
2.1 Der Zug auf der Strecke

Durch die Spurführung der Bahn reduziert sich die Bewegung des Zuges auf einen eindimensionalen translatorischen Vorgang. Auf diese Bewegungsrichtung entlang der Strecke (*Fahrtrichtung*) beziehen sich alle Vorgänge der Mechanik (Abb. 2.1).

Als unvermeidliche Auswirkung verschiedener Störeinflüsse entstehen während der Fahrt zusätzlich zu dieser Translation auch kleinere Bewegungen und Schwingungen in der Quer- bzw. Vertikalrichtung, die den Reisekomfort beeinträchtigen.

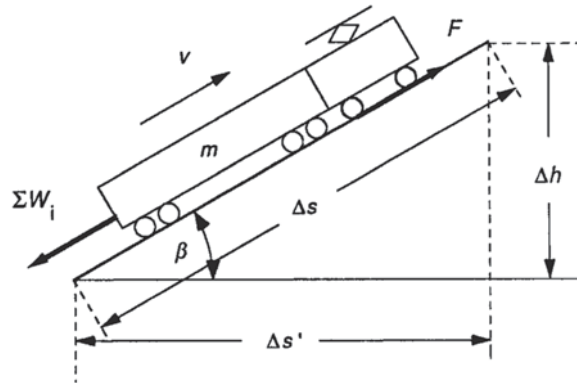
Neben der Länge als Dimension ist die Streckenführung in jedem Punkt durch die Neigung und eventuelle Krümmung (Kurve, Bogen) charakterisiert. Je nach geographischen Verhältnissen ändern sich diese Parameter verschieden oft. In Berggegend sind 5–10 Parameterwechsel pro Kilometer keine Seltenheit. Eine sprunghafte Änderung wird in der Regel mit besonderen Übergangsbögen vermieden.

Um den Kraft- und Leistungsbedarf für die Bewegung des Zuges ermitteln zu können, müssen die Streckenparameter sowie die gewünschten und die zulässigen Fahrgeschwindigkeiten auf der ganzen Strecke bekannt sein. Dazu werden noch nähere Angaben über die Zusammensetzung des Zuges benötigt.

Für jeden betrachteten Streckenpunkt erfolgt diese *Traktionsberechnung* in drei Schritten:

- Aus der Summe der zu erwartenden Fahrwiderstände wird die notwendige *Zugkraft* bestimmt.
- Anschliessend muss kontrolliert werden, ob bei gegebenen Verhältnissen diese Zugkraft durch die *Adhäsion* auf die Schiene übertragen werden kann. Andernfalls sind die Fahrwiderstände und damit die Zugkraft zu reduzieren (z. B. durch bescheidenere Beschleunigungen oder eine kleinere Anhängelast).
- Aus der Zugkraft und der zugehörigen Geschwindigkeit folgt als Produkt dieser Größen die *Leistung*.

Abb. 2.1 Der fahrende Zug auf der Strecke



In der ersten Phase der Berechnung werden nur einige kritische Streckenpunkte erfasst, wo grösste Zugkräfte oder andere extreme Bedingungen zu erwarten sind.

Sobald die Gesamtcharakteristik des Triebfahrzeuges bekannt ist, kann die Rechnung Punkt für Punkt über die ganze Strecke durchgeführt werden, um daraus die mittleren Belastungen, die Fahrzeiten sowie die Erwärmungen der elektrischen Maschinen und anderer Elemente zu bestimmen. Da bei einer solchen Rechnung unter Umständen Hunderte von Punkten nur für eine einzige Streckenfahrt zu berücksichtigen sind, wird hier ein Rechner vorteilhaft eingesetzt. Es ist auch zur Vereinfachung möglich mehrere Punkte mit einem Durchschnittswert zusammenzufassen.

Umgekehrt können in einem ähnlichen Rechenverfahren die zulässigen Anhängelasten auf verschiedenen Strecken für ein bestimmtes Triebfahrzeug ermittelt werden.

Bevor der Berechnungsgang im Einzelnen erläutert wird sollen die massgebenden Grössen näher definiert werden.

Strecken­neigung: Üblicherweise wird an Stelle des Neigungswinkels β der Strecke die Neigung I als die bewältigte Höhendifferenz Δh bezogen auf die Horizontalprojektion $\Delta s'$ der befahrenen Weglänge Δs verwendet. Sie wird in m/km, kürzer in ‰ (Promille) angegeben und solange positiv eher *Steigung* genannt:

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta s'} \cdot 10^3 = (\tan \beta) \cdot 10^3 \quad (2.1)$$

Bei $\Delta h < 0$ wird die Neigung I negativ und dann (immer in Bezug auf die Fahrtrichtung) als *Gefälle* bezeichnet. In der *Ebene* ist $I = 0$.

Strecken­krümmung: Die Streckenkrümmung ist durch den *Krümmungsradius* r (Radius des Gleisbogens) und die Richtung der Ablenkung (Links- bzw. Rechtskurve) charakterisiert. Auf gerader Strecke wird r unendlich gross.

Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigung: Während der Fahrt ist die *Fahrgeschwindigkeit* v positiv, beim Halt ist selbstverständlich $v = 0$. Negative Geschwindigkeiten kommen in dieser Betrachtung nicht vor.

Für die Fahrgeschwindigkeit v und die *Beschleunigung* a gelten die üblichen Definitionen

$$v = \frac{ds}{dt} \quad a = \frac{dv}{dt}$$

wobei die Fahrgeschwindigkeit in der Praxis immer in km/h angegeben wird:

$$1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$$

Es ist bei den Zahlenwerten zu beachten, dass die Beschleunigung in m/s^2 ausgedrückt wird.

Bei der Fahrt in *Beharrung* bleibt die Geschwindigkeit mit $a = 0$ konstant. Eine negative Beschleunigung wird *Verzögerung* genannt.

Die Masse des Zuges: Die *Masse* m des Zuges (oder das *Gewicht* des Zuges im Sinne von Masse) wird üblicherweise in Tonnen (t) angegeben. Die Masse der angehängten Wagen allein (d. h. ohne Triebfahrzeug) wird als *Anhängelast* bezeichnet.

Durch die Wirkung der Gravitation mit der (örtlichen) Fallbeschleunigung g auf die Masse m des Zuges entsteht die *Gewichtskraft* G :

$$G = mg \tag{2.2}$$

Da im Bahnbetrieb überall mit dem konstanten Wert $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ gerechnet werden darf, belastet die Masse von 1 t die Schienen mit einer Gewichtskraft von 9,81 kN. Es ist nicht notwendig den genaueren Wert ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$) zu benutzen oder die örtlichen Abweichungen ($g = 9,78049\text{--}9,83221 \text{ m/s}^2$) von weniger als $\pm 0,3 \%$ zu berücksichtigen [1].

Die praktischen und noch gebräuchlichen Worte *Gewicht* und *Last* sollten besser nicht benutzt werden, weil sie als Begriffe auch in der Fachliteratur für zwei verschiedene Grössen gebraucht werden: für die Masse und für die Gewichtskraft eines Körpers.

Wo Missverständnisse zu befürchten sind, soll nach Deutscher Norm DIN 1305 anstelle des Wortes *Gewicht* die Benennung *Wägewert* bzw. *Gewichtskraft* verwendet sowie das Wort *Last* vermieden werden [2]. Nach DIN 25007 und 25008 wird *Gewicht* im Sinne von Masse in vielen Kombinationen gebraucht (*Fahrzeuggewicht*, *Ladegewicht*, *Gewicht des Zuges*, *Nutzgewicht* usw.). Die *Last* wird hier ebenfalls im Sinne von Masse (*Radsatzlast*, *Nutzlast*, *Lastgrenze*) definiert [3, 4].

In diesem Zusammenhang steht der äusserst geringe Unterschied zwischen Masse und Wägewert – Korrektur des Luftauftriebes – hier nicht zur Diskussion. Er muss bei den Bahnen, wie auch bei meisten anderen Anwendungen, nicht beachtet werden.

Der Internationale Eisenbahnverband legt verschiedene Fachausdrücke in Kombination mit Gewicht und Last immer im Sinne von Masse fest (siehe Anhang D, insbesondere UIC-Kodex 800-01).

Im Interesse der Eindeutigkeit im deutschsprachigen Raum müssten somit das Gewicht und ebenfalls auch die Last in der Bahntechnik immer als Masse verstanden werden.

Fahrwiderstände und Zugkraft: Der gesamte *Fahrwiderstand* W ist die Summe aller auf den Zug entgegen der Fahrtrichtung wirkenden Kräfte. Es ist vorteilhaft ihn in einzelne, leichter zu berechnende Komponenten zu zerlegen:

- Laufwiderstand W_f ,
- Bogenwiderstand W_b ,
- Neigungswiderstand W_l ,
- Beschleunigungswiderstand W_a ,

$$W = W_f + W_b + W_l + W_a = \Sigma W_i \quad (2.3)$$

Der *Laufwiderstand* entsteht bereits während der Fahrt auf ebener gerader Strecke. Er setzt sich aus dem Rollwiderstand der Räder auf den Schienen, aus dem Reibungswiderstand der Lager und der rotierenden Antriebsteile sowie aus dem Luftwiderstand des ganzen Zuges zusammen. Er ist immer positiv.

Der *Bogenwiderstand* (oder Krümmungswiderstand) entsteht zusätzlich dazu durch den Kurvenlauf der Fahrzeuge in Gleisbögen. Auf gerader Strecke tritt er nicht auf.

Der *Neigungswiderstand* ist die entgegen der Bewegungsrichtung wirkende Komponente der Gewichtskraft des Zuges. In der Ebene ist er gleich Null.

Der *Beschleunigungswiderstand* repräsentiert den für die Beschleunigung des Zuges notwendigen Kraftanteil. Bei der Fahrt in Beharrung ist er nicht vorhanden.

Die letzten zwei Widerstände können auch negativ sein.

Der Neigungs- und der Bogenwiderstand werden oft als *Streckenwiderstand* zusammengefasst.

Die einzelnen Fahrwiderstände, für welche gelegentlich auch andere Namen gebräuchlich sind, werden anschliessend behandelt.

Die *Zugkraft* F ist die vom Triebfahrzeug entwickelte und auf die Schienen zwecks Überwindung der Fahrwiderstände übertragene Kraft. Sie ist dem gesamten Fahrwiderstand entgegengerichtet und gleich gross wie dieser:

$$F = W \quad (2.4)$$

Obwohl entgegengerichtet, haben somit in der Bahntechnik diese beiden Kräfte das gleiche Vorzeichen.

Bei negativem Vorzeichen wirkt die Zugkraft als eine *Bremskraft*.

In der Tab. 2.1 ist noch eine Übersicht über die Vorzeichen der vorher besprochenen Grössen in verschiedenen Fällen zu finden:

Tab. 2.1 Vorzeichen bei verschiedenen Verhältnissen

		positiv	Null	negativ
Laufwiderstand	W_f	immer	–	–
Bogenwiderstand	W_b	Kurve	Gerade	–
Neigungswiderstand	W_l	Steigung	Ebene	Gefälle
Beschleunigungswiderstand	W_a	Beschleunigung	Beharrung	Verzögerung
Fahrwiderstand	W	möglich	möglich	möglich
Fahrgeschwindigkeit	v	Fahrt	Halt	–
Beschleunigung	a	Beschleunigung	Beharrung	Verzögerung
Zugkraft	F	Zugkraft	Auslauf	Bremskraft

2.2 Die Spurführung

Das lichte Mass zwischen den Schienen auf gerader Strecke wird als *Spurweite* bezeichnet (Abb. 2.2). Je zwei darauf laufenden Räder der Fahrzeuge, auf eine Achswelle aufgepresst, bilden einen *Radsatz* (eine *Achse*).

Der *Spurkranz* des Rades gewährleistet die Spurführung des Fahrzeuges. Zum ungezwungenen Lauf der Radsätze ist ein Spurspiel von ca. 7–12 mm erforderlich.

In engeren Kurven ist eine gewisse *Spurerweiterung* (5–20 mm, gelegentlich mehr) üblich, um das Klemmen der Räder zu verhindern [5–7].

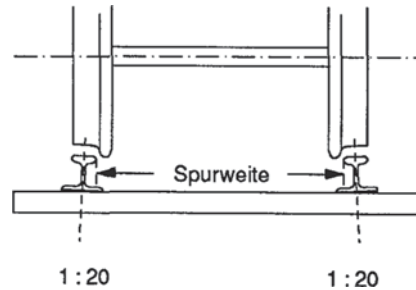
Zur Begegnung der Wirkung der Zentrifugalkraft wird in den Kurven die äussere Schiene höher gelegt. Diese *Überhöhung* ist vom Krümmungsradius abhängig und beträgt bis ca. 150 mm [7].

Die Schienen werden leicht nach innen geneigt befestigt. In der Regel beträgt die Neigung 1: 20, 1: 40 oder 1: 60. Die Lauffläche der Räder muss dementsprechend konisch oder ausgehöhlt sein. Auf gerader Strecke und bei fehlerfreiem Schienenweg sollte dies einen richtigen selbstkorrigierenden wellenförmigen Lauf (*Sinuslauf*) des Radsatzes in der Gleismitte ergeben, theoretisch sogar ohne Beihilfe des Spurkranzes, welcher nebst seiner Sicherheitsrolle erst für die Ablenkung in den Kurven unentbehrlich ist [8, 9].

Bei den Rillenschienen der Strassenbahnen wird auf die erwähnte Neigung verzichtet. Die Laufflächen der Räder müssen dann zylindrisch sein. Auch das Spurspiel ist kleiner.

Die Hauptbahnen und ein Teil anderer Bahnen in Europa (ausgenommen Spanien, Portugal, Russland und Finnland) verwenden die Spurweite von 1435 mm (*Normalspur*). Auch in Übersee wird die Normalspur viel benutzt. Die vorher erwähnten vier Länder haben eine breitere Spurweite (*Breitspur*): Russland und Finnland 1524 mm, Spanien und Portugal 1668 mm. Ausserdem bestehen in verschiedenen Ländern Breitspuren bis 1680 mm. Es existieren auch viele kleinere Spurweiten zwischen 381 und 1100 mm (*Schmalspur*), wovon zwei stark verbreitet sind: 1000 mm (*Meterspur*) für Nebenbahnen und Strassenbahnen sowie 1067 mm (*Kapspur*) insbesondere in Afrika und in Asien [6, 7].

Abb. 2.2 Die Spurführung des Radsatzes mit Schienenneigung 1:20 als Beispiel



Die Spurweite wird auch bei Normalspurbahnen in Europa nicht überall nach gleichen Kriterien gemessen (z. B. 14 mm unterhalb der Schienenoberkante). Wenn die Abweichungen klein sind, erlauben sie zusammen mit den Bautoleranzen die Benutzung durch gleiche Fahrzeuge.

Die Beanspruchung des Rad/Schiene Paares wird in erster Linie durch die *Radlast* bestimmt. Darunter ist der auf ein Rad entfallende Anteil der Masse des Fahrzeuges zu verstehen. Ihre Gewichtskraft belastet die Schiene als konzentrierte Kraft in einem Punkt. Deshalb darf sie einen bestimmten, durch Schienenstärke und Schwellenabstand gegebenen Wert nicht überschreiten. Üblicherweise wird die Radlast beider Räder des Radsatzes zusammen als die *Radsatzlast* angegeben. Bei den normalspurigen Bahnen in Europa beträgt die zulässige Radsatzlast 16–22, 5 t, bei den meterspurigen Nebenbahnen 10–16 t, bei Strassenbahnen 10 t und weniger. In Übersee sind höhere Radsatzlasten üblich, z. B. in den USA 30–35 t [10, 11].

Auch hier sind verschiedene Bezeichnungen zu finden: *Achslast* neben der Radsatzlast und Angaben in kN (als Gewichtskraft) oder in t (als Anteil der Masse).

Für die Brückenbeanspruchung ist die gesamte anfallende Gewichtskraft massgebend. Sie wird durch die Meterlast (Fahrzeugmasse je Längeneinheit) charakterisiert. Normalwerte bei europäischen Eisenbahnen sind 5,0–8,0 t/m.

Die Laufflächen der Räder nutzen sich im Betrieb ab und müssen periodisch erneuert werden. Zu diesem Zweck wird der auf der Felge warm aufgeschrumpfte *Radreifen* (*Bandage*) nach mehrmaligem Abdrehen ausgewechselt. Die zulässige radiale Bandagenabnutzung beträgt meistens 20–25 mm. Auch Vollräder ohne auswechselbare Radreifen (*Monobloc*-Räder) werden häufig verwendet. Sie lassen eine grössere Abnutzung zu.

Gelegentlich werden für die Bahnen auch gummibereitete Räder benutzt. Diese können auf normalen Schienen oder auf besonderen Holz- bzw. Betonbalken (Metro Paris) laufen. In jedem Fall sind zur Führung der Räder Spurkränze oder zusätzliche seitliche Führungsräder notwendig. Den Vorteilen des erhöhten Reisekomforts stehen die Nachteile des teuren Unterhaltes und des grösseren Laufwiderstandes gegenüber.

2.3 Die Problematik der spezifischen Fahrwiderstände

Nähere Betrachtungen der einzelnen Fahrwiderstände lassen folgende physikalische Zusammenhänge erkennen:

- Der Roll- und Reibungswiderstand (als Anteil des Laufwiderstandes), der Bogenwiderstand und der Neigungswiderstand entstehen in erster Linie wegen der Gewichtskraft G des Zuges und sind ihr annähernd proportional.
- Der Beschleunigungswiderstand ist allein durch die Masse m des Zuges bestimmt.
- Der Luftwiderstand ist lediglich von der Form des Zuges abhängig. Er lässt sich durch eine idealisierte Fläche (Stirnwände, Seitenwände) ausdrücken.

Die praktische Berechnung wird übersichtlicher, wenn die Widerstände auf eine geeignete gemeinsame Grösse bezogen werden (spezifische Fahrwiderstände). Die Aufgabe ist kaum korrekt zu lösen, weil hier drei verschiedene Bezugsgrössen (Gewichtskraft, Masse, Fläche) auftreten müssten.

Die Fläche scheidet ohnehin aus, weil sie nur beim Luftwiderstand anwendbar wäre.

Die Gewichtskraft hat als Bezugsgrösse die längste Tradition. Ein grösser Teil der noch heute im praktischen Gebrauch stehenden Berechnungsformeln ist im alten technischen Masssystem entstanden (mit Zugkraft in kg bzw. kp und Gewichtskraft in t bzw. Mp). Als Einheit des spezifischen Widerstandes ergab sich kg/t bzw. kp/Mp (Grösse mit der Dimension 1), was als Zahl mit ‰ (Promille) gleichzusetzen ist. Die Inkonsequenz betreffend den Beschleunigungswiderstand (und auch den Luftwiderstand) hat niemanden gestört, weil die Bezugsgrösse (Gewichtskraft) mit dem gängigen Begriff der „Grösse des Zuges“ (z. B. Zug von 800 t) praktisch identisch war.

Beim Übergang auf heutige SI-Einheiten hat die deutsche Normung (DIN 25007) die Bezugsgrösse Gewichtskraft übernommen und als Einheit des spezifischen Fahrwiderstandes N/kN festgelegt. Dies ergibt wieder eine Grösse mit der Dimension 1, d. h. die gleiche Zahl wie vorher, mit dem Vorteil, dass die Zahlenwerte der bisherigen Formeln unverändert bleiben. Zur physikalischen Inkonsequenz betreffend den Beschleunigungswiderstand kommt der Nachteil hinzu, dass die Bezugsgrösse (Gewichtskraft in kN statt Masse in t) nun vom Praktiker als unnatürlich empfunden wird [3].

Der Internationale Eisenbahnverband UIC lässt zwei Bezugsmöglichkeiten (Gewichtskraft oder Masse) mit Einheiten N/kN bzw. daN/t zu [12]. Der Bezug auf die Masse ist physikalisch ebenso problematisch wie der Bezug auf die Gewichtskraft, hat jedoch einen wichtigen Vorteil: die Bezugsgrösse ist praxisnah (z. B. Anschrift 40 t am Wagen), ohne Umrechnung verwendbar und genügend klar definiert.

Das dabei gewählte Vielfache daN der Krafteinheit N ($1 \text{ daN} = 10 \text{ N}$) ist leider eine überflüssige Massnahme zur Beibehaltung der alten Zahlenwerte, welche sich beim Übergang von kg bzw. kp auf N um den Faktor $9,81 \approx 10$ erhöhen. Der Vorsatz da (Deka), der Einzige SI-Vorsatz aus zwei Buchstaben, wird sonst in der Technik überall vermieden. Die Rundung auf 10 ergibt einen nicht immer zu vernachlässigenden Fehler von ca. 2 %.

Die Schweizerische Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen erwähnt die Fahrwiderstände in N/t [13].

Die Bezugsgrösse Masse - für die Beschleunigung die einzige physikalisch richtige - lässt sich nach Gl. 2.2 auch für andere Fahrwiderstände (Luftwiderstand ausgenommen) vertreten. Die spezifischen Widerstände in N/t ausgedrückt haben dann die Dimension einer Beschleunigung, was für den Quotienten der Kraft durch die Masse nach Newton auch zu erwarten ist.

In der Praxis können mit beiden Bezugsgrössen keine Probleme entstehen, weil die Umrechnung der Zahlenwerte einfach mit dem Faktor 9,81 erfolgt:

$$w^* = \frac{W}{m} = \frac{W}{G} g = w g \quad \text{in N/t} \quad (2.5)$$

$$w = \frac{W}{G} = \frac{W}{m g} = \frac{w^*}{g} \quad \text{in N/kN} \quad (2.6)$$

Der physikalisch korrekteste Weg ist den Beschleunigungswiderstand auf die Masse und die restlichen Widerstände auf die Gewichtskraft zu beziehen:

$$W = W_f + W_b + W_l + W_a = (w_f + w_b + w_l) G + w_a^* m \quad (2.7)$$

Diese Gleichung gilt allgemein. Für die bequemere praktische Anwendung kann sie nun in Übereinstimmung mit Gl. 2.5 umgestellt werden:

$$W = (w_f + w_b + w_l) m g + w_a^* m = (w_f + w_b + w_l) m g + \frac{w_a^*}{g} m g \quad (2.8)$$

$$W = W_f + W_b + W_l + W_a = (w_f + w_b + w_l + w_a) m g = \Sigma w_i m g$$

Hier sind w_f , w_b , w_l , w_a und w die spezifischen, auf die Gewichtskraft bezogenen Fahrwiderstände des Zuges. Sie werden in N/kN (oder gleichbedeutend in ‰) angegeben. Sie sind der Ausgangspunkt für die Berechnung der benötigten Zugkraft gemäss Gl. 2.4:

$$F = W = \Sigma W_i = \Sigma w_i m g = w m g \quad (2.9)$$

$$W_i = w_i m g \quad (2.10)$$

$$w = \Sigma w_i \quad (2.11)$$

Die Fahrwiderstände können für den Zug als Ganzes oder nach Bedarf für bestimmte Teile des Zuges gesondert berechnet werden. Beispielsweise weist die Lokomotive einen grös-

seren spezifischen Laufwiderstand als der übrige Zug auf. Hier kann dann die Rechnung getrennt für Triebfahrzeug und Anhängelast (Index 1 bzw. 2) durchgeführt werden:

$$W = W_1 + W_2 = \sum w_{i1} m_1 g + \sum w_{i2} m_2 g \quad (2.12)$$

2.4 Laufwiderstand

Der spezifische Laufwiderstand beträgt durchschnittlich [6, 10, 14–18]:

bei Vollbahnen (Lokomotivzüge):	3–4 N/kN	bei 60 km/h
	4–6 N/kN	bei 80 km/h
	7–8 N/kN	bei 120 km/h
	9–10 N/kN	bei 160 km/h
	11–12 N/kN	bei 180 km/h
	ca. 14 N/kN	bei 200 km/h
	ca. 34 N/kN	bei 330 km/h
bei Industrie- und Grubenbahnen:	5–15 N/kN	
bei Strassenbahnen (Rillenschienen):	5–12 N/kN	bei 0–60 km/h
bei Trolleybussen (Luftreifen):	12–30 N/kN	bei 0–60 km/h

Er lässt sich mit einer allgemeinen Formel beschreiben:

$$w_f = c_0 + c_1 v + c_2 v^2 \quad (2.13)$$

Der Koeffizient c_0 gibt den geschwindigkeitsunabhängigen Teil an. Dazu zählen in erster Linie die rollende Reibung zwischen Rad und Schiene, die Lager- und die Federreibung, die Reibung der rotierenden Antriebsteile sowie der Einfluss der Schienenstöße. Dieser konstante Anteil ist somit weitgehend von der Art und vom Zustand der Fahrzeuge und von der Qualität des Streckenoberbaues abhängig. Eine gewisse geschwindigkeitsabhängige Komponente (Einfluss verschiedener störender Bewegungen) kann mit dem Koeffizienten c_1 berücksichtigt werden.

Der Luftwiderstand hängt von der aerodynamischen Form des Zuges (Wagenart, Zugslänge, Kopfform) und von der Stärke und Richtung des Windes ab. Er ist annähernd dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit proportional und kommt somit mit dem Koeffizienten c_2 zur Geltung.

Die Werte können nur durch Messung ermittelt werden. Bei der praktischen Anwendung müssen daraus Mittelwerte gebildet werden, weil beispielsweise ein Güterzug aus verschiedenen Wagen besteht: neuen und alten, beladenen und nicht beladenen, einheimischen und fremdländischen. Auch ein Personenzug setzt sich aus verschiedenem Rollmaterial zusammen. Lediglich Züge geschlossener Bauart sind genauer bestimmbar.

Für die Berechnung des spezifischen Laufwiderstandes besteht aus diesem Grunde eine Vielzahl von empirischen Formeln, die zum Teil beachtlich abweichende Resultate ergeben. Fast jede grössere Bahnverwaltung entwickelte andere, dem eigenen Fahrzeugpark angepasste Formeln in mehreren Varianten: für Triebfahrzeuge und für die Anhängewagen verschiedener Art. Eine kleine Auswahl ist im Anhang A zu finden.

Bei allen Projektierungsaufgaben muss deshalb vereinbart werden nach welcher Formel der Laufwiderstand zu berücksichtigen ist. Für mittlere Verhältnisse bei mässigen Fahrgeschwindigkeiten bis ca. 150 km/h eignet sich die folgende angepasste Formel von Strahl zur Berechnung des spezifischen Laufwiderstandes des gesamten Zuges sehr gut, obwohl sie eigentlich nur für die Anhängelast bestimmt ist [6]:

$$w_f = 2,5 + k(v + \Delta v)^2 \cdot 10^{-3} \quad \text{N/kN} \quad (2.14)$$

Hier bedeutet Δv den üblichen Zuschlag für den Seiten- und Gegenwind von ca. 10–15 km/h. Der Koeffizient k berücksichtigt die Zusammensetzung der Züge:

$k = 0,25$	für Schnellzüge, Eilzüge und schwere Güterzüge,
$0,33$	für gewöhnliche Personenzüge,
$0,40$	für Eilgüterzüge,
$0,50$	für gewöhnliche Güterzüge gemischter Zusammensetzung,
$1,0$	für leere Güterzüge.

Nach dieser Formel beträgt der Laufwiderstand bei sehr kleinen Geschwindigkeiten 2,5 N/kN und steigt bei einem mit 120 km/h fahrenden Eilgüterzug bei Windstille auf 8,3 N/kN an.

Die Zahlen gelten für offene Strecke. In doppelspurigen Tunneln steigt der Luftwiderstand nach Messungen der Schweizerischen Bundesbahnen ungefähr auf den doppelten Wert, in einspurigen bis auf den dreifachen Wert an.

Der konstante Anteil von 2,5 N/kN (Reibung ohne Luftwiderstand als Mittelwert) verkleinert sich bei modernem Wagenmaterial auf 1,5–2,0 N/kN. Extremwerte liegen bei 1,0 N/kN.

Bei Lokomotiven üblicher Bauart beträgt dieser konstante Anteil 3,5–5 N/kN. Lokomotiven mit Drehstrommotoren weisen wegen der fehlenden Kollektorreibung spürbar kleinere Werte (gegen 2 N/kN) auf.

Bei den Triebfahrzeugen der Zahnradbahnen ist mit einem um 4–6 N/kN höheren spezifischen Laufwiderstand zu rechnen.

Ein Beispiel illustriert die Streuung: Nach Angaben der Schweizerischen Bundesbahnen beträgt der Luftwiderstand bei einem Schnellzug moderner Bauart rund 3,6 N/kN bei 140 km/h, im Vergleich zu 5–8 N/kN bei älterem Rohmaterial mit Stufenschalterlokomotiven [19]. Die Formel von Strahl ergäbe hier (ohne Windeinfluss) 7,4 N/kN.

Während der Anfahrt der mit Gleitlagern ausgerüsteten Fahrzeuge fehlt im ersten Moment der tragende Ölfilm in den Lagern, woraus ein stark erhöhter Reibungswiderstand resultiert. Dieser zusätzliche *Losbrechwiderstand* beträgt ca. 6–8 N/kN (mit Extremwerten bis 20 N/kN) und verschwindet nach einigen Metern Fahrt [7, 20]. Er tritt insbesondere