



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik

Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge

Lehrbrief „Fahrdynamik“ (Teil 04), Sommersemester 2020

Dr.-Ing. Martin Kache

8. Juni 2020

Vorwort

Hier ist nun der vierte Lehrbrief im Fach „Fahrtechnik/Bahnfahrzeuge I“ 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 Fahrtechnik 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 Juni 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	Lokomotiv-Kenndiagramm	16
8.6	Grenzlasten	23
9	Triebfahrzeugauslegung auf fahrdynamischer Basis	25
9.1	Leistungsauslegung auf Basis von Zugförderprogrammen	25
9.2	Fahrdynamische Auslegung elektrischer Triebfahrzeuge	29
9.3	Fahrdynamische Auslegung von Dieseltriebfahrzeugen	30
9.4	Anmerkungen zum Umgang mit den fahrdynamischen Auslegungsgleichungen .	34
10	Verständnisfragen	37

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.

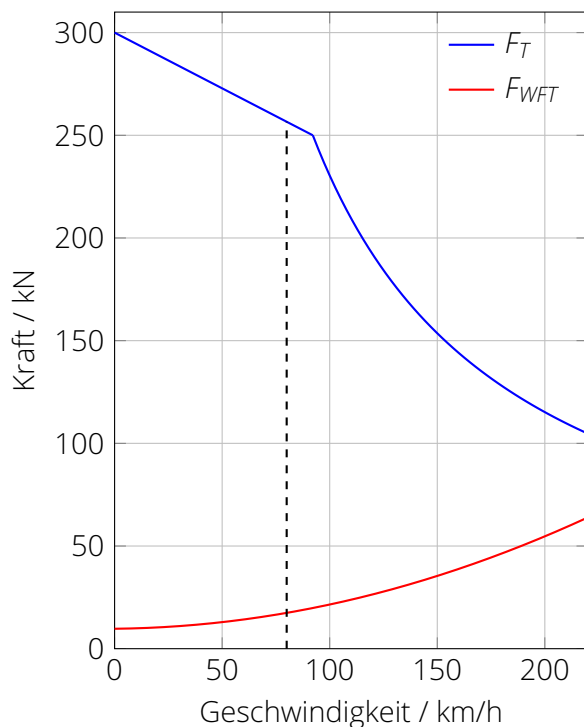
Im Falle des Beispiel-Güterzuges 8.1b beträgt die Zugkraft bei 80 km/h hingegen 72 kN und der Fahrwiderstand in der Ebene beläuft sich auf 29,9 kN. Daraus resultiert bei der genannten Geschwindigkeit ein Zugkraftüberschuss von 42,1 kN und eine Restbeschleunigung von $0,038$ m/s². Die Restbeschleunigung 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

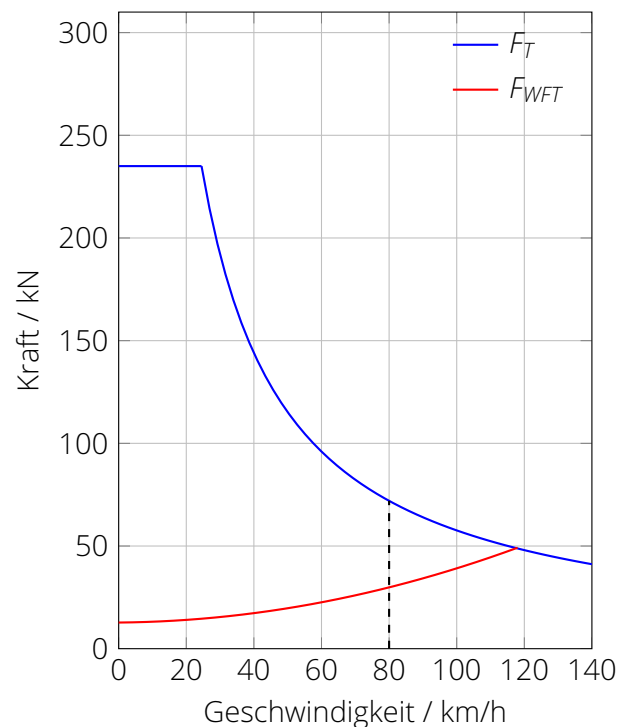
dargestellte Geschwindigkeitsintervall keinen Schnittpunkt aufweisen, existiert dieser für den Güterzug bei einer Geschwindigkeit von $v \approx 117$ km/h. Bei dieser Geschwindigkeit wird die Restbeschleunigung zu Null und es stellt sich ein Beharrungszustand ein. Eine Geschwindigkeit von 120 km/h könnte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

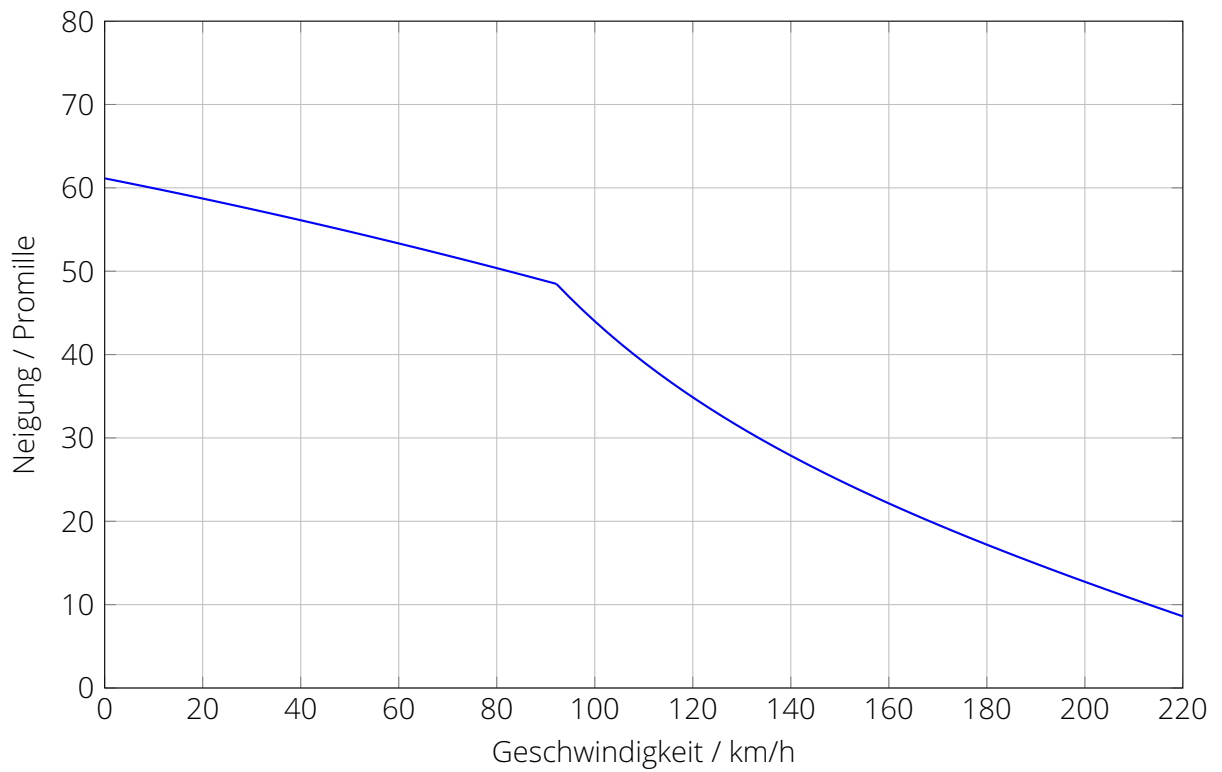
Für die beiden in Abbildung 8.1 dargestellten Beispielszüge ergeben sich bezüglich der Steigfähigkeit die beiden in Abbildung 8.2 dargestellten Diagramme.

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.

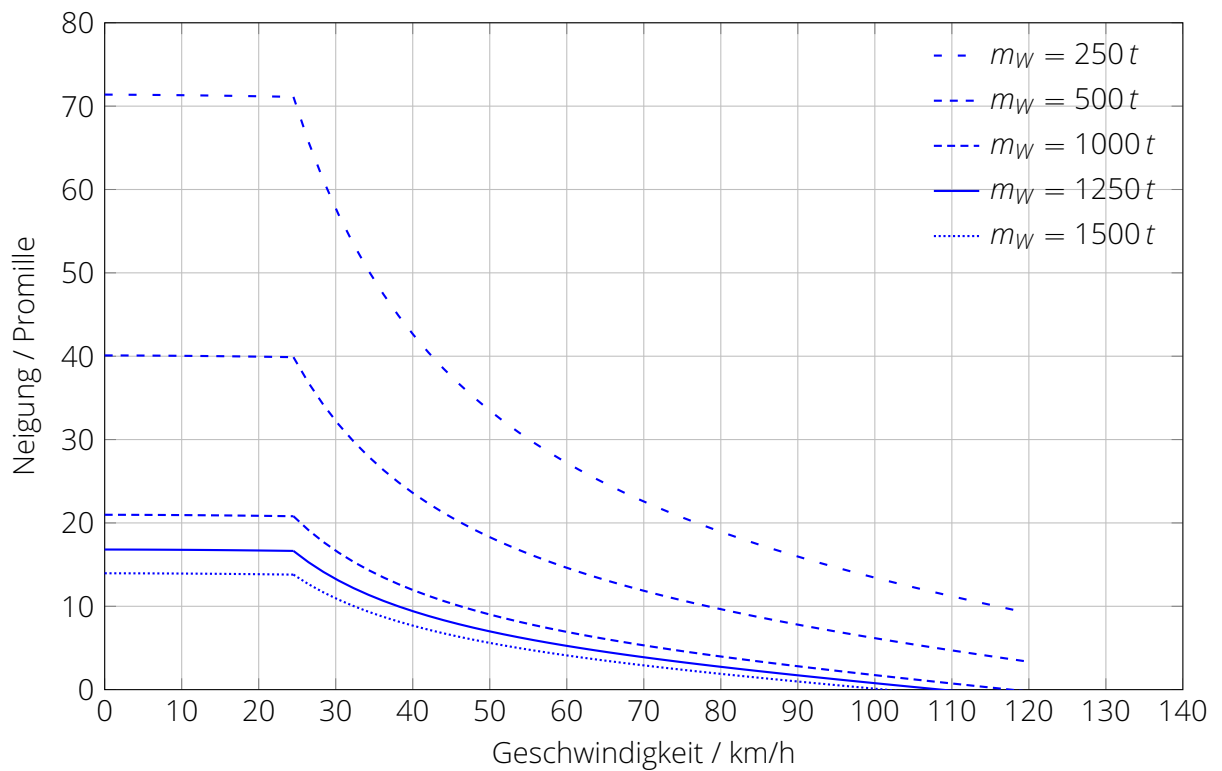
Im Falle des Güterzuges wird der enorme Einfluss der Wagenzugmasse auf die Steigfähigkeit deutlich. Aufgrund der im Vergleich geringen Leistungsfähigkeit des dieselelektrischen Triebfahrzeuges (ER 20) ist die Möglichkeit, hohe Wagenzugmassen mit akzeptabler Geschwindigkeit¹ in größeren Steigungen zu 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, $m_z=484$ t)



(b) ER 20 mit Güterganzzug ($m_z=1080$ t, $v_{max}=120$ 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.

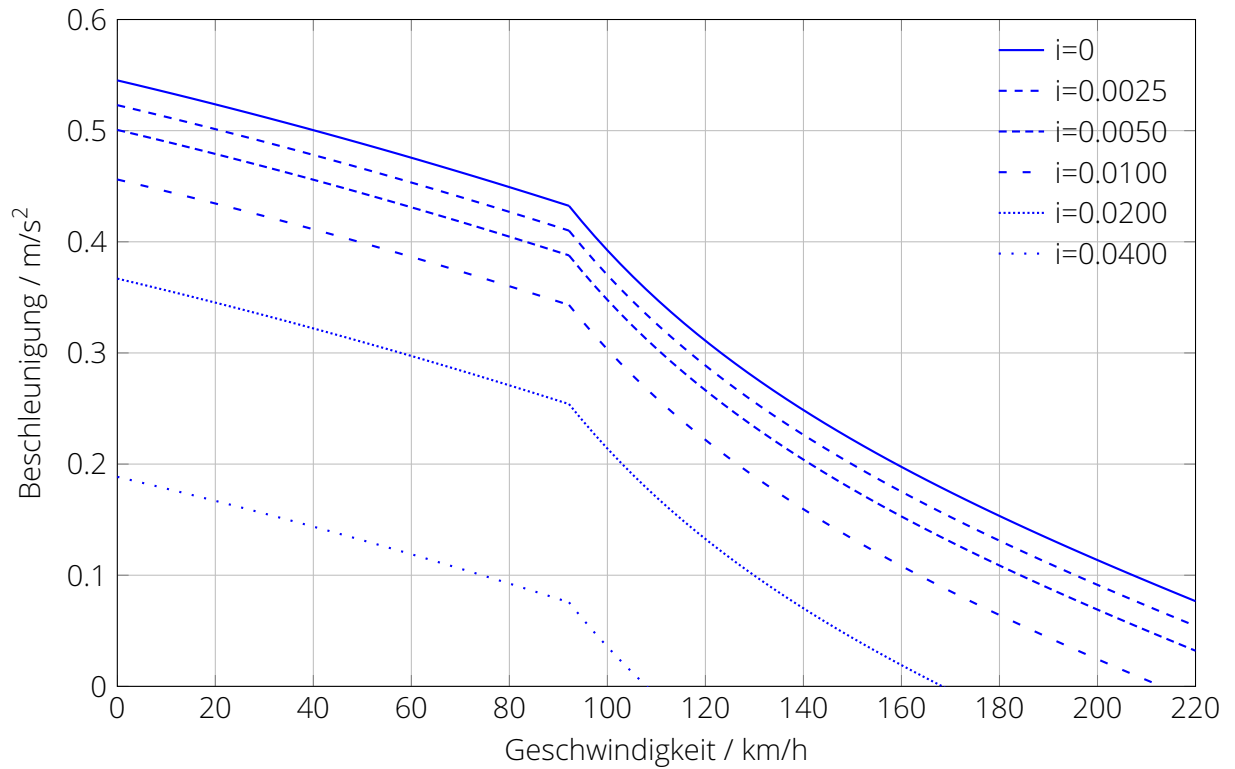


Das Traktionsvermögen von Triebfahrzeugen

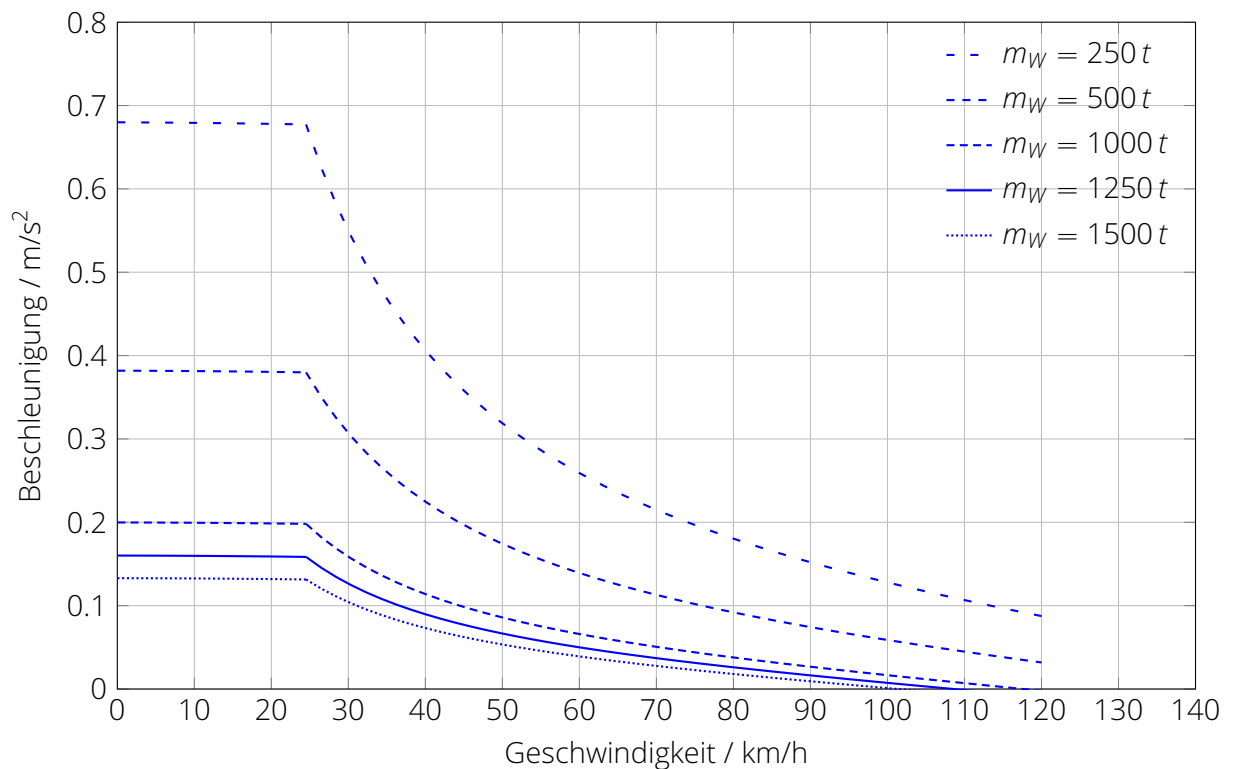
Sind Zugkraftcharakteristik und Fahrzeugwiderstandskräfte für bestimmte Fahrzeug- oder Zugkonfigurationen bekannt, können aus der fahrdynamischen Grundgleichung verschiedene fahrdynamische Charakteristiken abgeleitet werden.

Durch eine Umstellung der genannten Gleichung nach den Parametern Streckenneigung, Beschleunigung und Wagenzugmasse kann auch ohne fahrdynamische Simulation eine grundlegende Bewertung des Traktionsvermögens von Triebfahrzeugen vorgenommen werden, wobei die Betrachtung von Beharrungszuständen (also ein quasisatischer Ansatz) im Vordergrund steht.

Mit Hilfe der aus der Fahrdynamischen Grundgleichung abgeleiteten Gleichungen und auf deren Basis erstellter Diagramme lassen sich Aussagen treffen, welche Steigungen mit welchen (Wagen-)Zugmassen aus antriebstechnischer Sicht befahren werden können oder welches Beschleunigungsvermögen bei definierten Geschwindigkeiten und Streckenneigungen noch verfügbar ist. Ferner lassen sich auch erste Aussagen zu den maximal beförderbaren Wagenzugmassen ableiten, die es allerdings durch eine Grenzlastberechnung (siehe Kapitel 8.6) zu präzisieren gilt.



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



(b) Beschleunigungsvermögen ER 20 + Güterganzzug ($v_{max}=120 km/h$) 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 $0,01 \text{ m/s}^2$.

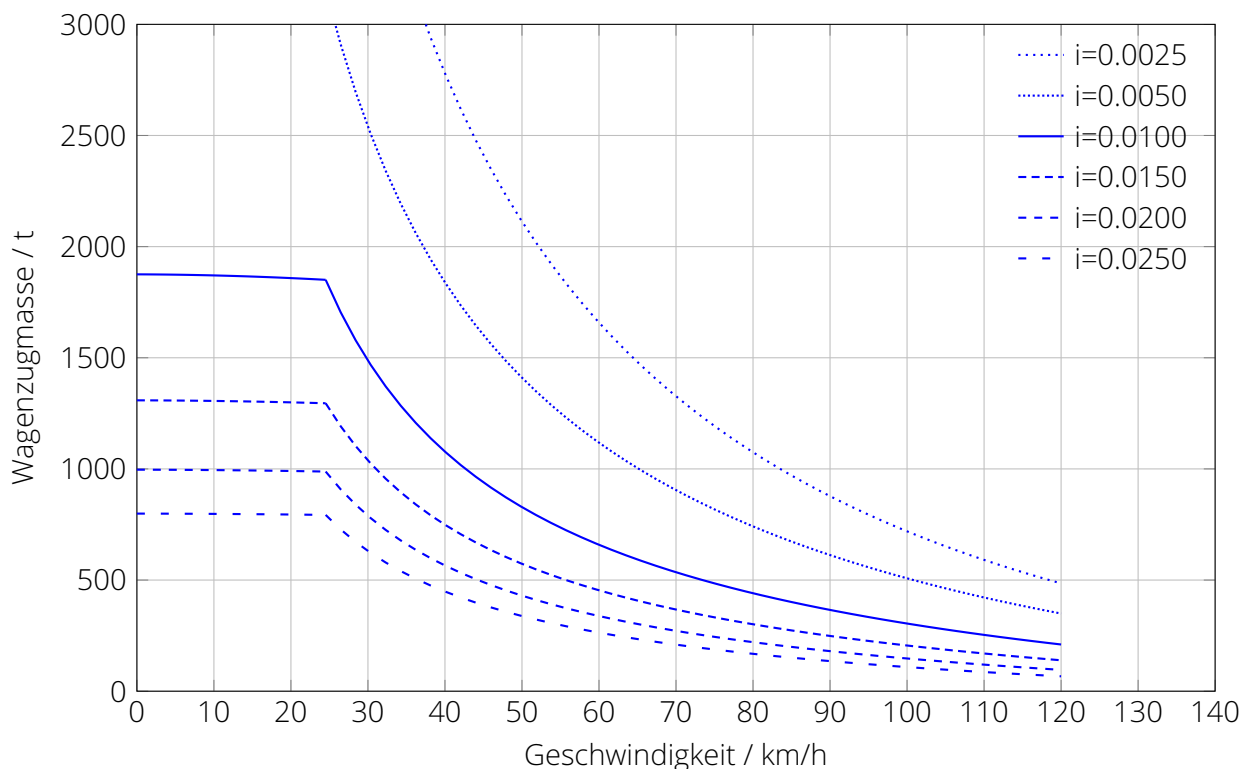


Abbildung 8.4: Schleppvermögen einer dieselelektrischen Lokomotive ER 20 für die Zugart Güterganzzug bei einer Restbeschleunigung von $0,01 \text{ m/s}^2$

💡 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

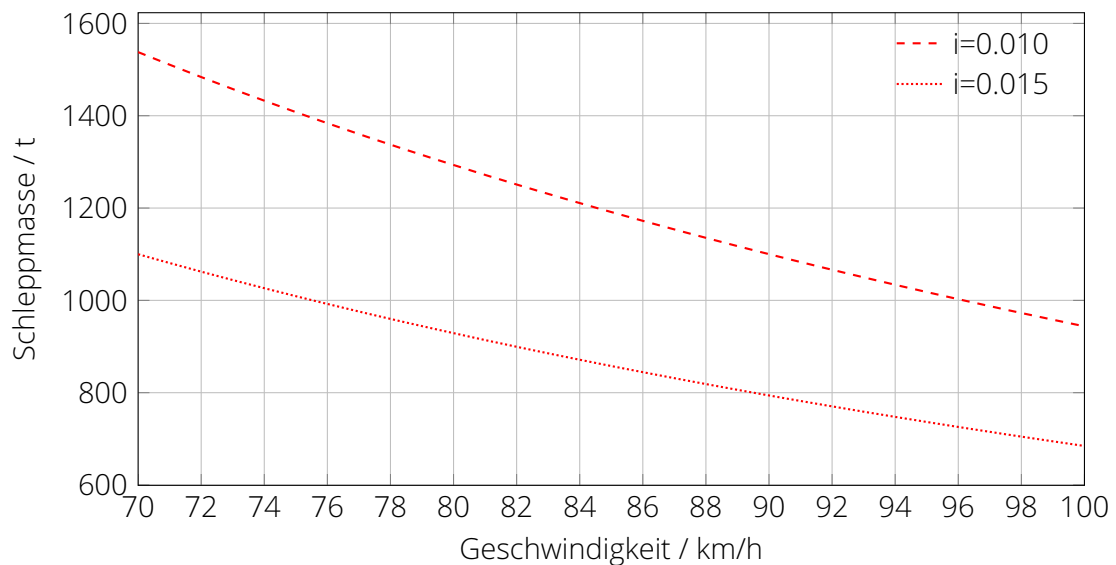
Die offensichtlichste Möglichkeit, die Praktikabilität des vorgeschlagenen Ersatz-Traktionskonzeptes zu beurteilen, ist die Berechnung der Schleppmassen für die BR 145 im Bereich von 70 bis 100 km/h für Neigungen von 10 und 15 ‰. Mit Hilfe von Gleichung 8.3 ergibt sich für eine Restbeschleunigung von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

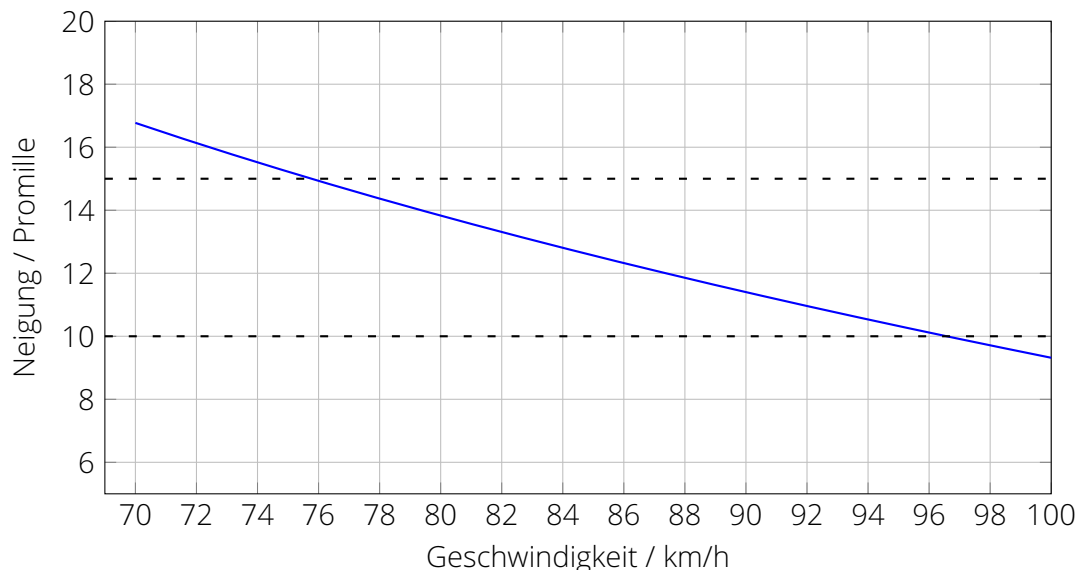
Die Visualisierung der aufgestellten Gleichung ergibt das folgende Diagramm:



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.

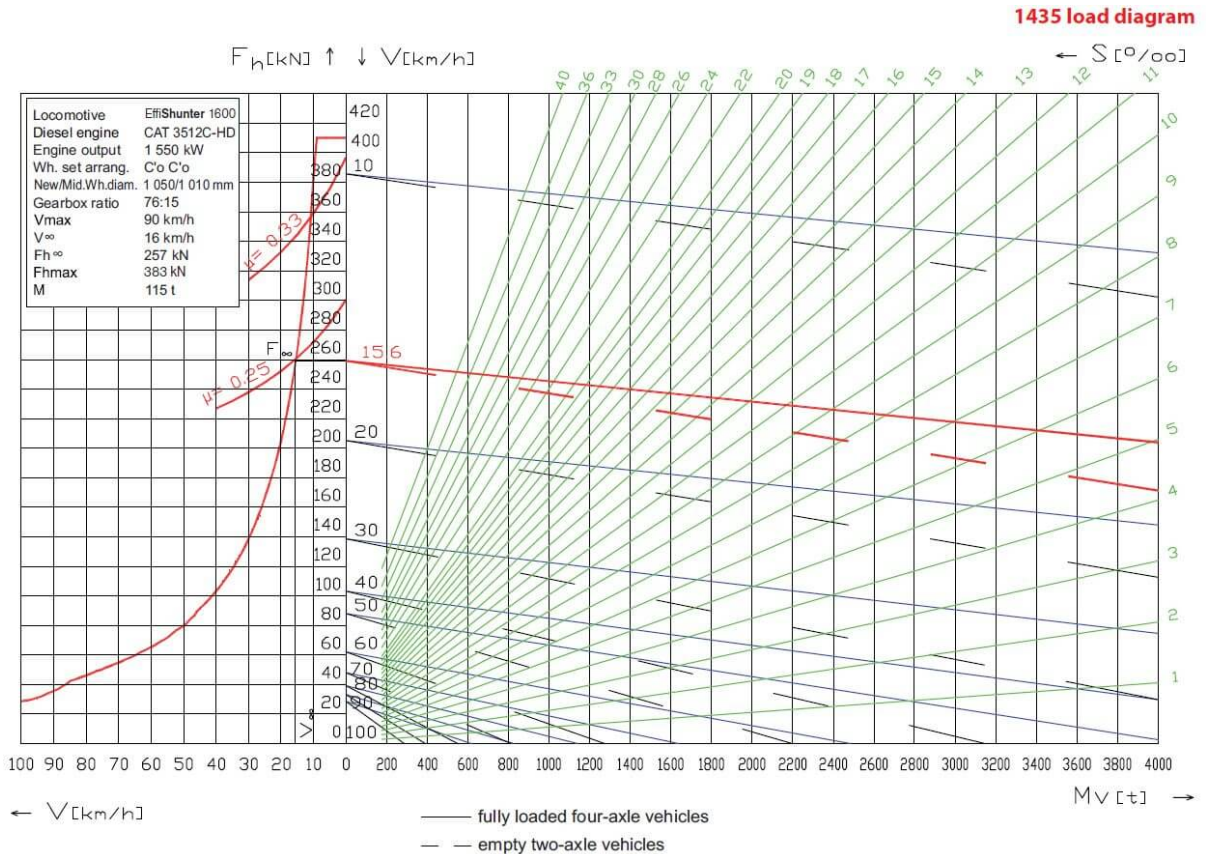
Ansatz 2: Steigvermögen

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



8.5 Lokomotiv-Kenndiagramm

Lokomotiv-Kenndiagramme bieten die Möglichkeit, das Schlepptvermögen eines Triebfahrzeuges graphisch darzustellen. Mit Hilfe eines solchen Diagrammes (siehe Abbildung 8.5) lassen sich die maximal bei einer bestimmten Geschwindigkeit in einer bestimmten Neigung zu befördernden Wagenzugmassen ablesen.



(a) Kenndiagramm der Lokomotive CZ Loko EffiShunter 1600 (Quelle: CZ LOKO a.s.)



(b) Lokomotive CZ Loko EffiShunter 1600, Ansicht 1



(c) Lokomotive CZ Loko EffiShunter 1600, Ansicht 2

Abbildung 8.5: Beispiel eines Triebfahrzeug-Kenndiagramms

Triebfahrzeug-Kenndiagramme bestehen grundsätzlich aus einem an der y-Achse gespiegelten Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm und einem Raster aus Linien, die den von der Wagenzugmasse abhängigen Streckenwiderstand dem ebenfalls von der Wagenzugmasse sowie

von der Geschwindigkeit abhängigen Zugkraftüberschuss in der Ebene gegenüberstellen. Die Wagenzugmasse, bei der sich beide Linienarten kreuzen, stellt die gerade noch von dem Triebfahrzeuge beförderbare Tonnage dar.

Im Folgenden soll nur der rechte Teil des in Abbildung 8.5 gezeigten Diagrammes betrachtet und sein Aufbau am Beispiel einer Siemens ER 20 - Lokomotive (siehe Abbildung 8.6) erläutert werden.

Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Triebfahrzeug-Kenn diagrammes ist die fahrdynamische Grundgleichung:

$$0 = F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS}$$

Diese wird so umgeformt, dass alle fahrzeugspezifischen Kräfte auf der einen und die Streckenwiderstandskräfte auf der anderen Seite des Gleichheitszeichens stehen:

$$F_T(v) - F_{WFT}(v) - m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v) = m_T \cdot g \cdot i + m_W \cdot g \cdot i \quad (8.4)$$

Der linke Teil der Gleichung 8.4 kann nun als Schar von Geraden aufgefasst werden, deren Variable die Wagenzugmasse m_W ist, die eine von der Geschwindigkeit abhängige Neigung $-gf_{WFW}(v)$ aufweisen und deren Schnittpunkt mit der y-Achse die ebenfalls geschwindigkeitsabhängige Zughakenzugkraft $F_Z = F_T - F_{WFT}$ ist.

In gleicher Weise kann die rechte Seite von Gleichung 8.4 als Schar von Geraden mit m_W als Variable, der Steigung gi und dem Schnittpunkt mit der y-Achse $m_T \cdot g \cdot i$ aufgefasst werden. Der spezifische Wagenzugwiderstand ist von der Zugart abhängig. Beispielhaft sind im Folgenden die spezifischen Wagenzugwiderstände eines Reisezuges (RZ) sowie eines gemischten Güterzuges (Gz, beladene Wagen mit 2 oder 4 Radsätzen) aufgeführt.

$$f_{WFW,RZ} = 0,0015 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (8.5)$$

$$f_{WFW,GZ} = 0,0016 + 0,0032 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (8.6)$$

Mit den in Abbildung 8.6 angegebenen Werten für die Zughakenzugkraft ergibt sich für den ER 20 im Einsatz vor Reisezügen mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h folgende Geradengleichung für den Zugkraftüberschuss F_a in der Ebene (linke Seite der Gleichung 8.4):

$$F_a = 51,8 \text{ kN} - 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,0037 \cdot m_W$$

Für einen Reisezug mit einer Wagenzugmasse von 400 t ergäbe sich folglich ein Zugkraftüberschuss von 37,3 kN.

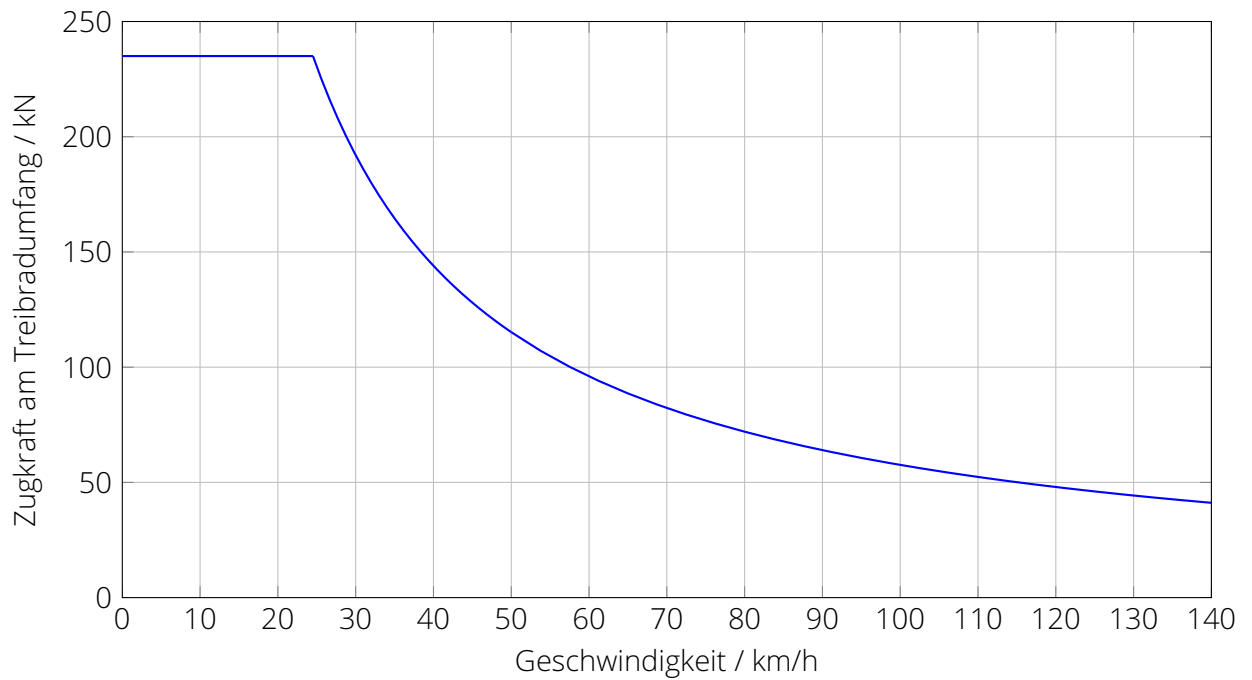
Die auf Basis dieser Berechnungen entstandenen Geradenscharen des Zugkraftüberschusses in der Ebene für das Geschwindigkeitsspektrum des ER 20 im Einsatz vor Reise- und Güterzügen sind Abbildung 8.7 zu entnehmen.

Bezüglich der Geradenschar für den Neigungswiderstand in Abhängigkeit von Wagenzugmasse (m_W) und Streckenlängsneigung i (Parameter) ergibt sich im Falle des ER 20 ($m_T=80$ t) folgende allgemeine Berechnungsvorschrift:

$$80 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot i + m_W \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot i = 784,8i + 9,81i \cdot m_W$$

Die Geradenschar für die wagenzugmassenabhängigen Streckenwiderstandskräfte ist in Abbildung 8.8 dargestellt.

Aus den beiden genannten Teildiagrammen kann nun durch Überlagerung das Triebfahrzeug-Kenn diagramm der ER-20 im Einsatz vor Reisezügen (Abbildung 8.9) bzw. Güterzügen (Abbildung 8.9) erstellt werden. Bei beiden Kenn diagrammen wurde eine Beschränkung der fahrdynamischen Parameter auf jeweils plausible Werte vorgenommen.



(a) Zugkraftdiagramm (am Treibradumfang) Siemens ER 20

Geschwindigkeit v in km/h	40	60	80	100	120	140
Zugkraft am Treibradumfang F_T in kN	144,0	96,0	72,0	57,6	48,0	41,1
Zugkraft am Zughaken F_Z in kN	141,9	92,9	67,7	51,8	40,5	31,6

(b) tabellarische Zusammenstellung der Zugkräfte bei typischen Eisenbahngeschwindigkeiten



(c) Siemens ER 20 als Rh 2016 der ÖBB

Abbildung 8.6: Zugkraftentwicklung einer dieselelektrischen Siemens ER 20 Lokomotive

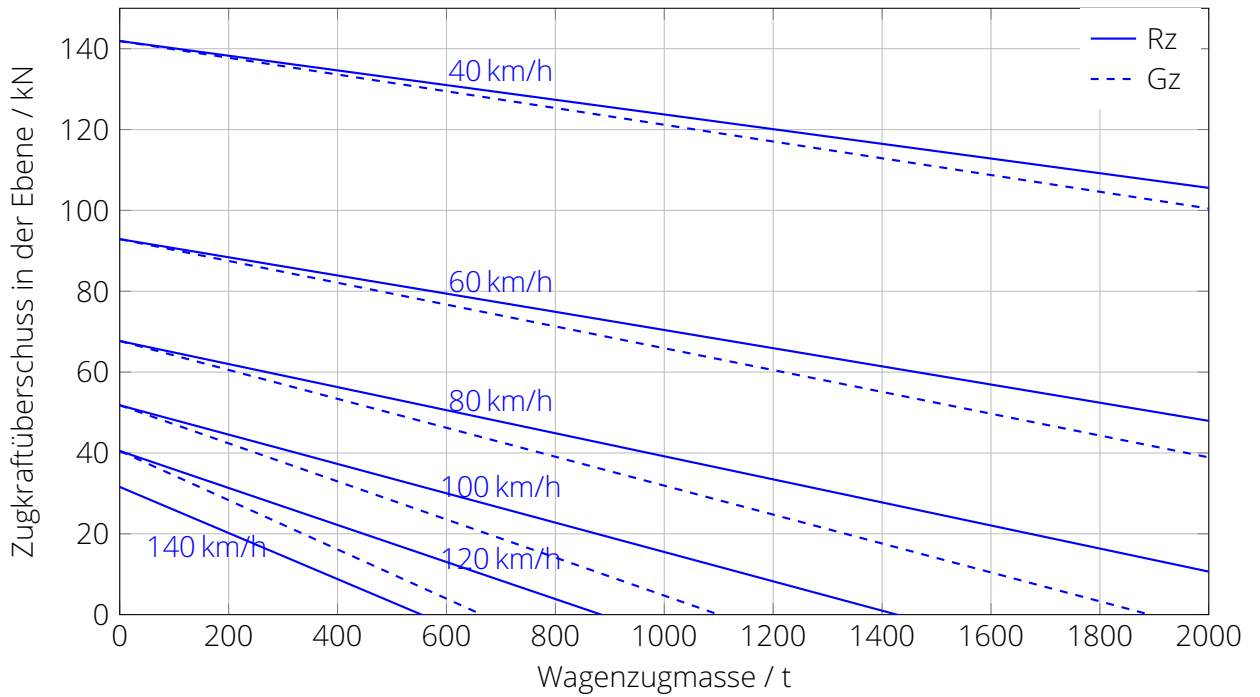


Abbildung 8.7: Zugkraftüberschuss in der Ebene für eine Lokomotive ER 20 vor einem Reise- bzw. Güterzug in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Wagenzugmasse

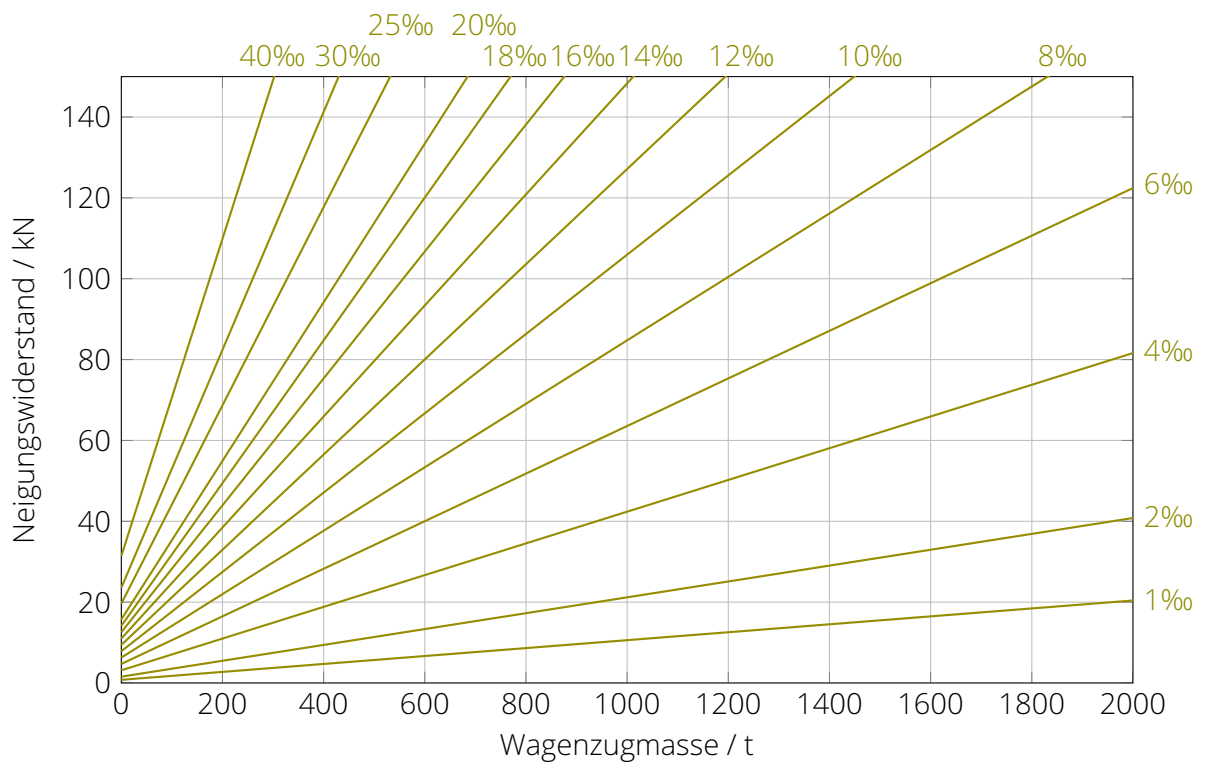


Abbildung 8.8

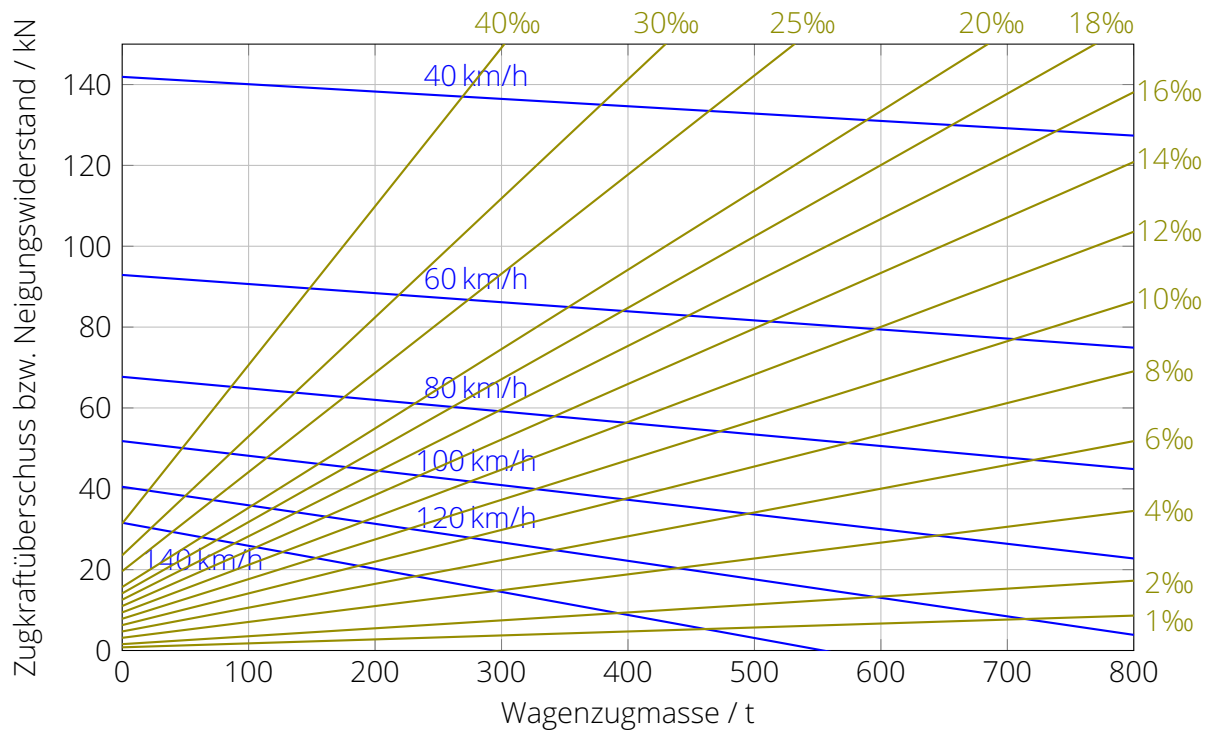


Abbildung 8.9: Kenndiagramm ER 20 für Reisezüge

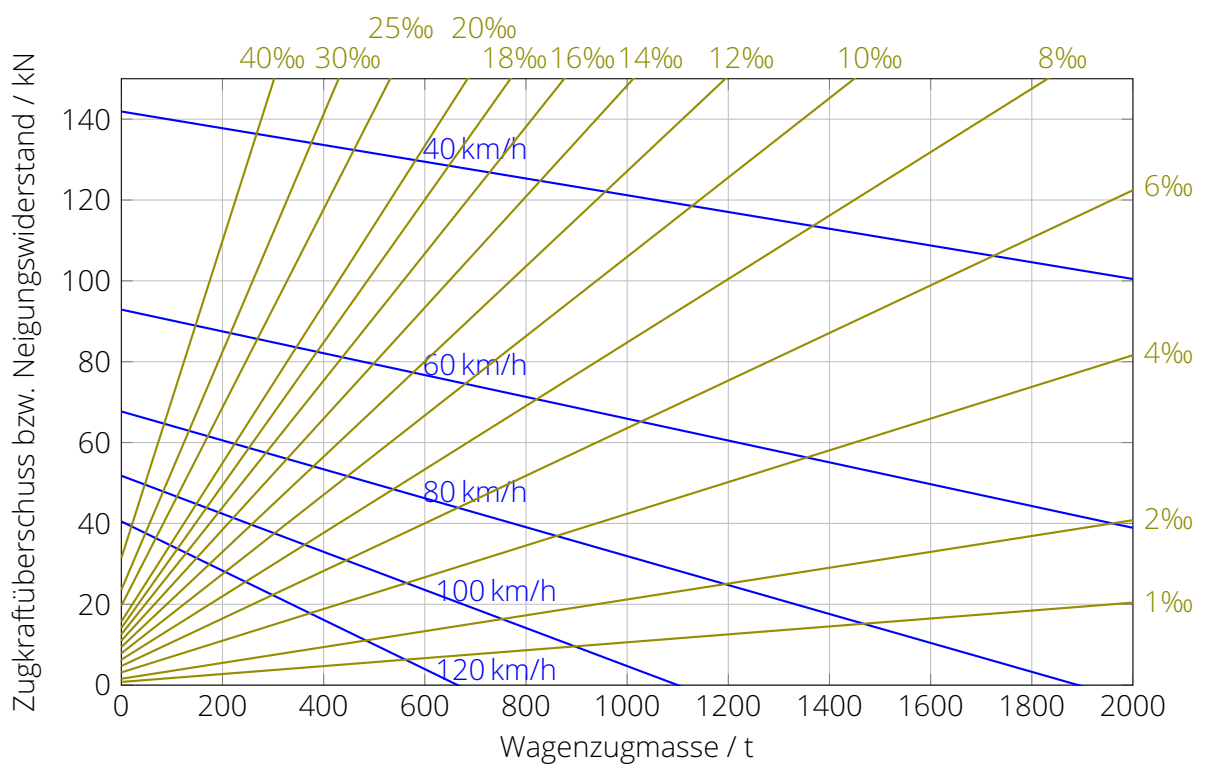


Abbildung 8.10: Kenndiagramm ER 20 für gemischte Güterzüge aus beladenen Wagen mit 2 und 4 Radsätzen

Wie aus dem Kenndiagramm für Reisezüge (Abbildung 8.9) hervorgeht, kann eine ER 20 Lokomotive Reisezüge mit einer Masse von 400 t in einer Steigung von 12 ‰ noch mit einer Geschwindigkeit von ca. 80 km/h befördern.

Der Schnittpunkt von Zugkraftüberschuss in der Ebene bei 80 km/h und Streckenwiderstandskraft in 12 ‰ steht dabei für den quasistationären Grenzfall, bei dem kein Zugkraftüberschuss mehr zur Verfügung steht. Dies bedeutet, dass die 80 km/h in dem geschilderten Fall konstant gehalten werden könnten, wenn der Zug diese Geschwindigkeit bei der Einfahrt in den Steigungsabschnitt bereits erreicht hat. Soll jedoch sichergestellt werden, dass in der genannten Steigung auch bis zu einer Geschwindigkeit von 80 km/h *beschleunigt* werden kann, ist es sinnvoll, einen Zugkraftüberschuss vorzusehen. Dieser kann in der Einheit „N/kN“ angegeben werden und weist somit dieselbe Dimension wie die Neigung auf (‰). Um einen Zugkraftüberschuss von 2 N/kN ($\hat{=}$ 2 ‰) in einer Steigung von 12 ‰ zu berücksichtigen, müsste also der Schnittpunkt der Geraden für den Zugkraftüberschuss in der Ebene bei 80 km/h mit der Geraden für den Streckenwiderstand bei 14 statt 12 ‰ gefunden werden. Dieser liegt gemäß Abbildung 8.9 bei ca. 340 t.

Tabelle 8.1 zeigt eine Auswahl von Schleppmassen, die sich für den stationären Fall aus den Kenndiagrammen (Abbildungen 8.9 und 8.10) für den Reise- bzw. Güterzug ablesen lassen.

Tabelle 8.1: Schleppmassen ER 20 gemäß der Kenndiagramme in Abbildung 8.9 und 8.10

v in km/h →	Reisezug				Güterzug		
	80	100	120	140	60	80	100
Steigung: 4 ‰	>800 t	640 t	440 t	295 t	1350 t	860 t	570 t
Steigung: 6 ‰	725 t	490 t	340 t	230 t	1040 t	675 t	460 t
Steigung: 10 ‰	470 t	330 t	230 t	155 t	680 t	460 t	320 t
Steigung: 16 ‰	290 t	210 t	140 t	90 t	440 t	280 t	190 t
Steigung: 20 ‰	240 t	160 t	110 t	65 t	340 t	230 t	140 t
Steigung: 25 ‰	170 t	120 t	70 t	45 t	270 t	180 t	110 t

Tabelle 8.1 kommt einer Schleppmassentafel (siehe Infobox) nahe. Schleppmassentafeln wurden in früheren Zeiten üblicherweise für jedes Triebfahrzeug berechnet und fanden Eingang in die einschlägigen Unterlagen, mit denen die Triebfahrzeuge bezüglich ihrer technischen und betrieblichen Merkmale charakterisiert wurden (z.B. das „Merkbuch für Triebfahrzeuge - Dienstvorschrift Tr 939“ der Deutschen Reichsbahn der DDR).

Schleppmassentafeln sind heute weitgehend überholt, da sie quasistationäre Zustände repräsentieren und heute mittels Simulation eine wesentlich genauere und differenziertere Ermittlung von Grenzlasten (siehe Kapitel 8.6) vorgenommen wird.



Lokomotiv-Kenndiagramm

Lokomotiv-Kenndiagramme dienen der Einschätzung des Traktionsvermögens von Triebfahrzeugen, indem sie den Zugkraftüberschuss in der Ebene in Abhängigkeit von Zugart, Geschwindigkeit und Wagenzugmasse den in bestimmten Steigungen entstehenden Streckenwiderstandskräften gegenüberstellt. Durch die systematische Auswertung von Lokomotiv-Kenndiagrammen können die maximalen Schlepplasten für den Beharrungszustand ($v=\text{const.}$ in Neigung i) ermittelt werden.

Diese sind nicht mit den Grenzlasten zu verwechseln, deren Ermittlung wesentlich komplexere Berechnungen zugrunde liegen.

Schlepplastentafel

Im Folgenden wird eine Schlepplastentafel für eine Rangierlok der Baureihe 106 (V60) der Deutschen Reichsbahn wiedergegeben. Die Angaben stammen aus dem „Merkbuch für Triebfahrzeuge - Dienstvorschrift Tr 939“ der Deutschen Reichsbahn. Die Lokomotiven verfügten über ein umschaltbares Getriebe, das einen Wechsel zwischen „Rangiergang“ ($v_{\max}=30$ km/h) und Streckengang“ ($v_{\max}=60$ km/h) ermöglichte.

Steigung ‰	Anfahr- grenzlast t	Anhängelasten in „t“ für den Beharrungszustand bei v (km/h)									
		10	15	20	25	30	35	40	50	60	
		Güterzüge (Wagen gemischter Bauart) im Streckengang									
0	2235	-	-	-	1450	1315	1185	655	525	435	
1	1830	-	-	1400	1030	925	850	470	395	335	
2	1545		1510	1060	755	705	655	365	310	270	
4	1180	1315	995	700	500	470	445	240	210	190	
6	950	975	735	515	365	345	330	175	-	-	
8	780	770	570	405	285	270	255	130	-	-	
10	680	630	475	330	230	215	205	100	-	-	
15	495	430	315	215	145	-	-	-	-	-	
20	385	320	230	155	-	-	-	-	-	-	
25	315	250	180	-	-	-	-	-	-	-	
		Güterzüge (Wagen gemischter Bauart) im Rangiergang									
0	2860	-	-	1750	1535	1315					
1	2345	-	-	1190	1060	925					
2	1985	-	1535	895	800	705					
4	1515	1565	1010	580	530	470					
6	1220	1155	745	430	390	345					
8	1020	920	580	335	305	275					
10	875	755	480	270	245	215					
15	640	515	325	175	145	-					
20	500	385	235	125	-	-					
25	410	305	145	-	-	-					



8.6 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, 4, 5]. 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 Mindestdauerfahrgeschwindigkeit des Triebfahrzeuges 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 8.2 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 8.2 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. Im Falle der Doppeltraktion von Triebfahrzeugen ist stets zu prüfen, ob die verdoppelte Anhängergrenzlast noch kleiner als die Zughakengrenzlast ist. Andernfalls begrenzt letztgenannte die maximale Tonnage.

Tabelle 8.2: Auszug aus einer Grenzlasttabelle für die (nicht elektrifizierte) Strecke Dresden - Görlitz (Quelle: DB Netze)

Streckenabschnitt	Zughaken-grenzlast	Anhängergrenzlast 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



Grenzlasten

Die Grenzlastrechnung zählt zweifellos zu den wichtigsten fahrdynamischen Anwendungen. Durch die korrekte Ermittlung von Grenzlasten kann sowohl eine hohe Ausnutzung von Triebfahrzeugen und Infrastruktur als auch eine hohe betriebliche Sicherheit gewährleistet werden.

Bei der Bestimmung der Grenzlasten geht es prinzipiell darum, eine Überlastung der Zug-einrichtungen zu verhindern (Zughakengrenzlast), die Anfahrmöglichkeit schwerer Züge zu gewährleisten (Anfahrergrenzlast) sowie die Einhaltung von Mindestbeschleunigungen und Mindestgeschwindigkeiten (Akzeptanzgeschwindigkeiten) sicherzustellen (Anhängergrenzlast), damit die zeitliche Fahrstraßenbelegung insbesondere auf Streckenabschnitten mit dichter Zugfolge akzeptablen Grenzen bleibt.

Bei Triebfahrzeugen, die nicht über Drehstromantriebstechnik verfügen, kann zudem noch die Verhinderung einer unzulässigen Erwärmung der Komponenten des Antriebsstranges (z.B. der Fahrmotoren oder des Strömungsgetriebes) im Fokus von Grenzlastberechnungen stehen.

Grenzlasten sind stets triebfahrzeug-, zugart- und laufwegspezifisch zu ermitteln. Dies ist insbesondere dann zu beachten, wenn Züge kurzfristig umgeleitet werden müssen.

9 Triebfahrzeugauslegung auf fahrdynamischer Basis

9.1 Leistungsauslegung auf Basis von Zugförderprogrammen

Die klassische fahrdynamische Fahrzeugauslegung beruht auf definierten Zugförderprogrammen, in denen die wichtigsten für die Auslegung benötigten Parameter definiert werden. Dies sind im einzelnen:

- die Zugart,
- die Wagenzugmasse m_W ,
- die angestrebte Geschwindigkeit bzw. Auslegungsgeschwindigkeit v_A ,
- die Neigung i , in der die genannte Wagenzugmasse mit der angestrebten Geschwindigkeit befördert werden soll,
- die spezifische Beschleunigungsreserve f_a ,
- der Komfortleistungsbedarf P_{Komf} (früher „Heizleistungsbedarf“) des Wagenzuges im Falle von Reisezügen (entfällt im Güterverkehr).

Die Auslegung selbst leitet sich von der fahrdynamischen Grundgleichung ab. Zunächst wird der Fahrzeugwiderstand bei der angestrebten Geschwindigkeit $F_{WF}(v_A)$ bestimmt:

$$F_{WF}(v_A) = F_{WFT}(v_A) + F_{WFW}(v_A) = F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v_A) \quad (9.1)$$

Als nächstes wird ein ggf. durch das Zugförderprogramm definierter Streckenwiderstand addiert und somit die Summe der bei der Auslegungsgeschwindigkeit wirkenden Fahrwiderstandskräfte $F_W(v_A)$ gebildet:

$$F_W(v_A) = F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v_A) + (m_W + m_T) \cdot g \cdot f_{WS} \quad (9.2)$$

Bei dem Streckenwiderstand wird es sich gewöhnlich um den Längsneigungswiderstand handeln. Eine Angabe von Bogenradien zur Bogenwiderstandsberechnung ist bei der fahrdynamischen Auslegung weder sinnvoll noch üblich.

Zusätzlich zu den Fahrwiderstandskräften wird oft noch eine Beschleunigungsreserve bzw. ein spezifischer Zugkraftüberschuss f_a bei der Auslegungsgeschwindigkeit gefordert. Diese Größe

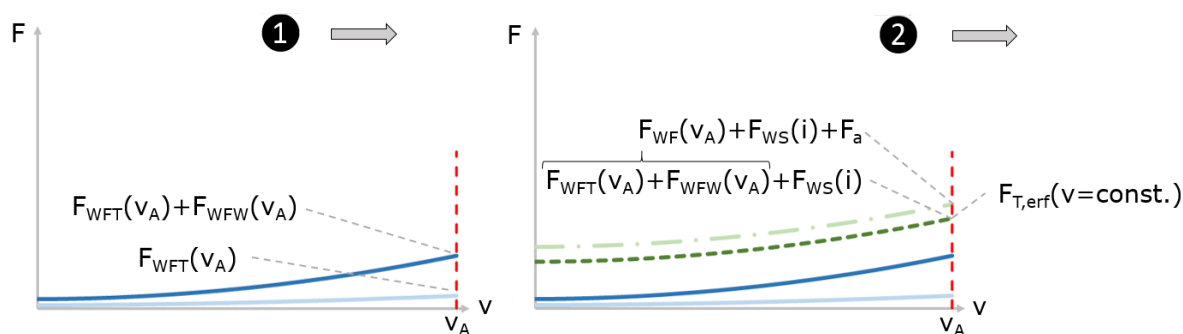
weist die gleiche Dimension wie eine spezifische Fahrwiderstandskraft (N/kN bzw. ‰) auf und wird deshalb bei der Berechnung zum spezifischen Streckenwiderstand addiert.

$$F_W(v_A) = F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v_A) + (m_W + m_T) \cdot g \cdot (f_{WS} + f_a) \quad (9.3)$$

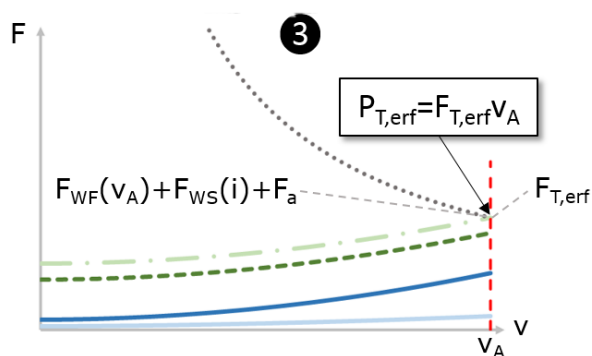
Der Sinn der Berücksichtigung einer solchen Beschleunigungsreserve liegt in der Notwendigkeit, die angestrebte Auslegungsgeschwindigkeit in endlicher Zeit zu erreichen. Nähme man die Auslegung so vor, dass im Auslegungspunkt eine exakte Kompensation der Widerstandskräfte durch die Antriebskraft erfolgt, ergäbe sich eine Beschleunigung von Null im Auslegungspunkt, sodass sich das Fahrzeug nur asymptotisch der Zielgeschwindigkeit nähern würde. Diese Problematik wird in der Infobox „Spezifischer Zugkraftüberschuss“ ausführlicher dargestellt. Um von den bilanzierten Widerstandskräften auf eine Leistung schließen zu können, muss die erforderliche Zugkraft mit der (Ziel-)Geschwindigkeit multipliziert werden. Der beschriebene Vorgang ist zusammenfassend in Abbildung 9.1 dargestellt. Um die Geschwindigkeit bei der Berechnung gleich mit der Einheit km/h einsetzen zu können, wird zudem der Umrechnungsfaktor von 3,6 km/h / m/s eingefügt. Somit ergibt sich für die erforderliche Treibradleistung:

$$P_{T,erf} = F_W \cdot \frac{v_A}{3,6} \quad (9.4)$$

$$= \frac{v_A}{3,6} [F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v_A) + (m_W + m_T) \cdot g \cdot (f_{WS} + f_a)] \quad (9.5)$$



(a) Schritt 1: Summierung der Widerstands- (b) Schritt 2: Hinzufügen eines Zugkraftüberschusses bei $v = v_{ziel}$ kräfte bei $v = v_{ziel}$



(c) Schritt 3: Ermittlung der erforderlichen Leistung am Treibradumfang

Abbildung 9.1: Fahrdynamische Auslegung auf Grundlage der fahrdynamischen Grundgleichung

Somit ist der Leistungsbedarf an den Treibrädern zur Erfüllung des Zugförderprogramms gegeben. An diesem Punkt muss nun definiert werden, was das Ziel der fahrdynamischen Auslegung ist. Soll ein geeigneter Fahrmotor gefunden werden, wie es im Falle der elektrischen Traktion sinnvoll wäre oder soll, wie im Falle der Dieseltraktion, die Dieselmotorleistung bestimmt werden, damit ein entsprechendes Aggregat ausgewählt werden kann? Hinsichtlich der zu betrachtenden Randbedingungen unterscheiden sich beide Auslegungsfälle im Detail, weshalb im Folgenden zunächst die fahrdynamische Auslegungsgleichung für elektrische Fahrzeuge und anschließend jene für die Dieseltraktion abgeleitet werden soll.



Beispiele für Zugförderprogramme

Zugförderprogramm Baureihe 120 der DB AG

Bei der fahrdynamischen Auslegung der Baureihe 120 der Deutschen Bundesbahn (heute BR 120 der Deutschen Bahn) wurde folgendes Zugförderprogramm zugrunde gelegt [6]:

- Beförderung von Reisezügen mit einer Masse von 700 t mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h
- Beförderung von Schnellgüterzügen mit einer Masse von 1500 t mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h
- Beförderung von Frachtzügen^a mit einer Masse von 2200 t mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h
- Beförderung von Güterganzzügen mit einer Masse von 2700 t mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h
- Beförderung von Güterganzzügen mit einer Masse von 5400 t mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h in Doppeltraktion

Zugförderprogramm Siemens Vectron

Elektrische Vectron-Lokomotiven mit einer Nennleistung von 6,4 MW erfüllen nach [3] folgendes Zugförderprogramm:

- Beförderung von Güterzügen mit einer Masse von 1600 t mit 120 km/h in der Ebene bei einem Zugkraftüberschuss von 3 N/kN
- Beförderung von Reisezügen mit einer Masse von 550 t mit 200 km/h in der Ebene bei einem Zugkraftüberschuss von 5 N/kN

Elektrische Vectron-Lokomotiven mit einer Nennleistung von 5,2 MW erfüllen nach [3] folgendes Zugförderprogramm:

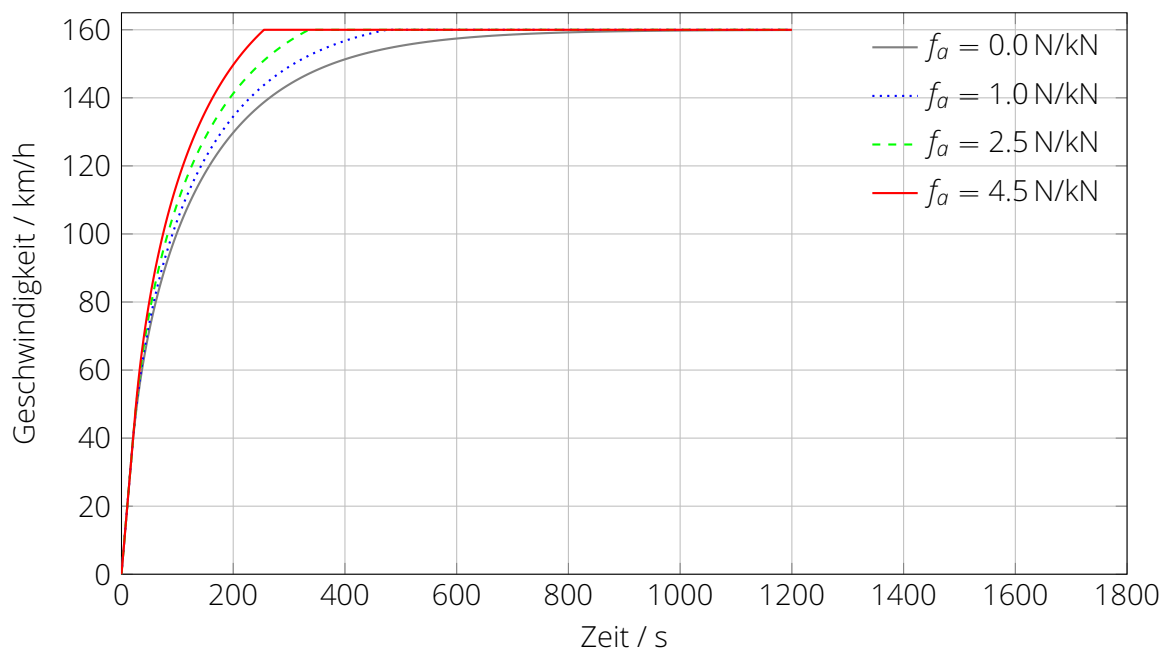
- Beförderung von Güterzügen mit einer Masse von 2100 t mit 100 km/h in der Ebene bei einem Zugkraftüberschuss von 3 N/kN
- Beförderung von Güterzügen mit einer Masse von 1400 t mit 120 km/h in der Ebene bei einem Zugkraftüberschuss von 3 N/kN

^aFrachtzug = gemischter Güterzug

Spezifischer Zugkraftüberschuss

Der spezifische Zugkraftüberschuss f_a wird auch als spezifische Beschleunigungsreserve bezeichnet. Bei der fahrdynamischen Auslegung von Fahrzeugen wird der spezifische Zugkraftüberschuss berücksichtigt, um eine möglichst rasche Beschleunigung auf die Auslegungs- bzw. Zielgeschwindigkeit zu erreichen.

Würde dieser Faktor bei der Auslegung nicht berücksichtigt, ergäben sich sehr lange Beschleunigungszeiten (und -wege), wie die unten aufgeführte Abbildung illustriert. Diese enthält das Ergebnis einer Parametervariation, bei der der spezifische Zugkraftüberschuss bei sonst identischen Randbedingungen in einem Wertebereich zwischen 0 und 4,5 N/kN variiert wurde. Es zeigt sich, dass eine suboptimale Auslegung mit der unteren Grenzleistung ($f_a = 0$) zu einer Beschleunigungszeit von ca. 1200 s führt. Dem entspricht ein Beschleunigungsweg von ca. 48(!) Kilometern. Bei der Berücksichtigung einer spezifischen Beschleunigungsreserve von 1 N/kN verkürzt sich die Beschleunigungszeit demgegenüber auf 474 s und der Beschleunigungsweg auf 16,7 km. Wird ein sehr reichlicher spezifischer Zugkraftüberschuss von 4,5 N/kN angesetzt, verringert sich die Beschleunigungszeit auf 255 s und der Beschleunigungsweg auf 8,1 km.



Der Betrag des spezifischen Zugkraftüberschusses ist vor allem von der Zugkategorie abhängig. Für Nahverkehrszüge wird aufgrund der häufigen Anfahrvorgänge und der im Allgemeinen dichten Zugfolge in den Verkehrsknoten eher ein hoher spezifischer Zugkraftüberschuss (bis zu 5 N/kN) angenommen, während Fernreisezüge in der Mitte des Wertebereiches (2-3 N/kN) angesiedelt werden und bei Güterzügen (vergleichsweise seltene Anfahrvorgänge, z.T. große Fahrzeitreserven in den Fahrplänen) die Annahme von $f_a=1$ N/kN oft ausreichend ist.

9.2 Fahrdynamische Auslegung elektrischer Triebfahrzeuge

Bei elektrischen Triebfahrzeugen steht die Auswahl geeigneter Fahrmotoren bei der fahrdynamischen Auslegung im Vordergrund. Aus elektrotechnischer Sicht ist heute zwar das Leistungsvermögen der Umrichter zur Speisung der elektrischen Antriebsmaschinen und weniger die Leistungsfähigkeit der Fahrmotoren selbst für die Dimensionierung der Antriebsausrüstung maßgeblich [3], im Rahmen dieser Betrachtungen soll es aber bei der Bestimmung der Fahrmotorleistung auf fahrdynamischer Basis belassen werden.

Vorstehend wurde erläutert, wie der Leistungsbedarf an den Treibrädern aus dem gegebenen Zugförderprogramm abgeleitet werden kann. Um von der Leistung am Treibradumfang auf die Fahrmotorleistung (genauer: mechanische Leistung an der Fahrmotorwelle) schließen zu können, muss der Wirkungsgrad des Antriebes η_{RG} berücksichtigt werden.

Unter „Antrieb“ wird bei elektrischen Triebfahrzeugen die Gesamtheit der Antriebselemente zwischen Fahrmotorwelle und Treibradsatz bezeichnet. Dabei handelt es sich um mindestens eine Zahnradübersetzung sowie ggf. weitere (dreh-)elastische Elemente. Je nach Komplexität des ausgeführten Antriebes kann der genannte Wirkungsgrad η_{RG} innerhalb eines Wertebereiches zwischen 0,95 und 0,98 angenommen werden. Berücksichtigt man ferner, dass die Gesamtleistung der Fahrmotoren auf eine bestimmte Anzahl Z_{FM} von Fahrmotoren aufgeteilt wird, ergibt sich die **fahrdynamische Auslegungsgleichung für elektrische Triebfahrzeuge** zu:

$$P_{FM} = \frac{v_A}{3,6} \cdot \frac{F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v_A) + (m_W + m_T) \cdot g \cdot (f_{WS} + f_a)}{\eta_{RG} \cdot Z_{FM}} \quad (9.6)$$

P_{FM}	kW	Fahrmotorleistung	v_A	km/h	Auslegungsgeschwindigkeit
F_{WFT}	kN	Triebfahrzeugwiderstandskraft	m_W	t	Wagenzugmasse
f_{WFW}	1	spezifische Wagenzugwiderstandskraft	m_T	t	Triebfahrzeugmasse
f_{WS}	1	spezifische Streckenwiderstandskraft	g	m/s ²	Erdbeschleunigung
f_a	1	spezifischer Zugkraftüberschuss	η_{RG}	1	Wirkungsgrad des Rad-satzgetriebes/ Antriebes
Z_{FM}	1	Anzahl der Fahrmotoren			



Rechenbeispiel: Auslegung einer Ellok für den Nahverkehr

Es soll eine elektrische Lokomotive (Masse: 84 t) mit vier einzeln angetriebenen Radsätzen (Wirkungsgrad der Radsatzgetriebe: 0,97) ausgelegt werden, die einen Nahverkehrszug aus Doppelstockwagen (Wagenzugmasse: 400 t) in einer Neigung von 10 ‰ mit einem spezifischen Zugkraftüberschuss von 5 N/kN mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h zu befördern in der Lage ist.

Für die Fahrzeugwiderstandskräfte sollen dabei folgende Annahmen gelten:

- $F_{WFT}(160 \text{ km/h}) = 10 \text{ kN}$,
- $F_{WFW}(160 \text{ km/h}) = 32 \text{ kN}$.

Die fahrdynamische Auslegungsgleichung (siehe Gl. 9.6) liefert:

$$\begin{aligned}
 P_{FM} &= \frac{v_A}{3,6} \cdot \frac{F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v_A) + (m_W + m_T) \cdot g \cdot (f_{WS} + f_a)}{\eta_{RG} \cdot Z_{FM}} \\
 &= \frac{160 \text{ km/h} \cdot \text{m/s}}{3,6 \text{ km/h}} \cdot \frac{10 \text{ kN} + 32 \text{ kN} + (400 \text{ t} + 84 \text{ t}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (0,010 + 0,005)}{0,97 \cdot 4} \\
 &= 44,4444 \text{ m/s} \cdot \frac{10,0 \text{ kN} + 32,0 \text{ kN} + 71,2 \text{ kN}}{3,88} \\
 &= 1297 \text{ kW} \\
 P_{FM} &\approx 1300 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

In Summe liefern die Fahrmotoren eine Leistung von 5200 kW. Dies entspricht einer Gesamtnennleistung am Treibradumfang von 5044 kW.

9.3 Fahrdynamische Auslegung von Dieseltriebfahrzeugen

Die fahrdynamische Auslegung von Dieseltriebfahrzeugen funktioniert grundsätzlich ähnlich wie bei elektrischen Triebfahrzeugen. Sie unterscheidet sich allerdings dadurch, dass das Auslegungsziel nicht die Dimensionierung von Fahrmotoren, sondern die Auswahl eines geeigneten Dieselmotors ist. Eine solche Eignung ist dann gegeben, wenn dieser sowohl die erforderliche Traktionsleistung am Treibradumfang als auch die Zusatzleistung zum Betrieb der Hilfsbetriebe sowie der Zugenergieversorgung (nur Personenverkehr) zu generieren vermag. Die Abbildung 9.2 veranschaulicht die beschriebenen Leistungsflüsse, wobei die Hilfsbetriebe symbolisch durch ein einzelnes Lüfterrad dargestellt werden.

Wie bei den elektrischen Triebfahrzeugen wird auf die Kräftebilanz an den Treibrädern zur Ermittlung der erforderlichen Treibradleistung (Gleichung 9.5) zurückgegriffen. Die Gleichung für die erforderliche Treibradleistung muss nun noch mit dem **Gesamtwirkungsgrad der Leistungsübertragungseinrichtung** $\eta_{Lü}^1$ verknüpft werden, um daraus die vom Dieselmotor zu generierende Traktionsleistung $P_{DM,T}$ zu erhalten:

$$P_{DM,T} = v_A \cdot \frac{F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v_A) + (m_W + m_T) \cdot g \cdot (f_{WS} + f_a)}{3,6 \cdot \eta_{Lü}} \quad (9.7)$$

Der Leistungsbedarf zur Versorgung der Hilfsbetriebe (z.B. Kühlanlage, Luftverdichter, Fahrmotorlüfter) wird pauschal mit dem **Hilfsbetriebefaktor** ψ berücksichtigt. Dieser beträgt zwi-

¹Anhaltswerte: $\eta_{Lü} \leq 0,85$ für elektrische Leistungsübertragung und $\eta_{Lü} \leq 0,80$ für hydrodynamische Leistungsübertragung

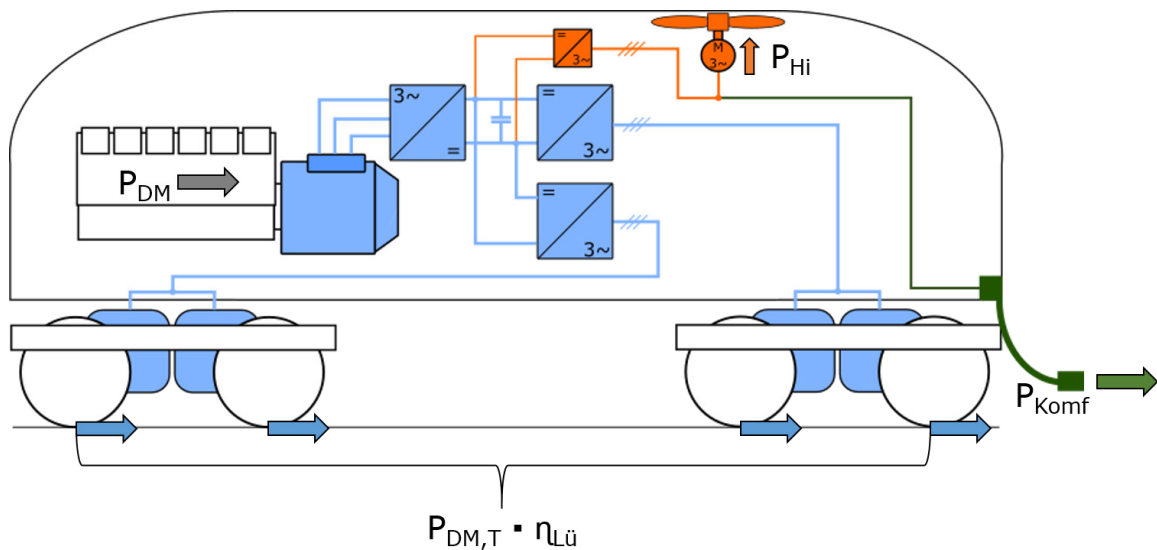


Abbildung 9.2: Leistungsflüsse zur Berücksichtigung bei der fahrdynamischen Auslegung von Dieseltriebfahrzeugen am Beispiel einer dieselelektrischen Lokomotive

schen 3 und 10 % der Traktionsleistung des Dieselmotors und stellt eine sehr grobe Abschätzung der Hilfsbetriebeleistung dar, die nur dann präzisiert werden kann, wenn die Entwicklung des Fahrzeuges schon weiter fortgeschritten ist und die grundlegende Architektur² der Hilfsbetriebe feststeht.

Ergänzt man die Gleichung 9.7 um den Hilfsbetriebefaktor und berücksichtigt man zudem den **Komfortleistungsbedarf** P_{Komf} (Zugenergieversorgung, Klimageräte auf den Führerständen, u.a.) so ergibt sich die folgende **allgemeine fahrdynamische Auslegungsgleichung für Dieseltriebfahrzeuge**:

$$P_{DM} = v_A \cdot \frac{F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WEW}(v_A) + (m_W + m_T) \cdot g \cdot (f_{WS} + f_a)}{3,6 \cdot \eta_{Lü} (1 - \psi)} + P_{Komf} \quad (9.8)$$

Die Komfortleistung wird dabei entweder summarisch für den gesamten Zug angegeben oder alternativ als Nennleistung je Wagen oder Radsatz. Sie kann bei modernen Reisezugwagen zwischen ca. 50 und 70 kVA³ je Fahrzeug betragen.

²Darunter werden u.a. folgende Punkte verstanden: Anzahl und Art der Antriebe von Lüftern, Pumpen (etc.) sowie das Betriebsregime der Hilfsbetriebe (z.B. Konstant- vs. Aussetzbetrieb).

³Es ist üblich, die elektrische Scheinleistung statt einer mechanischen Leistung anzugeben.



Beispiel: Ausschreibung eines Bahnbetreibers für Diesellokomotiven im Reisezugverkehr

Die folgenden Angaben werden zitiert aus einer Ausschreibung die im Amtsblatt der Europäischen Union 248/2009 unter der Nummer 356834-2009 veröffentlicht wurde:

„Die Lokomotiven müssen folgende Grundanforderungen erfüllen:

- Realisierung des folgenden Zugförderprogramms: 5 Doppelstockwagen (DoSto) mit je 55 t und ein Steuerwagen mit 60 t und V_{\max} 140 km/h in der Ebene mit einem Zugkraftüberschuss von 3 N/kN und einer zentralen Energieversorgung (ZEV) von mindestens 300 kVA,
- Streckenklasse C2,
- Anfahrzugkraft: mindestens 235 kN. Die Lokomotive muss auch auf 270 kN ausgelegt werden können,
- V_{\max} 140 km/h /Option 160 km/h, ...“



Auslegung einer Diesellokomotive

Es soll die Dieselmotorleistung für eine Diesellokomotive mit elektrischer Leistungsübertragung ermittelt werden, die folgendes Zugförderprogramm erfüllt:

1. Beförderung von 10 Schüttgutwagen (max. 80 t je Wagen) in einer Steigung von 10 ‰ mit 30 km/h bei einem spezifischen Zugkraftüberschuss von 1 N/kN,
2. Beförderung von 5 Reisezugwagen (55 t) und eines Steuerwagens (60 t) in Steigungen bis 5 ‰ mit 120 km/h bei einem spezifischen Zugkraftüberschuss von 1 N/kN im Rahmen von Überführungsfahrten ($P_{\text{Komf}}=150$ kW).

Die Dieselmotorleistung ist anhand der fahrdynamischen Auslegungsgleichung und unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen zu ermitteln:

- Triebfahrzeugmasse $m_T=80$ t
- Triebfahrzeugwiderstandskraft:

$$F_{WFT} = 1,1 + 1,5 \cdot \frac{v}{100} + 3,3 \left(\frac{v}{100} \right)^2,$$


- spezifische Wagenzugwiderstandskraft der Schüttgutwagen:

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

- spezifische Wagenzugwiderstandskraft der Reisezugwagen:

$$f_{WFW} = 0,0010 + 0,0006 \frac{v}{100} + 0,0014 \left(\frac{v}{100} \right)^2,$$

- Hilfsbetriebefaktor: $\psi=0,08$,
- Leistungsübertragungswirkungsgrad: $\eta_{Lü}=0,825$

 **Auslegung einer Diesellokomotive (Fortsetzung...)**

Beförderungsfall 1: Ermittlung der Fahrzeugwiderstandskräfte:

$$F_{WFT} = 1,1 + 1,5 \cdot \frac{30}{100} + 3,3 \left(\frac{30}{100} \right)^2 = 4,9 \text{ kN}$$

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0025 \left(\frac{30}{100} \right)^2 = 0,001425$$

Auslegungsgleichung:

$$\begin{aligned} P_{DM} &= v_A \cdot \frac{F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v_A) + (m_W + m_T) \cdot g \cdot (f_{WS} + f_a)}{3,6 \cdot \eta_{Lü} (1 - \psi)} + P_{K\text{omf}} \\ &= 30 \cdot \frac{4,9 + 800 \cdot 9,81 \cdot 0,001425 + (80 + 800) \cdot 9,81 \cdot (0,010 + 0,001)}{3,6 \cdot 0,825 \cdot (1 - 0,08)} \\ &= 30 \cdot \frac{4,9 + 11,18 + 94,96}{3,6 \cdot 0,759} \\ &= 1219 \approx \mathbf{1220 \text{ kW}} \end{aligned}$$

Beförderungsfall 2: Ermittlung der Fahrzeugwiderstandskräfte:

$$F_{WFT} = 1,1 + 1,5 \cdot \frac{120}{100} + 3,3 \left(\frac{120}{100} \right)^2 = 7,7 \text{ kN}$$

$$f_{WFW} = 0,0010 + 0,0006 \cdot \frac{120}{100} + 0,0014 \left(\frac{120}{100} \right)^2 = 0,003736$$

Auslegungsgleichung:

$$\begin{aligned} P_{DM} &= v_A \cdot \frac{F_{WFT}(v_A) + m_W \cdot g \cdot f_{WFW}(v_A) + (m_W + m_T) \cdot g \cdot (f_{WS} + f_a)}{3,6 \cdot \eta_{Lü} (1 - \psi)} + P_{K\text{omf}} \\ &= 120 \cdot \frac{7,7 + 335 \cdot 9,81 \cdot 0,003736 + (80 + 335) \cdot 9,81 \cdot (0 + 0,001)}{3,6 \cdot 0,825 \cdot (1 - 0,08)} + 150 \\ &= 120 \cdot \frac{7,7 + 12,28 + 4,07}{3,6 \cdot 0,759} + 150 \\ &= 1206,2 \approx \mathbf{1210 \text{ kW}} \end{aligned}$$

In diesem Beispiel sind die beiden Beförderungsfälle hinsichtlich des Leistungsbedarfes nahezu äquivalent. Der Dieselmotor sollte eine Nennleistung von ca. 1200...1300 kW aufweisen.

9.4 Anmerkungen zum Umgang mit den fahrdynamischen Auslegungsgleichungen

Die fahrdynamische Auslegung steht oft am Beginn der Projektierung von Triebfahrzeugen, weshalb einige Parameter der fahrdynamischen Auslegungsgleichungen (siehe Gln. 9.6 und 9.8) sinnvoll abgeschätzt werden müssen, sofern sie nicht anderweitig durch die Ausschreibung des Bestellers definiert werden.

Dies trifft insbesondere auf die Fahrzeugwiderstände und die relevanten Wirkungsgrade (η_{RG} bzw. $\eta_{Lü}$) sowie den Hilfsbetriebfaktor im Falle von Dieseltriebfahrzeugen zu.

Wie aus dem in dem oben stehenden Infokasten aufgeführten Beispiel einer realen Fahrzeugausschreibung hervorgeht, ist es nicht selbstverständlich, dass Angaben bezüglich der zu veranschlagenden Fahrzeugwiderstände Teil der Ausschreibung sind. Sie müssen vielmehr beim Auftraggeber erfragt werden oder, falls dieser nicht aussagefähig oder -willig ist, begründet abgeschätzt werden.

Dabei bietet sich die Bezugnahme auf Fahrzeuge an, die dem zu projektierenden ähnlich sind. Die Ähnlichkeit sollte sich dabei auf die gesamte Fahrzeug- wie auch Fahrwerks- und Antriebskonfiguration sowie die Masse erstrecken. Soll also beispielsweise eine Mittelführerhauslokomotive mit einer Masse von 80 t und vier Radsätzen in zwei Drehgestellen projektiert werden, sollte auch nur in dieser Fahrzeugkategorie nach Referenzdaten recherchiert werden, um eine sinnvolle Abschätzung der fehlenden Parameter zu treffen.

Damit wohnt der Berechnung der erforderlichen Leistung eine gewisse Unschärfe inne, sodass es sich lohnt, zu untersuchen, wie stark sich die Abweichung der verschiedenen Berechnungsparameter auf das Berechnungsergebnis auswirkt. Das Ergebnis einer solchen Analyse ist in Abbildung 9.3 für den Fall der Auslegung eines Dieseltriebfahrzeuges dargestellt.

Die Parameter Triebfahrzeugwiderstandskraft (F_{WFT}), spezifische Wagenzugwiderstandskraft (f_{WFW}), Triebfahrzeugmasse (m_T), Leistungsübertragungswirkungsgrad ($\eta_{Lü}$) und Hilfsleistungsfaktor (ψ) wurden dabei jeweils in einem Wertebereich zwischen 90 und 110 % ihres Nennwertes variiert und die daraus resultierende Veränderung der Auslegungsleistung gegenüber der Parametrierung mit den jeweiligen Nennwerten aufgetragen.

Es ist erkennbar, dass insbesondere eine Variation des Leistungsübertragungswirkungsgrades sowie des spezifischen Wagenzugwiderstandes eine große Veränderung der Auslegungsleistung hervorrufen. Auf die Belegung dieser beiden Parameter mit korrekten bzw. zutreffenden Werten sollte deshalb besonderes Augenmerk gelegt werden. Im Gegensatz dazu spielt beispielsweise die möglichst genaue Vorherbestimmung der Triebfahrzeugmasse in dem betrachteten Fall eine eher untergeordnete Rolle bei der fahrdynamischen Auslegung.

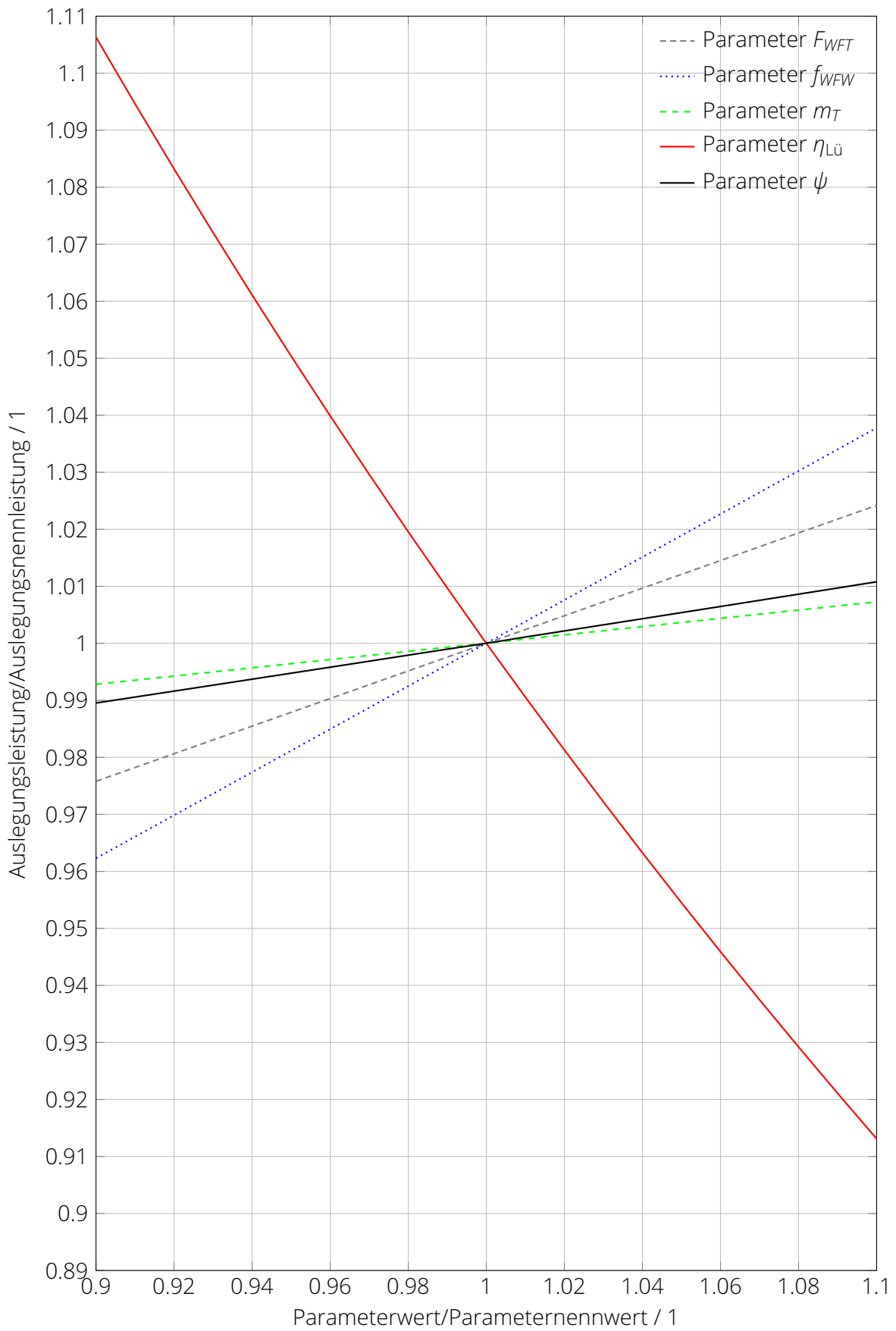


Abbildung 9.3: Sensitivitätsanalyse der Auslegungsleistung in Abhängigkeit schwankender Auslegungsparameter

10 Verständnisfragen

Komplex „Fahr-dynamische 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 „fahr-dynamische Höchstgeschwindigkeit“?
6. Was ist mit dem „Schleppvermögen“ von Triebfahrzeugen gemeint?
7. Wie ist ein Triebfahrzeug-Kenn- und Diagramm aufgebaut und welche Aussagen lassen sich aus einem solchen Diagramm ableiten?
8. Warum ist die Grenzlastberechnung so wichtig?
9. Welche Grenzlastarten gibt es und wie lassen sich diese charakterisieren?
10. Was macht die Grenzlastberechnung so aufwendig?
11. Wie wird eine Grenzlasttabelle sachgerecht ausgewertet?

Komplex „Triebfahrzeugauslegung auf fahr-dynamischer Basis“

1. Was ist ein „Zugförderprogramm“?
2. Warum wird bei der fahr-dynamischen Auslegung von Triebfahrzeugen ein (spezifischer) Zugkraftüberschuss berücksichtigt und wovon hängt der Betrag dieses Parameters ab?
3. Warum ist es für die fahr-dynamische Auslegung eines Triebfahrzeuges nicht ausreichend, die Treibradleistung zu bestimmen?
4. Welche Leistung wird im Ergebnis der fahr-dynamischen Auslegung von elektrischen Triebfahrzeugen festgelegt?

10 Verständnisfragen

5. Welche Leistung wird im Ergebnis der fahrdynamischen Auslegung von Dieseltriebfahrzeugen festgelegt?
6. Was ist bei der fahrdynamischen Auslegung von Dieseltriebfahrzeugen für den Reisezugverkehr zu beachten?



Arbeitsmaterialien

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

1. Foliensätze:
 - Folien_FD_17_Traktionsvermoegen.pdf
 - Folien_FD_18_Leistungsauslegung.pdf
2. Testressourcen in OPAL:
 - Selbsttest „Traktionsbewertung“
 - Selbsttest „Auslegung“
3. Rechenübungen „Übungskomplex Auslegung und Leistungsfähigkeit“ im Übungsheft auf den Seiten 25-28
4. Formelsammlung S. 43-46

Literaturverzeichnis

- [1] Benabdellah, Karim und Kache, Martin: „Einige Betrachtungen zu Grenzlasten im Schienenverkehr“, in: *El - Der Eisenbahn-Ingenieur*, Jg. 63 (2012), Nr. 7, S. 40–43.
- [2] Benabdellah, Karim und Kache, Martin: „Möglichkeiten aufwandsreduzierter Grenzlastberechnung“, in: *El - Der Eisenbahn-Ingenieur*, Jg. 66 (2015), Nr. 4, S. 54–59.
- [3] Fösel, Ulrich u. a.: „Auslegung der elektrischen Vectron-Lokomotiven“, in: *eb - Elektrische Bahnen*, Jg. 110 (2012), Nr. 1-2, S. 12–20.
- [4] Lehmann, H. und Wendt, J.: „Wagenzugmassen und Grenzlasten - bedeutende Planungsgrößen im Eisenbahnbetrieb“, in: *Deine Bahn*, (2004), S. 306–311.
- [5] 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.
- [6] Nießen, Manfred: „Elektrische Triebfahrzeuge“, in: Hrsg. von J. Michael Mehlretter, Motorbuch Verlag Stuttgart, 1986, Kap. Zielsetzung und Entwicklung der elektrischen Lokomotive BR 120 in Drehstromantriebstechnik, S. 103–117.