



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik

Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge

Lehrbrief „Fahrdynamik für Verkehringenieure“ (Teil 04), Sommersemester 2020

Dr.-Ing. Martin Kache

28. Mai 2020

Vorwort

Hier ist nun der vierte Lehrbrief im Fach „Fahrodynamik für Verkehrsingenieure“ im Sommersemester 2020. Nachdem wir uns in den letzten Wochen intensiv mit Fahrwiderstandskräften und Traktionscharakteristika beschäftigt haben, wollen wir nun diese zwei Aspekte nun zusammenführen. Somit beginnen wir jetzt „richtig Fahrodynamik zu machen“, indem wir uns zunächst mit Möglichkeiten beschäftigen, das Traktionsvermögen von Triebfahrzeugen zu beurteilen. Dabei wird es grundlegend um die Beantwortung der Frage gehen, welche Zugmasse mit welcher Geschwindigkeit bei welcher (Rest-)Beschleunigung in welcher Längsneigung befördert werden kann.

Der zweite Teil des Lehrbriefes wird sich um die fahrdynamische Auslegung von Triebfahrzeugen drehen und damit um die Frage, welche Traktionsleistung installiert werden muss, damit sich bestimmte fahrdynamische Szenarien realisieren lassen.

Ich wünsche Ihnen viel Erfolg und spannende Erkenntnisse. Für Rückfragen stehe ich Ihnen natürlich in bewährter Art und Weise (E-Mail oder Online-Konsultation) zur Verfügung.

Viele Grüße aus dem „Home Office“

Dr.-Ing. Martin Kache

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

Dresden im Mai 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 (7.1)

Inhaltsverzeichnis

8	Fahrdynamische Charakteristiken	7
8.1	Das Traktionsvermögen von Triebfahrzeugen	7
8.2	Steigfähigkeit	9
8.3	Beschleunigungsvermögen	11
8.4	Schleppvermögen	13
8.5	Grenzlasten	16
9	Verständnisfragen	19

8 Fahrdynamische Charakteristiken

8.1 Das Traktionsvermögen von Triebfahrzeugen

Um das Traktionsvermögen von Triebfahrzeugen sinnvoll einschätzen zu können, ist eine Gegenüberstellung der erzeugten Traktionskräfte (Zugkräfte) mit den auftretenden Widerstandskräften vorzunehmen. Ausgehend von der fahrdynamischen Grundgleichung lassen sich Aussagen zu folgenden fahrdynamischen Fragestellungen ableiten:

- Welche Längsneigung kann ein Triebfahrzeug mit welcher Wagenzugmasse (im Falle von Zügen) gerade noch in Beharrung befahren?
- Welche Längsneigung kann ein Triebfahrzeug mit welcher Wagenzugmasse (im Falle von Zügen) mit einer festgelegten Restbeschleunigung befahren?
- Wie hoch ist die bei einer bestimmten Zugkonfiguration erzielbare Längsbeschleunigung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, der Streckenlängsneigung und der (Wagen-) Zugmasse?
- Welche Wagenzugmasse kann von einem Triebfahrzeug maximal in einer bestimmten Neigung mit einer bestimmten Geschwindigkeit und Restbeschleunigung geschleppt werden?

In der voranstehenden Aufzählung taucht der Begriff der „Restbeschleunigung“ auf. Dabei handelt es sich um die Längsbeschleunigung, die sich aus dem Zugkraftüberschuss nach Abzug aller Fahrwiderstandskräfte ergibt.

Abbildung 8.1 zeigt Zugkraft und Fahrzeugwiderstandskräfte für zwei Zugkonfigurationen, die im Rahmen dieses Kapitels immer wieder als Beispiel herangezogen werden sollen.

Im Fall des Beispiel-IC-Zuges (Abbildung 8.1a) kann bei $v=80$ km/h eine Zugkraft von 257 kN erzeugt werden, während in der Ebene ein Fahrwiderstand von 17,4 kN überwunden werden muss. Somit liegt ein Zugkraftüberschuss von 239,6 kN vor, der einer Restbeschleunigung von $0,45$ m/s² entspricht.

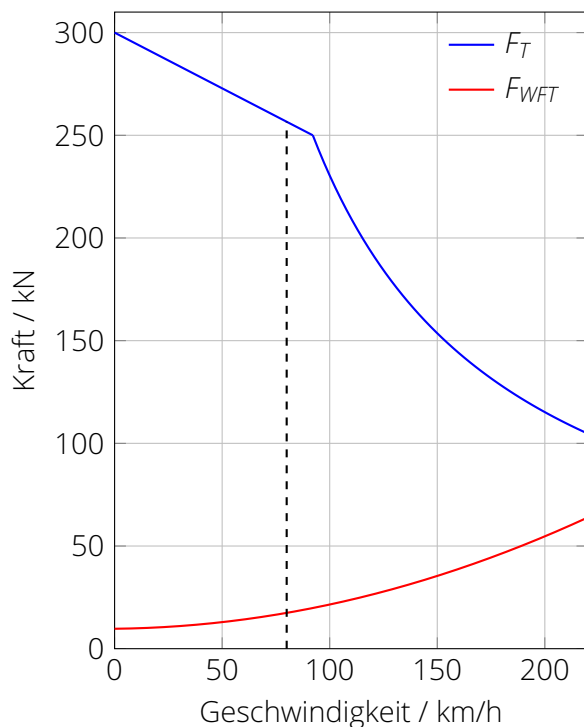
Im Falle des Beispiel-Güterzuges 8.1b beträgt die Zugkraft bei 80 km/h hingegen 72 kN und der Fahrwiderstand in der Ebene beläuft sich auf 29,9 kN. Daraus resultiert bei der genannten Geschwindigkeit ein Zugkraftüberschuss von 42,1 kN und eine Restbeschleunigung von $0,038$ m/s². Die Restbeschleunigung des Güterzuges ist also bei gleicher Geschwindigkeit aufgrund des geringeren Zugkraftangebotes und der deutlich höheren Zugmasse etwa um den Faktor 10 geringer als bei dem IC-Zug.

Den Diagrammen in Abbildung 8.1 ist noch ein weiterer entscheidender fahrdynamischer Aspekt zu entnehmen. Während die Kurven von Zugkraft und Fahr(zeug)widerstand im Falle für das

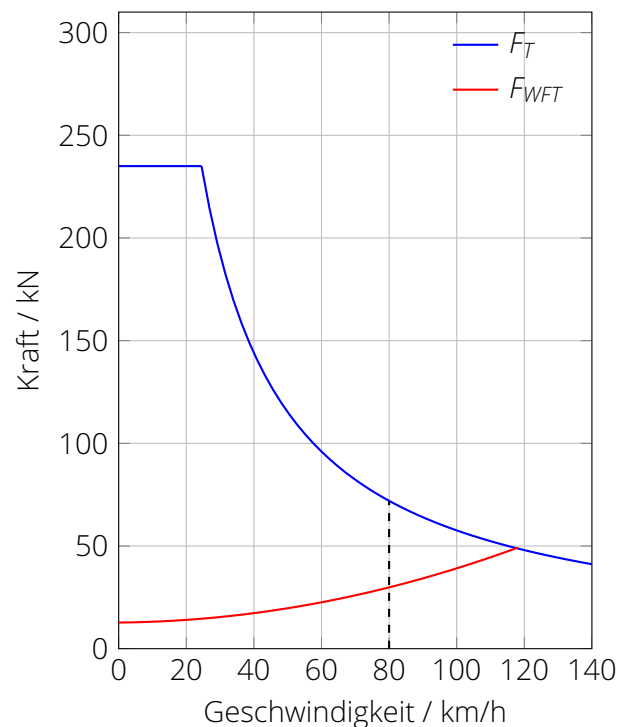
dargestellte Geschwindigkeitsintervall keinen Schnittpunkt aufweisen, existiert dieser für den Güterzug bei einer Geschwindigkeit von $v \approx 117$ km/h. Bei dieser Geschwindigkeit wird die Restbeschleunigung zu Null und es stellt sich ein Beharrungszustand ein. Eine Geschwindigkeit von 120 km/h könnte also in der Ebene und in Steigungen bei dieser Zugkonfiguration nicht erreicht werden.

Es liegt damit neben der *infrastrukturseitigen*, der *bremstechnischen* sowie der *lauftechnischen* Höchstgeschwindigkeit eine weitere Art der Höchstgeschwindigkeit vor: nämlich die **fahrdynamische Höchstgeschwindigkeit**. Diese ist stets gleich der Geschwindigkeit, bei der sich Zugkraft- und Fahrwiderstandskurve schneiden.

Nachdem diese grundlegenden Beziehungen diskutiert worden sind, widmen sich die folgenden Abschnitten der Steigfähigkeit, dem Beschleunigungsvermögen sowie dem Schleppvermögen von Triebfahrzeugen.



(a) BR 101 mit IC-Zug (9 Wagen, $m_Z=484$ t, $\xi_Z=1,1$)



(b) ER 20 mit Güterganzzug ($m_Z=1080$ t, $\xi_Z=1,03$)



(c) BR 101 der DB AG vor einem IC-Zug



(d) ER 20 der WLE vor einem Güterzug

Abbildung 8.1: Beispielzugkonfigurationen für die verschiedenen fahrdynamischen Charakteristiken in diesem Kapitel

8.2 Steigfähigkeit

Als *Steigfähigkeit* von Zügen wird deren fahrdynamisches Vermögen bezeichnet, bestimmt Streckenlängsneigungen mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit zu befahren. Der allgemeine Ansatz für die Steigfähigkeit ergibt sich aus der Umstellung der fahrdynamischen Grundgleichung nach der im Streckenwiderstand enthaltenen Längsneigung i :

$$i = \frac{F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - \xi_Z m_Z a}{m_Z g}. \quad (8.1)$$

Es ist üblich, die Beschleunigung a auf den Wert „Null“ zu setzen und Steigfähigkeitsdiagramme für den Grenzfall der Beharrungsfahrt zu erstellen. Bei Güterzügen wird außerdem noch die Wagenzugmasse als zusätzlicher Parameter variiert.

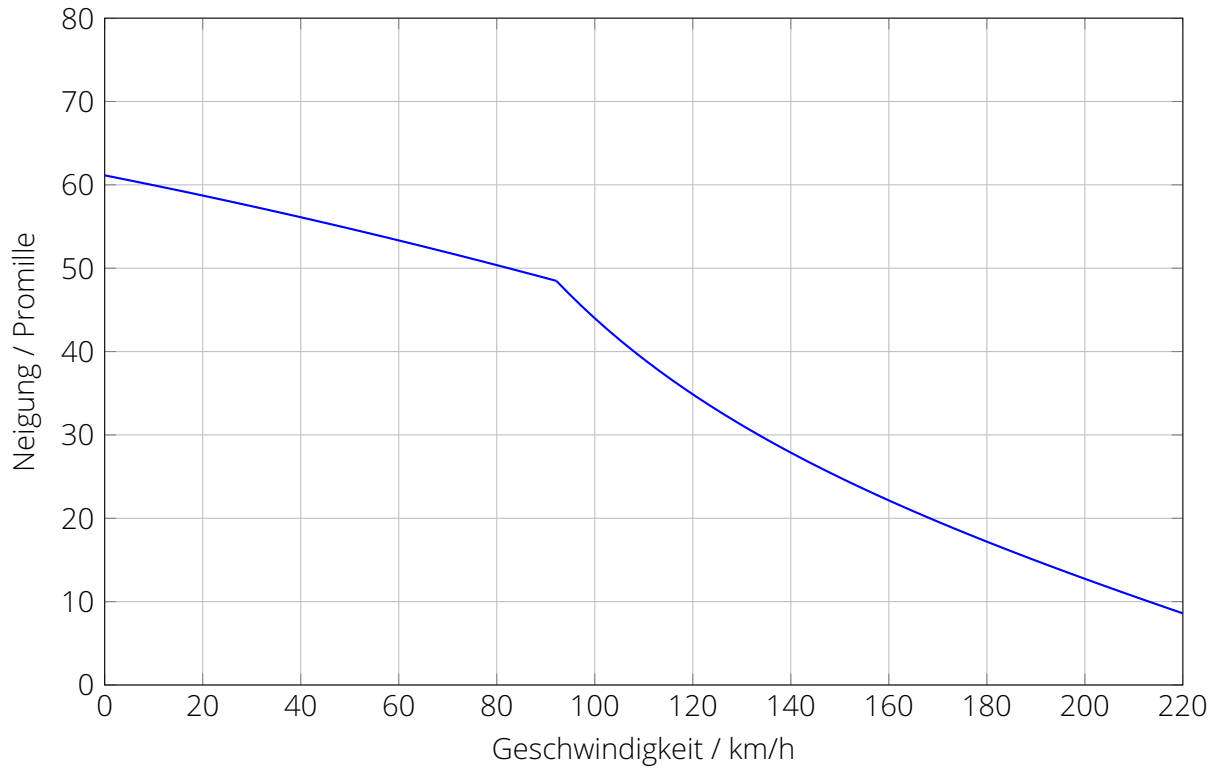
Für die beiden in Abbildung 8.1 dargestellten Beispielizege ergeben sich bezüglich der Steigfähigkeit die beiden in Abbildung 8.2 dargestellten Diagramme.

Es wird deutlich, dass der Zugkraftüberschuss im Falle des IC-Zuges ausreicht, um diesen auch noch in Steigungen bis ca. 13 ‰ auf eine Geschwindigkeit von 200 km/h zu beschleunigen. In langgezogenen Steigungen von mehr als 25 ‰ würde die Geschwindigkeit jedoch auf Werte unterhalb von ca. 150 km/h gedrückt.

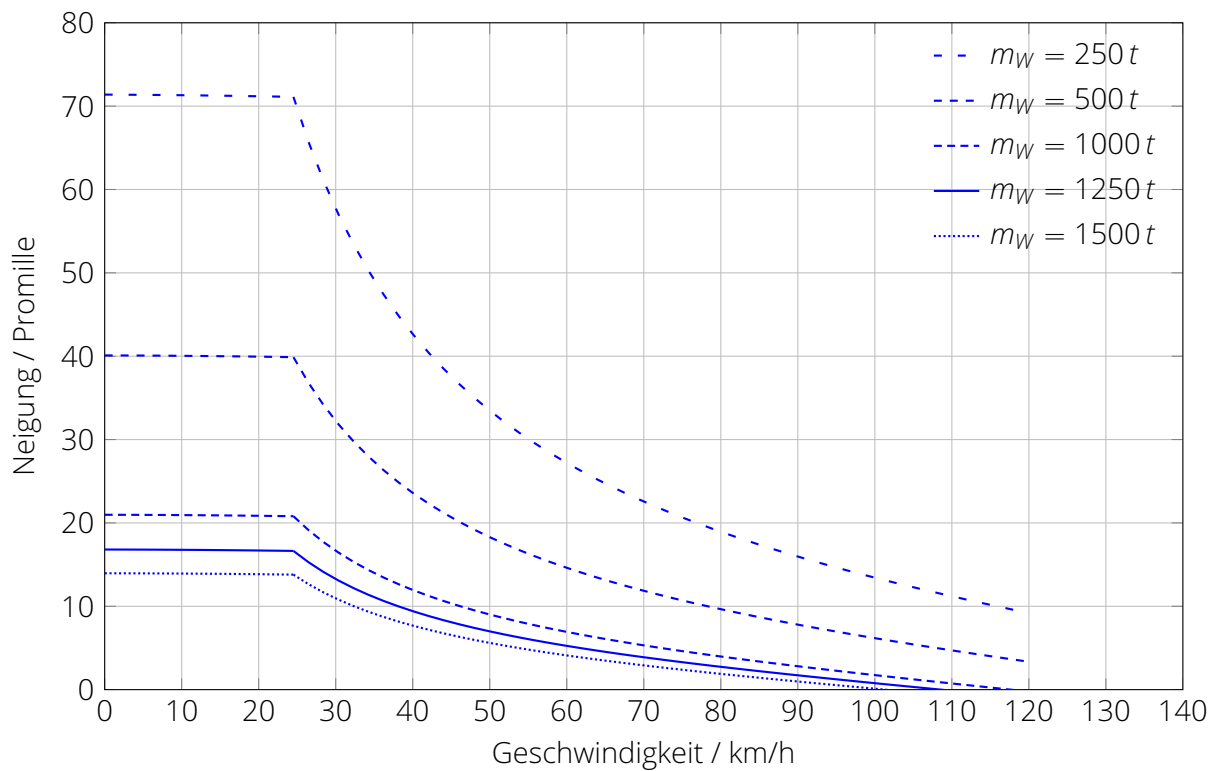
Im Falle des Güterzuges wird der enorme Einfluss der Wagenzugmasse auf die Steigfähigkeit deutlich. Aufgrund der im Vergleich geringen Leistungsfähigkeit des dieselelektrischen Triebfahrzeuges (ER 20) ist die Möglichkeit, hohe Wagenzugmassen mit akzeptabler Geschwindigkeit¹ in größeren Steigungen zu befördern, sehr limitiert. Die fahrdynamische Höchstgeschwindigkeit in der Ebene kann bei einem Steigungsdiagramm direkt abgelesen werden, da sie identisch mit dem Schnittpunkt der wagenzugmassenspezifischen Graphen mit der Geschwindigkeitsachse ist.

Die fahrdynamische Höchstgeschwindigkeit in bestimmten Steigungen ergibt sich entsprechend, wenn am Schnittpunkt der wagenzugmassenspezifischen Graphen mit der infrage kommenden Steigung das Lot auf die Geschwindigkeitsachse gefällt wird. Bei dem betrachteten Güterzuge läge die fahrdynamische Höchstgeschwindigkeit in einer Steigung von 10 ‰ demnach zwischen ca. 32 km/h (bei 1500 t Wagenzugmasse) und ca. 116 km/h (bei 250 t Wagenzugmasse).

¹Was eine „akzeptable“ Geschwindigkeit ist, hängt stark von den betrieblichen Randbedingungen ab. So können auf wenig befahrenen Nebenstrecken oder auf Gleisen, die ausschließlich dem Güterverkehr vorbehalten sind, Geschwindigkeiten zwischen 40 und 60 km/h akzeptabel sein, während auf Hauptstrecken mit dichter Zugfolge eher Geschwindigkeiten zwischen 80 und 100 (120) km/h angestrebt werden sollten, um nachfolgende, schneller fahrende Züge nicht zu sehr zu behindern.



(a) Steigfähigkeit BR 101 mit IC-Zug (9 Wagen, $m_z=484\text{ t}$)



(b) ER 20 mit Güterganzzug ($m_z=1080\text{ t}$, $v_{\max}=120\text{ km/h}$)

Abbildung 8.2: Steigfähigkeitsdiagramme der in Abbildung 8.1 dargestellten Beispielzüge

8.3 Beschleunigungsvermögen

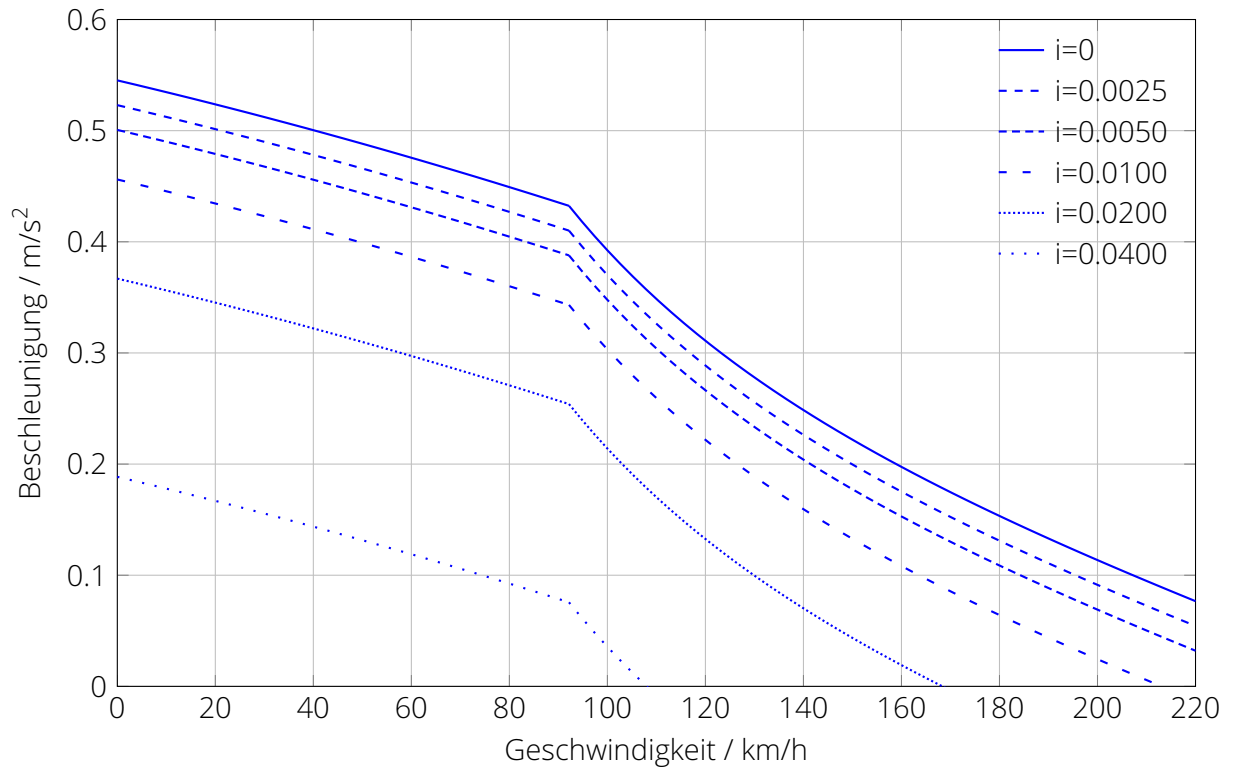
Das Beschleunigungsvermögen eines Triebfahrzeuges oder Zugverbandes ergibt sich aus der Umstellung der fahrdynamischen Grundgleichung nach der Beschleunigung a . Wagenzugmasse und Längsneigung können als zusätzliche Parameter genutzt werden, um das Beschleunigungsvermögen von Fahrzeugen oder Zügen möglichst umfassend zu charakterisieren.

Abbildung 8.3a lässt prinzipiell ähnliche Schlussfolgerungen zu wie das Diagramm zum Steigvermögen. Jedoch lassen sich hier die fahrdynamischen Höchstgeschwindigkeiten für die verschiedenen Neigungen noch einfacher ablesen, da die Schnittpunkte der Beschleunigungskennlinien mit der Geschwindigkeitsachse gut zu identifizieren sind.

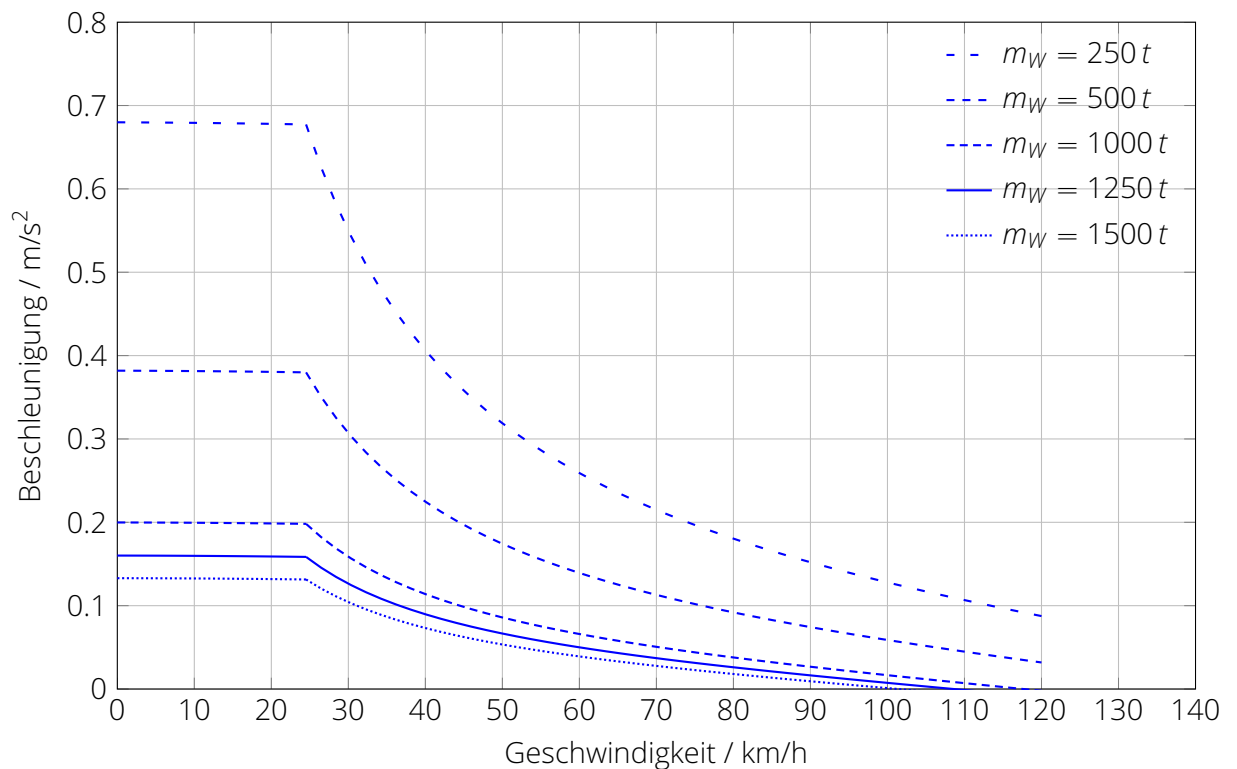
Anhand von Abbildung 8.3b lässt sich sehr gut nachvollziehen, wie stark sich hohe Wagenzugmassen im Güterverkehr auf das Beschleunigungsverhalten auswirken. Oberhalb einer Wagenzugmasse von 1000t lassen sich mit der betrachteten Lokomotive selbst beim Anfahren nur noch Beschleunigungen unterhalb von $0,2 \text{ m/s}^2$ erzielen. Jeder ungeplante Halt solch schwerer Züge wird deshalb aufgrund der langen Beschleunigungsdauer bis zu typischen Güterzuggeschwindigkeiten (80...100 km/h) potentiell erhebliche Folgen für das Fahrplangefüge haben.

$$a = \frac{F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - im_{Zg}}{\xi_Z m_Z} \quad (8.2)$$

Für die beiden in Abbildung 8.1 dargestellten Beispielzüge ergeben sich bezüglich des Beschleunigungsvermögens die beiden in Abbildung 8.3 dargestellten Diagramme.



(a) Beschleunigungsvermögen BR 101 + IC-Zug (9 Wagen, $m_z=484\text{ t}$) mit der Streckenlängsneigung i als Parameter



(b) Beschleunigungsvermögen ER 20 + Güterganzzug ($v_{\max}=120\text{ km/h}$) in der Ebene mit der Wagenzugmasse m_W als Parameter

Abbildung 8.3: Beschleunigungsvermögen der in Abbildung 8.1 dargestellten Beispielzüge

8.4 Schleppvermögen

Wird die fahrdynamische Grundgleichung nach der Wagenzugmasse umgestellt, so ergibt sich die sogenannte Schleppmasse. Diese bezeichnet die maximale Wagenzugmasse, die von einem Triebfahrzeug theoretisch mit einer bestimmten Geschwindigkeit über eine bestimmte Längsneigung befördert werden kann. Da nur von einem quasistatischen Kräftegleichgewicht ausgegangen wird, handelt es sich um eine grobe Abschätzung, die im Rahmen von Grenzlastberechnungen ggf. verfeinert werden kann und muss.

Das Schleppvermögen wird mit folgender Gleichung ausgedrückt:

$$m_W = \frac{F_T - F_{WFT} - m_T (a\xi_Z + gi)}{a\xi_Z + g(f_{WFW} + i)} \quad (8.3)$$

Betrachtungen zum Schleppvermögen sind heute im Grunde nur für Güterzüge lohnenswert, weil der Personenverkehr heute in der Regel mit fixen Zugkonfigurationen durchgeführt wird und damit eine nennenswerte Variation der Zugmassen nicht stattfindet.

Abbildung 8.4 zeigt deshalb nur für die Beispiel-Güterzugkonfiguration aus Abbildung 8.1 das Schleppmassendiagramm für verschiedene Streckenlängsneigungen bei einer Restbeschleunigung von $0,01 \text{ m/s}^2$.

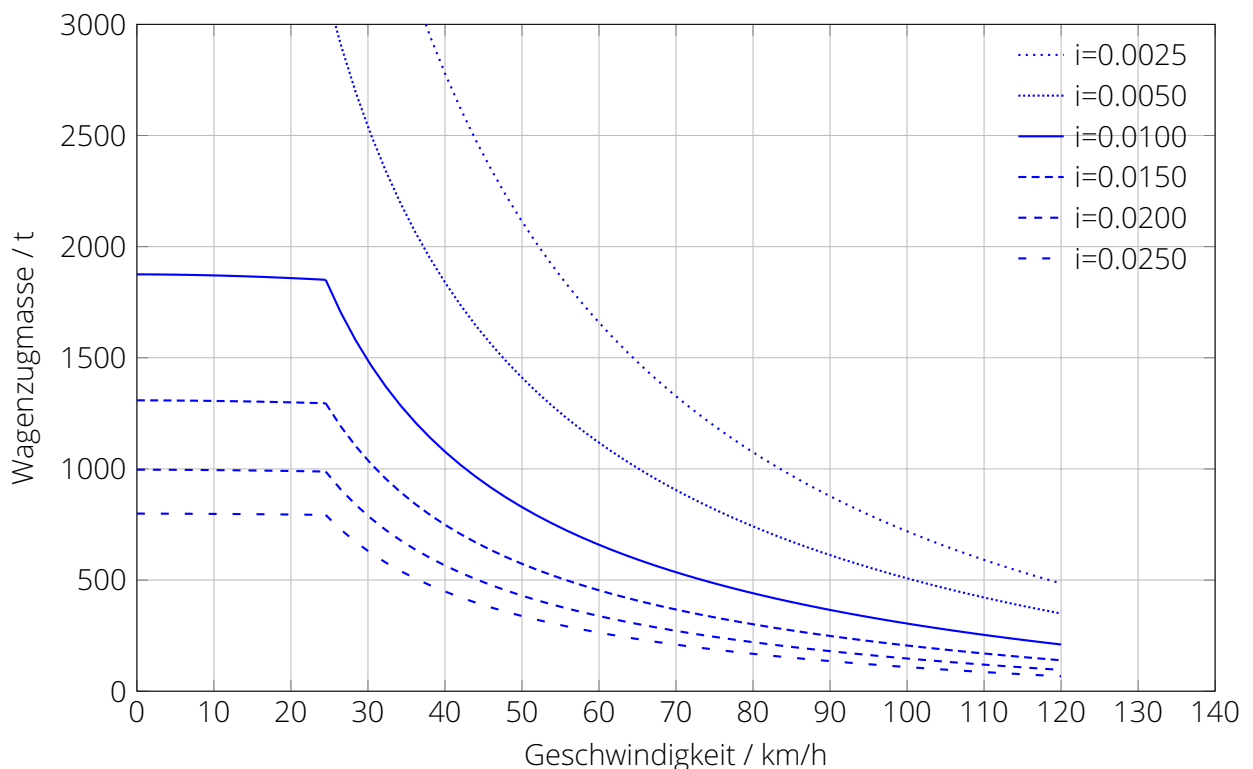


Abbildung 8.4: Schleppvermögen einer dieselelektrischen Lokomotive ER 20 für die Zugart Güterganzzug bei einer Restbeschleunigung von $0,01 \text{ m/s}^2$

💡 Rechenbeispiel Traktionsvermögen



BR 187



BR 145

Ein Eisenbahnverkehrsunternehmen befördert auf einer Strecke, die ausgedehnte Steigungsabschnitte mit Neigungen zwischen 10 und 15 ‰ aufweist, Güterganzzüge mit einer Tonnage von 1000 t (Massenfaktor: $\xi_Z=1,03$). Dafür steht in der Regel ein Triebfahrzeug der Baureihe 187 mit einer Treibradnennleistung von 5,6 MW ($v_{\bar{u}}=80$ km/h) zur Verfügung.

Da dieses Fahrzeug kurzfristig für eine andere Verkehrsleistung benötigt wird, stellt sich die Frage, ob die entsprechenden Züge auch mit einem Fahrzeug der BR 145 bespannt werden könnte. Dieses weist eine Treibradnennleistung von 4,2 MW ($v_{\bar{u}}=57,06$ km/h) auf.

Auf der betrachteten Eisenbahnstrecke können Güterzüge mit Geschwindigkeiten zwischen 80 und 100 km/h verkehren, wobei wegen der Zugfolge mindestens 70 km/h sicher erreicht werden müssen.

Folgende weitere Daten sind bekannt:

- Masse der BR 145: 80 t
- Masse der BR 187: 87 t
- Triebfahrzeugwiderstandskraft der Lokomotiven (Annahme gleicher Werte wegen großer baulicher Ähnlichkeit der Lokomotiven):

$$F_{WFT} = 1,42 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,8 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2$$

- spezifischer Wagenzugwiderstand des Ganzzuges:

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0025 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

Ansatz 1: Schleppmasse

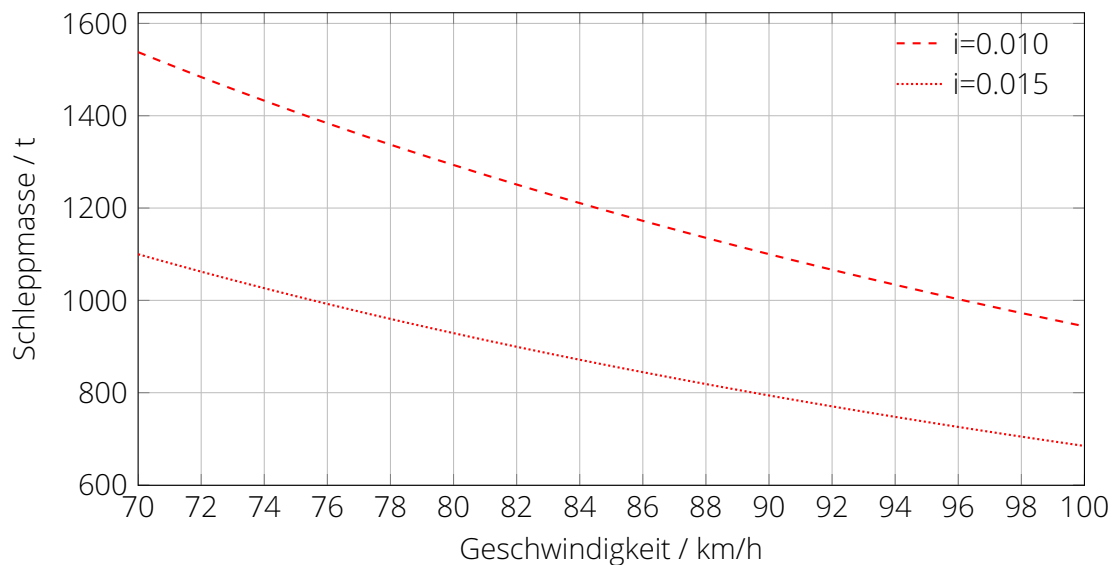
Die offensichtlichste Möglichkeit, die Praktikabilität des vorgeschlagenen Ersatz-Traktionskonzeptes zu beurteilen, ist die Berechnung der Schleppmassen für die BR 145 im Bereich von 70 bis 100 km/h für Neigungen von 10 und 15 ‰. Mit Hilfe von Gleichung 8.3 ergibt sich für eine Restbeschleunigung von $a=0,01$ m/s²:

$$m_W = \frac{\frac{4200 \text{ kW}}{v} - 1,42 - 0,84 \cdot \frac{v}{100} - 2,8 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 - 80 \text{ t} (0,01 \text{ m/s}^2 \cdot 1,03 + 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot i)}{0,01 \text{ m/s}^2 \cdot 1,03 + 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \left(0,0012 + 0,0025 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 + i \right)}$$



Rechenbeispiel Traktionsvermögen (Fortsetzung)

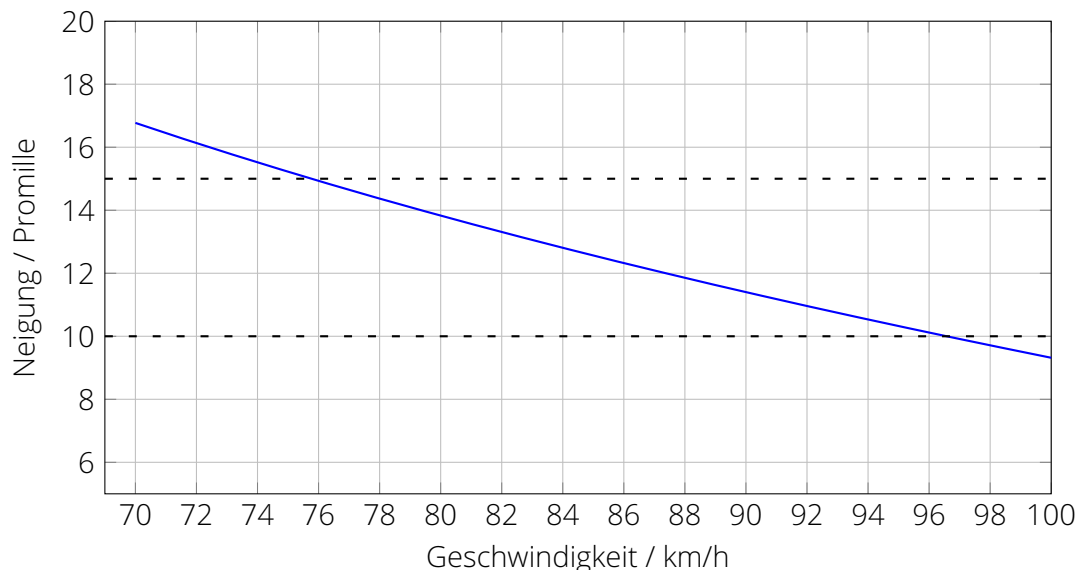
Die Visualisierung der aufgestellten Gleichung ergibt das folgende Diagramm:



Es ist ersichtlich, dass die Beförderung von 1000 t in einer Steigung von 10 ‰ kein Problem für die BR 146 darstellt. Es könnte dabei sogar theoretisch eine Geschwindigkeit von ca. 96 km/h erreicht werden. In einer Steigung von 15 ‰ sieht es etwas kritischer aus, allerdings könnte auch dort die geforderte Mindestgeschwindigkeit von 70 km/h um ca. 6 km/h überboten werden. Ein Ersatz der BR 187 durch die BR 145 erscheint also aus fahrdynamischer Sicht möglich.

Ansatz 2: Steigvermögen

Eine weitere Möglichkeit, die ebenso zum Ziel führt, ist die Ermittlung des Steigfähigkeit der BR 146 mit einem 1000t-Zug bei einer Restbeschleunigung von $0,01 \text{ m/s}^2$.



8.5 Grenzlasten

Die Bestimmung von Grenzlasten ist ein wichtiger Sonderfall der Traktionsbewertung von Triebfahrzeugen. Die Motivation zur Bestimmung von Grenzlasten liegt in der möglichst effizienten Ausnutzung von Triebfahrzeugen, Infrastruktur und Fahrplantrassen. Gerade auf hochbelasteten Strecken ist es oft notwendig, die maximale Transportkapazität mit einer möglichst geringen Anzahl von Zugfahrten bereitzustellen.

Gleichzeitig muss jedoch sichergestellt werden, dass auch schwere Züge nach außerplanmäßigen Halten wieder Anfahren können und in Abschnitten mit großen Längsneigungen nicht „liegen bleiben“ oder unterhalb bestimmter akzeptabler Mindestgeschwindigkeiten gedrückt werden.

Die Grenzlastermittlung liegt in der Hand der Netzbetreiber (in Deutschland: DB Netze) und ist europaweit nicht einheitlich geregelt. So gibt es Bahnverwaltungen, die eine pauschale Obergrenze für die Wagenzugmassen der Züge auf ihrem Netz definiert haben und keine aufwendigen Simulationsrechnungen anstellen, um die Tonnagen für verschiedene Relationen zu optimieren. [1]

In Deutschland wird die Grenzlastermittlung mit vergleichsweise großem Aufwand durchgeführt [2, 3, 4]. Es werden dabei die folgenden der Arten von Grenzlast ermittelt:

- die **Zughakengrenzlast**,
- die **Anfahrgrenzlast** und
- die **Anhängegrenzlast**

Dabei wird jeweils den folgenden Fragen nachgegangen:

Zughakengrenzlast Welche Wagenzugmasse kann auf einem bestimmten Streckenabschnitt maximal transportiert werden, ohne dass die erforderlichen Zugkräfte so groß werden, dass die mechanische Festigkeit der Kupplungseinrichtung gefährdet wäre?

Anfahrgrenzlast Wie groß darf die Masse eines Wagenzuges maximal sein, damit auch nach außerplanmäßigen Halten (etwa an Signalen oder vor Bahnübergängen) sicher wieder angefahren werden kann? Hier gilt es, insbesondere den erhöhten Anfahrwiderstand in Steigungen und engen Gleisbögen im Blick zu behalten.

Anhängegrenzlast Mit welcher maximalen Wagenzugmasse darf ein Zug verkehren, damit er nach erfolgter Anfahrt eine Mindestbeschleunigung einhalten kann, um in der erforderlichen Zeit die Mindestdauerfahrtesgeschwindigkeit des Triebfahrzeuges zu sowie die vom Netzbetreiber festzulegende Akzeptanzgeschwindigkeit² dauerhaft zu überschreiten. Muss die Zugmasse ggf. reduziert werden, um eine zu starke Erwärmung des Antriebsstranges und damit eine drohende Zwangsabschaltung zu verhindern?

Im Allgemeinen gilt die folgende Ungleichung:

$$\text{Zughakengrenzlast} > \text{Anfahrgrenzlast} > \text{Anhängegrenzlast}$$

Da sich sowohl die Zugmasse als auch die Fahrwiderstandskräfte mit der Zuglänge ändern, erfordert die Bestimmung der Anhängegrenzlast in der Regel eine iterative Berechnung. In der Grenzlastberechnung werden Züge grundsätzlich als Massenband modelliert.

²Dabei handelt es sich um eine untere Grenzgeschwindigkeit, die auch auf Streckenabschnitten mit starker Längsneigung nicht für längere Zeit unterschritten werden darf. Der Festlegung können sowohl sicherungstechnische als auch betriebliche Erwägungen zugrunde liegen.

Die Ergebnisse von Grenzlastberechnungen gehen in Grenzlasttabellen (DB RiL 491) ein, die es ermöglichen, für beliebige Zugläufe und Triebfahrzeuge die Grenzlast zu bestimmen. Zu Informationszwecken sowie zur komfortableren Grenzlastermittlung stellt die DB Netze AG den online-basierten → Grenzlastanzeiger (GretA) zur Verfügung.

Tabelle 8.1 enthält eine beispielhafte und auszugsweise Darstellung einer Grenzlasttabelle. Die Grenzlast einer Zugfahrt ergibt sich aus dem triebfahrzeugspezifischen Spaltenminimum der in der Grenzlasttabelle angegebenen Massen, die für bestimmte Streckenabschnitte berechnet werden. Für die Baureihe 232 ergäbe sich somit gemäß Tabelle 8.1 eine Grenzlast von 650 t bei der Fahrt von Dresden Neustadt nach Görlitz. Beginnt die Fahrt erst in Bischofswerda, könnten jedoch mit demselben Triebfahrzeuge 1650 t nach Görlitz befördert werden.

Tabelle 8.1: Auszug aus einer Grenzlasttabelle für die (nicht elektrifizierte) Strecke Dresden - Görlitz (Quelle: DB Netze)

Streckenabschnitt	Zughaken- grenzlast	Anhängegrenzlast in t, gültig für Baureihe:			
		204	216	218	232
DD-Neustadt - Klotzsche	1505 t	500	400	480	650
Klotzsche - Arnsdorf	2940 t	1150	600	800	1650
Arnsdorf - Bischofswerda	3785 t	1150	600	800	1650
Bischofswerda - Bautzen	5065 t	2000	600	800	2650
Bautzen - Görlitz	2645 t	1150	600	800	1650

9 Verständnisfragen

Komplex „Fahrdynamische Charakteristiken“

1. Welche Aspekte spielen bei der Beurteilung des Traktionsvermögens von Triebfahrzeugen eine Rolle?
2. Was verstehen Sie unter der Steigfähigkeit bzw. dem Steigvermögen von Eisenbahnfahrzeugen?
3. Was ist unter dem Begriff „Restbeschleunigung“ zu verstehen?
4. Wie ist der Zugkraftüberschuss zu ermitteln?
5. Was verstehen Sie unter dem Begriff „fahrdynamische Höchstgeschwindigkeit“?
6. Was ist mit dem „Schleppvermögen“ von Triebfahrzeugen gemeint?
7. Warum ist die Grenzlastberechnung so wichtig?
8. Welche Grenzlastarten gibt es und wie lassen sich diese charakterisieren?
9. Was macht die Grenzlastberechnung so aufwendig?
10. Wie wird eine Grenzlasttabelle sachgerecht ausgewertet?



Arbeitsmaterialien

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

1. Foliensätze:
 - Folien_FD_VIW_2020_Traktionvermoegen.pdf
2. Formelsammlung S. 32

Literaturverzeichnis

- [1] Benabdellah, Karim und Kache, Martin: „Einige Betrachtungen zu Grenzlasten im Schienenverkehr“, in: *EI - Der Eisenbahn-Ingenieur*, Jg. 63 (2012), Nr. 7, S. 40–43.
- [2] Benabdellah, Karim und Kache, Martin: „Möglichkeiten aufwandsreduzierter Grenzlastberechnung“, in: *EI - Der Eisenbahn-Ingenieur*, Jg. 66 (2015), Nr. 4, S. 54–59.
- [3] Lehmann, H. und Wendt, J.: „Wagenzugmassen und Grenzlasten - bedeutende Planungsgrößen im Eisenbahnbetrieb“, in: *Deine Bahn*, (2004), S. 306–311.
- [4] Lehmann, Helmut und Kreis, W.: „Grenzlasten im Eisenbahnbetrieb - Erfordernis, Begriffe und Grundlagen“, in: *ZEV Rail*, Jg. Heft 128 (2004), Nr. 1-2, S. 58–67.