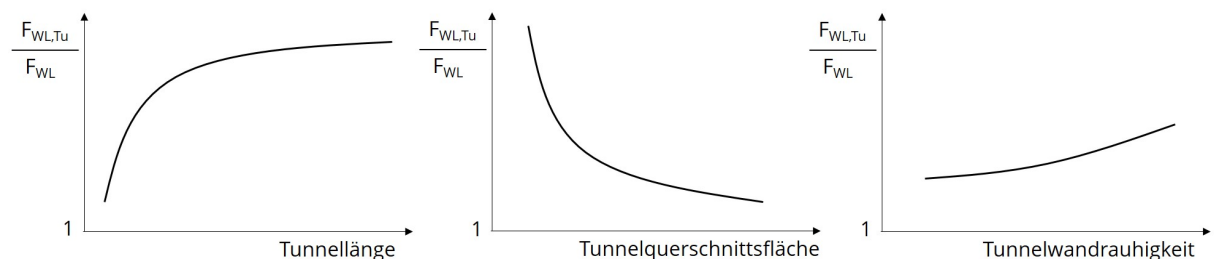


Abbildung 4.26.: Qualitative Abhängigkeiten der Haupteinflussfaktoren auf den Luftwiderstand im Tunnel $F_{WL,Tu}$ bezogen auf den nominellen Luftwiderstand F_{WL}

Für die rechnerische Berücksichtigung des Tunnelwiderstandes $F_{WL,Tu}$ wird der von den konkreten Verhältnissen im jeweiligen Tunnel abhängige Tunnelfaktor θ_{Tu} eingeführt und die Gleichung für den Luftwiderstand gemäß Gleichung 4.19 abgewandelt, wobei in Tunneln ohne den



(a) Beispiel für einen relativ engen Tunnel mit vergleichsweise hohem Versperrungskoeffizienten



(b) Beispiel für einen vergleichsweise großzügigen Tunnelquerschnitt

Abbildung 4.27.: Beispiele für Tunnel mit unterschiedlich großzügigen Querschnitten und somit abweichenden Versperrungsfaktoren

Gegenwindzuschlag Δv (siehe S. 31) gerechnet wird.

$$F_{WL,Tu} = \theta_{Tu} \cdot F_{WL} \quad (4.19)$$

Für den Gotthard-Basistunnel haben Schranil und Lavanchy in [16] für verschiedene typische Zugkompositionen Tunnelfaktoren zwischen 1,485 und 1,561 mittels Versuchsfahrten ermittelt.



Tunnelwiderstand

Fahren Eisenbahnfahrzeuge durch (lange) Tunnel kommt es zu einer deutlichen Erhöhung der Luftwiderstandskraft. Dieses Phänomen wird als Tunnelwiderstand bezeichnet und rechnerisch mit der Einführung eines Tunnelfaktors in der Gleichung für den Luftwiderstand berücksichtigt.

Der Tunnelfaktor ist stets größer als 1 und von der Länge des Tunnels, seiner Querschnittsfläche sowie der Rauigkeit der Tunnelwände abhängig. Er muss für jeden Tunnel individuell ermittelt werden.

Es müssen bei Berechnungen generell nur Tunnel berücksichtigt werden, die länger als 500 m und dabei gleichzeitig länger als der betrachtete Zug sind.

4.3.5. Empirisch ermittelte Fahrzeugwiderstandskräfte

Für die Ermittlung des Fahrzeit- und Energiebedarfes von Zugfahrten sind in der Regel nicht die Teilwiderstandskräfte, sondern der gesamte Fahrzeugwiderstand von Interesse. Dieser kann entweder über die Summierung der Teilwiderstandskräfte berechnet werden oder er ist über empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen zugänglich. Die letztgenannte Option ist in den allermeisten Fällen die Vorzugsvariante, weil beispielsweise die Ermittlung von Luftwiderstandsbeiwerten in Windkanalversuchen aufgrund des hohen Aufwandes bei Schienenfahrzeugen eher die Ausnahme als die Regel ist.

Die empirischen Gleichungen werden prinzipiell im Rahmen von Versuchen ermittelt. Bezüglich der Durchführung dieser Versuche sei auf den Infokasten verwiesen.

Die Fahrzeugwiderstandskräfte werden für Triebfahrzeuge und Triebzüge als Absolutkraft in der Form $F_{WFT}(v)$ und für Wagenzüge als spezifische Kraft in der Form $f_{WFW}(v)$ angegeben. Die entsprechenden Gleichungen weisen im Allgemeinen folgende Struktur auf:

$$F_{WFT} = A + Bv + C(v + \Delta v)^2. \quad (4.20)$$

$$f_{WFW} = \alpha + \beta v + \gamma \cdot v^2 \quad (4.21)$$

Wende schlägt in [19] vor, diese Gleichungen auf 100 km/h zu normieren, was den Vorteil hat, dass die Geschwindigkeit unmittelbar in der Einheit km/h in die empirischen Gleichungen eingesetzt werden kann⁵ und man zudem für „typische“ Eisenbahngeschwindigkeiten mit übersichtlichen Dezimalzahlen⁶ arbeiten kann.

In Anerkennung der Vorteile dieser Normierung und im Sinne der Fortführung einer „Dresdener Schule“ der Fahrdynamik werden deshalb im Rahmen der Lehrveranstaltung alle empirischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen nach folgendem Schema angegeben:

$$F_{WFT} = A + B \frac{v}{100} + C \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2, \quad (4.22)$$

$$f_{WFW} = \alpha + \beta \frac{v}{100} + \gamma \left(\frac{v}{100} \right)^2. \quad (4.23)$$

Der empirische Charakter der Gleichungen ist unbedingt zu beachten. Zwar können die konstanten Faktoren A bzw. α als dem (spezifischen) Grundwiderstand der Fahrzeuge/Züge korrelierend betrachtet werden, sie sind jedoch *nicht* mit diesem *identisch*. Gleiches gilt sinngemäß für den Luftwiderstand(sbeiwert) und den quadratischen Koeffizienten C bzw. γ in den Gleichungen 4.22 und 4.23. Eine *Abschätzung* der Widerstandsanteile mit Rückgriff auf die Koeffizienten $A(\alpha)$ und $C(\gamma)$ ist mangels praktikabler Alternativen dennoch statthaft.

⁵Selbstverständlich entwertet das nicht die Bemühungen, die mutmaßlich seit dem ersten Tag des Studiums in Sie investiert worden sind und zum Ziel hatten, dass Sie sich bei physikalischen Berechnungen bitte immer der SI-Einheiten bedienen. Die Fahrdynamik ist jedoch eine sehr praxisbezogene Ingenieursdisziplin und es ist grundsätzlich „praktischer“ mit km/h als der Einheit der Geschwindigkeit zu rechnen. Die Fahrdynamik behelgt Sie in der Regel nicht mit hochkomplexen mathematischen Fragestellungen, insofern könnten Sie sich, gewissermaßen „zum Dank“ einprägen, dass in empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen so gut wie immer die Geschwindigkeit in der Einheit km/h einzusetzen ist.

⁶z.B. 40/100=0,4 und 80/100=0,8 und 160/100=1,6 usw.



Ermittlung empirischer Fahrzeugwiderstandsgleichungen

Für die Ermittlung der fahrdynamischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen stehen prinzipiell zwei verschiedene experimentelle Methoden zur Verfügung: der Auslaufversuch sowie der Konstantfahrversuch. Beide Versuche werden in der Regel entweder mit Zügen und nur im Ausnahmefall mit Einzelfahrzeugen durchgeführt.

Das Ergebnis der Versuche sind in beiden Fällen quadratische Polynomgleichungen F_{WF} , die entweder zwei- oder dreigliedrig sein können, je nachdem, für welche Variante die Approximation besser abbildet.

Auslaufversuche

Um Auslaufversuche durchzuführen, wird ein längerer gerader Gleisabschnitt benötigt, der entweder keine Längsneigung oder genau bekannte (geringe) Längsneigungen und möglichst wenige Neigungswechsel aufweisen soll. Außerdem sollen die Versuche nur bei weitgehender Windstille (die Windverhältnisse an der Versuchsstrecke sind zu protokollieren) durchgeführt werden, um die Störeinflüsse von Seiten-, Gegen- oder Rückenwind zu minimieren. Allenfalls sind die Versuche auf demselben Streckenabschnitt in beiden Fahrtrichtungen durchzuführen.

Der prinzipielle Ablauf von Auslaufversuchen sieht vor, den Zug auf eine bestimmte Ausgangsgeschwindigkeit zu beschleunigen und ihn dann frei auslaufen zu lassen (es dürfen weder Antriebs- noch Bremskräfte wirksam sein). Während des Auslaufvorganges wird der Verlauf der Verzögerung über der Geschwindigkeit aufgezeichnet. Da die Auslaufwege insbesondere bei Fahrzeugen, die sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen, sehr groß ist, müssen der Geschwindigkeitsbereich des untersuchten Fahrzeuges ggf. in Intervalle aufgeteilt werden.

Im Ergebnis der Versuche (die mehrmals wiederholt werden) liegt eine Punktwolke $a_i(v_i)$ vor, in die eine Ausgleichsfunktion gelegt wird, sodass die Summe der quadratischen Abweichungen minimal wird. Aus der erhaltenen Funktion $a(v)$ lässt sich in Kenntnis der Trägheitseigenschaften des Zuges (fahrdynamisch äquivalente Masse) und ggf. der aufgetretenen Streckenlängsneigungen auf die Funktion $F_{WFZ}(v)$ schließen.

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass sich der Fahrzeugwiderstand vollständiger Zugverbände mit überschaubarer Instrumentierung ermitteln lässt und an die Fähigkeiten der beteiligten Triebfahrzeugpersonale keine besondere Bedingungen zu stellen sind.

Konstantfahrversuche

Die Randbedingungen der Versuche sind mit denen der Auslaufversuche identisch. Allerdings werden die zu untersuchenden Fahrzeuge in diesem Fall auf eine bestimmte Geschwindigkeit beschleunigt, die anschließend konstant gehalten wird. Über die Messung der dafür erforderlichen Zugkraft kann unmittelbar auf die zu überwindenden (Fahrzeug-)Widerstandskräfte geschlossen werden. Je nachdem, ob die Zughakenzugkraft oder die Treibradzugkraft gemessen werden, erhält man entweder die Wagenzugwiderstandskraft oder die Zugwiderstandskraft.

Der Versuch muss für verschiedene Geschwindigkeiten im gesamten vorgesehenen Spektrum durchgeführt werden und führt auch hier zu einer Wolke von Messwerten $F_{WF}(v)$, die über eine Ausgleichsfunktion approximiert werden muss.

Die manuelle Geschwindigkeitsregelung auf $v \approx \text{const.}$ kann unter Umständen eine große Herausforderung für die beteiligten Triebfahrzeugpersonale sein.

Die Angabe von empirischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen erfolgt in der Regel für konkrete Fahrzeuge oder Fahrzeugkategorien. Die Gleichungen, *die ohnehin nur eine Abschätzung der Fahrzeugwiderstandskräfte darstellen*, sind jeweils auch nur für die angegebenen Fahrzeuge oder Fahrzeugkategorien gültig. Bevor sie auf andere als die angegebene Fahrzeug- oder Zugkategorie angewendet werden können, ist stets die *fahrdynamische Ähnlichkeit* der zu untersuchenden Fahrzeuge oder Fahrzeugkategorie kritisch zu hinterfragen. Um diese *fahrdynamische Ähnlichkeit* beurteilen zu können, sollten folgende Fragen beantwortet werden:

1. Ist die Radsatzfahrmasse (veraltet: Achslast) der zu betrachtenden Fahrzeuge ähnlich der Fahrzeuge, für die die Gleichung gilt?
2. Ist die Fahrwerksart (Raddurchmesser, Lagerart, Radsatzführung, Federungskonzept) der zu betrachtenden Fahrzeuge ähnlich der Fahrzeuge, für die die Gleichung gilt?
3. Sind die aerodynamischen Eigenschaften (siehe Kapitel 4.3.3) der zu betrachtenden Fahrzeuge ähnlich der Fahrzeuge, für die die Gleichung gilt?
4. Aus welcher Epoche stammt die empirische Gleichung?⁷
5. Aus welchem Land stammt die Gleichung? Passen die Fahrzeugquerschnitte, Radsatzlasten und die Spurweite zu dem betrachteten Problem?
6. Wie „seriös“⁸ ist die Quelle, aus der die Gleichung stammt?

Generell findet man in der Fachliteratur Gleichungen für konkrete Fahrzeuge oder Züge sowie für Zugkategorien. Insbesondere die empirischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen für Zugkategorien können dabei einen wesentlich komplexeren Aufbau als die Gleichungen 4.22 und 4.23 aufweisen. So werden mitunter die Fahrzeugmasse, die (mittlere) Radsatzfahrmasse, die Zuglänge oder die Anzahl der Radsätze als zusätzliche Parameter der Koeffizienten in den quadratischen Polynomgleichungen integriert.

Zudem muss stets die Größenordnung der mittels empirischer Gleichungen abgeschätzten Fahrzeugwiderstandskräfte beachtet werden. So ist es im internationalen Kontext möglich, dass Fahrzeugwiderstandskräfte in daN oder lbf angegeben werden. Die Koeffizienten der Gleichungen müssen dann entsprechend angepasst werden, damit sie die gewünschten Ergebnisse (Absolutkräfte in N oder kN, spezifische Kräfte in 1 oder N/kN) liefern.

Im folgenden Abschnitt werden exemplarisch einige empirische Gleichungen für die Abschätzung der Fahrzeugwiderstandskräfte unterschiedlicher Fahrzeuge und Zugkompositionen angegeben. Eine große Auswahl an Gleichungen enthält zudem die Formelsammlung.



Empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen

Fahrzeugwiderstandskräfte von Schienenfahrzeugen werden in ihrer Gesamtheit üblicherweise mit empirischen Gleichungen angegeben. Diese basieren auf Versuchen und sind immer Polynomgleichungen 2. Grades. Sie können dreigliedrig (mit linearem Anteil) oder zweigliedrig (ohne linearen Anteil) sein. Es existieren Gleichungen für konkrete Fahrzeuge oder Zugkompositionen sowie für Zugkategorien. Die Randbedingungen für die Gültigkeit der Gleichungen müssen unbedingt beachtet werden.

⁷Die Literatur enthält eine Vielzahl empirischer Gleichungen, von denen nicht wenige auf Versuche in den 1920er und 1930er-Jahren zurückgehen. Dies ist kritisch zu reflektieren!

⁸Es gibt heute ein Flut von Aufsätzen, die sich mit fahrdynamischen Fragestellungen befassen. Nicht jeder Autor verfügt jedoch über das erforderliche Hintergrundwissen, um die „richtigen“ Gleichungen für das jeweilige Problem auszuwählen. Reflektieren Sie dies stets kritisch, um ggf. Fehlannahmen nicht zu reproduzieren und ihnen durch Zitieren unangemessene Relevanz zu bescheinigen.

Beispielgleichungen Fahrzeugwiderstand

BR 143



$$F_{WFT} = 3,62 + 0,95 \cdot \frac{v}{100} + 4,45 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2$$

BR 232



$$F_{WFT} = 4,56 + 3,53 \cdot \left(\frac{v + 12}{100} \right)^2$$

BR 612



$$F_{WFT} = 1,58 + 1,03 \cdot \frac{v}{100} + 2,9 \cdot \left(\frac{v + 15}{100} \right)^2$$

InterCity 125 (BR)



$$F_{WFT} = 3,22 + 3,13 \cdot \frac{v}{100} + 6,019 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2$$

BB 7200 + 6 Schnellzugwagen (SNCF)



$$F_{WFZ} = 2,54 + 3,34 \cdot \frac{v}{100} + 5,72 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2$$

IC 2000 mit Re 460 (SBB)



$$F_{WFZ} = 6,8 + 7,0 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2$$

Gleichung der SNCF für Reisezüge



$$f_{FW} = 0,0015 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

(nur Wagenzug)

Gleichung für beladene Kohlezüge



$$f_{FW} = 0,0010 + 0,0015 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

(nur Wagenzug)



Einordnung empirischer Fahrzeugwiderstandsgleichungen

Empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen werden häufig nach der Person benannt, die sie ermittelt bzw. (erstmal) veröffentlicht haben.

Im englischen Sprachraum war es W. J. **Davis** jr., der im Jahre 1926 einen Aufsatz mit dem Titel „The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars“ in der *General Electric Review* veröffentlichte. In der englisch-sprachigen Literatur ist deshalb häufig von der „Davis equation“ die Rede, wenn es um empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen geht. Die „Davis-Koeffizienten“ in der Gleichung wurden mittlerweile wiederholt angepasst, um die Gleichung für neuere Fahrzeuggenerationen nutzen zu können.

In Deutschland hat Friedrich **Sauthoff** das Verständnis von Fahrzeugwiderstandskräften geprägt. Er promovierte 1932 an der TH Berlin-Charlottenburg zum Dr.-Ing. mit dem Thema: „Die Bewegungswiderstände der Eisenbahnwagen unter besonderer Berücksichtigung der neueren Versuche der Deutschen Reichsbahn“. Die von ihm ermittelten Gleichungen wurden ebenfalls über die Jahre weiterentwickelt und auf neue Fahrzeuggenerationen angepasst, tragen aber häufig immer noch seinen Namen („Sauthoff-Gleichung“).

Neben den Gleichungen von Sauthoff, die sich überwiegend auf Reisezüge beziehen, wird in der fahrdynamischen Fachliteratur auch auf die Gleichung nach **Strahl** für Güterzüge verwiesen. Dieser Autor veröffentlichte zwischen 1900 und 1920 mehrere Arbeiten zur Auslegung von Dampflokomotiven und somit beziehen sich zumindest seine Originalgleichungen auf den Stand der Technik vom Anfang des 20. Jahrhunderts.

Eine neuere und häufig zitierte Gleichung für die Abschätzung des Fahrzeugwiderstandes schneller Reisezüge stammt aus den 1970er Jahren von **Voss** und wird auch als „Hannoversche Formel“ bezeichnet.



Berechnung von Fahrzeugwiderständen auf empirischer Basis



Die Fahrzeugwiderstandskräfte eines IC-Zuges und eines Güterganzzuges aus geschlossenen Güterwagen sind bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h zu ermitteln.

(Anmerkung: Die Abbildungen dienen nur zur Illustration der Zugkonfigurationen).

Es sind folgende Fahrzeugdaten bekannt:

- Zugwiderstandsgleichung für IC-Zug mit BR 101 und 9 IC-Wagen:

$$F_{WFZ} = 9,71 + 1,1 \cdot \frac{v}{100} + 10,7 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

Fortsetzung auf der nächsten Seite



Berechnung von Fahrzeugwiderständen... (Fortsetzung)

- Wagenzugmasse des Güterzuges: 1500 t
- Triebfahrzeugwiderstandskraft der Güterzuglokomotive:

$$F_{WFT} = 1,42 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,8 \cdot \left(\frac{v+12}{100} \right)^2$$

- spezifische Wagenzugwiderstandskraft des Güterzuges:

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0022 \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

Die Berechnung des Zugwiderstandes für den IC-Zug gestaltet sich denkbar einfach: es ist lediglich die Geschwindigkeit (in km/h) in die empirische Gleichung einzusetzen:

$$\begin{aligned} F_{WFZ} &= 9,71 + 1,1 \cdot \frac{80}{100} + 10,7 \cdot \left(\frac{80}{100} \right)^2 \\ &= 9,71 + 1,1 \cdot 0,8 + 10,7 \cdot 0,8^2 \\ &= 17,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

Im Falle des Güterzuges ist wie folgt vorzugehen:

$$\begin{aligned} F_{WFZ} &= F_{WFT} + F_{WFW} = F_{WFT} + f_{WFW} \cdot m_W \cdot g \\ F_{WFT} &= 1,42 + 0,84 \cdot \frac{80}{100} + 2,8 \cdot \left(\frac{80+12}{100} \right)^2 \\ &= 4,462 \text{ kN} \\ F_{WFW} &= \left[0,0012 + 0,0022 \cdot \left(\frac{80}{100} \right)^2 \right] \cdot 1500 \text{ t} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ &= 0,002608 \cdot 14715 \text{ kN} \\ &= 38,377 \text{ kN} \\ F_{WFZ} &= 4,462 \text{ kN} + 38,377 \text{ kN} \\ &= 42,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

Es wird deutlich, wie groß die Diskrepanz der Zugwiderstandskräfte aufgrund der sehr verschiedenen Zugkonfigurationen ist. Gleichzeitig wird durch die Ergebnisse auch nochmal bekräftigt, wie wichtig es ist, die für ein zu lösendes fahrdynamisches Problem relevanten (im Sinne von: „richtigen“) empirischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen zu finden.

4.4. Streckenwiderstandskräfte

4.4.1. Charakterisierung und Einordnung des Streckenwiderstandes

Der Streckenwiderstand ist neben dem Fahrzeugwiderstand wesentlicher Bestandteil des Fahrwiderstandes von Schienenfahrzeugen. Er selbst setzt sich wiederum aus den Komponenten (Längs-)Neigungswiderstand⁹, (Gleis-)Bogenwiderstand¹⁰ und Weichenwiderstand zusammen (vgl. Abbildung 4.28). Letztgenannter ist nur bei der detaillierten Betrachtungen von Rangiervorgängen (z.B. Abrollvorgänge am Ablaufberg) relevant und wird im Folgenden vernachlässigt.

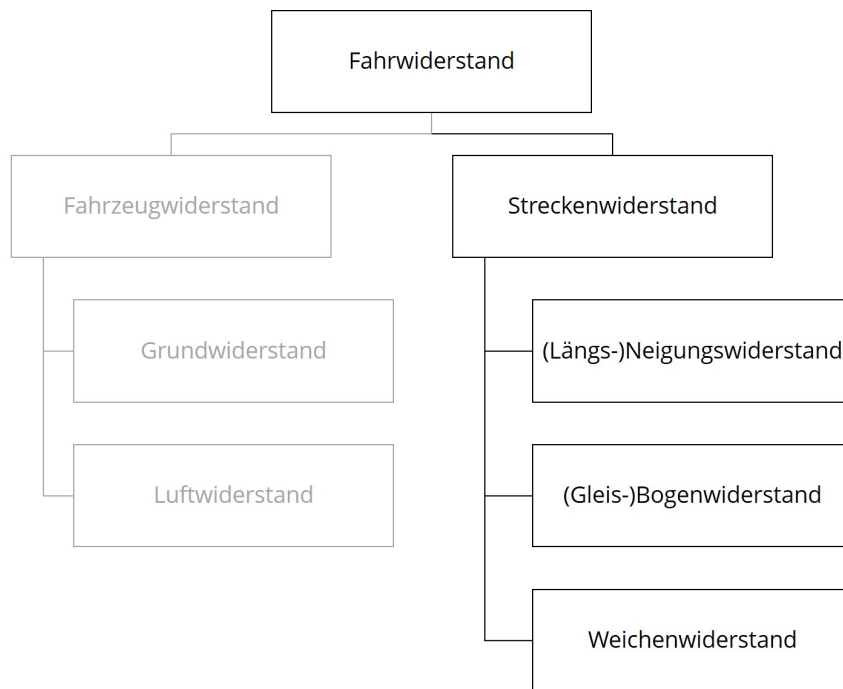


Abbildung 4.28.: Fahrwiderstandshierarchie mit Streckenwiderstand

Im Vergleich zur Fahrzeugwiderstandskraft weist die Streckenwiderstandskraft einige Besonderheiten auf, die im Folgenden genannt und kurz erläutert werden.

1. Streckenwiderstandskräfte sind von Trassierungselementen abhängig und wirken sich auf unterschiedliche Fahrzeuge in gleicher (Neigungswiderstand) oder annähernd gleicher Weise (Bogenwiderstand) aus.
2. Der Streckenwiderstand kann (wenn die Fahrzeuge Gefällestrecken befahren) den Fahrzeugwiderstand kompensieren und sogar eine beschleunigende Wirkung auf das Fahrzeug haben (Vorzeichenwechsel des Streckenwiderstandes).
3. Ändert sich die Fahrtrichtung, muss der Neigungswiderstand invertiert werden, alle übrigen Fahrwiderstandsanteile hingegen nicht.

⁹Da es um die Streckenwiderstandskomponente geht, die von den Längsneigungen der Gleistrasse hervorgerufen werden, ist der Begriff „Längsneigungswiderstand“ formal die richtige Bezeichnung. Da die Längsneigung jedoch die einzige Neigung ist, die fahrdynamisch relevante Widerstandskräfte verursacht, ist meistens vereinfachend von „Neigungswiderstand“ die Rede, so auch in diesem Lehrbrief.

¹⁰Auch hier ist „Gleisbogenwiderstand“ der formal korrekte Begriff, der vereinfachend auf „Bogenwiderstand“ reduziert wird. Teilweise wird auch der Begriff „Krümmungswiderstand“ verwendet. Die Krümmung ist als das Reziproke des Radius⁹ definiert. In diesem Lehrbrief werden die Begriffe „Krümmungs-“ und „Bogenwiderstand“ synonymisch verwendet.

4.4.2. Der Längsneigungswiderstand

Der (Längs-)Neigungswiderstand von (Schienen-)Fahrzeugen kann aus der Kraftzerlegung an der geneigten Ebene abgeleitet werden. Bei einem Fahrzeug, das eine geneigte Ebene befährt, lässt sich die Gewichtskraft als vektorielle Summe von der senkrecht auf den Untergrund wirkenden Normalkraft F_N und der Neigungswiderstandskraft $F_{WS,i}$ formulieren. Der Winkel δ zwischen Normal- und Gewichtskraft entspricht dem Winkel zwischen Ankathete und Hypothenuse im Steigungsdreieck des Streckenprofils (siehe Abbildung 4.29).

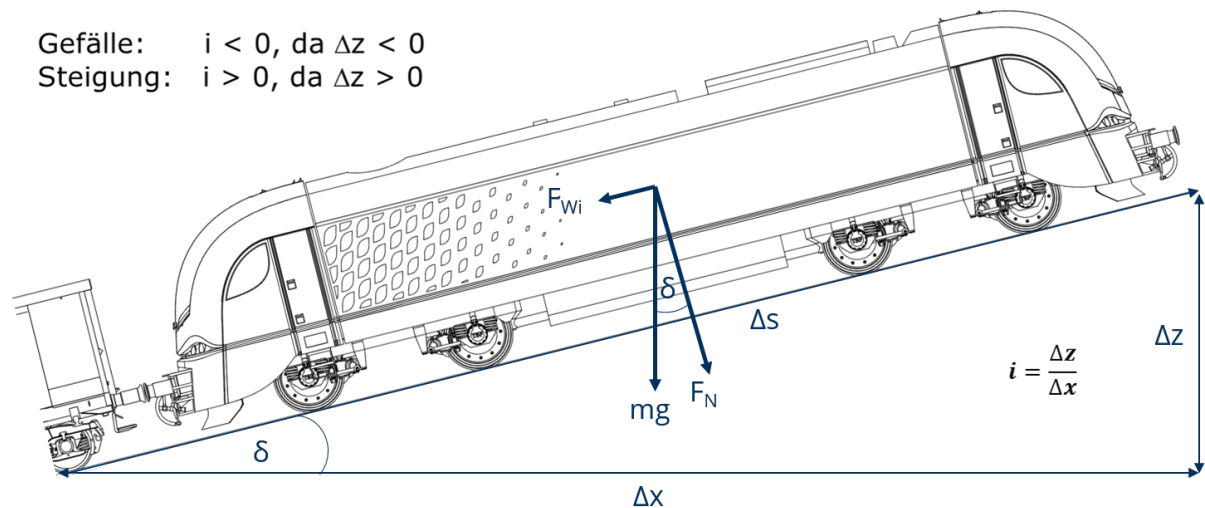


Abbildung 4.29.: Kräftezerlegung an der geneigten Ebene

Für die Neigungswiderstandskraft (=Hangabtriebskraft) ergibt sich folglich folgender Zusammenhang:

$$F_{WS,i} = mg \sin \delta. \quad (4.24)$$

Hinsichtlich des Winkels ergibt sich aus dem Neigungsdreieck (Δx , Δz , Δs - siehe Abbildung 4.29) folgende Gleichung:

$$\sin \delta = \frac{\Delta z}{\Delta s} \quad (4.25)$$

Für kleine Winkel δ gilt: $\Delta s \approx \Delta x$, sodass sich das Δs in Gleichung 4.25 durch ein Δx ersetzen ließe. Wird nun noch in Betracht gezogen, dass die Definition der Längsneigung das Verhältnis von Δz zu Δx ist, so erhält man folgende Gleichung für den Streckenwiderstand:

$$F_{WS,i} = mg \frac{\Delta z}{\Delta s} \approx mg \frac{\Delta z}{\Delta x} = mgi \quad \text{für Neigungen } \leq 100\% \quad (4.26)$$

Was aber sind „kleine Winkel“? Tabelle 4.2 enthält die Werte für δ , $\sin \delta$ und $\Delta z/\Delta x$ für verschiedene Neigungen im Bereich von 5 bis 100 ‰. Es wird deutlich, dass die Abweichungen zwischen dem exakten Wert $\sin \delta$ und dem Verhältnis $\Delta z/\Delta x$ extrem gering sind und die in 4.26 vorgenommene Vereinfachung durchaus gerechtfertigt ist. Als Richtwert gilt für Eisenbahnstrecken in Deutschland, dass ihre Längsneigung über relevante Abschnitte nicht höher als 25 ‰ (Hauptstrecken) bzw. 40 ‰ (Nebenstrecken) liegen soll. Strecken, die Längsneigungen oberhalb der genannten 40 ‰ aufweisen, werden als „Steilstrecken“ bezeichnet. Als Faustregel gilt, dass Eisenbahnstrecken in Deutschland Längsneigungen bis etwa 60 ‰ aufweisen,

Tabelle 4.2.: Längsneigungen und zugehörige trigonometrische Werte

Neigung	δ	$\sin \delta$	$\frac{\Delta z}{\Delta x}$
5 ‰	0,286477°	0,005000	0,005
10 ‰	0,572939°	0,010000	0,010
20 ‰	1,145763°	0,019996	0,020
40 ‰	2,290610°	0,039968	0,040
80 ‰	4,573921°	0,079745	0,080
100 ‰	5,710593°	0,009950	0,010

während Strecken in den Schweizer Alpen Längsneigungen zwischen 60 und 80 ‰ aufweisen können.

Als steilste „Adhäsionsbahn“¹¹ gilt die Pöstlingbergbahn in Österreich mit maximal 116 ‰ Längsneigung.

Die überwiegende Zahl der Eisenbahnstrecken weisen damit Längsneigungen in einem Wertebereich auf, der die in Gleichung 4.26 vorgenommene Vereinfachung rechtfertigt.



Neigungswiderstand

Der Neigungswiderstand von (Schienen-)Fahrzeugen entspricht der Hangabtriebskraft an der geneigten Ebene. Da die Trassierung von Eisenbahnstrecken nur geringe Steigungswinkel zulässt, weisen diese in der Regel Neigungen von deutlich unter 100 ‰ auf. Der Neigungswiderstand lässt sich deshalb vereinfacht mit der Beziehung $F_{WS,i} = mgi$ berechnen.



Berechnungsbeispiel Neigungswiderstand



Der Neigungswiderstand eines Triebwagens ABe 4/16 (Masse: 113 t) der RhB soll für eine Längsneigung von 60 ‰ ermittelt werden.

$$F_{WS,i} = mgi = 113 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,060 = 66,51 \text{ kN}$$

Nach exakter Rechnung erhalte man:

$$F_{WS,i} = mg \sin \delta = 113 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \sin 3,43363 = 66,39 \text{ kN}$$

Die Abweichung beträgt 120 N oder 0,18 ‰ und ist damit sehr gering. Dies zeigt, dass der vereinfachte Ansatz ausreichend ist.

¹¹So werden Eisenbahnstrecken bezeichnet, auf denen die Zugkräfte ausschließlich über den Kraftschluss zwischen Rad und Schiene übertragen werden. Der Begriff dient zur Abgrenzung von Eisenbahnstrecken, die Zahnstangenabschnitte aufweisen.

4.4.3. Der Bogenwiderstand

Bei der Befahrung von Gleisbögen treten zusätzliche Widerstandskräfte auf, die mit abnehmenden Bogenradien tendenziell größer werden. Diese Kräfte entstehen einerseits dadurch, dass die Radsätze in Gleisbögen nur suboptimal abrollen können. Der auf der bogen-inneren Schiene zurückgelegte Weg ist etwas kleiner als der auf der bogen-äußeren Schiene und da die Räder bei Eisenbahnfahrzeugen in den allermeisten Fällen über Radsatzwellen nahezu starr miteinander verbunden sind, müssen diese Wegdifferenzen durch Gleitbewegungen („Längsgleiten“) der Räder gegenüber der Schiene kompensiert werden. Die Konizität der Radlauflächen reicht, gerade in engen Bögen, nicht für einen vollständigen Ausgleich aus.

Neben des erhöhten Längsgleitens kommt es im Rad-Schiene-Kontakt auch zu Quergleitbewegungen, weil die „Wendebewegung“ der Radsätze im Gleisbogen um ihre Hochachse eine zusammengesetzte Bewegung mit Längs- und Querbewegungsanteilen ist.

Können sich die Radsätze im Gleisbogen nicht radial einstellen (dies kann über die konstruktive Gestaltung der Radsatzanlenkung beeinflusst werden), kommt es zudem zu einem zunehmenden Anlaufen der Spurkränze am Schienenkopf, das ebenfalls zusätzliche Widerstandskräfte generiert.

Wenn sich die Eisenbahnfahrzeuge im Gleisbogen gegeneinander verdrehen, werden die Zug- und Druckeinrichtungen elastisch gedehnt und die bogeninneren Seitenpuffer gestaucht. Auf diese Weise werden zusätzliche Kräfte in den Fahrzeugkasten eingeleitet, die im Rad-Schiene-Kontakt Gegenkräfte mit gleichem Betrag, aber entgegengesetzter Richtung hervorrufen. Auch dies führt zu einem verstärkten Anlauf der Spurkränze an die Schienenköpfe und damit zu erhöhten Reibungskräften im Rad-Schiene-Kontakt. Dieser Effekt wird gegebenenfalls noch verstärkt durch die Einwirkung einer Radialkraft, die bei der Befahrung der Bögen bei hohen Geschwindigkeiten auftritt und nur teilweise durch die Gleisbogenüberhöhung kompensiert wird.

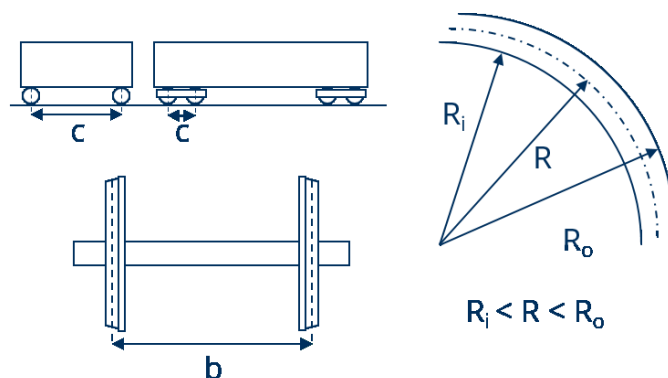


Abbildung 4.30.: Einflussgrößen Bogenwiderstand (vereinfacht)

Es ist leicht einsehbar, dass die in Abbildung 4.30 dargestellten Parameter mutmaßlich einen Einfluss auf die entstehenden Bogenwiderstandskräfte haben. Dabei handelt es sich um folgende Kenngrößen:

- der **Gleisbogenradius R** ,
- der **Laufkreisabstand¹² b** sowie
- der **Radsatzabstand c** im Fahrzeug oder Drehgestell.

¹²Der Laufkreis ist die gedachte Linie, die auf der Laufläche eines Rades entstünde, wenn man alle Berührungspunkte, die sich beim idealen Abrollen eines vollständig in Gleismitte zentrierten Radsatzes ergeben, darauf aufzeichnen würde. Der Laufkreisabstand ist immer etwas größer als die Spurweite (Normalspur: 1435 mm und b=1500 mm).

Zur Berechnung der spezifischen Bogenwiderstandskraft stehen sowohl empirische als auch analytische Gleichungen zur Verfügung (siehe Anhang A.3 der Formelsammlung). Letztgenannte erfordern mitunter eine detaillierte Kenntnis der Parameter von Fahrwerk und Gleis und sind für fahrdynamische Berechnungen meistens nicht sehr praktikabel.

Für fahrdynamische Berechnungen prinzipiell gut verwendbare Ansätze (sortiert nach dem Jahr des Erscheinens der Original-Aufsätze) stammen von Roeckl [13], Hanker [6], Protopapadakis [12] und Schramm [14, 15].

Die von Röckl vorgeschlagene Gleichung für die Abschätzung des spezifischen Bogenwiderstandes $f_{WS,Bo}$ ist von bestechender Einfachheit und lautet für Gleisbogenradien R größer als 300 m wie folgt:

$$f_{WS,Bo} = \frac{65}{R - 55} \quad (4.27)$$

Röckl's Gleichung wird noch heute gern verwendet und taucht in so ziemlich jeder Veröffentlichung zur Fahrdynamik auf. Allerdings hat sie einen entscheidenden Haken: sie widerspiegelt die Verhältnisse bei der Eisenbahn von 1880.

Folgt man der Gleichung in ihrer populären Form, hätte ein Drehgestellfahrzeug mit einem Radsatzabstand im Drehgestell von 2 m denselben spezifischen Bogenwiderstand wie ein Güterwagen mit zwei Radsätzen, deren Abstand 9 m beträgt. Das erscheint nicht eben logisch. Es ist deshalb aus Sicht des Autors besser, den im Vergleich zur Röckl'schen Gleichung „blutjungen“ Ansatz von Protopapadakis (1937) zu verwenden. Er wirkt zunächst komplizierter, ist aber nicht so komplex wie der Ansatz nach Schramm. Überdies enthält er alle wesentlichen Parameter, die man spontan im Kopf haben könnte, wenn man an Einflussfaktoren auf den Bogenwiderstand denkt: den Reibwert μ zwischen Rad und Schiene, den Laufkreisabstand b , den Radsatzabstand im Fahrzeug oder Drehgestell c sowie den Gleisbogenradius R :

$$f_{WS,Bo} = \frac{\mu (0,72b + 0,47c)}{R} \quad (4.28)$$

Die Gleichung von Protopapadakis lässt sich relativ einfach an verschiedene Verhältnisse (Spurweite, Schienenzustand nass/trocken, Radsatzabstand) anpassen.

Welche Gleichung liefert nun die „richtigen“ Werte? In [7] wird auf schweizerische Messungen verwiesen, die gezeigt haben, dass keine der erwähnten Gleichungen den Bogenwiderstand exakt abzubilden vermag. Die Rechnung mit der Gleichung nach Röckl führte jedoch stets zu zu hohen Werten, was die weiter oben getroffenen Aussagen noch einmal unterstreicht.

In Abbildung 4.31 sowie im Anhang B werden die nach den unterschiedlichen Berechnungsansätzen ermittelten spezifischen Bogenwiderstände verglichen. Abbildung 4.31 bezieht sich dabei auf einen Radsatzabstand von 2 m, wie er bei Güterwagen-Drehgestellen häufig vorkommt. Das Spektrum der Bogenradien bezieht sich in genannter Abbildung eher auf Werk- und Anschlussgleise und bildet damit den in der Praxis ungünstigsten auftretenden Fall ab.

Aus dem Diagramm (Abb. 4.30 sowie den in Anhang B enthaltenen Darstellungen) lassen sich folgende Feststellungen ableiten, die für den Umgang mit dem (spezifischen) Bogenwiderstand bei fahrdynamischen Berechnungen von Bedeutung sind:

- Der spezifische Bogenwiderstand ist bei Drehgestellfahrzeugen selbst in sehr engen Bogenradien verhältnismäßig gering ($<1 \text{ ‰}$).
- Die Gleichungen von Hanker und Protopapadakis liefern für kurze Radsatzabstände (Drehgestellfahrzeuge) ähnliche Ergebnisse. Dies gilt auch für die korrespondierenden Varianten der Gleichungen (Hanker, trockene Schiene vs. Protopapadakis, Sommer sowie Hanker, nasse Schiene vs. Protopapadakis, Winter - siehe Anhang B).

- Gleisbogenradien, die deutlich größer als 1000 m sind, lassen sich unabhängig von der Fahrzeugart und vom gewählten Berechnungsansatz vernachlässigen, weil die spezifischen Bogenwiderstände sehr klein werden.
- Die Röckl'sche Berechnungsgleichung ergibt bei geringen Radsatzabständen stets die größten spezifischen Bogenwiderstände. Bei großen Radsatzabständen kehrt sich das Verhältnis um. Hier wären die Gültigkeitsgrenzen der Gleichungen bezüglich des Spektrums der Radien sowie der Radsatzabstände kritisch zu hinterfragen.

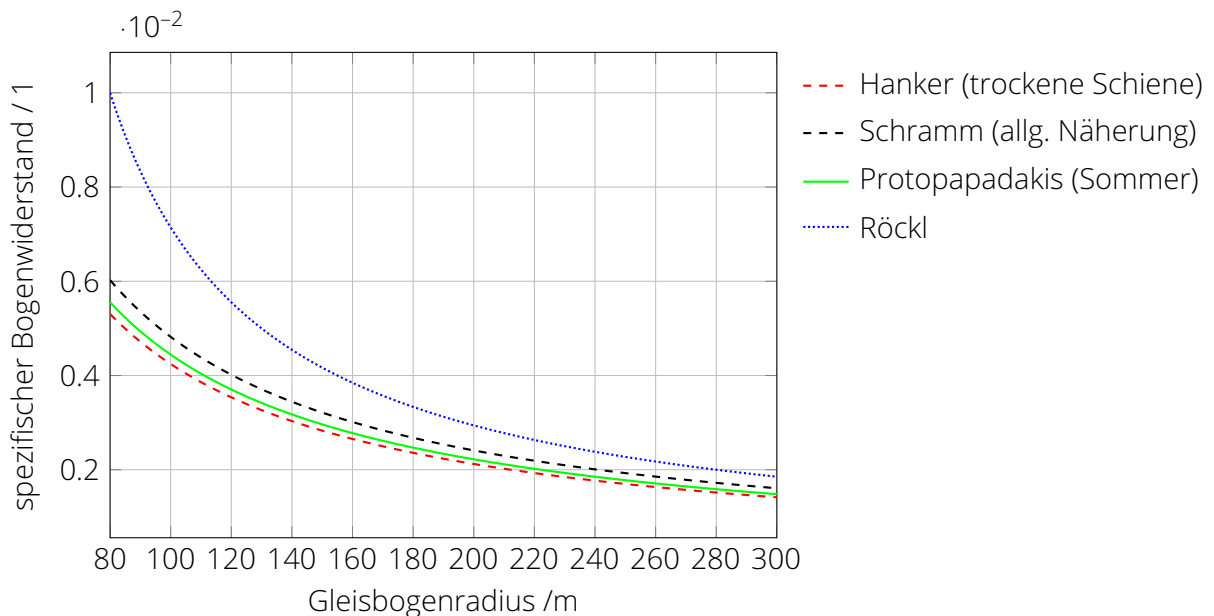


Abbildung 4.31.: Spezifische Bogenwiderstandskräfte mit unterschiedlichen Gleichungen berechnet für einen Radsatzabstand von 2 m



Bogenwiderstand

Der Bogenwiderstand wird durch die Zwangsbewegungen der Radsätze von Schienenfahrzeugen in Gleisbögen hervorgerufen. Er steigt bei kleinen Gleisbogenradien nichtlinear an und verliert bei großen Radien an Bedeutung. Er lässt sich mit Hilfe verschiedener Berechnungsansätze (v.a. nach Protopapadakis, Hanker oder Schramm) abschätzen. Eine exakte Bestimmung ist mit den genannten Möglichkeiten nicht realisierbar, weil die Einflussgrößen zu vielfältig sind, um sie in praktisch gut handhabbaren Gleichungen zu erfassen. In der Regel tritt die Bedeutung des Bogenwiderstandes im Vergleich zu der des Neigungswiderstandes stark in den Hintergrund.

💡 Berechnungsbeispiel Bogenwiderstand



Betrachtet wird eine Rangierabteilung, bestehend aus einer Lokomotive Voith Gravita (Masse: 86 t, Radsatzabstand im Drehgestell: 2,40 m) sowie zwei beladenen Kesselwagen (Masse: jeweils 80 t, Radsatzabstand im Drehgestell: 1,80 m).

Bei der Befahrung von Werksgleisen sollen von diesem Zugverband Gleisbögen mit Halbmessern von 120 m mit kleinen Geschwindigkeiten befahren werden.

Mit Hilfe der Gleichung von Protopapadakis (für Sommer, also trockene Gleise) soll abgeschätzt werden, wie sich dabei der Zugkraftbedarf im Vergleich zur geraden Strecke (summierter spezifischer Grundwiderstand für die betrachteten Fahrzeuge: $f_{WF0}=0,0020$) ändert.

1. Grundwiderstand in geradem Gleis:

$$F_{WF0} = (m_T + m_W) \cdot g \cdot f_{WF0} = (86 \text{ t} + 2 \cdot 80 \text{ t}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,0020 = 4,8 \text{ kN}$$

2. Bogenwiderstand der Lokomotive:

$$F_{WS,Bo,T} = f_{WS,Bo,T} m_T g = \frac{0,22 \cdot (0,72 \cdot 1,5 \text{ m} + 0,47 \cdot 2,4 \text{ m})}{120} \cdot 86 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 3,4 \text{ kN}$$

3. Bogenwiderstand der Wagengruppe:

$$F_{WS,Bo,W} = f_{WS,Bo,W} m_W g = \frac{0,22 \cdot (0,72 \cdot 1,5 \text{ m} + 0,47 \cdot 1,8 \text{ m})}{120} \cdot 160 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 5,5 \text{ kN}$$

4. Bogenwiderstand des Zugverbandes insgesamt:

$$F_{WS,Bo} = F_{WS,Bo,T} + F_{WS,Bo,W} = 3,4 \text{ kN} + 5,5 \text{ kN} = 8,9 \text{ kN}$$

Dies entspricht einer Erhöhung des Zugkraftbedarfes (Fahrwiderstandes) um 8,9 kN oder um den Faktor 2,85.

Hinweis: Bei der Befahrung von großzügiger trassierten Bögen mit z.B. $R=500 \text{ m}$ fällt der Widerstand auf nur noch 2,2 kN ab (entspricht einer Erhöhung des Fahrwiderstandes im geraden Gleis um den Faktor 1,45).

4.4.4. Der effektive Streckenwiderstand

Bisher wurden die Streckenwiderstandskräfte immer so betrachtet, als würden sie auf alle betrachteten Fahrzeuge gleichzeitig wirken. Defacto wurden Züge dabei als Punktmassen idealisiert, die in Gänze einen bestimmten Streckenwiderstand x erfahren, wenn sie sich am Streckenpunkt y befinden.

Natürlich ist die Realität wesentlich komplexer, wie die Abbildung 4.32 beispielhaft zeigt. So ist es möglich, dass Züge aufgrund ihrer großen Längenausdehnung (EU: bis zu 850 m) in mehreren Neigungen oder Bögen zugleich stehen. In solchen Fällen liefert das Punktmassenmodell nur ungenaue Ergebnisse, die in speziellen Anwendungsfällen zu einer drastischen Fehleinschätzung der fahrdynamischen Kräfteverhältnisse führen können.



(a) Beispiel 1: vorderer Zugteil in leichtem Gefälle und hinterer Zugteil in leichter Steigung (b) Beispiel 2: vorderer Zugteil in der Ebene, hinterer Zugteil in der Steigung

Abbildung 4.32.: Auswirkung der Längenausdehnung von Zügen bei Längsneigungswechseln

Es ist deshalb üblich, längere Züge (Daumenregel: Zuglänge größer als 100 m) nicht mehr als Punktmasse, sondern als *Massenband* zu modellieren. Dies läuft praktisch auf die Berechnung einer **effektiven Neigung** statt der nominellen Neigung hinaus.

Bei der Berechnung des Neigungswiderstandes mit Hilfe der nominellen Neigung wird geschaut, an welchem Streckenpunkt die Zugspitze (oder Zugmitte)¹³ sich gerade befindet, und die dort herrschende Längsneigung wird dem gesamten Zug zugeordnet. Bei den Massenbandmodellen wird demgegenüber an jedem Streckenpunkt geschaut, welche Zugteile in welcher Neigung stehen und dann das gewichtete Mittel der Neigung für den gesamten Zugverband gebildet. Konkret ist die effektive Neigung für die drei möglichen Modellierungen der Fahrzeugmasse wie folgt definiert:

1. **Punktmassen-Modell:** Die gesamte Masse des Zuges ist in einem ideellen Punkt konzentriert. Die effektive Neigung i_e ist in diesem Falle gleich der nominellen Neigung.

$$i_e = i \quad (4.29)$$

Einzelne Fahrzeuge und kurze Zugverbände können problemlos als Punktmasse betrachtet werden. Dies betrifft insbesondere die im Nah- und Regionalverkehr weitverbreiteten Diesellokomotiven (Fahrzeuglängen zwischen 25,5 m (RegioShuttle) und 80,9 m (Alstom Coradia LINT 81)).

2. **Homogenes Massenband:** Es wird von einer weitgehend gleichmäßigen (homogenen) Verteilung der Zugmasse über die Zuglänge ausgegangen. Für jeden Wegpunkt wird

¹³Verschiedene Festlegungen sind denkbar.

dann analysiert, welche Teilzuglängen l_{zj} in den Neigungen i_j ¹⁴ stehen. Die effektive Neigung entspricht dann dem gewichteten Mittel der Neigungen bezogen auf die gesamte Zuglänge l_z .

$$i_e = \frac{\sum (l_{zj} \cdot i_j)}{l_z} \quad (4.30)$$

Als homogenes Massenband können nahezu alle Triebzüge mit verteiltem Antrieb, aber auch Güterganzzüge¹⁵ betrachtet werden. Im Falle langer Reisezüge, bei denen die Wagenmassen sehr ähnlich sind und lediglich das Triebfahrzeug/die Triebfahrzeuge „herausstechen“, könnte vereinfacht ebenfalls die Modellierung als homogenes Massenband erwogen werden. Gleiches gilt für Hochgeschwindigkeitstriebzüge mit Triebköpfen (ICE 1, ICE 2, TGV).

3. **Inhomogenes Massenband:** Im Falle einer ungleichmäßigen (inhomogenen) Verteilung der Zugmassenanteile über die Zuglängen werden nicht die Teilzuglängen sondern die Teilzugmassen in den verschiedenen Neigungsabschnitten i_j bilanziert und auf die Gesamtzugmasse bezogen.

$$i_e = \frac{\sum (m_{zj} \cdot i_j)}{m_z} \quad (4.31)$$

Die Modellierung als inhomogenes Massenband bietet sich vor allem bei der Betrachtung gemischter (sei es hinsichtlich der eingestellten Wagen oder auch hinsichtlich des Beladungszustandes) Güterzüge an.

Die Modellierung von Zügen als Massenband ist besonders dann relevant, wenn es um die maximal auf einer Strecke zu befördernde Zugmassen geht. Abbildung 4.33 zeigt dies beispielhaft für den Ausschnitt aus einer realen Eisenbahnstrecke. Die schwarz gestrichelte Linie zeigt den Verlauf der nominellen Neigung über dem Weg. Ferner sind auf diesem Verlauf sechs potentielle „Anfahrpunkte“ (AP1 bis AP6) aufgetragen. Damit sind Orte gemeint, an dem ein Zug potentiell aufgrund betrieblicher Erfordernisse (Signalstandorte, Bahnübergänge,...) zum Anhalten gezwungen sein könnte. An (mindestens) diesen Punkten müsste also überprüft werden, welche maximale Wagenzugmasse von dem eingesetzten Triebfahrzeug wieder angefahren werden könnte. Dabei spielt der effektive Streckenwiderstand naturgemäß eine bedeutende Rolle.

Für die beiden Anfahrpunkte AP2 und AP7 sollen die Auswirkungen der Modellierung als (homogenes) Massenband sowie verschiedener Zuglängen exemplarisch diskutiert werden. Es wird für den Vergleich ein gemischter Güterzug mit einer Länge von 400 bzw. 600 Metern zugrunde gelegt. Legt man einen Richtwert von 2,15 Tonnen Zugmasse je Meter Zuglänge zugrunde, ergibt sich je nach Zuglänge eine Zugmasse von 860 bzw. 1290 t.

Wie aus Abbildung 4.33 sowie Tabelle 4.3 hervorgeht, würde die Neigungswiderstandskraft bei einer Betrachtung des Zuges als Massenpunkt im AP2 überschätzt und im AP7 stark unterschätzt werden. Insbesondere im letztgenannten Anfahrpunkt zeigt sich die Diskrepanz (–4,1 bzw. –6,2 kN vs. 79,9 bzw. 187,5 kN) besonders deutlich. Eine Modellierung der Zugmassen als Massenband ist deshalb insbesondere bei Güterzüge unerlässlich.

¹⁴ j ist also der „Zählindex“

¹⁵Güterzüge, die nur gleiche oder ähnliche Wagentypen aufweisen, deren Beladungszustand überdies ähnlich ist.

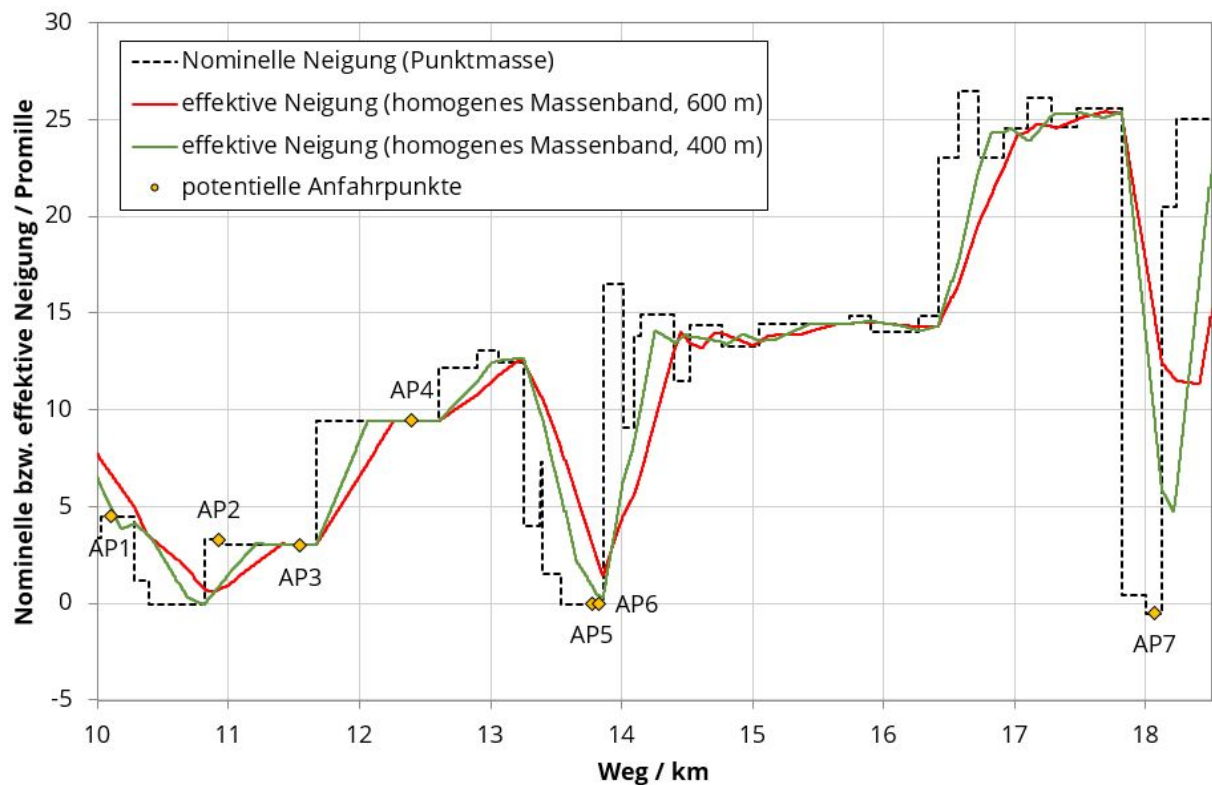


Abbildung 4.33.: Einfluss der Zuglänge auf die effektive Neigung

Tabelle 4.3.: Auswertung der in Abbildung 4.33 visualisierten Daten für einen gemischten Güterzug mit einer Zuglänge von 400 bzw. 600 Metern und zuglängenproportionaler Masse (ca. 2,15 t/m)

	Anfahrpunkt 2	Anfahrpunkt 7
nominelle Neigung	3,30 ‰	-0,49 ‰
nominelle Streckenwiderstandskraft für einen gemischten Güterzug (400 m und 860 t)	27,8 kN	-4,1 kN
nominelle Streckenwiderstandskraft für einen gemischten Güterzug (600 m und 12990 t)	41,8 kN	-6,2 kN
effektive Neigung für einen 400-Meter-Zug	0,93 ‰	9,47 ‰
effektive Streckenwiderstandskraft für einen gemischten Güterzug (400 m und 860 t)	7,8 kN	79,9 kN
effektive Neigung für einen 600-Meter-Zug	0,76 ‰	14,82 ‰
effektive Streckenwiderstandskraft für einen gemischten Güterzug (600 m und 1290 t)	9,6 kN	187,5 kN



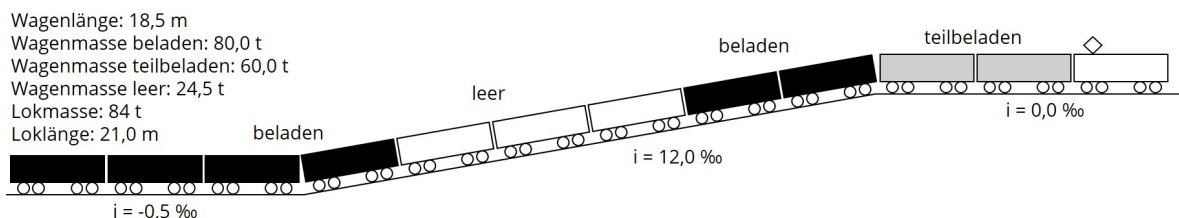
Effektiver Streckenwiderstand

Aufgrund ihrer beträchtlichen Länge (in der EU: bis zu 835 m) können Züge in verschiedenen Neigungen und Bögen gleichzeitig stehen. Die effektiv auf den Zugverband wirkende Streckenwiderstandskraft ist in solchen Fällen davon abhängig, welche Teilzuglängen oder Teilzugmassen in welchen Neigungen (Bögen) stehen. Der effektive Streckenwiderstand wird dann als gewichtetes Mittel der Streckenwiderstände der einzelnen Zugteile, bezogen auf die gesamte Zuglänge (Modell: homogenes Massenband) oder die gesamte Zugmasse (Modell: inhomogenes Massenband) gebildet.

Für den Neigungswiderstand ergeben sich so effektive Neigungen, die in Abhängigkeit der Zuglänge und der Streckentopographie erheblich von der nominellen Neigung (also der Neigung, in der sich die Spitze oder Mitte des Zuges gerade befindet) unterscheiden können. Effektive Bogenwiderstände können prinzipiell analog ermittelt werden, allerdings kommt dem Neigungswiderstand in den meisten Fällen die größere fahrdynamische Relevanz zu.



Berechnungsbeispiel effektiver Streckenwiderstand



Betrachtet wird ein vor einem Signal zum Stehen gekommener Güterzug, der aus Wagen gleichen Typs, aber mit unterschiedlichen Beladungszuständen gebildet wurde. Die Lokomotive und die ersten beiden Wagen des Zuges stehen in einem ebenen Streckenabschnitt, während sich weitere sechs Wagen in einem Steigungsabschnitt und die letzten drei Wagen in einem minimalen Gefälle befinden. Der effektive Neigungswiderstand ist einmal mit dem Modell „homogenes Massenband“ und einmal mit dem Modell „inhomogenes Massenband“ zu berechnen.

1. Ermittlung der Zugdaten:

$$l_z = 21 \text{ m} + 11 \cdot 18,5 \text{ m} = 224,5 \text{ m}$$

$$m_z = 84 \text{ t} + 2 \cdot 60 \text{ t} + 6 \cdot 80 \text{ t} + 3 \cdot 24,5 \text{ t} = 757,5 \text{ t}$$

2. Ermittlung der Teilzuglänge und Teilzugmasse in der Steigung:

$$l_{z,2} = 6 \cdot 18,5 \text{ m} = 111 \text{ m}$$

$$m_{z,2} = 3 \cdot 80 \text{ t} + 3 \cdot 24,5 \text{ t} = 313,5 \text{ t}$$

3. Ermittlung der Teilzuglänge und Teilzugmasse im Gefälle:

$$l_{z,3} = 3 \cdot 18,5 \text{ m} = 55,5 \text{ m}$$

$$m_{z,3} = 3 \cdot 80 \text{ t} = 240,0 \text{ t}$$



Berechnungsbeispiel effektiver Streckenwiderstand (Fortsetzung)

4. Ermittlung der effektiven Neigung mit dem Modell „homogenes Massenband“

$$i_e = \frac{111 \text{ m} \cdot 0,012 - 55,5 \text{ m} \cdot 0,0005}{224,5 \text{ m}} = 0,0058 = 5,8 \text{ ‰}$$

5. Ermittlung der effektiven Neigung mit dem Modell „inhomogenes Massenband“

$$i_e = \frac{313,5 \text{ t} \cdot 0,012 - 240 \text{ t} \cdot 0,0005}{757,5 \text{ t}} = 0,0048 = 4,8 \text{ ‰}$$

Somit ergibt sich, je nach Modellierung, eine Streckenwiderstandskraft von 43,1 kN (homogenes Massenband) oder 35,7 kN (inhomogenes Massenband) für den betrachteten Güterzug.

4.4.5. Gesamtwiderstand

Gesamtschau der Fahrwiderstandskräfte

Im Rahmen fahrdynamischer Berechnungen und Simulationen ist es häufig nötig, im Vorfeld möglichst viele Daten und Parameter der zu untersuchenden Fahrzeuge und Strecke zu sammeln. Nicht immer gelingt es, alle Parameter, die zur vollständigen Beschreibung der Fahrwiderstände nötig sind, zu ermitteln. So kann es praktisch vorkommen, dass zwar die Neigungen einer Eisenbahnstrecke bekannt sind, aber nicht die Radien¹⁶. Es ist deshalb hilfreich, eine ungefähre Vorstellung davon zu haben, wie sich die Widerstandsanteile auf Streckenfahrten aufteilen und welche Bedeutung die drei Teilwiderstände Fahrzeug-, Neigungs- und Bogenwiderstand für den Fahrwiderstand insgesamt haben.

Abbildung 4.34 zeigt beispielhaft die simulierte Fahrt eines Dieseltriebwagens auf einer realen Strecke, die vergleichsweise große Steigungen (25...26 ‰) und enge Bogenradien aufweist.

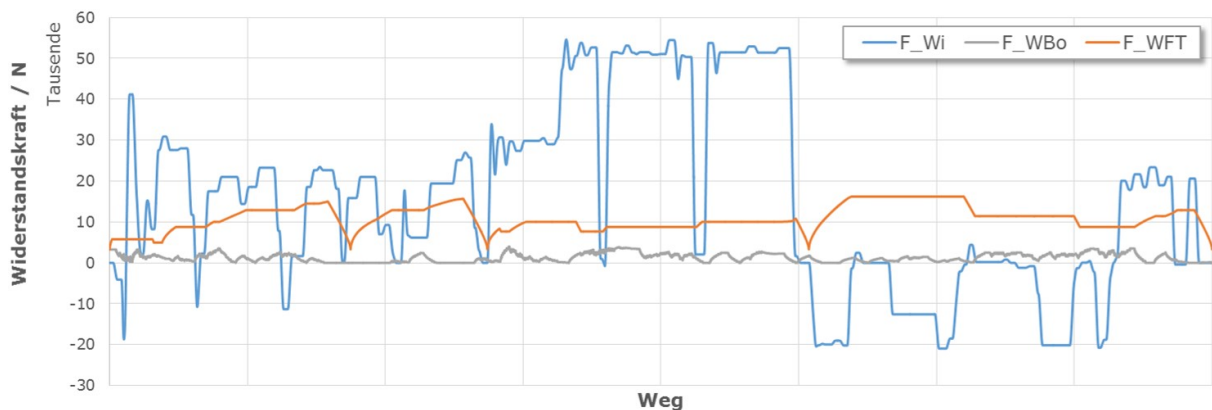


Abbildung 4.34.: Fahrwiderstandsanteile bei der Fahrt eines Dieseltriebwagens auf einer Beispielstrecke

Wie zu erkennen ist, dominiert über weite Teile der Fahrt der Neigungswiderstand. Wechselt er die Richtung, kann es an einigen Stellen sogar zu einer negativen Fahrzeugwiderstandskraft kommen (z.B. im sechsten und siebten Wegintervall im Diagramm Abb. 4.34), da alle übrigen Widerstandsanteile überkompensiert werden.

Der Betrag des Bogenwiderstandes ist gegenüber dem des Neigungs- sowie des Fahrzeugwiderstandes auf nahezu allen Streckenabschnitten sehr klein. Liegen keine Daten für die Gleisbogenradien auf einer zu untersuchenden Strecke vor, kann also abgewogen werden, ob der Aufwand zu ihrer Recherche den potentiellen Zugewinn an Genauigkeit bei den Berechnungsergebnissen rechtfertigt.

Leistungsbedarf zur Überwindung des Fahrwiderstandes

Die Kenntnis der Fahrwiderstandskräfte in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Fahrzeugmasse und Trassierungselementen gestattet eine erste Abschätzung, welche fahrdynamischen Szenarien realistisch sind. Kann ein ICE 3 seine Höchstgeschwindigkeit von 330 km/h auch in einer langgezogenen Steigung von 10 ‰ halten? Kann die Güterzuglok X einen Güterzug der Masse m mit der Geschwindigkeit v in einer Steigung i befördern? Diese und ähnliche Fragen bedürfen nicht immer einer fahrdynamischen Simulation, da schon die Analyse stationärer Zustände eine erste Antwort liefern kann.

¹⁶Selbstverständlich sind die Daten dem jeweiligen Betreiber der Infrastruktur bekannt, die Frage ist nur, ob die Daten auch der- oder demjenigen, der oder die mit der fahrdynamischen Berechnung betraut ist, zugänglich gemacht werden

Nicht immer liegt für ein Triebfahrzeug eine vollständige Zugkraftcharakteristik vor. Die installierte Leistung ist jedoch immer bekannt oder sie kann mit überschaubarem Aufwand recherchiert werden. Es ist deshalb sinnvoll, aus dem Zugkraftbedarf für die Beharrungsfahrt, die sich unmittelbar aus der Summe der Fahrwiderstandskräfte ergibt, auf den Leistungsbedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände zu schließen, der sich für den stationären Fall aus der folgenden einfachen Gleichung ergibt:

$$P_W = \sum F_W \cdot v. \quad (4.32)$$

Abbildung 4.35 zeigt ein Beispiel für eine derartige Betrachtung. Dort ist der Leistungsbedarf zur Überwindung der Fahrwiderstandskräfte für einen Containerzug mit der Masse 1500 t einmal für die Ebene und einmal in einer Steigung von 10 ‰ über der Geschwindigkeit aufgetragen.

Zum Vergleich sind die Nennleistungen verschiedener Ellok-Baureihen ebenfalls in das Diagramm eingetragen. Aus dem Vergleich von (Nenn-)Leistungsangebot und Leistungsbedarf ergibt sich eine grobe Beantwortung der Frage, welche Geschwindigkeit mit welchem Triebfahrzeug in der genannten Steigung voraussichtlich erreicht werden kann. Der Eigenwiderstand der Fahrzeuge wird vernachlässigt.

Da es bei elektrischen Triebfahrzeugen heute üblich ist, die Leistung an den Treibrädern als Nennleistung anzugeben, kann diese unmittelbar für den Vergleich herangezogen zu werden. Bei Altbau-Elloks und Dieseltriebfahrzeugen gilt es zu beachten, dass die Leistung an den Treibrädern weder konstant noch mit der Nennleistung identisch ist¹⁷. Ein *überschlägiger* Vergleich kann dennoch auch mit diesen Leistungen vorgenommen werden.

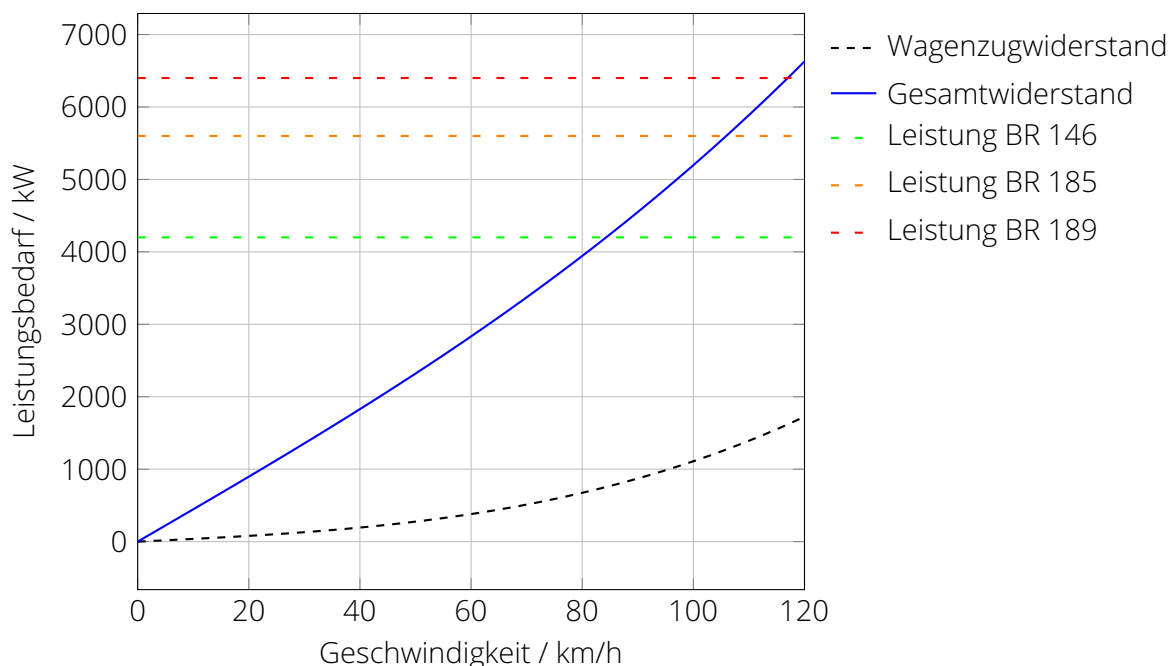


Abbildung 4.35.: Leistungsbedarf eines Containerzuges (1500 t) bei Beharrungsfahrt in einer Steigung von 10 ‰

¹⁷Bei Dieseltriebfahrzeugen wird als Nennleistung meistens die Dieselmotornennleistung angegeben und bei elektrischen Fahrzeugen mit Einphasen-Reihenschlussmotoren gilt die Nennleistung nur für den „Nennleistungspunkt“ (M,n) der Motoren. Ihr ist stets eine bestimmte Geschwindigkeit zugeordnet.



Berechnungsbeispiel Leistungsbedarf Fahrwiderstand



Ein Eisenbahnverkehrsunternehmen befördert regelmäßig Schüttgutzüge mit einer Masse von 1600 t. Die vorgesehen Fahrplantrassen sind so ausgelegt, dass diese Züge auch in einer Steigung von 12 ‰ noch mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h gefahren werden können. Normalerweise kommen Siemens Vectron-Lokomotiven (Nennleistung: 6,4 MW) vor diesen Zügen zum Einsatz, die aber kurzfristig für einen anderen Einsatz benötigt werden. So ist auf die Schnelle abzuschätzen, ob der Zug auch mit einer Traxx-Lokomotive (BR 186, Nennleistung: 5,6 MW) oder einer Alstom Prima II (Nennleistung: 4,2 MW) befördert werden könnte. Die Gleichung für den spezifischen Wagenzugwiderstand der Schüttgutzüge lautet:

$$f_{WFW} = 0,0011 + 0,0020 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)$$

1. Ermittlung des Wagenzugwiderstandes bei 80 km/h:

$$\begin{aligned} F_{WFW} &= f_{WFW} m_W g = \left[0,0011 + 0,0020 \cdot \left(\frac{80}{100} \right)^2 \right] \cdot 1600 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \\ &= 0,00238 \cdot 15696 \text{ kN} \\ &= 37,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

2. Ermittlung des Neigungswiderstandes in 12 ‰:

$$F_{WS,i} = m_W g i = 1600 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,012 = 188,4 \text{ kN}$$

3. Ermittlung der erforderlichen Leistung zur Überwindung des Fahrwiderstände des Wagenzuges:

$$\begin{aligned} P_{WF} &= (F_{WS,i} + F_{WFW}) \cdot v = (188,4 \text{ kN} + 37,4 \text{ kN}) \cdot \frac{80 \text{ km/h}}{3,6 \frac{\text{km/h}}{\text{m/s}}} \\ &= 5017 \text{ kW} \end{aligned}$$

Mit Hilfe dieser *einfachen Überschlagsrechnung* (die exakte Leistungsermittlung erfolgt in einem anderen Kapitel) kann festgestellt werden, dass die Alstom Prima II aufgrund ihrer vergleichsweise geringen installierten Leistung keine geeignete Alternative wäre.

Die Traxx-Lokomotive käme hingegen als Ersatz für die Siemens Vectron in Betracht. Die Differenz zwischen dem ermittelten Leistungsbedarf und der installierten Leistung ist groß genug, um die der Berechnung innewohnenden Unsicherheiten ggf. abfangen zu können.

5. Verständnisfragen

Komplex Fahrwiderstand

1. Was verstehen Sie im Kontext der Fahrdynamik unter einer „spezifischen Kraft“?
2. Woran erkennen Sie in der Fahrdynamik, ob es sich bei einer Angabe um eine absolute oder eine spezifische Kraft handelt?
3. Aus welchen Teilkräften setzt sich der Fahrwiderstand zusammen?
4. Was ist der Unterschied zwischen Fahrwiderstand und Fahrzeugwiderstand?

Komplex Grundwiderstand

1. In welchem Geschwindigkeitsbereich ist der Grundwiderstand von Schienenfahrzeugen fahrdynamisch besonders relevant?
2. Aus welchen Teilwiderstandskräften setzt sich der Grundwiderstand bei Schienenfahrzeugen zusammen?
3. Ist der Rollwiderstand bei allen Eisenbahnfahrzeugen gleich?
4. Wie verhält sich der spezifische Rollwiderstand von Eisenbahnfahrzeugen zu dem von Straßenfahrzeugen?
5. Spielt der Fahrweg bei der Entstehung des Grundwiderstandes eigentlich eine Rolle?
6. Wodurch wird der Gleitwiderstand von Eisenbahnfahrzeugen beeinflusst?
7. Wovon hängt die durch die Radsatzlager verursachte Widerstandskraft bei Schienenfahrzeugen ab?
8. An welchen Stellen im Fahrzeug wird der Grundwiderstand erzeugt?
9. Wie lässt sich die Grundwiderstandskraft von Eisenbahnfahrzeugen rechnerisch abschätzen?
10. Ist die Grundwiderstandskraft von Eisenbahnfahrzeugen auch experimentell zu ermitteln und wenn ja, wie kann dies erfolgen?

5. Verständnisfragen

11. Was ist die Motivation, sich mit dem Anfahrwiderstand von Zügen zu befassen?
12. Welche Ansätze zur Berücksichtigung des Anfahrwiderstandes sind Ihnen bekannt?
13. Wodurch entsteht der Anfahrwiderstand bei Eisenbahnfahrzeugen?
14. Warum muss in Steigungen mit einer erhöhten spezifischen Anfahrwiderstandskraft im Vergleich zur Ebene gerechnet werden?

Komplex Luftwiderstand

1. Warum kommt dem Luftwiderstand von Eisenbahnfahrzeugen eine wichtige Bedeutung zu?
2. Grenzen Sie grob den Geschwindigkeitsbereich ab, in dem der Luftwiderstand den Fahrzeugwiderstand dominiert.
3. Aus welchen Teilwiderständen setzt sich der Luftwiderstand von Eisenbahnfahrzeugen zusammen?
4. Von welchen physikalischen Größen ist der Luftwiderstand abhängig?
5. Stimmt es, dass der Luftwiderstand im Winter größer ist als im Sommer und warum?
6. Wie wird der Luftwiderstand von Zügen berechnet?
7. Welche Möglichkeit kennen Sie, den ggf. auftretenden Gegenwind bei der rechnerischen Ermittlung der Luftwiderstandes zu berücksichtigen?
8. Welche konstruktiven Möglichkeiten können ergriffen werden, um den Luftwiderstand von Eisenbahnfahrzeugen zu senken?
9. Warum werden Lokomotiven mit wenig windschnittigen Fahrzeugköpfen akzeptiert?
10. Wie verhält sich der Luftwiderstand, wenn sich die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges verdoppelt?
11. Wie verändert sich der Luftwiderstand beim Befahren von Tunneln und warum?
12. Welche konstruktiven Anforderungen würden Sie an einen Eisenbahntunnel stellen, damit er aus fahrdynamischer Sicht „günstig“ gestaltet ist?
13. Was ist der „Tunnelfaktor“ und wovon hängt er ab?

Komplex Fahrzeugwiderstandskraft

1. Aus welchen Teilkräften setzt sich der Fahrzeugwiderstand zusammen?
2. Was ist der Unterschied zwischen Fahrwiderstand und Fahrzeugwiderstand?
3. Mit welchen Methoden kann die Fahrzeugwiderstandskraft von Schienenfahrzeugen ermittelt werden?
4. Was ist beim Umgang mit empirischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen zu beachten?
5. Wieso werden Fahrzeugwiderstandsgleichungen als Polynome zweiten Grades formuliert?

Komplex Streckenwiderstandskraft

1. Aus welchen Teilkräften setzt sich der Streckenwiderstand zusammen?
2. Welche Vereinfachung gilt bei der Ermittlung des Neigungswiderstandes von Schienenfahrzeugen und warum?
3. Was ändert sich bei der Berechnung des Neigungswiderstandes von Zahnradbahnen im Vergleich zu „normalen“ Eisenbahnstrecken?
4. Warum ist der spezifische Bogenwiderstand von Schmalspurbahnen geringer als der von Breitspurbahnen?
5. Welche Trassierungsparameter müssen für die Ermittlung des Streckenwiderstandes (ohne Weichenwiderstand) bekannt sein?
6. Was ist bei der Berechnung des Streckenwiderstandes zu beachten, wenn sich die Fahrtrichtung ändert?
7. Was haben alle Berechnungsansätze zur Abschätzung des Bogenwiderstandes von Eisenbahnfahrzeugen gemein?
8. Was ist an dem Berechnungsansatz nach Röckl für den spezifischen Bogenwiderstand problematisch?
9. Welche wesentlichen Parameter beeinflussen den Bogenwiderstand von Schienenfahrzeugen?
10. Was ist der Unterschied zwischen nomineller Streckenlängsneigung und effektiver Streckenlängsneigung?
11. Welche Möglichkeiten, die Masse von Fahrzeugverbänden zu modellieren, gibt es und wann kommt welches Modell zu Anwendung?

Komplex Gesamtwiderstand

1. Wieso ist es ggf. tolerierbar, wenn für eine fahrdynamische Simulation zwar die Längsneigungen der Strecke bekannt sind, nicht aber die Bogenradien?
2. Warum stellen die in Kapitel 4.4.5 vorgenommenen Berechnungen zum Leistungsbedarf lediglich eine *Abschätzung* des tatsächlichen Leistungsbedarfes dar?
3. Wie verändert sich der Leistungsbedarf zur Überwindung des Streckenwiderstandes, wenn sich die Geschwindigkeit verdoppelt?
4. Wie verändert sich der Leistungsbedarf zur Überwindung des Luftwiderstandes, wenn sich die Geschwindigkeit verdoppelt?



Arbeitsmaterialien

Zu den in diesem Lehrbrief abgehandelten Themenkomplexen stehen vertiefend und begleitend folgende weitere Materialien zur Verfügung:

1. Foliensätze:
 - Folien_FD_04_2020_Grundwiderstand.pdf
 - Folien_FD_05_2020_Luftwiderstand.pdf
 - Folien_FD_06_2020_Fahrzeugwiderstand.pdf
 - Folien_FD_07_2020_Streckenwiderstand.pdf
 - Folien_FD_08_2020Leistungsbedarf_Beharrungsfahrt.pdf
2. Testressourcen in OPAL:
 - Selbsttest „Schätzaufgaben“
 - Selbsttest „Grundwiderstand“
 - Selbsttest „Luftwiderstand“
 - Selbsttest „Fahrzeugwiderstand“
 - Test „Fahrzeugwiderstandskräfte“
 - Selbsttest „Streckenwiderstand“
 - Test „Fahrwiderstandskräfte“
3. Rechenübungen „Übungskomplex Fahrwiderstand“ im Übungsheft auf den Seiten 7-15
4. Formelsammlung S. 14-26 + Anhänge A.4-A.7

Literaturverzeichnis

- [1] Ahmed, S. R., Gawthorpe, R. G. und Mackrodt, P. -A.: „Aerodynamics of Road- and Rail Vehicles“, in: *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Jg. 14 (1985), Nr. 4 - 6, S. 319–392.
- [2] Bendel, Helmut: „Untersuchungen zur Verringerung des aerodynamischen Widerstandes von Güterwagen“, in: *ZEV Rail - Glasers Annalen*, Jg. 114 (1990), Nr. 4, S. 124–132.
- [3] Boden, Nicolaus: „Zur Ermittlung des Luftwiderstandes von Schienenfahrzeugen“, in: *AET - Archiv für Eisenbahntechnik*, Jg. 25 (1970), Nr. 25, S. 40–71.
- [4] Glück, H.: „Aerodynamik bei der Eisenbahn“, in: *Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge*, Jg. 22 (1987), S. 7 –10.
- [5] Glück, H.: „Die Aerodynamik schnellfahrender Züge - Ein Überblick über den Stand der Erkenntnisse“, in: *Archiv Für Eisenbahntechnik*, Jg. 36 (1981), S. 23–40.
- [6] Hanker, R.: „Schienenkopf und Radreifen. Kräftewirkungen und Gestaltung des Querschnittes.“, in: *Zeitschrift für Bauwesen*, (1925), Nr. 1-3, S. 19–31.
- [7] Hendrichs W. und Voß, G.: *Der Ingenieurbau/Fahrdynamik+Verkehrsfluß*, Ernst&Sohn, Berlin, 1995.
- [8] Hucho, W.-H.: „Aerodynamik der stumpfen Körper“, in: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011, Kap. 7 Eisenbahn, S. 306 –371.
- [9] Keßler, Karl-H. und Junker, Klaus: „Grundsätze der Fahrdynamik“, in: *Eisenbahn Ingenieur Kalender*, (1994), S. 245–264.
- [10] Lukaszewicz, P.: „Running resistance - results and analysis of full-scale tests with passenger and freight trains in Sweden“, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Jg. 221 (2007), Nr. 2, S. 183–192, URL: [http : // dx . doi . org / 10 . 1243 / 0954409JRRT89](http://dx.doi.org/10.1243/0954409JRRT89).
- [11] Lukaszewicz, Piotr: „Energy Consumption and Running Time for Trains : modelling of running resistance and driver behaviour based on full scale testing“, Diss., University dissertation from Stockholm : KTH, 2001.
- [12] Protopapadakis, Demosthenes: „Bemerkungen über die zur Berechnung des Krümmungswiderstandes angewendeten Formeln“, in: *Monatsschrift der Internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung*, (1937), S. 1540–1555.
- [13] Röckl, Alois von: „Die Versuche der bayer. Staatseisenbahn über die Widerstände der Eisenbahnfahrzeuge bei ihrer Bewegung in den Gleisen“, in: *Zeitschrift für Baukunde*, (1880), Nr. 4, S. 542–562.

- [14] Schramm, Gerhard: „Bogenwiderstand und Spurkranzreibung“, in: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, (1963), Nr. 8, S. 390–392.
- [15] Schramm, Gerhard: „Der Bogenwiderstand“, in: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, (1962), Nr. 5, S. 215–219.
- [16] Schranil, S. und Lavanchy, V.: „Fahrdynamische Messfahrten im Gotthard-Basistunnel“, in: *EB - Elektrische Bahnen*, Jg. 114 (2016), Nr. 7, S. 388–393.
- [17] Schranil, Steffen und Stachetzki, Jana: „Energetische Optimierung von Tunnelquerschnitten“, in: *EB - Elektrische Bahnen*, Jg. 113 (2015), Nr. 10, S. 488–497.
- [18] Szanto, Frank: „Rolling resistance revisited“, in: *CORE 2016 - Maintaining the Momentum (Konferenzband)*, Railway Technical Society of Australasia, 2016, S. 628–633.
- [19] Wende, Dietrich: *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*, 1. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2003.

A. Praxisbeispiele Aerodynamik

A.1. Kopfparten verschiedener Fahrzeuge



(a) Die Ra-Lokomotiven der Schwedischen Staatsbahn SJ waren von den in den 1940er bis 1960er Jahren sehr populären amerikanischen „Stromlinienloks“ inspiriert. Die in den 1955-1961 gebauten Elloks fuhren bis zu 150 km/h schnell.



(b) Die BR 103 wurde in den 1960er Jahren für den Schnellverkehr in der damaligen BRD entwickelt. Die Form dieser bis zu 200 km/h schnellen Lokomotiven ist das Resultat umfangreicher Windkanal-Versuche gewesen.

Abbildung A.1.: Kopfformen „klassischer“ Schienenfahrzeuge, Teil 1



(a) Die Frontpartie eines Shinkansen-Hochgeschwindigkeitszuges der ersten Generation. Diese in den 1960er Jahren gebauten Fahrzeuge wiesen noch einen „klassischen“ Aufbau mit einem langgestreckten Vorbau und „kanzelerartigem“ Führerstand darüber auf. Bemerkenswert sind auch die tief heruntergezogenen Schürzen.



(b) Die BB 9004 ist eine Weltrekordlok und erreichte 1955 eine Geschwindigkeit von 331 km/h. Der Zug, vor dem die Lokomotive lief wurde eigens präpariert, damit der Luftwiderstand gesenkt werden konnte. So wurde beispielsweise durch zusätzliche Hauben ein bündiger Übergang von der Lokomotive zum Wagenzug hergestellt.

Abbildung A.2.: Kopfformen „klassischer“ Schienenfahrzeuge, Teil 2



(a) Kopfpattie eines Siemens EuroSprinters der Reihe 5600 der Portugiesischen Staatsbahn CP



(b) Kopfpattie einer französischen BB 26000 (SYBIC)

Abbildung A.3.: Das eher „kantige“ Design vieler älterer Lokomotiven ist unter anderem der Tatsache geschuldet, dass die Fertigung (doppelt) gekrümmter Flächenelemente vergleichsweise teuer ist. Die Schrägungswinkel der oberen Kopfpattien sind in beiden Fällen gering gehalten, sodass die entstehende Lücke zum Wagenzug nicht zu groß wird, wenn die Lokomotiven an einen solchen gekuppelt werden.



(a) Auf den ersten Blick mutet es absurd an, dass Triebzüge mit derartigen Frontpartien gebaut werden. Bedenkt man allerdings, dass mehrere dieser dreiteiligen Zugarnituren zusammengekuppelt werden und der im Bild gelb lackierte Teil der Fahrzeugfront weggeklapt werden kann, damit ein freier Durchgang zwischen den Zugteilen entsteht, erscheint die Konstruktion in einem anderen Licht.

(b) Auf diesem Bild wird ein weiterer Vorteil dieser recht unkonventionellen Formgestaltung deutlich. Verkehren zwei Triebzug-Einheiten gemeinsam, werden zwischen beiden Einheiten keine zusätzlichen aerodynamischen Widerstandskräfte erzeugt, da sie bündig aneinanderstoßen. Die Fahrzeuge verkehren mit bis zu 160 km/h.

Abbildung A.4.: Triebzüge AM 96 der belgischen Staatsbahn SNCB



(a) Das Grundkonzept dieser Triebwagen der Baureihe 156 ist in Großbritannien weit verbreitet. Auch hier wurde auf eine Ansträgung der Frontflächen weitgehend verzichtet, weil ein begehrter Übergang zwischen den Fahrzeugen realisiert werden sollte. Da die Höchstgeschwindigkeit dieser Fahrzeuge nur ca. 120 km/h beträgt, konnte man hier wohl an die Grenze der Kompromissfähigkeit zwischen geringen Luftwiderstand und praktischer Funktionalität gehen.

(b) Die ICM-Triebzüge verkehren als IC-Züge in den Niederlanden mit bis zu 160 km/h. In diesem Geschwindigkeitsbereich ist eine so „plumpe“ Lösung wie bei den nebenstehenden britischen Triebwagen nicht mehr sinnvoll. Man hat sich deshalb entschieden, die Fahrzeugfront in der x-y-Ebene abzurunden und den Führerstand kanzelartig auf das Fahrzeug aufzusetzen. Die Fahrzeuge wiesen eine stirnseitige Übergangsmöglichkeit auf, die heute nicht mehr genutzt wird.

Abbildung A.5.: Weitere Fahrzeuge mit Übergangsmöglichkeiten an den Stirnseiten



(a) SNG-Triebzüge der Niederländischen Eisenbahn (NS)



(b) Siemens Desiro-Triebzüge

Abbildung A.6.: Auch bei Nahverkehrsfahrzeugen haben aerodynamisch günstig gestaltete Kopfparten mittlerweile weite Verbreitung gefunden. Das liegt einerseits an den relativ hohen Einsatzgeschwindigkeiten (bis zu 160 km/h) und der Notwendigkeit, im notorisch unterfinanzierten Nahverkehr Betriebskosten zu sparen. Andererseits spielt aber auch der Wille eine Rolle, mit modernem und „dynamischen“ Design für den Schienenverkehr zu werben.



(a) ETR 500 (Italien)



(b) ETR 400 (Italien)



(c) TGV Réseau (Frankreich)



(d) TGV Duplex (Frankreich)

Abbildung A.7.: Kopfparten von Hochgeschwindigkeitszügen unterschiedlicher Generationen

A.2. Verkleidungen zur Reduktion des Luftwiderstandes

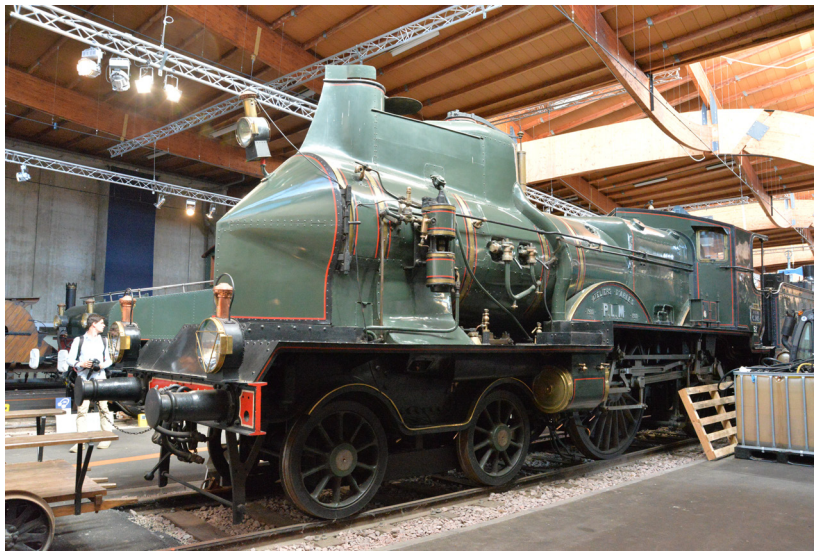
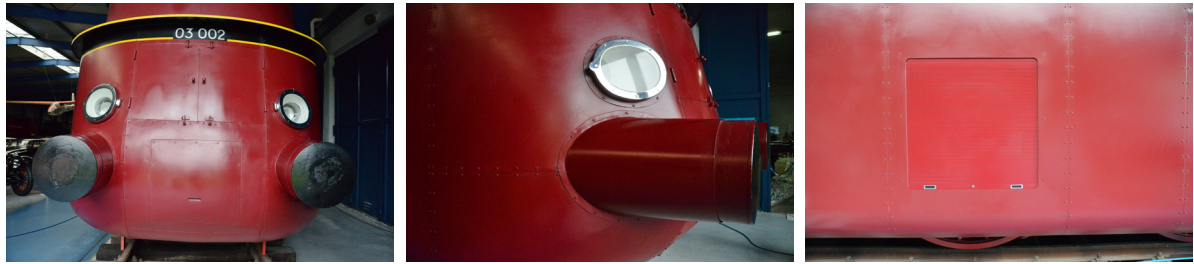


Abbildung A.8.: Reihe C145 der PLM (1900) - Diese Lokomotive steht für erste Versuche, den Luftwiderstand mit „Windschneider“ zu verringern. Die Lokomotiven trugen deshalb den Beinamen „Coupe-Vent“ (frz. couper - schneiden, frz. vent - Wind).



Abbildung A.9.: Reihe 232 U1 der SNCF (1949) - Französische Hochleistungs-Dampflokomotive (2,4 MW). Sie repräsentiert den am Ende der Dampflok-Epoche weitgehend akzeptierten Kompromiss, moderate Verkleidungen anzubringen, aber die Zugänglichkeit bei Fahr- und Triebwerk nicht einzuschränken.



(a) BR 03 002 - komplette Einhausung der Fahrzeugfront (b) BR 03 002 - Integration der Puffer und der Lampen in die aerodynamisch optimierte Fahrzeugfront (c) Wartungsrollo zur Prüfung der Lagerzustände

Abbildung A.10.: Die Deutsche Reichsbahn führte in den 1930er Jahren umfangreiche Versuche zur Reduktion des Luftwiderstandes von Dampflokomotiven durch. Während sich in den USA zur gleichen Zeit die Designer „austobten“ und „die Stromlinie“ Teil der Populärkultur wurde, gehorchte die Formgebung in Deutschland vor allem den Vorgaben aus den Windkanal-Versuchen. Es wurden einige voll- und teilverkleidete Schnellzuglokomotiven gebaut und eingesetzt. Obwohl die Effektivität der Maßnahmen durchaus nachgewiesen werden konnte, war den Betriebseisenbahnern die schlechte Zugänglichkeit der Fahr- und Triebwerke unter den Verkleidungen stets ein Dorn im Auge. Mit Beginn des zweiten Weltkrieges wurde die Entwicklung von Schnellzugdampflokomotiven jäh unterbrochen und in Deutschland erst in den 1950er wieder fortgesetzt - in den meisten Fällen ohne Verkleidungen.



(a) Lok der Reihe A4 der LNER - Die abgebildete Lokomotive („Mallard“) erreichte 1938 vor einem Zug eine Geschwindigkeit von 201,2 km/h (125 mph).



(b) LMS „Coronation“ Class - Die Gesellschaft LMS war ein „Marktbegleiter“ der LNER und wollte nach dem Erfolg der A4 ebenfalls eine werbeträchtige „Stromlinienlok“ haben. Das Ergebnis ist ästhetisch durchaus gelungen und war auch bezüglich der Verringerung des Luftwiderstandes ein Erfolg, brachte aber die Lokführer zur Verzweiflung, weil der Rauch aus dem Schornstein nicht zuverlässig aus ihrem Sichtbereich geleitet wurde. Auch damals gab es also schon Zielkonflikte bei der aerodynamischen Optimierung.

Abbildung A.11.: Verkleidungen an Dampflokomotiven, Teil 3



(a) Der ETR 400 ist für eine Höchstgeschwindigkeit von 360 km/h ausgelegt und deshalb aerodynamisch umfassend optimiert. Im Bild gut zu erkennen sind die glatten Außenwände mit den bündig integrierten Fensterbändern und Türen. Das führende Fahrwerk verschwindet hinter einer Verkleidung und die mittleren Fahrwerke sind gegenüber dem Fahrzeugkasten deutlich eingezogen.

(b) Dieses Bild zeigt den ETR 400 nochmal in der Gesamtansicht. Hier ist besonders das „aufgeräumte“ Fahrzeugdach zu erkennen, auf dem sich nur der Stromabnehmer befindet. Weder Hauben für Klimaanlage noch andere Elemente behindern die Luftströmung über das Fahrzeugdach. Die seitlichen Verkleidungen zwischen Fahrwerken sind tief heruntergezogen und abschnittsweise für Belüftungszwecke unterbrochen.

Abbildung A.12.: ETR 400 von Trenitalia



(a) („ICN“) RABDe 500 der SBB



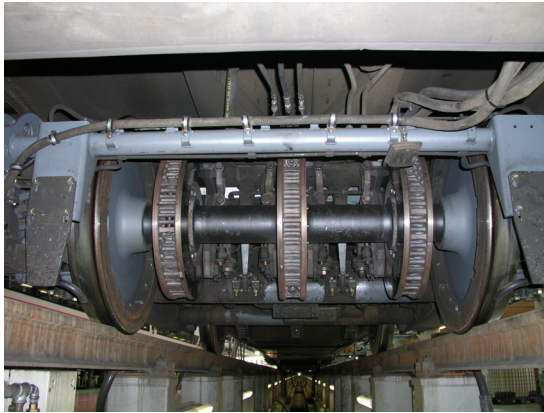
(b) Bombardier Regina-Triebzüge

Abbildung A.13.: Diese Abbildung zeigt zwei Triebzüge, die im Betrieb mit bis zu 200 km/h verkehren, aber aus heutiger Sicht eigentlich nicht mehr als „Hochgeschwindigkeitszüge“ betrachtet werden. Aufgrund ihrer Höchstgeschwindigkeit weisen sie jedoch hinsichtlich ihrer aerodynamischen Eigenschaften viele Gemeinsamkeiten zu diesen auf. Auf beiden Bildern ist jeweils die weitgehende Bündigkeit der Außenwände (keine ausragenden Griffe, Fenster oder Türen) und die tief heruntergezogenen Schürzen im unteren Fahrzeugteil sowie die weitgehend glatten Dächer zu erkennen.

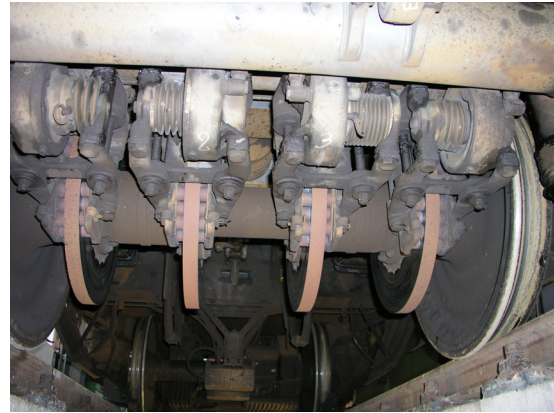


Abbildung A.14.: Zum Schluss noch eine Abbildung, die zeigt, was aus aerodynamischer Sicht nicht passieren sollte. Wenn sich die Abdeckung der Kupplung an der Fahrzeugfront aufgrund eines technischen Defektes nicht mehr schließen lässt, wird die Kupplung zwar vom Fahrtwind gut gekühlt, für die Umströmung des Fahrzeuges entehen jedoch eher subpotimale Bedingungen.

A.3. Sonstige Gestaltungsaspekte mit Bezug zur Luftwiderstandsreduzierung



(a) Bremsscheiben ICE-T



(b) Bremsscheiben TGV POS

Abbildung A.15.: In Kapitel 4.3.3 wird der Bremsscheibenwiderstand als Teil des Luftwiderstandes diskutiert. Aufgrund des gegenüber deutschen Verhältnissen abweichenden Betriebsregimes von TGV-Zügen (Fahrt auf eigener Infrastruktur, vergleichsweise große Haltestellenabstände) konnte bei einigen Zügen auf die Selbstbelüftung der Bremsscheiben verzichtet und der Einbau von Vollscheiben vorgenommen werden. Damit reduziert sich der durch die Bremsscheiben verursachte Luftwiderstand natürlich beträchtlich.

B. Gleichungen zum spezifischen Bogenwiderstand

B.1. Vergleich der Berechnungsergebnisse für Werksgleise und Nebenstrecken

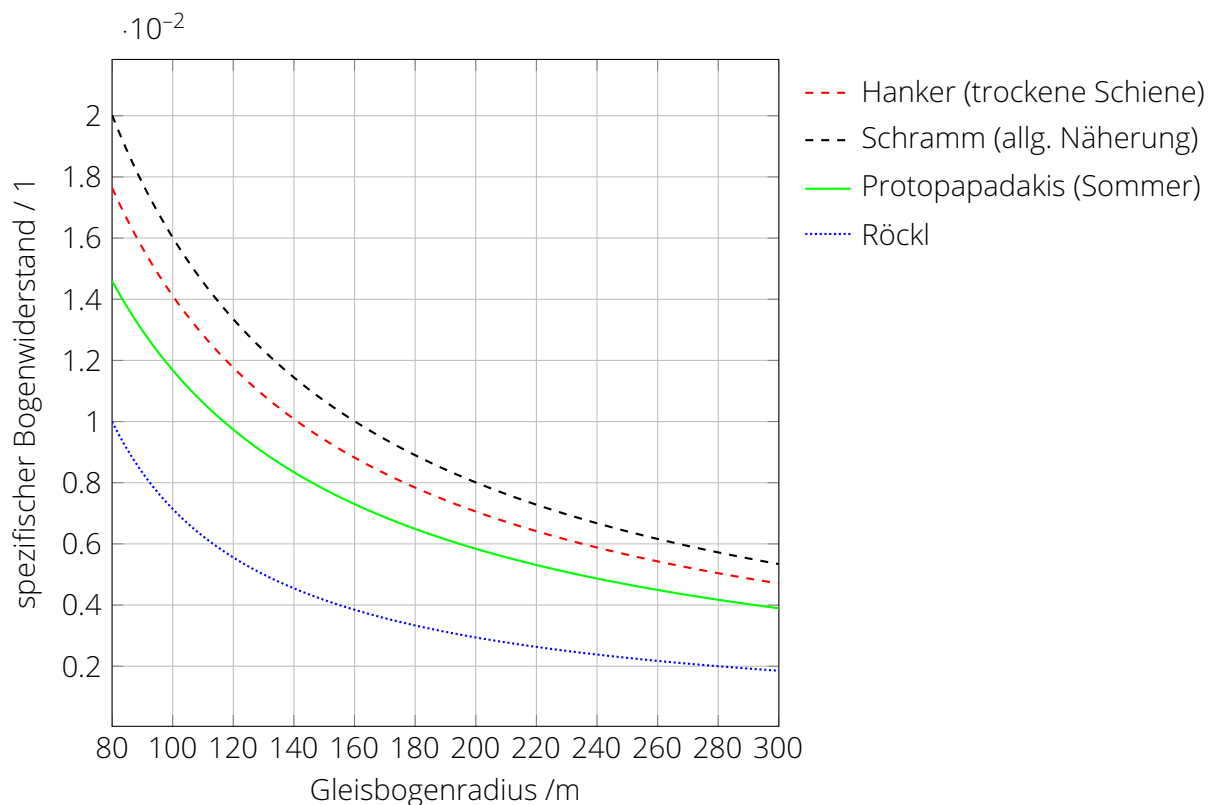


Abbildung B.1.: Spezifische Bogenwiderstandskräfte mit unterschiedlichen Gleichungen berechnet für einen Radsatzabstand von 9 m

B.2. Vergleich der Berechnungsergebnisse für Hauptstrecken

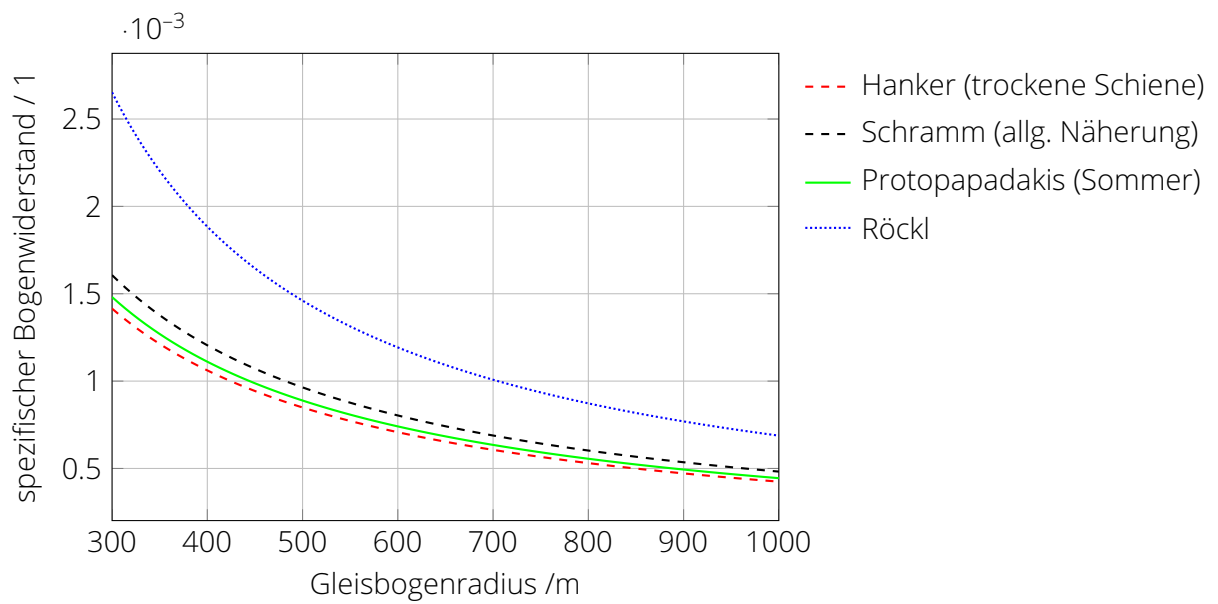


Abbildung B.2.: Spezifische Bogenwiderstandskräfte mit unterschiedlichen Gleichungen berechnet für einen **Radsatzabstand von 2 m**

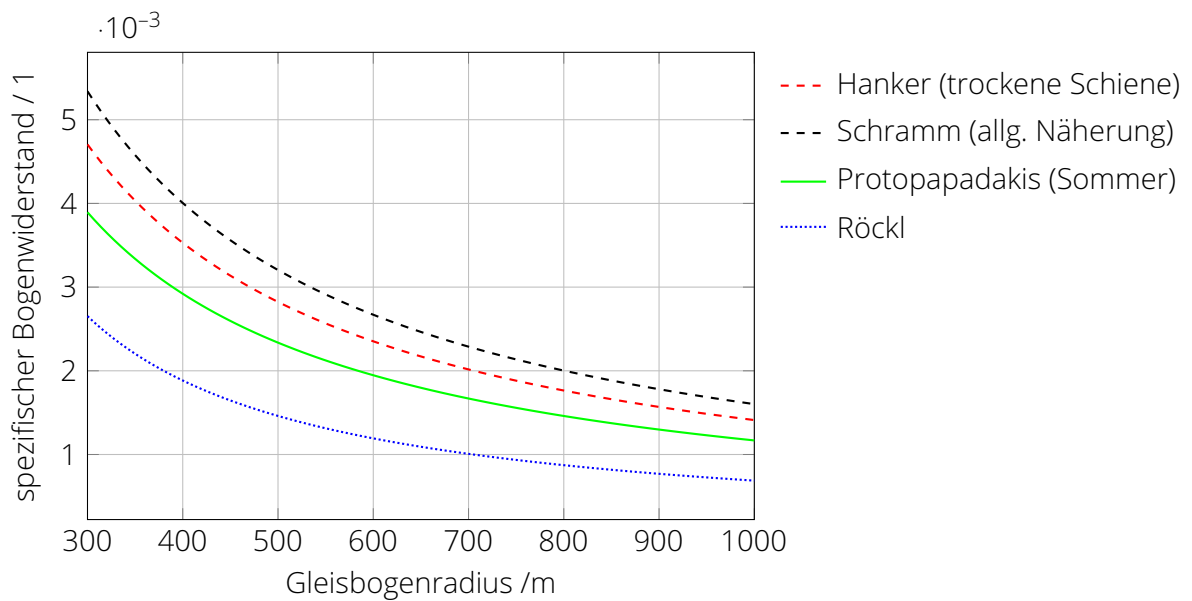


Abbildung B.3.: Spezifische Bogenwiderstandskräfte mit unterschiedlichen Gleichungen berechnet für einen **Radsatzabstand von 9 m**

B.3. Vergleich der Gleichungsvarianten von Hanker und Protopapadakis (Hauptstrecken)

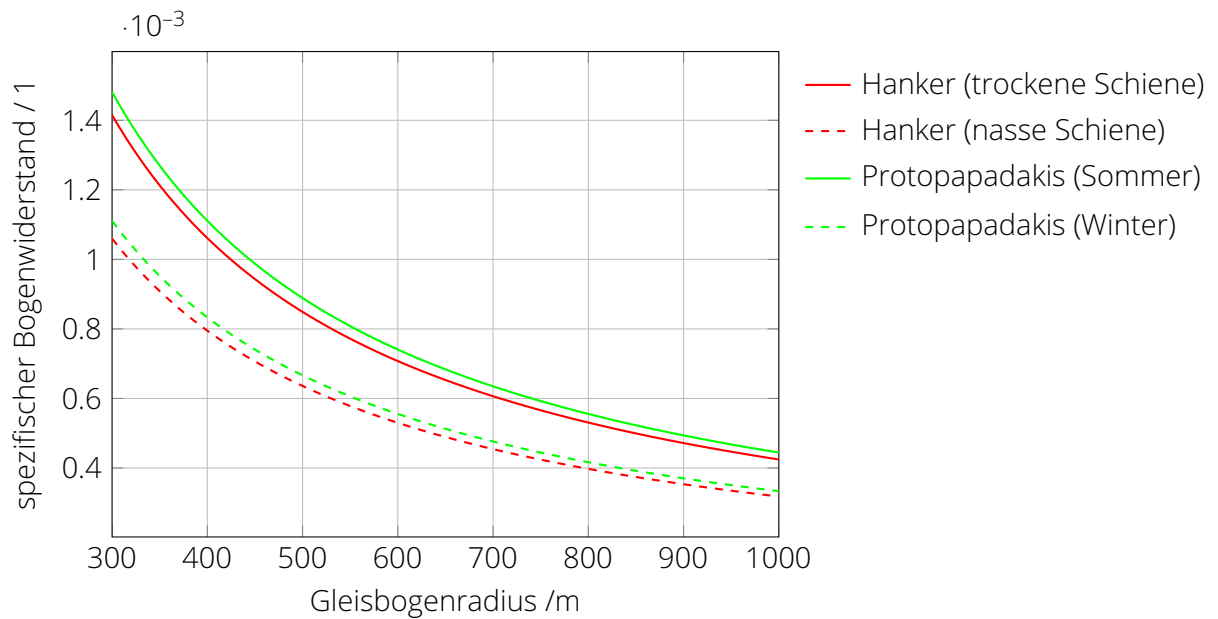


Abbildung B.4.: Spezifische Bogenwiderstandskräfte mit unterschiedlichen Gleichungen berechnet für einen Radsatzabstand von 2 m