



Lehrbrief „Fahrdynamik“ (Teil 05), Sommersemester 2020

Dr.-Ing. Martin Kache

19. Juni 2020

Vorwort

Nun haben Sie es bereits bis zum 5. Lehrbrief im Fach „Fahrodynamik/Bahnfahrzeuge“ geschafft und ich hoffe, dass die letzten Lehrbriefe viel Interessantes für Sie bereit hielten und Ihr Interesse an der Fahrodynamik geweckt oder verstärkt wurde.

Mit diesem Lehrbrief wollen wir auf einen der wichtigsten Aspekte bei fahrdynamischen Betrachtungen zu sprechen kommen, nämlich dem Energiebedarf von Zugfahrten. Ausgangspunkt der Überlegungen ist dabei stets die Bilanzierung der Kräfte an den Treibrädern, wofür die Kenntnis der Zusammenhänge aus Lehrbrief 2 (Fahrwiderstände) eine große Rolle spielt. Ausgehend von der an den Treibrädern verrichteten Arbeit wird dann auf den Energiebedarf ab Oberleitung oder Treibstofftank geschlossen, wofür eine solide Kenntnis des Aufbaus der Antriebsstränge und dem energetischen Verhalten der dort verbauten Elemente (Lehrbrief 3) vonnöten ist.

Falls Sie sich also wider Erwarten sehr durch die genannten Lehrbriefe „quälen“ mussten, kann ich Ihnen versichern, dass Ihre Mühen nicht umsonst gewesen sind.

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 (10.1)

Inhaltsverzeichnis

11 Energiebedarf von Zugfahrten	7
11.1 Vorbetrachtungen zu Energie und Arbeit	7
11.2 Energie und Arbeit an den Treibrädern	10
11.3 Triebfahrzeugwirkungsgrad	18
11.3.1 Von der Treibradarbeit zur Traktionsenergie	18
11.3.2 Triebfahrzeug-Kennlinienfelder	20
11.3.3 Triebfahrzeug-Leistungs- und Verbrauchstafeln (TLV-Tafeln)	28
11.4 Grundzüge des Energiesparenden Fahrens	30
11.4.1 Randbedingungen	30
11.5 Strategien für energiesparendes Fahren	33
12 Verständnisfragen	41

11 Energiebedarf von Zugfahrten

11.1 Vorbetrachtungen zu Energie und Arbeit

Der Energiebedarf von Zugfahrten setzt sich zusammen aus dem **Traktionsenergiebedarf**, dem **Hilfsenergiebedarf** und dem **Komfortenergiebedarf**.

Ein **Traktionsenergiebedarf** ergibt sich immer dann, wenn Antriebskräfte erzeugt werden (Anfahrt, Beschleunigung und Beharrung). Der Traktionsenergiebedarf an den Treibrädern entspricht der verrichteten Treibradarbeit. Es gibt zwei Möglichkeiten, diese zu bestimmen, nämlich mittels Integration der Treibradzugkraft über den zurückgelegten Weg oder über die Integration der Treibradleistung über die Zeit:

$$W_T = \int P_T dt = \int F_T ds \quad (11.1)$$

Der **Hilfsenergiebedarf** resultiert aus dem Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe, also aller Fahrzeugkomponenten, die in der Antriebsperipherie in erster Linie für die Kühlung sowie die Förderung und Aufbereitung von Betriebsstoffen (Wasser, Öl, Kraftstoff, Luft) zuständig sind. Um den Hilfsenergiebedarf rechnerisch genau zu erfassen, sind meist aufwendige Untersuchungen notwendig, da ein Teil der Hilfsbetriebe mit nahezu konstanter Leistung betrieben wird (Grundlast), während ein anderer Teil stark schwankende Leistungen aufweist und/oder im Aussetzbetrieb arbeitet. So können Kühlerlüfter und Pumpen entweder mit fester Drehzahl, in Drehzahlstufen oder mit variabler Drehzahl betrieben werden, woraus jeweils ein sehr unterschiedlicher Energiebedarf über der Zeit resultiert.

Ein weiteres Merkmal des Hilfsenergiebedarfes ist, dass er auch im Fahrzeugauslauf, bei Bremsungen oder im Fahrzeugstillstand auftreten kann. So ist beispielsweise der Leistungsbedarf von Kühllüftern sowohl von der Temperatur der Aggregate oder Medien, die sie kühlen sollen, als auch von der Umgebungstemperatur abhängig. Sie werden folglich im Sommer ein anderes Betriebsregime aufweisen, als im Winter und nach Abschaltung der Traktionsleistung entsprechend unterschiedliche Nachlaufzeiten aufweisen.

Die genaue Bestimmung des Hilfsenergiebedarfes ist deshalb sehr aufwendig und erfordert eine genaue Kenntnis des Hilfsbetriebemanagements auf dem betrachteten Fahrzeug¹.

Der **Komfortenergiebedarf** spielt ausschließlich bei Reisezügen eine Rolle². Analog dem Hilfsenergiebedarf ist der Komfortenergiebedarf von zahlreichen Parametern und Randbedingungen

¹Giebel hat zum Beispiel in [2] das Energiemanagement der Hilfs- und Komfortsysteme von elektrischen Triebzügen untersucht.

²Sofern die Führerstandsklimatisierung und -beleuchtung sowie etwaig vorhandene Kühlfächer oder Kochplatten für die Triebfahrzeugpersonale den Hilfsbetrieben zugeschlagen werden.

gen abhängig. So kann er sowohl jahres- als auch tageszeitlich stark schwanken. Die größte Leistungssenkung unter den Komfortsystemen stellt sicherlich die Fahrzeugklimatisierung dar. Diese umfasst Baugruppen zum Kühlen, Heizen, Lüften sowie zur (Frisch-)Luftaufbereitung. Da die Komfortsysteme bei betriebsbereiten Fahrzeugen unabhängig vom Fahrzustand (also auch während der Fahrzeugstillstandszeiten) mit Energie versorgt werden müssen, kann der Komfortenergiebedarf als proportional zur Gesamtfahrzeit (inklusive Haltezeiten) angenommen werden.

Der Gesamtenergiebedarf einer Zugfahrt E_{ges} ergibt sich somit als Summe aus der mit dem Triebfahrzeugwirkungsgrad η_{Tfz} gewichteten Treibradarbeit W_T sowie den zeitlichen Integralen von Hilfsleistung P_{Hi} und Komfortleistung P_{Komf} :

$$E_{\text{ges}} = \frac{W_T}{\eta_{\text{Tfz}}} + \int P_{\text{Hi}} dt + \int P_{\text{Komf}} dt. \quad (11.2)$$

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Leistungs- und Energiebedarf in den erwähnten Kategorien (Traktion (Treibrad), Hilfs- und Komfortsysteme) sind in Tabelle 11.1 zusammengetragen.

Einige der dort aufgeführten Faktoren sind schwierig quantifizier- und vorhersagbar, sodass bei der Vorausbestimmung insbesondere des Hilfs- und Komfortenergiebedarfes häufig auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden muss.

Energieflussanalyse am Beispiel einer Straßenbahn



Citadis Dublin (Foto links: Manfred Kopka, Foto rechts: en.wikipedia (gemeinfrei))

Bomke hat in [1] eine Analyse des elektrischen Energiebedarfes der Citadis-Straßenbahnen in Dublin dargestellt. Die Angaben basieren dabei auf Messungen, die vom Fahrzeughersteller ALSTOM im November 2014 durchgeführt worden sind.

Es zeigte sich, dass 79 % des gesamten elektrischen Energiebedarfes der Straßenbahnen während des Fahrbetriebs entstehen und 21 % während der Abstellzeiten im Depot. Außerdem wurde herausgefunden, dass nur 51 % des Gesamtenergiebedarfes der Straßenbahnen auf die Antriebe zurückzuführen sind, während 29 % auf die Hilfsbetriebe und 20 % auf die Komfortsysteme entfallen.

Soll also der Gesamtenergiebedarf solcher Fahrzeuge ermittelt oder vorausberechnet werden, dürfen die Leistungssenkungen, die nicht unmittelbar dem Antrieb dienen, also nicht vernachlässigt werden.

Tabelle 11.1: Einflussfaktoren auf den Leistungs- und Energiebedarf

Treibradleistung	Hilfsleistung	Komfortleistung
Fahrzeugwiderstände	Antriebsleistung	Fahrzeugausstattung
Streckenwiderstand	Antriebswirkungsgrad	Außentemperatur
Geschwindigkeit	Außentemperatur	Besetzungsgrad
Fahrzeugmasse	Druckluftverbrauch	Sonneneinstrahlung
Massenfaktor	Hilfsbetriebmanagement	Betriebszustand
Treibradenergie	Hilfsenergie	Komfortenergie
Anzahl Geschwindigkeitswechsel	Betriebsregime des Antriebsstranges	Wetter
Streckentopographie	Nachlaufzeit der Lüfter	Besetzungsgrad
Anzahl Fahrzeughalte	Wetter	Laufweg
Anteil Fahrzeugauslauf	Bremsregime	Konsumverhalten der Reisenden

💡 Treibrad- vs. Hilfsbetriebeleistung



Betrachtet wird eine Lokomotive der Baureihe 145 im Einsatz vor einem schweren Güterzug. Es werde angenommen, dass die Lokomotive im Zuge eines Beschleunigungsvorganges oder der Befahrung einer schweren Steigung an der Leistungsgrenze ($P_T=4,2$ MW) betrieben wird. Dabei werden auch alle Fahrmotorlüfter (4 Stck.), die Rückkühlerlüfter (2 Stck.) für das Trafoöl, die Trafo- und Stromrichterölpumpen (je 2 Stck.), der Stromrichterlüfter sowie der Hilfsbetriebeumrichterlüfter jeweils mit Nennleistung betrieben, woraus ein Hilfsleistungsbedarf von insgesamt ca. 218 kW resultiert.

Der Energiebedarf je Minute Fahrzeit ergibt sich somit für die Traktion und die Hilfsbetriebe wie folgt:

$$W_T = P_T \cdot 60 \text{ s} = 4200 \text{ kW} \cdot 60 \text{ s} = 252000 \text{ kWs} = 70,0 \text{ kWh}$$

$$W_{Hi} = P_{Hi} \cdot 60 \text{ s} = 218 \text{ kW} \cdot 60 \text{ s} = 13080 \text{ kWs} = 3,6 \text{ kWh}$$

Damit macht der Energiebedarf der Hilfsbetriebe in diesem Fall etwa 5 % des Gesamtenergiebedarfes aus, wenn die Treibradarbeit als Bezugspunkt gewählt wird und der Wirkungsgrad des Antriebsstranges vernachlässigt wird.

11.2 Energie und Arbeit an den Treibrädern

Im Gegensatz zum Energiebedarf der Hilfs- und Komfortsysteme lässt sich die Treibradarbeit mit Hilfe fahrdynamischer Berechnungen relativ genau bestimmen. Dabei lohnt es sich, den Energiefluss für die verschiedenen Phasen der Zugfahrt getrennt zu betrachten.

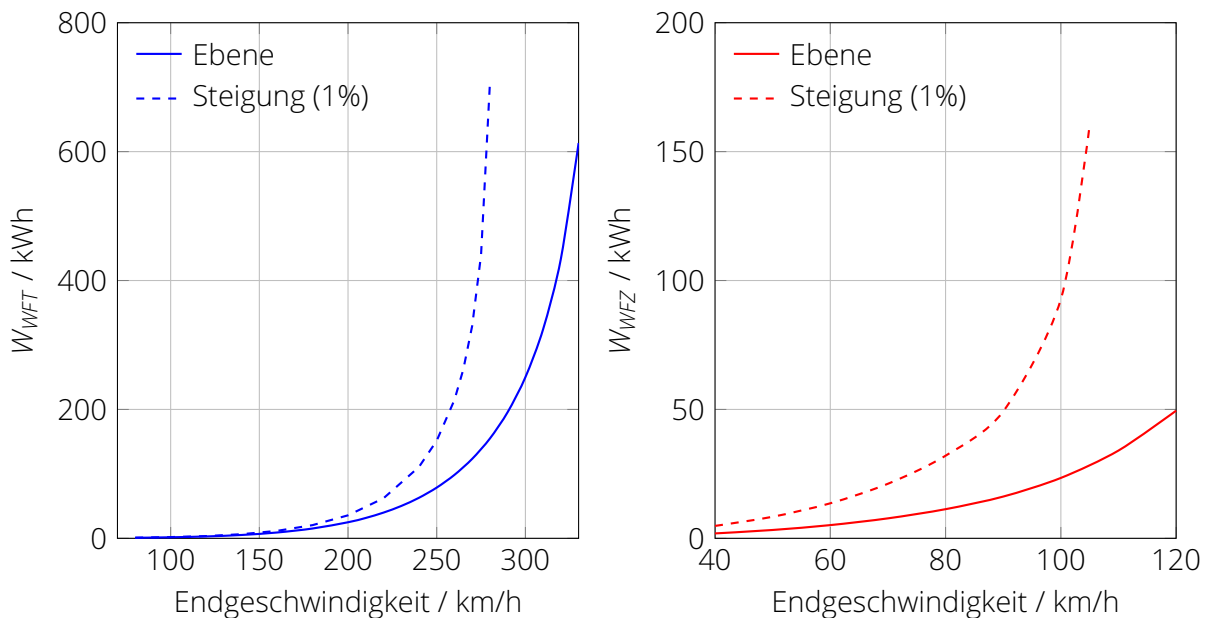
Anfahr- und Beschleunigungsvorgang

Im Rahmen dieser Betrachtungen wird der Anfahrprozess dem Beschleunigungsvorgang zugeschlagen, da die prinzipiellen physikalischen Gesetzmäßigkeiten für beide genannten Phasen der Zugfahrt in gleicher Weise gelten.

Während des Beschleunigungsprozesses wird die an den Treibrädern verrichtete Arbeit zu einem (geringen) Teil zur Überwindung der Fahrzeugwiderstandskräfte benötigt. Der überwiegende Teil der Treibradarbeit geht in die Änderung der kinetischen und potentiellen Energie des Fahrzeuges über.

$$W_T = W_{WF} + \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} \quad (11.3)$$

Während potentielle und kinetische Energie im Fahrzeug zwischengespeichert werden und potentiell für den Transportprozess verfügbar bleiben (kinetische Energie: Fahrzeugauslauf, potentielle Energie: Zugkräfteinsparung bei Gefällefahrten) ist der Anteil der Treibradarbeit, der zur Überwindung der Fahrzeugwiderstände benötigt wird (F_{WF}) für die Fahrbewegung unwiederbringlich verloren. Abbildung 11.1 zeigt die an den Fahrzeugwiderständen umgesetzte Energie bei Beschleunigungsvorgängen auf unterschiedliche Endgeschwindigkeiten sowohl für einen Hochgeschwindigkeitszug (Abbildung 11.1a) als auch für einen Containerzug (Abbildung 11.1b) in der Ebene und in 10 ‰ Steigung.



(a) Durch den Fahrzeugwiderstand dissipierte Energie bei der Beschleunigung eines Hochgeschwindigkeitszuges auf verschiedene Endgeschwindigkeiten

(b) Durch den Fahrzeugwiderstand dissipierte Energie bei der Beschleunigung eines Containerzuges ($m_W=1600$ t) auf verschiedene Endgeschwindigkeiten

Abbildung 11.1: Treibradarbeit zur Überwindung des Fahrzeugwiderstandes bei der Beschleunigung verschiedener Züge bis zur jeweiligen Endgeschwindigkeit

Es wird deutlich, dass die Fahrzeugwiderstandsarbeit W_{WF} progressiv mit der Endgeschwindigkeit der Beschleunigungsprozesse ansteigt. Fällt diese auf die fahrdynamische Höchstgeschwindigkeit $a \rightarrow 0$, wächst die Fahrzeugwiderstandsarbeit über alle Grenzen an, weil theoretisch unendlich lange mit maximaler Treibradarleistung gefahren werden müsste, damit sich die Geschwindigkeit des Fahrzeuges oder des Zugverbandes asymptotisch der Endgeschwindigkeit nähert. Da in diesem Falle $\Delta E_{kin} \approx 0$, würde die gesamte Treibradararbeit als Fahrwiderstandsarbeit verrichtet.

Die folgenden Beispiele sollen die in Abbildung 11.1 gezeigten Zusammenhänge zusammenfassen und untermauern.

- Wird der beispielhaft betrachtete Hochgeschwindigkeitszug (Abbildung 11.1a) aus dem Stillstand auf eine Endgeschwindigkeit von 250 km/h beschleunigt, hat er am Ende des Beschleunigungsvorganges eine kinetische Energie von 307,2 kWh (1106 MJ) erreicht. Aufgrund der zu überwindenden Fahrzeugwiderstandskräfte muss dafür jedoch an den Treibrädern eine Arbeit von insgesamt 385,9 kWh (1389 MJ) verrichtet werden. Circa 20 % dieses Betrages wird an den Fahrwiderständen dissipiert.
Findet der beschriebene Beschleunigungsprozess in einer Steigung von 10 ‰ statt, verlängert sich der Beschleunigungsweg um etwa 6,7 km von 8,7 km (in der Ebene) auf 15,4 Kilometer. Damit einher geht ein Anstieg der Treibradararbeit auf insgesamt 553,8 kWh (1922 MJ), wovon 151,5 kWh ($\hat{=}$ 28,4 %) an den Fahrzeugwiderständen umgesetzt werden und 185,4 kWh ($\hat{=}$ 34,7 %) als potentielle Energie des Fahrzeuges gespeichert werden.
- Wird der beispielhaft betrachtete Containerzug (Abbildung 11.1b) aus dem Stillstand auf eine Endgeschwindigkeit von 100 km/h beschleunigt, hat er am Ende des Beschleunigungsvorganges eine kinetische Energie von 186,3 kWh (671 MJ) erreicht. Aufgrund der zu überwindenden Fahrzeugwiderstandskräfte muss dafür jedoch an den Treibrädern eine Arbeit von insgesamt 209,8 kWh (755 MJ) verrichtet werden. Circa 11 % dieses Betrages wird an den Fahrwiderständen dissipiert.
Findet der beschriebene Beschleunigungsprozess in einer Steigung von 10 ‰ statt, verlängert sich der Beschleunigungsweg um etwa 7,3 km von 2,8 km (in der Ebene) auf 10,1 Kilometer. Damit einher geht ein Anstieg der Treibradararbeit auf insgesamt 744 kWh (2680 MJ), wovon 92,8 kWh ($\hat{=}$ 12,5 %) an den Fahrzeugwiderständen umgesetzt werden und 465,3 kWh ($\hat{=}$ 62,5 %) als potentielle Energie des Zuges gespeichert werden.

Der Anteil der an den Fahrzeugwiderständen verrichteten Arbeit an der gesamten Treibradararbeit ist für die betrachteten Beschleunigungsvorgänge im Falle beider Zugtypen in Abbildung 11.2 dargestellt. Es wird schon an dieser Stelle deutlich, dass die Energie, die aufgewendet

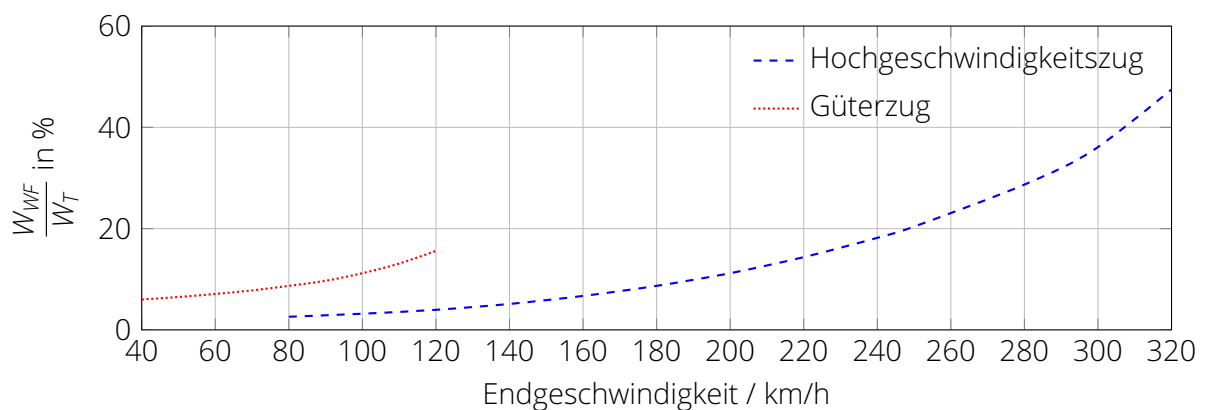


Abbildung 11.2: Anteil der Fahrzeugwiderstandsarbeit an der Treibradararbeit bei Beschleunigungsvorgängen auf verschiedene Endgeschwindigkeiten

werden muss, um den Hochgeschwindigkeitszug auf ein hohes Geschwindigkeitsniveau zu bringen, bei hohen Geschwindigkeiten überproportional ansteigt. Beträgt das Verhältnis von Energieumsatz an den Fahrwiderständen (entspricht W_{WF}) zu (gespeicherter) kinetischer Energie bei einer Geschwindigkeit von 250 km/h noch 0,256, so beträgt es bei 300 km/h bereits 0,565 (Verdopplung) und bei 330 km/h 1,146 (mehr als Vervierfachung).

Wird der zeitliche Verlauf des kumulierten Energiebedarfes einer Zugfahrt betrachtet, so weisen Beschleunigungsabschnitte meistens die größten Gradienten auf, weil der Leistungsbedarf in diesen Phasen („Aufladen des mechanischen Speichers Fahrzeug/Zug mit kinetischer Energie“) häufig am vergleichsweise größten ist.

Beharrungsfahrt

Bei Beharrungsphasen während der Zugfahrt geht es im Wesentlichen darum, die Geschwindigkeit der Fahrzeuge oder Züge nahezu konstant zu halten. Die kinetische Energie des Fahrzeuges bzw. Fahrzeugverbandes bleibt in dieser Phase ebenfalls nahezu konstant, wodurch sich bezüglich der Treibradararbeit ein bezüglich Gleichung 11.3 abgewandelter Zusammenhang ergibt:

$$W_T = W_{WF} + \Delta E_{\text{pot}} \quad (11.4)$$

Es ist zu beachten, dass der Term ΔE_{pot} in obenstehender Gleichung ein negatives Vorzeichen aufweist, wenn Gefälle Strecken befahren werden. Ist das Gefälle stark genug, wechselt auch die Treibradararbeit ihr Vorzeichen und es muss gebremst statt angetrieben werden. Im Falle, dass das Fahrzeug über regenerative Bremsen verfügt, besteht die Möglichkeit, den Leistungsfluss durch das Fahrzeug umzukehren und damit die Gesamtenergiebilanz der Zugfahrt zu verbessern. Streckenabschnitte, auf denen das möglich ist, lassen sich relativ einfach identifizieren, indem die fahrdynamische Grundgleichung für den Fall der Beharrungsfahrt nach der Streckenneigung umgestellt wird und die Antriebs- bzw. Bremskraft auf „Null“ gesetzt wird. Auf diese Weise ergibt sich mit dem Fahrzeugschwerkraft mg ein geschwindigkeitsabhängiges Grenzgefälle, bei dessen Unterschreitung gebremst und bei dessen Überschreitung angetrieben werden muss:

$$\begin{aligned} 0 &= F_T - \sum F_{WF} - F_{WS} - F_B \quad \text{mit: } F_T = F_B = 0 \\ F_{WS} &= - \sum F_{WF} \quad \text{Bogenwiderstand vernachlässigt} \\ mgi &= -F_{WFT}(v) - F_{WFW} \\ i_{\text{grenz}} &= \frac{-F_{WFT}(v) - F_{WFW}}{mg} \end{aligned} \quad (11.5)$$

Für den im vorangegangenen Abschnitt betrachteten Beispiel-Hochgeschwindigkeitszug ist das auf diese Weise berechnete Grenzgefälle in Abbildung 11.3 zu finden. Daraus geht hervor, dass eine Beharrungsbremung vorgenommen werden müsste, wenn der Zug mit einer Geschwindigkeit von 140 km/h ein Gefälle befähre, dessen Neigung kleiner als -5 ‰ ist.

Für den Fall, dass Traktionskräfte aufgebracht werden müssen, um die Geschwindigkeit des Fahrzeuges konstant zu halten, lässt sich die Treibradararbeit verhältnismäßig einfach aus dem Produkt der Summe der zu überwindenden Fahrwiderstandskräfte und der zurückgelegten Wegstrecke, während der diese konstant bleiben (Neigungsabschnitte), ermitteln.

$$W_T = \sum F_W \cdot \Delta s \quad (11.6)$$

In diesem Zusammenhang kann es interessant sein, den Energiebedarf (die verrichtete Arbeit) an den Fahrwiderständen pro in Beharrung zurückgelegter Wegstrecke zu ermitteln. Die em-

pirischen Fahrwiderstandsgleichungen liefern die Fahrzeugwiderstandskräfte in der Regel in der Einheit kN. Werden die so erhaltenen Fahrzeugwiderstandskräfte mit 1000 m multipliziert, ergibt sich der Energiebedarf an den Treibrädern in kJ ($kN \cdot m = 1000Nm$) in der Ebene. Gegebenenfalls ist der Neigungswiderstand zu ergänzen. Abbildung 11.4 zeigt die grafische Umsetzung des genannten Ansatzes wiederum für den exemplarischen Hochgeschwindigkeitszug.

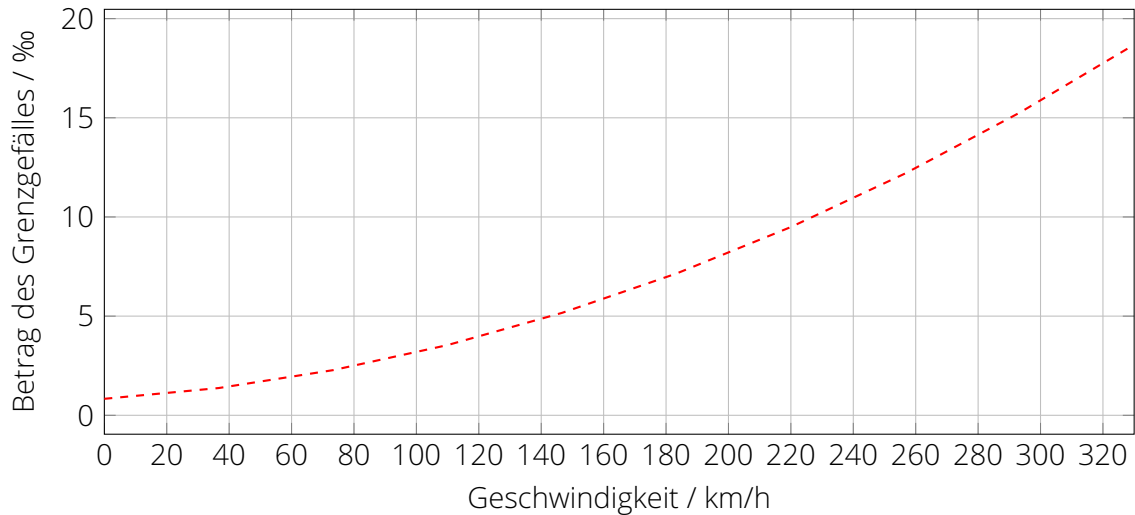


Abbildung 11.3: Grenzgefälle nach Gleichung 11.5 für einen exemplarischen Hochgeschwindigkeitszug

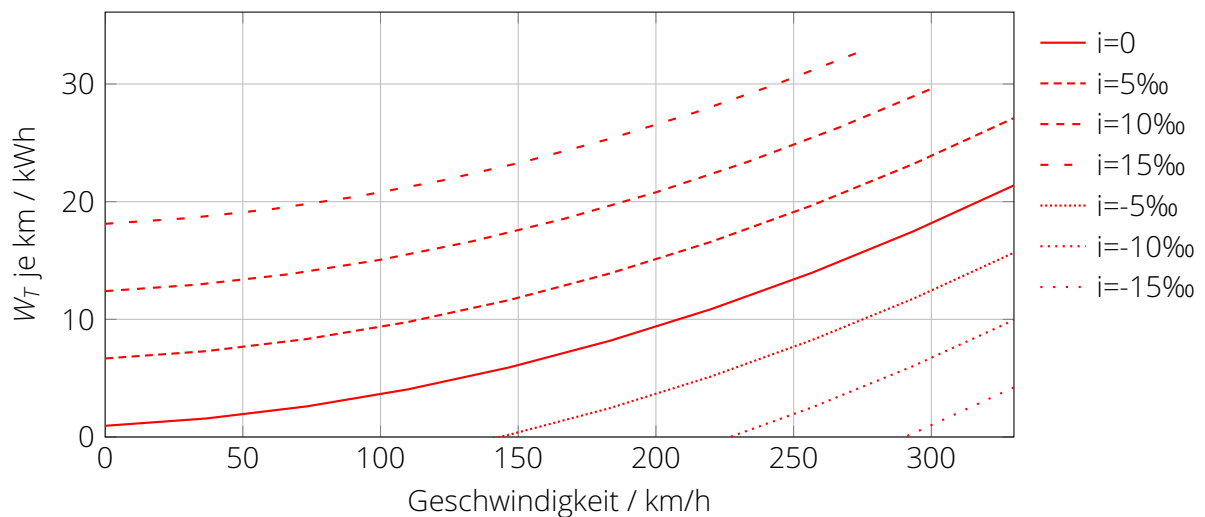


Abbildung 11.4: Energieumsatz an den Treibrädern zur Überwindung der Fahrwiderstände je in Beharrung zurückgelegtem Kilometer Fahrstrecke für den Beispiel-Hochgeschwindigkeitszug

Wie aus Abbildung 11.4 hervorgeht, müssen im Falle des Hochgeschwindigkeitszuges ca. 9 kWh/km an den Treibrädern aufzubringen, um dessen Geschwindigkeit in der Ebene konstant bei 200 km/h zu halten. Fährt der Zug stattdessen mit 300 km/h in Beharrung, wird mit 18 kWh etwa die doppelte Energie pro km an den Treibrädern umgesetzt.

Fahrzeugauslauf

Im Fahrzeugauslauf wird an den Treibrädern keine Arbeit umgesetzt. Der Energiebedarf in dieser Phase der Zugfahrt setzt sich aus dem Komfort- und Hilfsenergiebedarf sowie dem Leerlauf-Energiebedarf des Antriebsstranges zusammen. Wird lediglich die Bilanz an den Treibrädern betrachtet, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Delta E_{\text{kin}} = -W_{WF} - \Delta E_{\text{pot}}. \quad (11.7)$$

Im Falle einer starken Abnahme der potentiellen Energie (starkes Gefälle) kann es damit auch im Fahrzeugauslauf zu einer Zunahme der kinetischen Energie des Fahrzeuges oder Zuges kommen.

Aufgrund der geringen spezifischen Fahrzeugwiderstandskräfte in Verbindung mit den vergleichsweise großen Massenträgheiten weisen Eisenbahnfahrzeuge bzw. Züge sehr große Auslaufwege auf (siehe Tabelle 11.2). Daraus ergibt sich ein großes Energieeinsparpotential, da der Fahrzeitverlust bei Ausnutzung des Fahrzeugauslaufes insbesondere bei Auslaufvorgängen im (relativ zum Geschwindigkeitsspektrum der betrachteten Züge) oberen Geschwindigkeitsbereich relativ gering ist.

Tabelle 11.2: Auslaufwege (rechnerisch) für einen exemplarischen Hochgeschwindigkeitszug und einen gemischten Güterzug (1600 t) auf geradem, ebenem Gleis

Hochgeschwindigkeitszug			Güterzug		
Auslauf- anfangs- geschwin- digkeit	Auslaufend- geschwin- digkeit	Auslaufweg	Auslauf- anfangs- geschwin- digkeit	Auslaufend- geschwin- digkeit	Auslaufweg
300 km/h	250 km/h	8400 m	120 km/h	100 km/h	3200 m
250 km/h	200 km/h	9500 m	100 km/h	80 km/h	3400 m
200 km/h	160 km/h	8620 m	80 km/h	60 km/h	3500 m

In Tabelle 11.2 fällt, insbesondere bei den Auslaufwegen des Güterzuges, zunächst auf, dass die Auslaufwege mit *abnehmenden* Geschwindigkeitsniveau *zunehmen*, was auf den ersten Blick paradox anmuten mag. Es gilt allerdings, im Blick zu behalten, dass bei hohen Geschwindigkeiten auch die größten Fahrzeugwiderstandskräfte und damit die höchsten Auslaufverzögerungen wirksam sind. Der Auslaufweg ist sowohl von der kinetischen Energie des Zuges bei Beginn des Auslaufes als auch den im Geschwindigkeitsintervall des Auslaufes im Mittel wirkenden Fahrzeugwiderstandskräften abhängig.

Der Geschwindigkeitsbereich, in dem für gleiche Geschwindigkeitsintervalle der größte Auslaufweg erzielt wird, befindet sich deshalb eher in der Mitte des zugspezifischen Geschwindigkeitsspektrums, wie Abbildung 11.5 zeigt. Dort wurde für den in bereits in Tabelle 11.2 betrachteten Güterzug eine Berechnung der Auslaufwege aus diskreten Auslaufanfangsgeschwindigkeiten bis zum Absinken der Geschwindigkeit um jeweils 10 km/h berechnet. Wie gezeigt wird, entstehen in diesem Beispielfall die größten Auslaufwege im Bereich zwischen 60 und 90 km/h. In diesem Geschwindigkeitsbereich ist die kinetische Energie des Zuges noch relativ hoch, während die Fahrzeugwiderstandskräfte im Vergleich zur Fahrt mit 120 km/h schon soweit abgenommen haben, dass sich der als Energiespeicher betrachtete Zug vergleichsweise langsam über die Fahrzeugwiderstandskräfte entlädt.

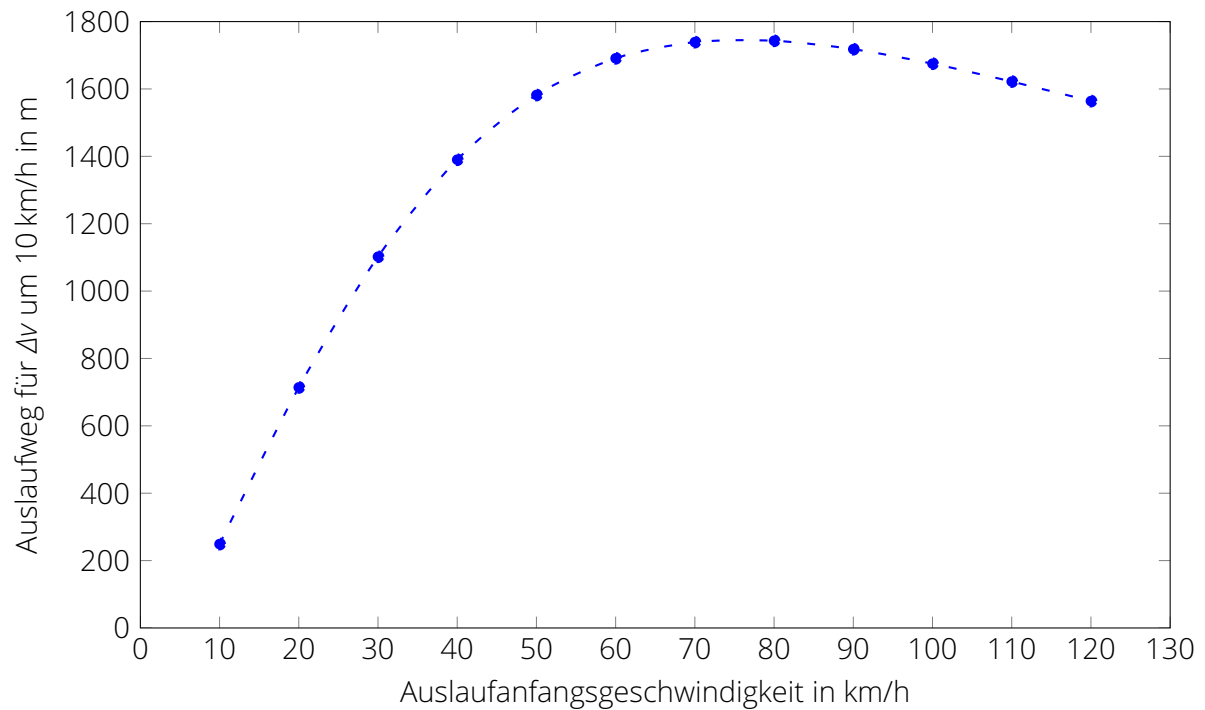


Abbildung 11.5: Auslaufwege eines exemplarischen gemischten Güterzuges ($m_Z = 1688 \text{ t}$) auf geradem, ebenem Gleis für eine Geschwindigkeitsdifferenz im Auslauf von jeweils 10 km/h

Bremung

Bei Bremsvorgängen wird die kinetische Energie der Fahrzeuge komplett in andere Energieformen überführt. Je nachdem, ob ein Haltepunkt in oder am Ende eines Gefälles oder einer Steigung liegt, muss außerdem ggf. auch noch ein Teil der potentiellen Energie gewandelt werden. Der generelle Zusammenhang stellt sich in Bezug auf die Treibräder wie folgt dar:

$$W_T = -W_B - W_{WF} - \Delta E_{\text{kin}} - \Delta E_{\text{pot}}. \quad (11.8)$$

Mit W_B ist in dieser Gleichung die mechanische Arbeit gemeint, die von den nicht-regenerativen Bremsen verrichtet wird, während W_T in diesem Fall für die von den ggf. vorhandenen elektrodynamischen Bremsen verrichtete Arbeit, bezogen auf den Treibradumfang steht.

Bei allen Fahrzeugen, bei denen es sich nicht um rückspeisefähige³ elektrische Triebfahrzeuge handelt, gilt deshalb für Bremsungen der folgende Zusammenhang:

$$W_B = -W_{WF} - \Delta E_{\text{kin}} - \Delta E_{\text{pot}}. \quad (11.9)$$

Die Frage, ob und wieviel Energie während der Bremsungen gewandelt wird, lässt sich nur unter Berücksichtigung komplexer Randbedingungen angeben, von denen das Bremsregime, die Leistungsfähigkeit der elektrodynamischen Bremsen sowie die Aufnahmefähigkeit des elektrischen Netzes, an dem die Triebfahrzeuge betrieben werden, die wichtigsten sind.

³In Deutschland gelten elektrische Fahrzeuge mit Drehstromantriebstechnik in der Regel als rückspeisefähig.

Zusammenfassung

Zusammenfassend soll ein exemplarisches Fahrspiel eines Nahverkehrstriebzuges auf einem etwa 15 km langen Streckenabschnitt analysiert werden. Abbildung 11.6 zeigt das simulierte Fahrspiel des Zuges (Abbildung 11.6a), ergänzt um den Verlauf der Streckenlängsneigung (Abbildung 11.6b) sowie die summierte Arbeit an den Treibrädern (Abbildung 11.6c).

Insgesamt beläuft sich die während des Fahrspiels verrichtete Treibradarbeit auf 87,8 kWh (316 MJ). Etwa 50 % der Treibradarbeit muss während der drei Beschleunigungsphasen aufgebracht werden. Die andere Hälfte der Treibradarbeit wird benötigt, um die Geschwindigkeit des Zuges in wechselnden Neigungen konstant zu halten. Die Streckenlängsneigung selbst fällt im gewählten Beispiel vergleichsweise moderat aus - es handelt sich um eine Strecke im Flachland.

Trotzdem gibt es zwischen 95 und 116 s einen kurzen Fahrtabschnitt, in dem ein Gefälle von 5 ‰ genügt, um die Geschwindigkeit konstant zu halten, sodass keine weitere Energie zugeführt werden muss.

Ansonsten ist der Energieumsatz in den Beharrungsabschnitten in erster Linie vom Streckenwiderstand abhängig, sodass sich ein Neigungswechsel unmittelbar in der Veränderung des Gradienten des zeitlichen Verlaufes der kumulierten Treibradarbeit niederschlägt. Dies lässt sich im Beispiel besonders gut zwischen der 120. und der 190. Sekunde der Fahrt nachvollziehen.

Am Ende des Fahrspiels ist ein 46 s langer Auslaufabschnitt zu finden, während dessen der Energieumsatz an den Treibrädern ebenso wie während der nachfolgenden Bremsung stagniert. Wird das Fahrspiel ohne diesen Auslaufabschnitt modelliert, vergrößert sich die summierte Treibradarbeit um 7,5 % auf 94,4 kWh (339,8 MJ).

Die von den Bremsen zu wandelnde Energie beträgt unter Berücksichtigung des durch die Fahrzeugwiderstände dissipierten Anteil 28,7 kWh (103 MJ) und somit etwa 33 % des Gesamtenergieumsatzes an den Treibrädern.

Das große Einsparpotential, das durch die Nutzung des Fahrzeugauslaufes sowie regenerativer Bremsen erschlossen werden kann, wird durch oben stehende Erläuterungen deutlich.

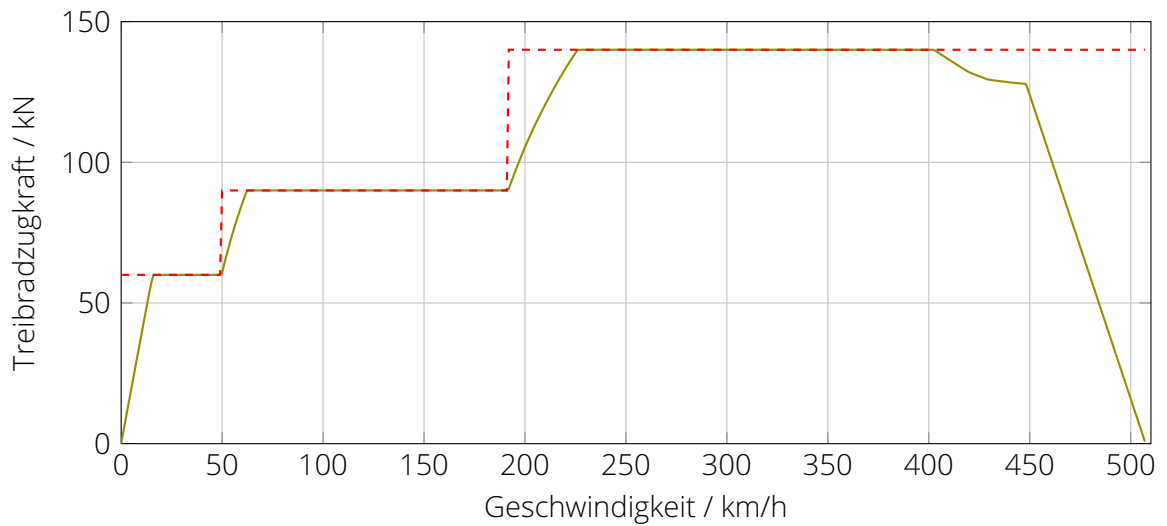
Der tatsächliche Traktionsenergiebedarf ist vom Wirkungsgrad des Antriebsstranges abhängig. Dieser ist nicht konstant, sondern in der Regel von der Drehzahl und dem Drehmoment bzw. der Geschwindigkeit und der Zugkraft abhängig. Aus fahrdynamischer Sicht stellt der mit Hilfe der Energiebilanz an den Treibrädern ermittelte Energiebedarf den Mindestbedarf für eine Zugfahrt dar, der sich unabhängig von der Antriebskonfiguration ergibt. Gleichwohl verbleibt auch bei bloßer Betrachtung der Treibradarbeit ein gewisser Spielraum, wie der Energiebedarf einer Zugfahrt beeinflusst werden kann.

Die relevanten Einflussfaktoren sind die Fahrzeugmasse, die Fahrzeugwiderstandskräfte und die Fahrstrategie.

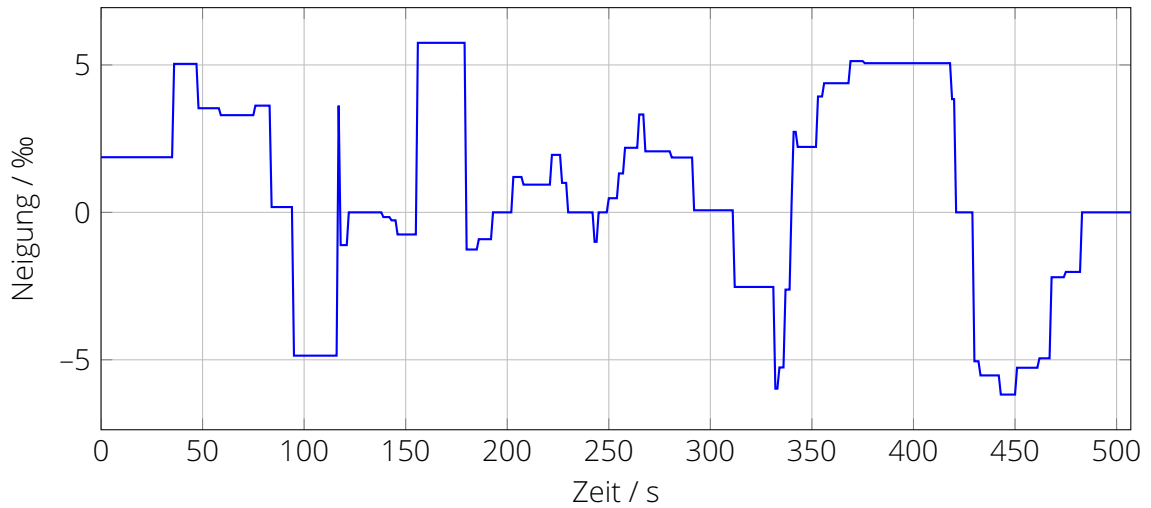
Gelingt es, die Fahrzeugmasse zu reduzieren, verringert sich die bei jedem Beschleunigungsvorgang auf das Fahrzeug zu übertragende kinetische Energie. Im betrachteten Beispiel würde die Reduzierung der Fahrzeugmasse um 3 t (entspricht ca. 1,8 % der Fahrzeugmasse) zu einer Reduzierung der Treibradarbeit um 0,6 kWh für das gezeigte Fahrspiel führen. Unter der Annahme, dass das Fahrzeug dieses Fahrspiel zehn mal am Tag absolviert und an 300 Tagen im Jahr auf der betrachteten Strecke im Einsatz ist, ergibt sich eine jährliche Einsparung von 1800 kWh (6,48 GJ) pro Fahrzeug.

Ein ähnlicher Effekt ließe sich auch durch die Reduzierung des Fahrzeug-Grundwiderstandes um 7 % erzielen. Die Verringerung des Luftwiderstandes um denselben Betrag würde den Energieumsatz an den Treibrädern im betrachteten Fahrspiel sogar um 2,1 kWh (7,56 MJ) verringern.

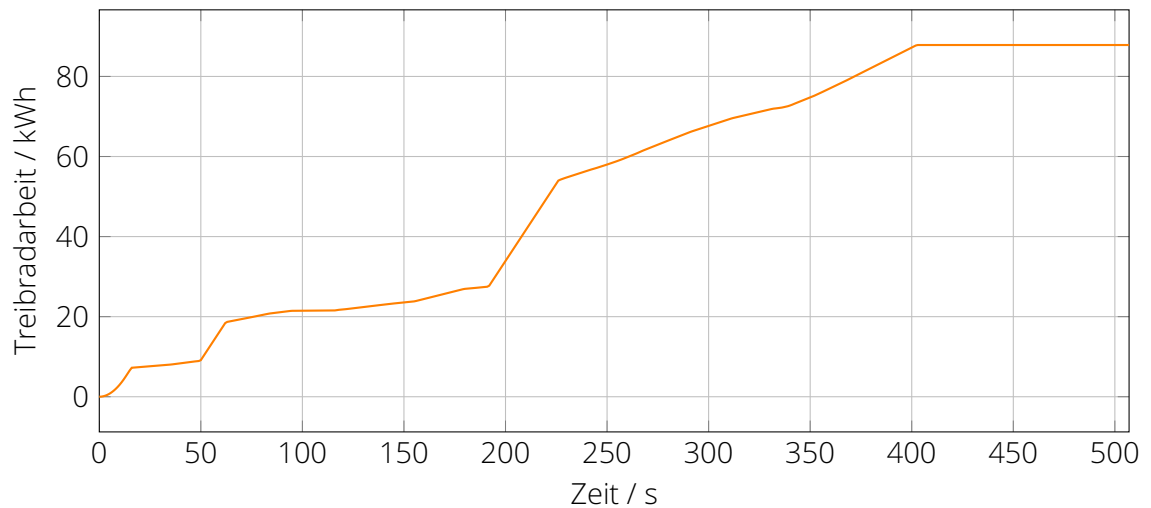
Der Einfluss der Fahrstrategie auf die kumulierte Treibradarbeit spiegelt sich vor allem in der Vermeidung zu langer Beharrungsfahrten und der Ausnutzung des Fahrzeugauslaufes wider, wann immer der Fahrplan dies ermöglicht.



(a) Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf



(b) Längsneigungen während der Fahrt



(c) Arbeit an den Treibrädern

Abbildung 11.6: Exemplarisches Fahrspiel eines Nahverkehrstriebzuges (170 t) zur Analyse der verrichteten Treibradarbeit

11.3 Triebfahrzeugwirkungsgrad

11.3.1 Von der Treibradarbeit zur Traktionsenergie

Im vorangegangenen Abschnitt wurde ausführlich auf die energetische Bilanzierung an den Treibradsätzen eingegangen, die die Grundlage für die Bestimmung der tatsächlich erforderlichen Traktionsenergie darstellt. Das entscheidende Bindeglied zwischen dem Energieumsatz an den Treibrädern W_T und dem Traktionsenergiebedarf W_{Traktion} ist der **Triebfahrzeugwirkungsgrad** (siehe Gleichung 11.10).

$$\eta_{\text{Tfz}} = \frac{W_T}{W_{\text{Traktion}}} \quad (11.10)$$

Der Triebfahrzeugwirkungsgrad ist ferner das Produkt der Wirkungsgrade aller Elemente, die im Leistungsfluss zwischen dem Kraftstofftank oder der Oberleitung und den Treibrädern liegen.

$$\eta_{\text{Tfz}} = \prod \eta_i \quad (11.11)$$

Die Wirkungsgrade welcher Elemente konkret in Gleichung 11.11 zu berücksichtigen sind, hängt von der jeweiligen Antriebskonfiguration ab, wie Abbildung 11.7 illustriert.

Die Wirkungsgrade der Antriebsstrangelemente sind nicht konstant, sondern sie hängen vielmehr typischerweise von der Drehzahl und dem Drehmoment ab, sodass sich für das Gesamtfahrzeug eine Abhängigkeit des Triebfahrzeugwirkungsgrades von der Geschwindigkeit und der Zugkraft ergibt.

In Ergänzung zu Abbildung 11.7 enthält Tabelle 11.3 typische Wirkungsgrade der Antriebskomponenten von Triebfahrzeugen mit (diesel)elektrischen und dieselhydraulischen Antriebssträngen. Es ist in der untersten Zeile von Tabelle 11.3 ersichtlich, dass Dieseltriebfahrzeuge einen deutlich geringeren Triebfahrzeugwirkungsgrad aufweisen als elektrische Triebfahrzeuge⁴.

Tabelle 11.3: Typische Wirkungsgrade von Antriebskomponenten und Antriebskonfigurationen von Triebfahrzeugen

E-Tfz		DE-Tfz		DH-Tfz	
Baugruppe	η	Baugruppe	η	Baugruppe	η
Transformatormotor	0,92...0,95	Dieselmotor	0,38...0,44	Dieselmotor	0,38...0,44
		Traktionsgenerator	0,94...0,96	Strömungsgeltriebe	0,82...0,85
Leistungselektronik	0,96...0,98	Leistungselektronik	0,96...0,98	Gelenkwellen	0,98...0,99
Fahrmotoren	0,92...0,94	Fahrmotoren	0,92...0,94		
Radsatzantrieb	0,96...0,98	Radsatzantrieb	0,96...0,98	Radsatzgeltriebe	0,96...0,98
$\eta_{\text{Tfz,max}} \approx 0,80$		$\eta_{\text{Tfz,max}} \approx 0,34$		$\eta_{\text{Tfz,max}} \approx 0,32$	

Der Wirkungsgrad von Dieselmotoren lässt sich mit Hilfe der folgenden zugeschnittenen Größengleichung ganz einfach aus dem spezifischen Dieselkraftstoffverbrauch b_{DK} ableiten, der den

⁴Bei der Betrachtung auf Fahrzeugebene muss das selbstverständlich so sein. Wird jedoch der Blick erweitert und werden die Ketten der Energiebereitstellung in die Betrachtung mit einbezogen, so relativiert sich die Energiebilanz von elektrischen Triebfahrzeugen, sofern die Elektrizität nicht aus regenerativen Energiequellen gewonnen wird.

Dieselmotorkennfeldern entnommen werden kann:

$$\eta_{DM} = \frac{3600 \text{ kJ/kWh}}{b_{DK} \cdot 42800 \text{ kJ/kg}} \quad (11.12)$$

Dieselmotoren, die in Triebfahrzeugen zum Einsatz kommen, weisen im günstigsten Betriebspunkt typischerweise spezifische Verbräuche zwischen 0,188 und 0,200 kg/kWh auf. Dies entspricht gemäß Gleichung 11.12 einem maximalen Dieselmotorwirkungsgrad von 45 bis 42 %. Im Rahmen fahrdynamischer Betrachtungen und Simulationen ist es erstrebenswert, mit Triebfahrzeug-Kennlinienfeldern (Abschnitt 11.3.2) oder mit Triebfahrzeug-Leistungs- und Verbrauchstafeln (TLV-Tafeln, Kapitel 11.3.3) zu arbeiten.

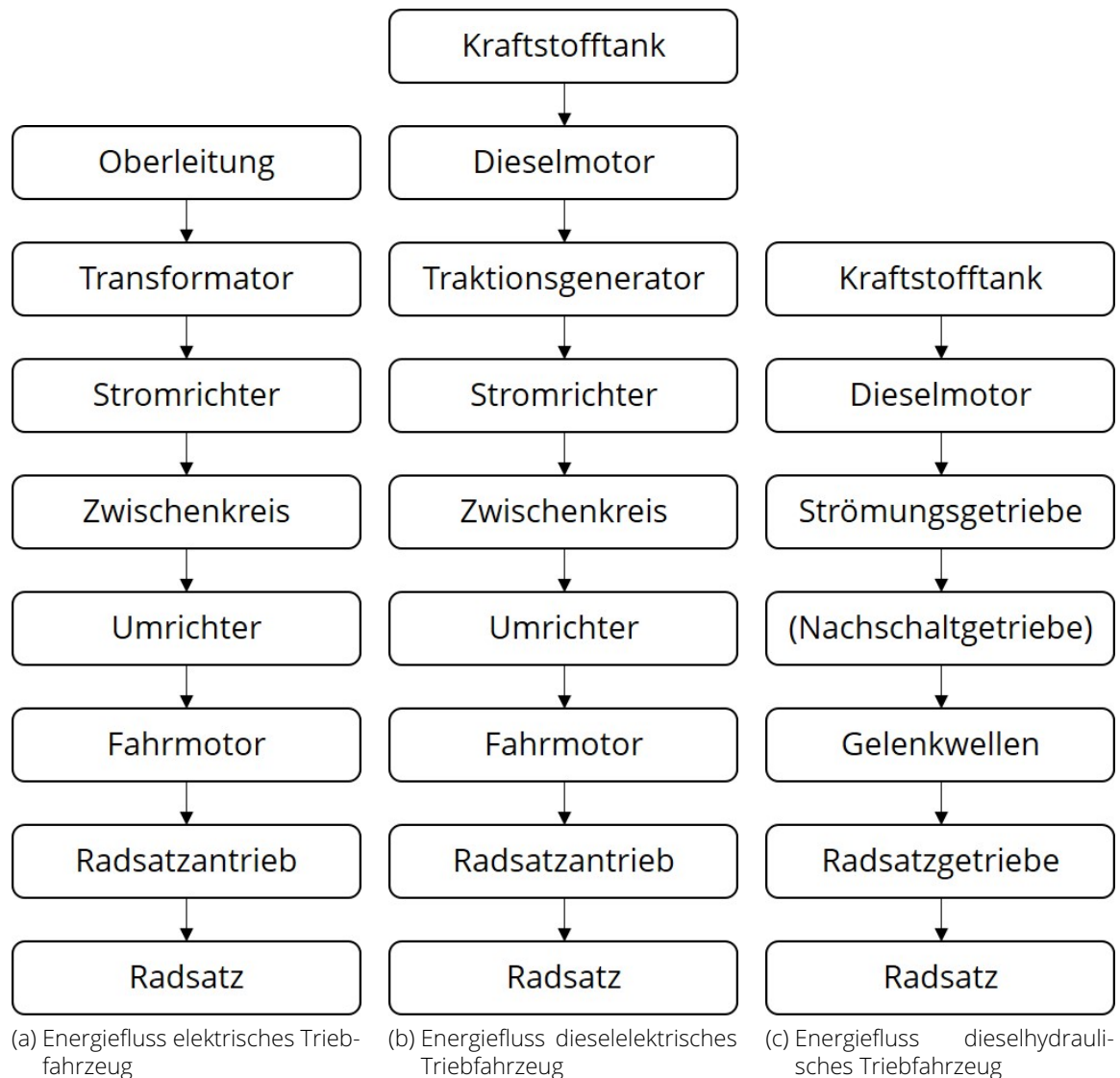


Abbildung 11.7: Energieflüsse bei drei typischen Triebfahrzeug-Antriebskonfigurationen

11.3.2 Triebfahrzeug-Kennlinienfelder

Bei Triebfahrzeug-Kennlinienfeldern handelt es sich grundlegend um Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramme, die um eine Dimension erweitert wurden, damit auch das energetische Verhalten der Triebfahrzeuge beschrieben werden kann. Die Art und Weise, wie dies geschieht, ist recht vielfältig; folgende Varianten werden dabei genutzt:

- Angabe des Triebfahrzeug-Wirkungsgrades (Diesel und elektrische Triebfahrzeuge),
- Angabe des Leistungsbezuges ab Oberleitung (elektrische Triebfahrzeuge),
- Angabe des wegspezifischen Energiebezuges ab Oberleitung (Einheit: kWh/km, elektrische Triebfahrzeuge),
- Angabe des zeitspezifischen Dieselmotorkraftstoffverbrauches (Einheit: kg/h),
- Angabe des wegspezifischen Dieselmotorkraftstoffverbrauches (Einheit: kg/km).

Häufig sind mehrere der genannten Varianten gleichzeitig in einem Diagramm angegeben, was die Darstellungen auf den ersten Blick überladen und unübersichtlich wirken lässt.

Um ein Triebfahrzeug-Kennlinienfeld zu erstellen, muss das energetische Verhalten des gesamten Antriebstranges im gesamten Zugkraft- und Geschwindigkeitsspektrum bekannt sein. Insbesondere die Beschreibung des Teillastverhaltens kann dabei eine große Herausforderung sein, weil es die Vermessung der am Leistungsfluss beteiligten Komponenten voraussetzt.

Abbildung 11.9 zeigt beispielhaft das Kennlinienfeld einer elektrischen Lokomotive der Baureihe 143 der Deutschen Bahn (siehe Abbildung 11.8). Es handelt sich um ein Triebfahrzeug mit konventioneller Antriebstechnik, das über eine Nennleistung von 3720 kW (Stundenleistung) verfügt.

Wie aus dem Kennlinienfeld der Lokomotive hervorgeht, bewegt sich der Triebfahrzeugwirkungsgrad in Abhängigkeit von Zugkraftniveau und Geschwindigkeit zwischen 50 und 80 %. Ferner ist der wegbezogene Energiebedarf in einem Wertebereich zwischen 10 kWh/km und 100 kWh/km in dem Kennlinienfeld verzeichnet, sowie die effektive Leistungsaufnahme am Stromabnehmer der Lokomotive.



Abbildung 11.8: Baureihe BR 143 der Deutschen Bahn

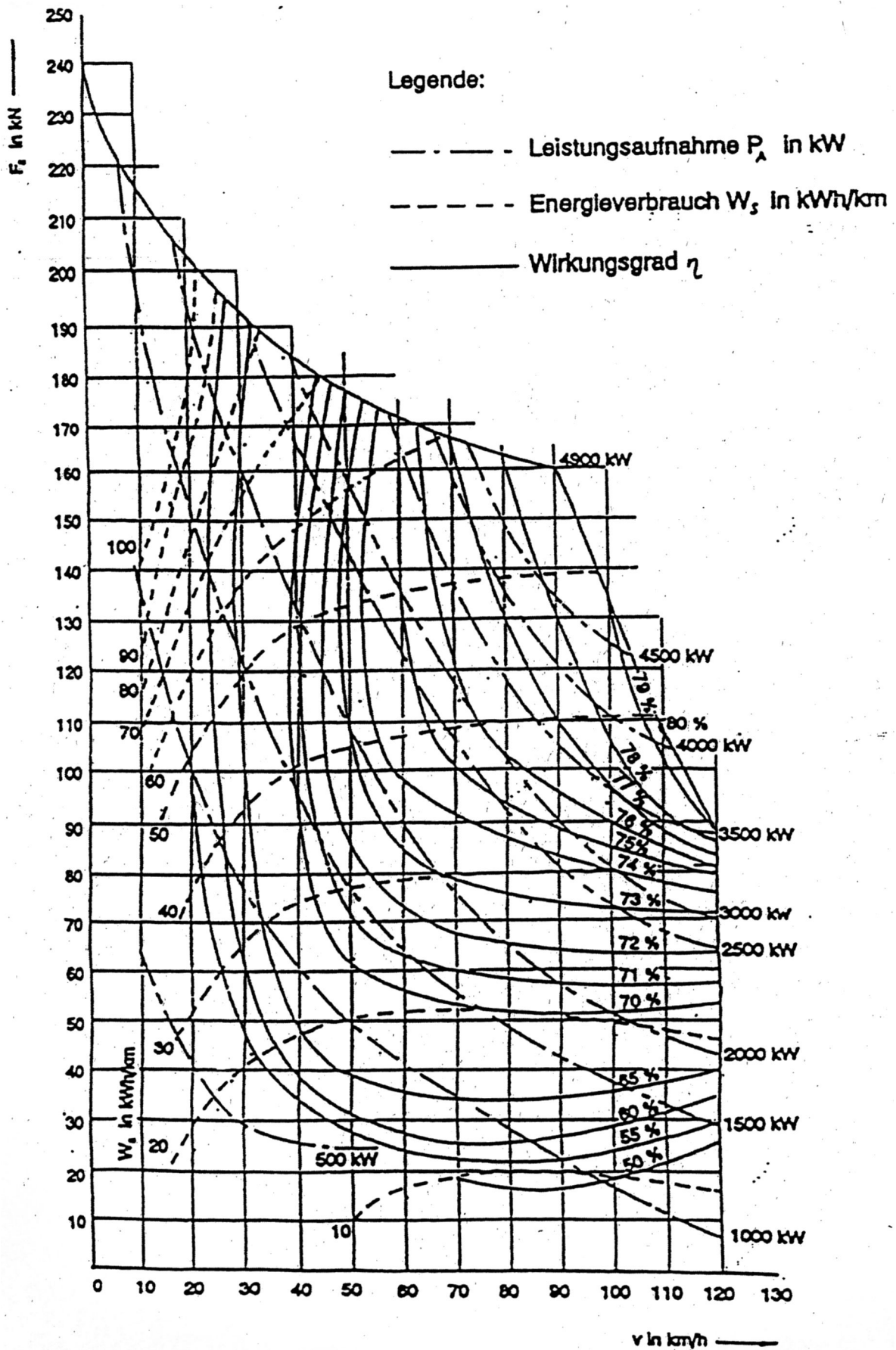


Abbildung 11.9: Kennlinienfeld einer elektrischen Lokomotive BR 143

Die Nutzung solcher Kennlinienfelder für energetische fahrdynamische Berechnungen fusst auf dem folgenden Algorithmus:

1. Geschwindigkeit, Zugart (Fahrzeugwiderstandsgleichung) und Zugmasse müssen bekannt sein.
2. Für beliebige Fahrzustände wird die Kräftebilanz am Zughaken oder an den Treibrädern (Angaben am Kennlinienfeld beachten! Im Falle des Kennlinienfeldes der BR 143 erfolgt eine Bilanzierung am Zughaken.) erstellt.
3. Sind Zugkraftbedarf und Geschwindigkeit bekannt, kann der jeweilige Betriebspunkt in das Kennlinienfeld eingetragen werden.
4. Es ist dann zu prüfen, in der Nähe welcher Linie konstanten energetischen Verhaltens dieser im Kennlinienfeld liegt. Liegt er zwischen zwei Linien kann ggf. eine lineare Interpolation⁵ vorgenommen werden.
5. Wenn das Kennfeld „nur“ Angaben zum Triebfahrzeugwirkungsgrad enthält, muss zunächst die während des betrachteten Zeitraums oder Wegabschnittes verrichtete Arbeit am Zughaken oder den Treibrädern ermittelt werden, damit mit Hilfe des Wirkungsgrades auf den Energiebezug geschlossen werden kann.
6. Wenn das Kennlinienfeld zeit- oder wegbezogene Angaben zum Energiebedarf enthält, ist die Zeitspanne oder Wegstrecke, für die der ermittelte Betriebspunkt ($F_Z; v$) gilt, zu ermitteln und die genannten Angaben mit dem Zeit- oder Wegintervall zu multiplizieren, damit der absolute Energiebezug ermittelt werden kann.
7. Sobald sich der Zugkraftbedarf (Neigungswechsel, Transition von Beschleunigung zu Beharrung) oder die Geschwindigkeit ändert, ist der jeweils neue Betriebspunkt zu bestimmen und im Kennlinienfeld zu verorten.

Es ist ferner möglich, aus dem Kennlinienfeld das energetische Verhalten für spezielle Fragestellungen abzuleiten. Dazu zählt zum Beispiel die Entwicklung des Wirkungsgrades oder der Leistungsaufnahme am Stromabnehmer bei einer Beschleunigung unter Nutzung der maximalen Zugkraft. Abbildung 11.10a zeigt die mittels der Stützpunkte aus dem Kennlinienfeld gewonnene Kurve der Leistungsaufnahme am Stromabnehmer P_A über der Geschwindigkeit bei Ausnutzung der maximalen Zughakenzugkraft. Ergänzend dazu enthält Abbildung 11.10b den Triebfahrzeugwirkungsgrad, wie er sich gemäß des Kennlinienfeldes entlang der maximalen Zugkraft ergibt.

Unter Einbeziehung dieser aus dem Kennlinienfeld extrahierten Kennlinien wurde eine Simulationsrechnung durchgeführt, deren Ergebnisse die Abbildung 11.11 zeigt. Es wurde die Beschleunigung einer Lokomotive der BR 143 mit einem Doppelstockwagenzug, bestehend aus 3 Wagen und einem Steuerwagen (Wagenzugmasse: 225 t), in der Ebene von 0 auf 120 km/h simuliert.

Wie aus Abbildung 11.11a hervorgeht, ist der Beschleunigungsvorgang nach etwa 1300 m abgeschlossen. Der in Abbildung 11.11b dargestellte Verlauf der Beschleunigung über dem zurückgelegten Weg dient vor allem der Überprüfung der kinematischen Plausibilität der Ergebnisse. Dass ein solcher Zugverband im unteren Geschwindigkeitsbereich Beschleunigungen zwischen $0,7$ und $0,5 \text{ m/s}^2$ erreicht, ist realistisch, sodass davon ausgegangen werden kann, dass bei der fahrdynamischen Simulationen keine groben Fehler bei der Parametrisierung unterlaufen sind.

⁵Obwohl davon auszugehen ist, dass die Übergänge zwischen den einzelnen Linien konstanten energetischen Verhaltens in der Regel nicht linear sind, ist bei einer hohen Auflösung des Kennlinienfeldes eine lineare Interpolation meistens vollkommen ausreichend.

Die Beschleunigungszeit beträgt insgesamt ca. 71 s, wobei davon ausgegangen werden muss, dass in der Realität etwas mehr Zeit benötigt wird, weil der Anfahrprozess (allmähliche Steigerung der Zugkraft bis zum Maximalwert) nicht in der Simulation abgebildet wurde.

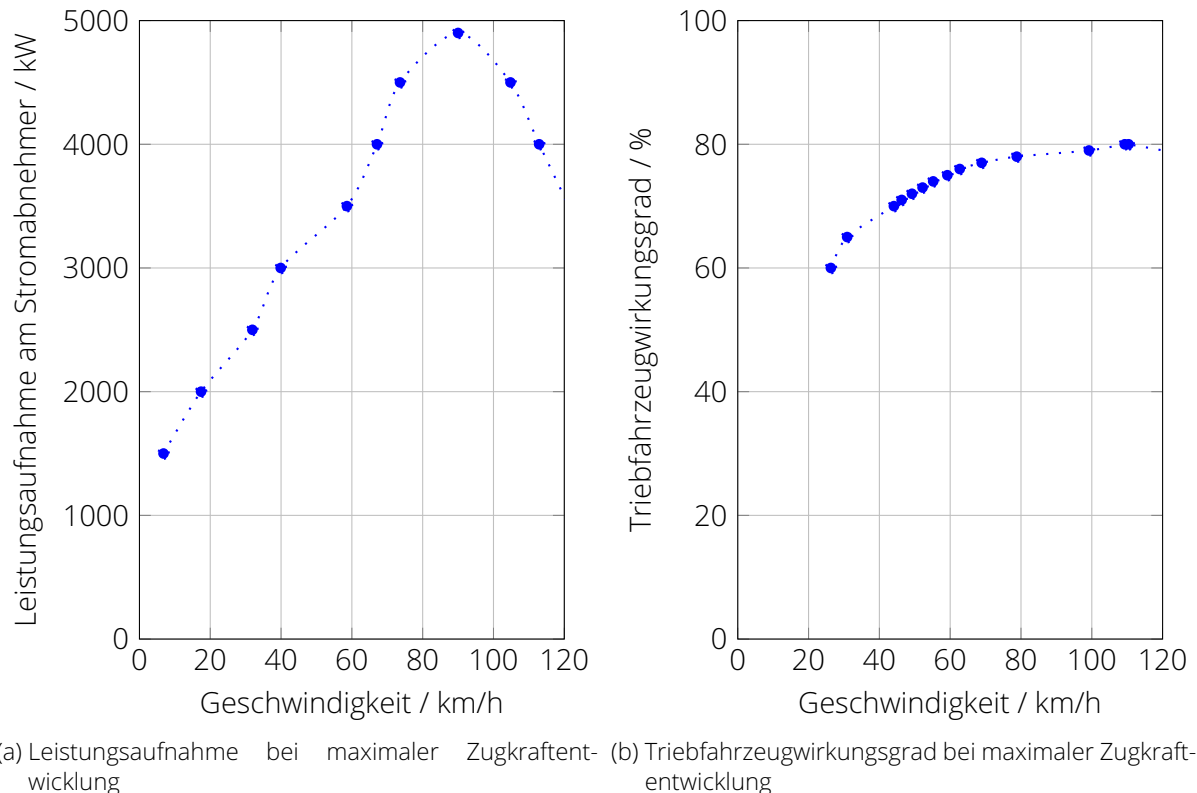


Abbildung 11.10: Aus dem Kennlinienfeld abgeleitete Kurven für den Fall maximaler Zugkraftentwicklung

Von großem Interesse sind natürlich die Simulationsergebnisse bezüglich des Energieumsatzes. Wie aus Abbildung 11.11c hervorgeht, hat der betrachtete Zugverband am Ende des Beschleunigungsvorganges eine kinetische Energie von ca. 51,3 kWh erreicht. Um dies zu erreichen, muss am Zughaken der Lokomotive⁶ eine Arbeit W_Z von 53,4 kWh verrichtet werden. Der durch den Wagenzugwiderstand hervorgerufene zusätzliche Energiebedarf am Zughaken beläuft sich also auf ca. 2,1 kWh⁷.

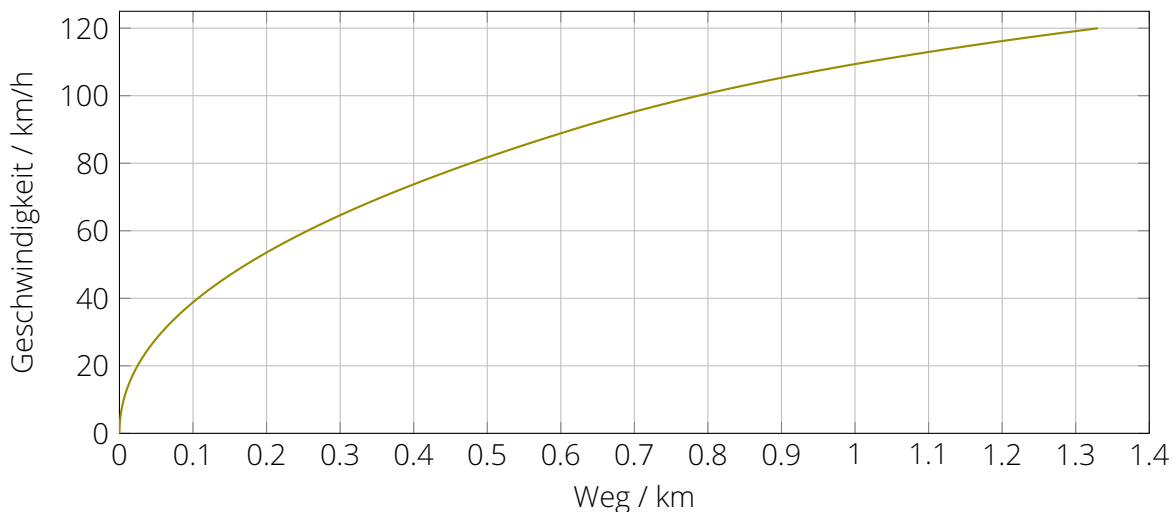
Mit Hilfe der in Abbildung 11.11c abgebildeten Kurven konnte schließlich ein effektiver Energiebedarf ab Oberleitung von 70,7 kWh (Kurve „ $W_{ges}(P_A)$ “ in Abbildung 11.11c) bzw. 67,6 kWh (Kurve „ $W_{ges}(\eta_{TFZ})$ “ in Abbildung 11.11c) ermittelt werden.

Eine Abweichung sollte hier nicht auftreten, da der Weg über die Leistungsaufnahme dem Ansatz der Nutzung des Triebfahrzeugwirkungsgrades äquivalent sein sollte. Die Ursache für die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen ist in der Datenqualität zu suchen.

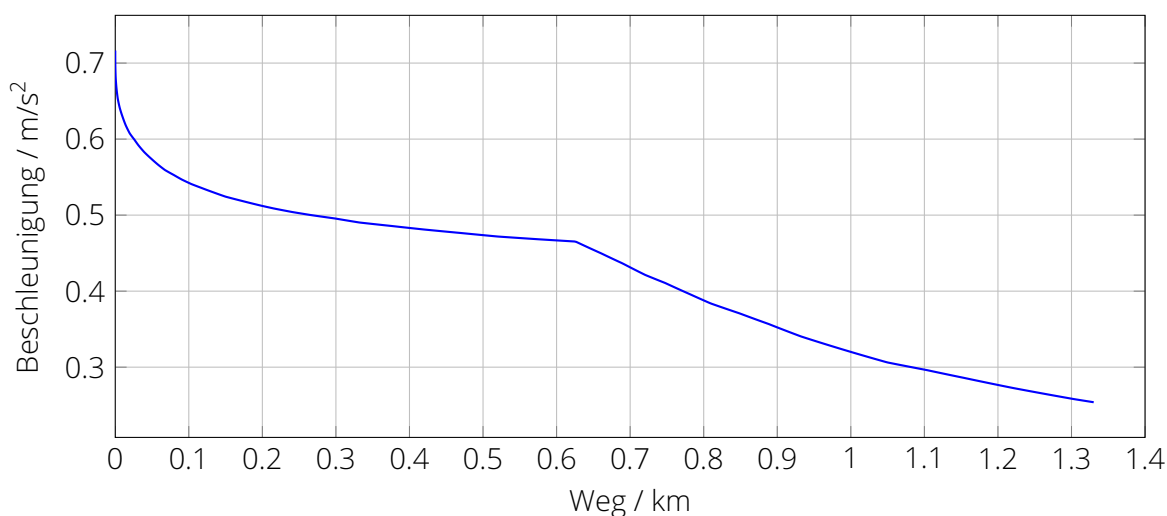
Bei dem betrachteten Beschleunigungsvorgang bewegt sich der Zug während 70% der Beschleunigungszeit in einem Geschwindigkeitsbereich $40 < v \leq 120$ km/h. In dem genannten Geschwindigkeitsintervall werden zudem etwa 88% der mechanischen Arbeit am Zughaken verrichtet. (Fortsetzung auf Seite 25)

⁶Zur Erinnerung: die Bilanzierung erfolgt in diesem Beispiel am Zughaken und nicht an den Treibrädern, weil sich das Triebfahrzeug-Kennlinienfeld auf die Zughakenzugkraft bezieht.

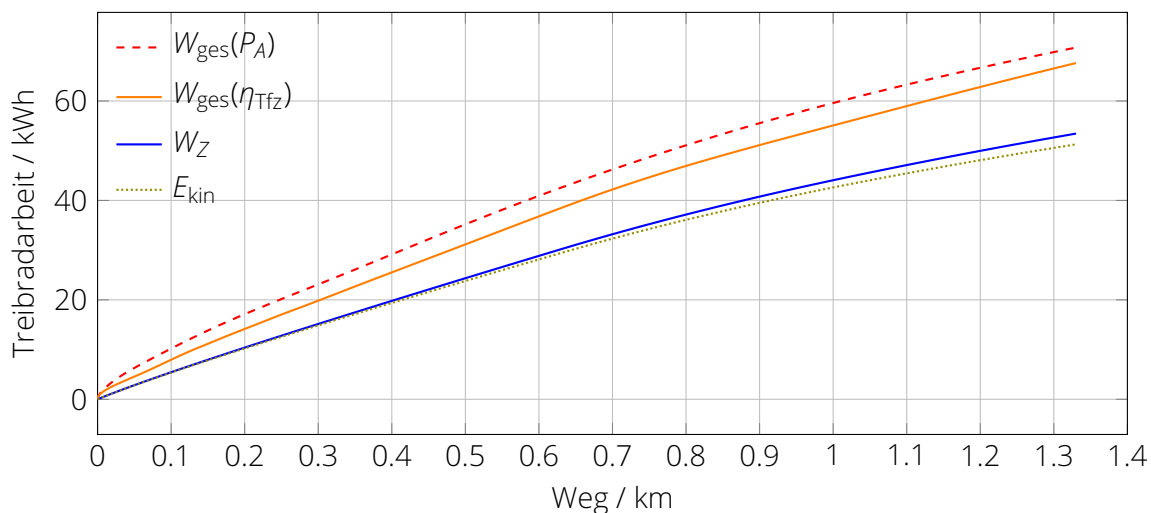
⁷Eine Prüfung auf Plausibilität ist hier über eine Rückrechnung möglich. 2,1 kWh entsprechen 7560 kWs = 7560 kJ = 7560 kNm. Wird dieser Wert durch den zurückgelegten Weg (1300 m) dividiert, ergibt sich die mittlere, während des Beschleunigungsvorganges wirksame, Wagenzugwiderstandskraft von 5800 N - bei modernen Fahrzeugen ein plausibler Wert.



(a) Geschwindigkeits-Weg-Verlauf



(b) Beschleunigungs-Weg-Verlauf



(c) Arbeit und Energie

Abbildung 11.11: Simulierte Beschleunigung einer Lokomotive BR 143 mit 4 Doppelstockwagen (davon ein Steuerwagen) in der Ebene

Bei der Betrachtung von Abbildung 11.10 wird deutlich, dass zwischen 40 und 120 km/h für den Verlauf der Leistungsaufnahme am Stromabnehmer lediglich sieben Stützstellen zur Verfügung stehen, während im Falle des Wirkungsgradverlaufes auf immerhin 13 Stützstellen zurückgegriffen werden kann. Die durch Interpolation zu schließenden Lücken sind somit im ersten Fall deutlich größer. Der Verlauf des Triebfahrzeugwirkungsgrades kann deshalb mit den dem Kennlinienfeld entnommenen Werten mutmaßlich genauer nachgebildet werden, als die Leistungsaufnahme am Stromabnehmer. Deshalb kann dem mit Hilfe des Triebfahrzeugwirkungsgrades ermittelten effektiven Energiebedarf für den Beschleunigungsvorgang wohl eher vertraut werden und es wird deutlich, dass der Qualität der bei fahrdynamischen Simulationen hinterlegten Daten zur energetischen Beschreibung der Antriebsstränge eine große Bedeutung beigemessen werden muss. Bei der Aufbereitung der Daten im Vorfeld einer Simulation sind dementsprechend Genauigkeit und Fleiß gefordert.



Triebfahrzeug-Kennlinienfeld

Triebfahrzeug-Kennlinienfelder sind Zugkraftdiagramme, die um Angaben zum energetischen Verhalten der Triebfahrzeuge in den verschiedenen Zugkraft- und Geschwindigkeitsbereichen ergänzt wurden.

Sie dienen der Bestimmung des Energiebezuges (ab Oberleitung) bzw. Dieselmotorkraftstoffverbrauches von Zugfahrten, indem sie es ermöglichen, vom Energiebedarf an den Treibrädern (oder am Zughaken) auf den Energiebezug unter Berücksichtigung des Triebfahrzeugwirkungsgrades zu schließen.

Mit Hilfe eines Triebfahrzeug-Kennlinienfeldes lässt sich jedem Wertepaar (F_T, v) bzw. (F_Z, v) innerhalb eines Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagrammes ein Kraftstoffverbrauch oder elektrischer Energiebedarf zuordnen.

Im Falle transients Vorgänge (z.B. Beschleunigungsprozesse) muss ein wiederholtes Auslesen des Kennlinienfeldes mit einem sinnvollen Abtastintervall erfolgen.

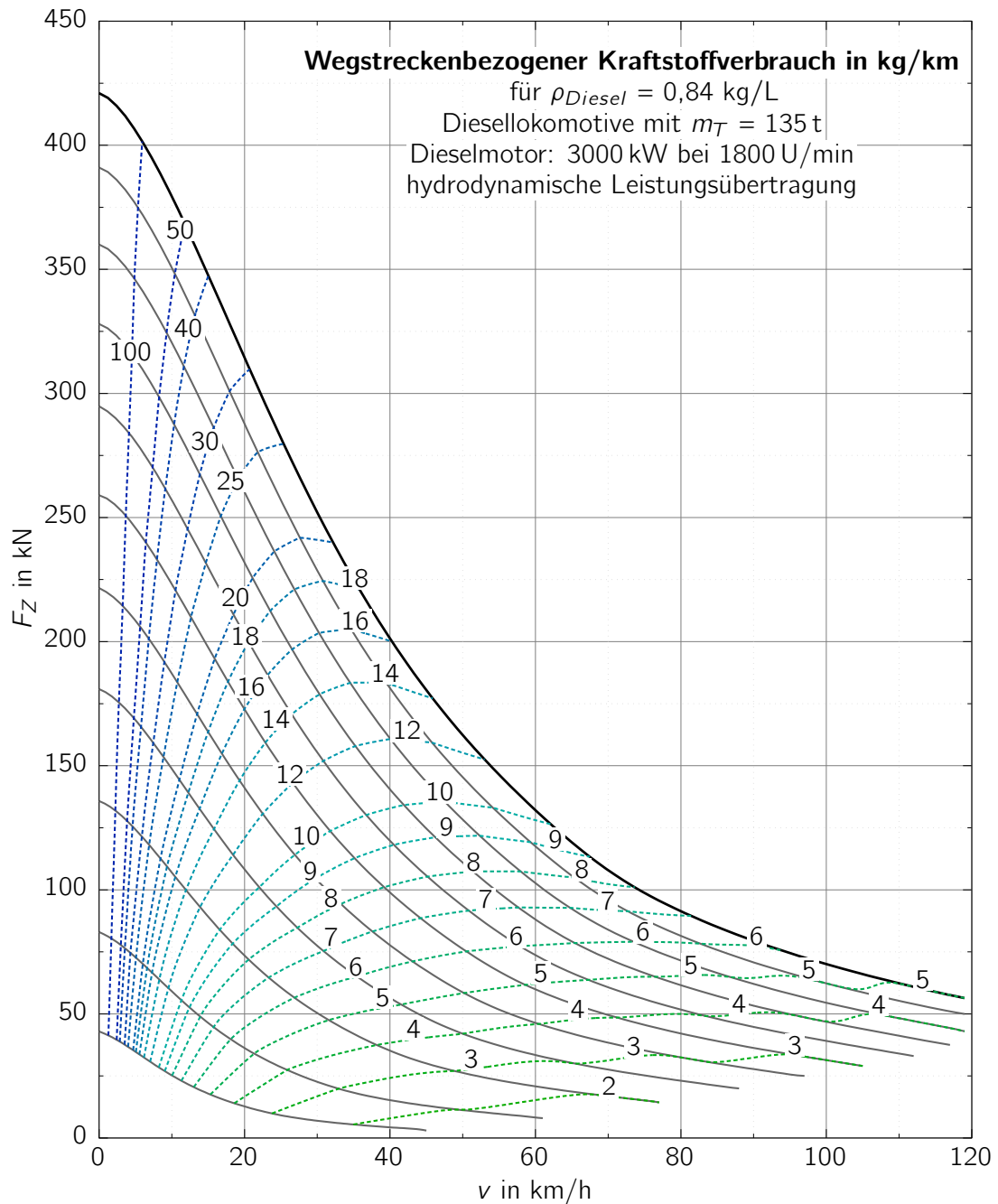


Rechenbeispiel Triebfahrzeug-Kennlinienfeld

Es wird die Fahrt einer Diesellokomotive vor einem Güteranzug betrachtet. Dieser weist eine Wagenzugmasse von 1000 t auf und soll mit 50 km/h in einer Steigung von 12,5 ‰ transportiert werden. Der Streckenabschnitt weist eine Länge von 1160 m auf. Es ist der Kraftstoffbedarf für die Bewältigung dieser Steigung mit Hilfe des unten stehenden Kennlinienfeldes zu ermitteln.

Der spezifische Wagenzugwiderstand des Güterzuges kann mit Hilfe folgender Gleichung angenähert werden:

$$f_{WFW} = 0,0013 + 0,0015 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2.$$



💡 Rechenbeispiel Triebfahrzeug-Kennlinienfeld (Fortsetzung)

Das Kennlinienfeld bezieht sich auf die Zughakenzugkraft. Der Zugkraftbedarf am Zughaken ergibt sich aus der Fahrdynamischen Grundgleichung:

$$0 = -\ddot{x}m\xi_Z + \underbrace{F_T - F_{WFT}}_{F_Z} - F_{WFW} - F_{WS}$$

Für den vorliegenden Spezialfall der Beharrungsfahrt ergibt sich ferner:

$$F_Z = F_{WFW} + F_{WS} = m_W \cdot g \cdot f_{WFW} + m_Z \cdot g \cdot i$$

Für $v=60$ km/h und $i=12,5$ ‰ folgt:

$$\begin{aligned} F_{Z,\text{erf}} &= 1000 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \left[0,0013 + 0,0015 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \right] + 1135 \text{ t} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,0125 \\ &= 1000 \text{ t} \cdot 9,81 \cdot 0,001675 + 139,2 \text{ kN} \\ &= 16,4 \text{ kN} + 139,2 \text{ kN} \\ &= 156 \text{ kN} \end{aligned}$$

Der Betriebspunkt, der einer Fahrt mit 50 km/h in einer Steigung von 12,5 ‰ mit dem Güterganzzug im Kennlinienfeld zugeordnet werden kann, liegt in unmittelbarer Nähe zu dem Kurvenzug, der einen Kraftstoffverbrauch von 12 kg/km markiert. Der Gesamtverbrauch für den betrachteten Streckenabschnitt lässt sich also aus dem Produkt der Streckenabschnittslänge (1,16 km) und dem wegspezifischen Kraftstoffverbrauch errechnen. Er beträgt 13,92 kg (bzw. 16,6 L).

11.3.3 Triebfahrzeug-Leistungs- und Verbrauchstafeln (TLV-Tafeln)

Bei Triebfahrzeug-Leistungs- und Verbrauchstafeln (TLV-Tafeln) handelt es sich um eine alternative Darstellungsart der energetischen Eigenschaften von Triebfahrzeugen. Wie bei den im voranstehenden Abschnitt beschriebenen Kennlinienfeldern erfolgt auch bei der Arbeit mit TLV-Tafeln eine Zuordnung von Zugkraft, Geschwindigkeit und Energiebezug.

Abbildung 11.12 zeigt exemplarisch eine TLV-Tafel für ein Dieseltriebfahrzeug, das mit einer Geschwindigkeit von bis zu 140 km/h verkehren kann.

Der Algorithmus zur Ermittlung des zeitbezogenen Kraftstoff- oder Energiebezugs stellt sich wie folgt dar:

1. Die Geschwindigkeit, bei der der Energiebezug ermittelt werden soll, muss festgelegt werden.
2. Der Zugkraftbedarf bei der gewählten Geschwindigkeit ist mit Hilfe der Fahrdynamischen Grundgleichung zu ermitteln.
3. Auf dem zuvor bestimmten Zugkraftniveau ist eine zur x-Achse parallelverschobene Gerade in die TLV-Tafel einzuzeichnen.
4. Sofern der Zugkraftbedarf von dem betrachteten Fahrzeug erfüllt werden kann, existiert ein Schnittpunkt der Zugkraft-Geraden mit der zutreffenden Geschwindigkeitskurve in der TLV-Tafel. Am gemeinsamen Schnittpunkt ist das Lot auf die x-Achse zu fällen.
5. Der momentante Energie- oder Leistungsbezug kann am Schnittpunkt des Lotes mit der x-Achse abgelesen werden.

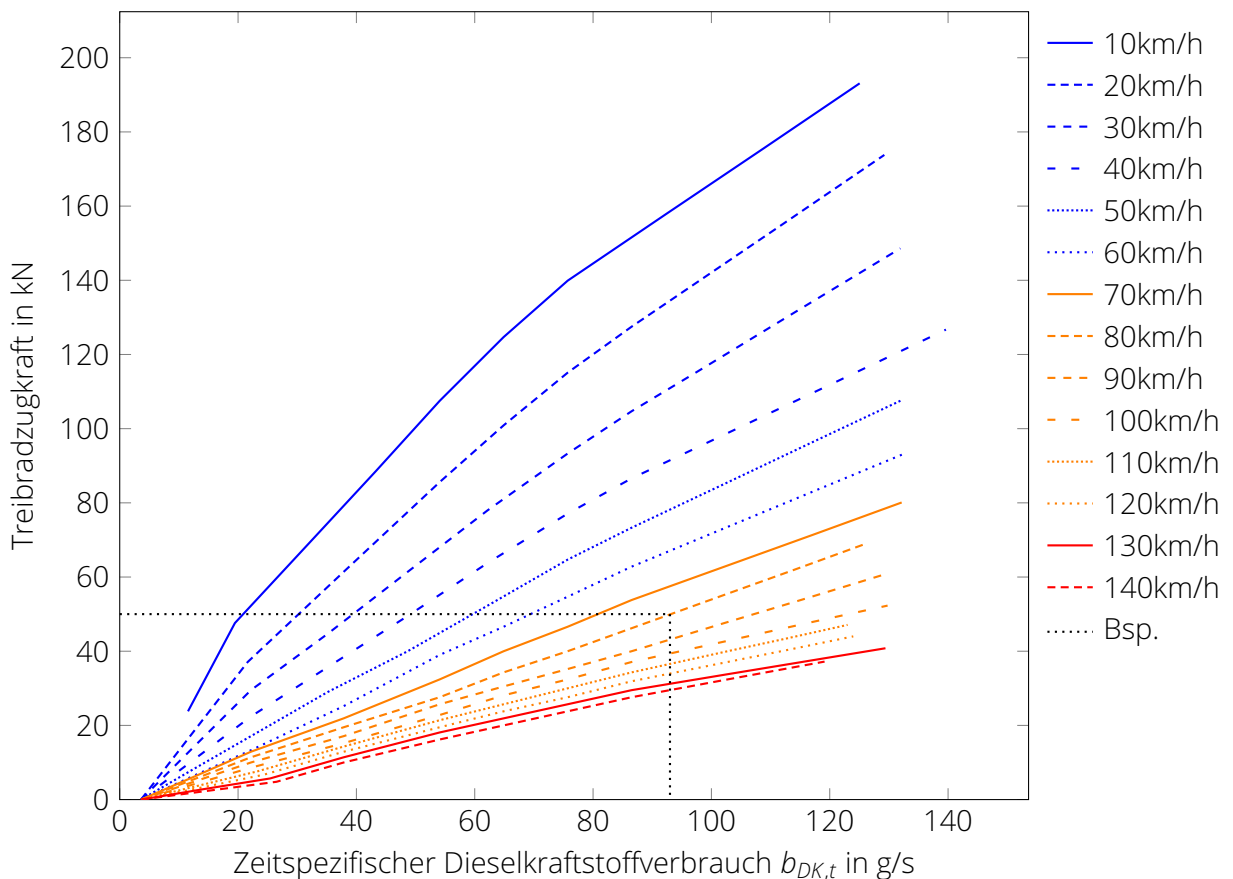


Abbildung 11.12: TLV-Tafel für ein Dieseltriebfahrzeug (exemplarische Darstellung)

In Abbildung 11.12 ist mit den schwarzgepunkteten Geraden ein Beispiel eingezeichnet. Bei diesem soll der Dieselkraftstoffverbrauch bestimmt werden, wenn bei einer Geschwindigkeit von $v=80$ km/h eine Zugkraft von 50 kN erzeugt werden soll.

Der Schnittpunkt von $F_T=\text{const.}=50$ kN mit der 80 km/h-Kurve befindet sich bei $b_{DK,t}=93$ g/s. Der absolute Verbrauch ergibt sich aus dem Produkt des ermittelten zeitspezifischen Kraftstoffverbrauches mit dem Zeitintervall, in dem die Zugkraftanforderung bei der genannten Geschwindigkeit aufrecht erhalten wird.

11.4 Grundzüge des Energiesparenden Fahrens

11.4.1 Randbedingungen

Fahrstil

Die Erfahrung zeigt, dass im täglichen Eisenbahnbetrieb 10-20 % der Energie, die für Traktionszwecke aufgewendet werden muss, von der Fahrweise der Triebfahrzeugpersonale beeinflusst werden kann. Die sinnvolle Nutzung der kinetischen Energie der Fahrzeuge und Züge im Fahrzeugauslauf ist dabei ein wesentliches Element energiesparender Fahrstrategien.

Die Prioritäten der Triebfahrzeugpersonale sind dabei aufgrund der hohen Anforderungen, die bezüglich der Sicherheit und Pünktlichkeit im Eisenbahnverkehr gestellt werden, klar definiert. In erster Linie sind die Bedienhandlungen der Triebfahrzeugführerinnen und Triebfahrzeugführer darauf ausgerichtet, das höchstmögliche Maß an **Sicherheit** bei der Fahrt zu gewährleisten. Wenn dies erreicht ist, steht zunächst die **Pünktlichkeit** der Fahrt im Zentrum der Bemühungen und erst dann, wenn der Fahrplan sicher eingehalten werden kann, kommen Erwägungen zum energiesparenden Fahren ins Spiel.

Der Handlungsspielraum der Triebfahrzeugpersonale besteht im gezielten **Einfügen von Auslaufabschnitten** vor Streckenabschnitten mit verringerter Soll-Geschwindigkeit oder planmäßigen Halten, der geschickten **Ausnutzung der Streckentopographie**, der gewollten **Absenkung der Höchstgeschwindigkeit** sowie dem priorisierten **Einsatz der elektrodynamischen Bremsen**, wo immer dies möglich ist.

Fahrzeit und Fahrplan

Fahrpläne sind in der Regel so konstruiert, dass zunächst berechnet wird, welche **minimale Fahrzeit** ein Fahrzeug oder Zug bei maximaler Ausnutzung des Zugkraftangebotes benötigt. Die so generierten Fahrspiele weisen keine Auslaufabschnitte auf, sondern bestehen nur aus den Phasen Anfahren/Beschleunigen, Beharrung und Bremsung. Fahrten mit minimalem Fahrzeitbedarf werden auch als „**Spitzfahrt**“ bezeichnet. Nun wäre es jedoch fatal, die so berechneten Fahrzeiten als Fahrplanfahrzeit zu übernehmen, weil dann geringste Verzögerungen im Betriebsablauf dazu führen würden, dass das gesamte Fahrplangefüge durcheinander gerät. Es ist deshalb üblich, der Mindestfahrzeit **prozentuale Fahrzeitzuschläge** beizugeben. Diese werden von den Netzbetreibern festgelegt und bewegen sich in der Regel in einem Wertebereich zwischen 3 und 7 %, wobei auch höhere Fahrzeitzuschläge denkbar sind.

Es wird zwischen Fahrzeit-Regelzuschlägen und Fahrzeit-Sonderzuschlägen unterschieden. Erstgenannte werden stets der Mindestfahrzeit zugeschlagen und ihr konkreter Betrag kann von der Zugkategorie⁸ und der Traktionsart (Elektro- vs. Dieseltraktion) abhängen.

Sonderzuschläge werden zum Beispiel immer dann in die Fahrplanfahrzeit eingerechnet, wenn Baustellen auf einer Strecke geplant sind. Diese gehen häufig mit Langsamfahrstellen oder eingleisigem Betrieb einher, sodass es wichtig und sinnvoll ist, kleinere zeitliche Fahrtverzögerungen, die im Zusammenhang mit dem Baugeschehen stehen, von vornherein zu berücksichtigen.

Die Summe der Fahrzeitzuschläge wird als **Fahrzeitreserve** oder auch als **Fahrzeitrückhalt** bezeichnet. Diese kann entweder genutzt werden, um unerwartete Verzögerungen während der Fahrt auszugleichen oder um Strategien der energiesparenden Fahrweise anzuwenden. Generell kann festgehalten werden, dass das Vorhandensein einer Fahrzeitreserve überhaupt erst die Voraussetzung dafür schafft, dass sich für die Triebfahrzeugpersonale die erforderlichen Handlungsspielräume eröffnen um Verspätungen aufzuholen oder Traktionsenergie einzusparen. Es kann ferner grundsätzlich festgehalten werden, dass das Aufholen von Verspätungen und die Einsparung von Traktionsenergie als Zielkonflikt zu verstehen ist, der prak-

⁸z.B. Fernverkehrszug, Nahverkehrszug, Güterzug,...

tisch immer zugunsten der Einhaltung des Fahrplans aufgelöst wird.

Damit lässt sich ein wesentlicher Grundsatz des energiesparenden Fahrens wie folgt zusammenfassen:

Soll Traktionsenergie durch betriebliche Maßnahmen eingespart werden, muss in der Regel eine Verlängerung der Fahrzeit akzeptiert werden. Die Verkürzung der Fahrzeit wird umgekehrt immer mit einem zusätzlichen Energieaufwand erkaufte.

Geschwindigkeit

Die tatsächliche Höchstgeschwindigkeit von Eisenbahnfahrzeugen ist das Minimum der folgenden Höchstgeschwindigkeiten:

- die infrastrukturseitige Höchstgeschwindigkeit (Streckenhöchstgeschwindigkeit),
- die bremstechnische Höchstgeschwindigkeit (Einhaltung sicherer Bremswege),
- die lauftechnische Höchstgeschwindigkeit (Entgleisungssicherheit),
- die fahrdynamische Höchstgeschwindigkeit (Leistungsbegrenzung)

Eine Überschreitung einer dieser Höchstgeschwindigkeiten ist im Eisenbahnbetrieb nicht ohne weiteres möglich, sodass eine temporäre Erhöhung der Geschwindigkeit zum Ausgleich von Verspätungen nicht infrage kommt.

Um sinnvoll einschätzen zu können, welche Auswirkungen die Fahrt mit verminderter Geschwindigkeit auf die Fahrzeit hat, ist es wichtig, sich den zunächst simples Zusammenhang zwischen Fahrzeit Δt und Geschwindigkeit v bei Beharrungsfahrt ins Gedächtnis zu rufen:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v}. \quad (11.13)$$

Wird für Δs in Gleichung 11.13 einen Wert von 1 km ein, so ergibt sich naheliegenderweise die Fahrzeit, die bei einer Beharrungsfahrt mit der Geschwindigkeit v benötigt wird, um eben diese 1 km zurückzulegen.

Abbildung 11.13 illustriert diesen funktionalen Zusammenhang, aus dem sich einige einfache, aber wichtige, Zusammenhänge bezüglich des energiesparenden Fahrens ableiten lassen.

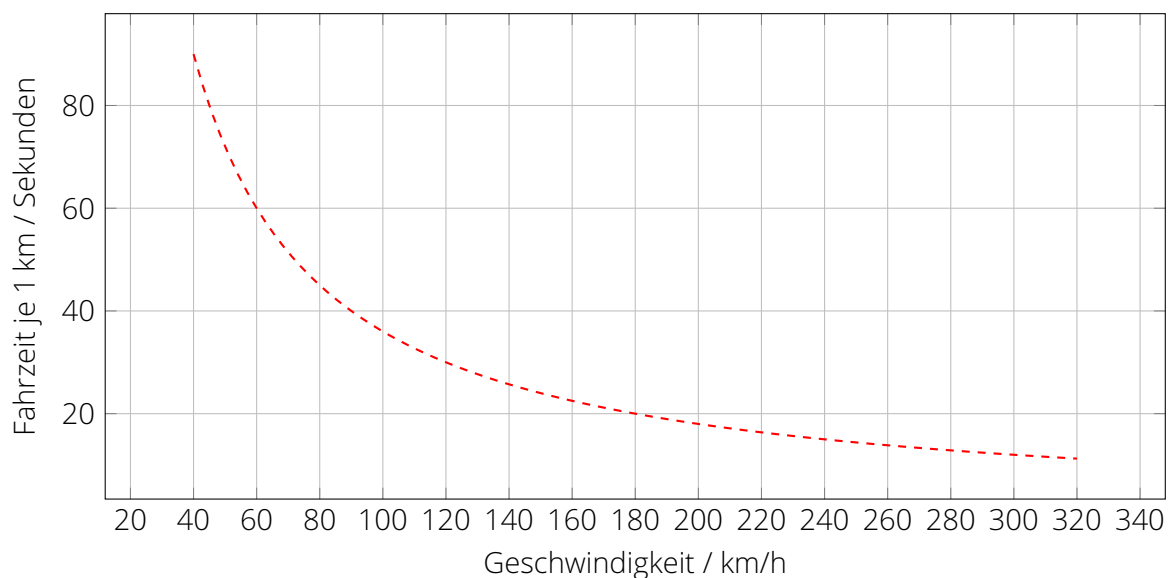


Abbildung 11.13: Fahrzeitbedarf für je Kilometer Wegstrecke bei Beharrungsfahrt

Dazu werden folgende einfache beispielhafte Überlegungen angestellt:

1. Wird ein Fahrzeug oder Zug z.B. aufgrund einer Signalstörung dazu gezwungen, einen 1000 m langen Streckenabschnitt mit $v=40$ km/h zu durchfahren, der sonst mit $v=160$ km/h befahren werden könnte, resultiert daraus ein zusätzlicher Fahrzeitbedarf von 67,5 s. Dies entspricht der Fahrzeitreserve (Annahme eines Fahrzeitzuschlages von 5 %) einer Zugfahrt von 22,5 Minuten Fahrplanfahrzeit.
Es ist allgemein festzuhalten, dass die lange Verweildauer im niedrigen Geschwindigkeitsbereich zu relativ großen Fahrzeitverlusten führt. Langsamfahrstellen, die nicht bei der Ermittlung der Fahrplanfahrzeit berücksichtigt werden konnten, zehren die Fahrzeitreserve deshalb schnell auf, selbst wenn sie sich im Verhältnis zur Gesamtstrecke nur über relativ kurze Distanzen erstrecken.
2. Wird die Beharrungsgeschwindigkeit verdoppelt, halbiert sich die Fahrzeit je Wegeinheit. Dies führt dazu, dass der absolute Fahrzeit-Einspareffekt im unteren Geschwindigkeitsspektrum wesentlich größer ist, als im oberen Teil des Geschwindigkeitsspektrums. Verdoppelt sich die Geschwindigkeit eines Zuges von 80 auf 160 km/h, werden pro Kilometer 22,5 s Fahrzeit eingespart, während die Zeitdifferenz bei einer Verdopplung von 160 auf 320 km/h nur noch 11,5 s beträgt. Die Zeiteinsparung je Kilometer halbiert sich damit ebenfalls.
3. Wird auf einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit 300 statt 250 km/h gefahren, beträgt die Fahrzeiterparnis pro Kilometer Wegstrecke 2,4 s. Es müsste somit auf einer Gesamtstrecke von 125 km *ununterbrochen* mit konstant 300 statt 250 km/h gefahren werden, um 5 Minuten Fahrzeit zu einzusparen. Daraus lässt sich die (auch für Autobahnfahrten gültige ⁹) einfache Regel ableiten, dass das Fahren mit hohen Geschwindigkeiten bezüglich der Fahrzeit erst wirksam wird, wenn diese Geschwindigkeiten über lange Distanzen konstant gehalten werden können.

Energie und Fahrzeit

Wie oben bereits erwähnt, verhalten sich der Gesamtenergiebedarf und die Gesamtfahrzeit von Zugfahrten gegenläufig. Die Kürzung von Fahrzeiten ist mit konventionellen Fahrzeuge nur möglich, wenn mehr Energie umgesetzt wird. Andererseits erfordert das energiesparende Fahren eine Fahrzeitreserve und damit einen gegenüber der Spitzfahrt erhöhten Fahrzeitbedarf.

Abbildung 11.14 illustriert diesen Zusammenhang noch einmal zusammenfassend. Aus dem qualitativen Verlauf der „Gesamtenergiebedarf über Gesamtfahrzeit“ ergibt sich die auch durch die Praxis bestätigte Feststellung, dass bereits geringe Fahrzeitzuschläge T_{Res} in Abbildung 11.14 ausreichen, um verhältnismäßige große Mengen an Traktionsenergie einzusparen. Der Kurvenverlauf verdeutlicht außerdem, dass es ab einer bestimmten Fahrzeitverlängerung kaum noch möglich ist, größere Mengen an Traktionsenergie einzusparen. Besteht, wie im Falle von Reisezügen, noch ein signifikanter Komfortleistungsbedarf, kann der Gesamtenergiebezug bei extremen Fahrzeitverlängerungen sogar wieder ansteigen, da die Komfortenergiebedarf proportional zur Fahrzeit ansteigt, sodass ab einem bestimmten (Zeit-)Punkt der Einspareffekt bei der Traktionsenergie überkompensiert wird.

⁹Fahrdynamik für den Hausgebrauch: Legt man die Richtgeschwindigkeit auf Autobahnen von 130 km/h zugrunde, beträgt die Fahrzeiterparnis pro km 5,2 s, wenn stattdessen 160 km/h gefahren werden. Es müsste über eine Distanz von 58 km/h mit 160 statt 130 km/h gefahren werden, um 5 min Fahrzeit einzusparen. Bei 200 statt 130 km/h wären es immerhin noch 31 km für einen Fahrzeitgewinn von 5 Minuten. Für „schnelle Fahrer*innen“: Die Erhöhung des Tempos von 160 auf 200 km/h führt erst nach 67 km ununterbrochener Schnellfahrt zu einem Fahrzeitgewinn von 5 Minuten.

Die Ausnutzung des Energieeinsparpotentials bei Zugfahrten ist immer ein Kompromiss zwischen der Erreichung von bestimmten (gewünschten) Fahrzeiten und der Akzeptanz des dafür notwendigen Energieeinsatzes.

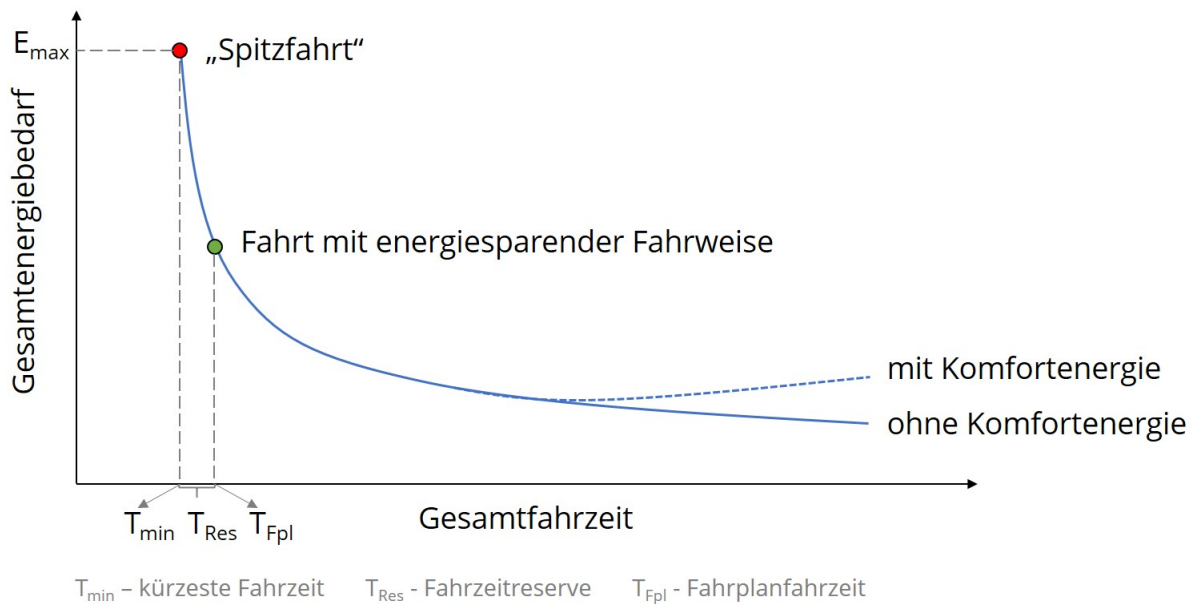


Abbildung 11.14: Zusammenhang von Gesamtenergiebedarf und Gesamtfahrzeit für beliebige Zugfahrten (Anmerkung: Es handelt sich *nicht* um den zeitlichen Verlauf des Energiebedarfes einer speziellen Zugfahrt, sondern um einen allgemeinen Zusammenhang zwischen kumulierten Größen.)

11.5 Strategien für energiesparendes Fahren

Die Anwendung einer energieeffizienten Fahrweise ist schon seit vielen Jahrzehnten ein Thema im Eisenbahnbetrieb. Früher standen dabei vor allem die Betriebskosten (Einsparung von Brennstoff¹⁰ und Kraftstoff) im Vordergrund, während heute flankierend dazu auch Erwägungen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen eine wichtige Rolle spielen.

Die drei geläufigsten Ansatzpunkte zur Realisierung eines energetisch günstigen Fahrregimes sind:

1. die Nutzung des Fahrzeugauslaufes, wann immer die Fahrplanlage dies zulässt,
2. die Absenkung der Höchstgeschwindigkeit im Falle großer Haltestellenabstände,
3. die extensive Nutzung regenerativer Bremsen.

Daneben gibt es weitere Ansätze, die nur bei bestimmten betrieblichen Randbedingungen praktikabel sind. So ist es im städtischen Personennahverkehr üblich, schwach frequentierte Haltestellen nur „auf Verlangen“ zu bedienen und also keinen Zwischenhalt einzulegen, wenn keine potentiellen Fahrgäste an der Haltestelle stehen und keine Haltewunschtaaste betätigt wurde. Bei einem Straßenbahnzug mit einer Masse von 56 t können so zum Beispiel mindestens ca. 0,24 kWh¹¹ pro nicht angefahrenem Halt eingespart werden.

¹⁰Zu Zeiten, da die Erzeugung von Traktionsenergie noch mit harter körperlicher Arbeit (Lokomotivheizer) verbunden war, ist es gut vorstellbar, dass das „Betriebsklima“ auf dem Führerstand besser war, wenn der Triebfahrzeugführer die energiesparende Fahrweise beherrschte und „seiner“ Heizer schonte.

¹¹Annahme: die Fahrzeuggeschwindigkeit wird auf minimal 20 km/h abgesenkt und die kinetische Energie wird $E_{\text{kin}}(20 \text{ km/h}, 56 \text{ t})=864 \text{ kJ}=0,24 \text{ kWh}$.

Fahrzeugauslauf

Die Beharrungsfahrt ist von allen Phasen der Zugfahrt die energetisch ungünstigste. Werden nicht gerade sehr hohe Geschwindigkeiten gefahren oder hohe Wagenzugmassen in großen Steigungen bewegt, liegt der Leistungsbedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände deutlich unter der Maximalleistung, sodass der Antriebsstrang tendenziell bei eher ungünstigen Wirkungsgraden betrieben wird (vgl. Abbildung 11.9 auf Seite 21). Wenngleich der absolute Energieumsatz bei Beharrungsfahrt in den meisten Fällen deutlich geringer ist als während der Beschleunigungsvorgänge, reduziert sich der Energiebezug (ab Oberleitung bzw. Kraftstofftank) nicht in gleicher Weise, da sich der Triebfahrzeugwirkungsgrad in Abhängigkeit mit abnehmender Zugkraft bei gleicher Geschwindigkeit häufig verschlechtert.

Die Frage, in welchem Ausmaß der Fahrzeugauslauf genutzt werden kann, hängt mit der Streckentopographie und mit der gegenüber der Beharrungsfahrt zu erwartenden Fahrzeitverlängerung zusammen. Diese ist außer von der Streckenneigung stark von der Auslaufanfangsgeschwindigkeit abhängig. Abbildung 11.15 zeigt die Modellrechnung für ein einfaches Fahr-

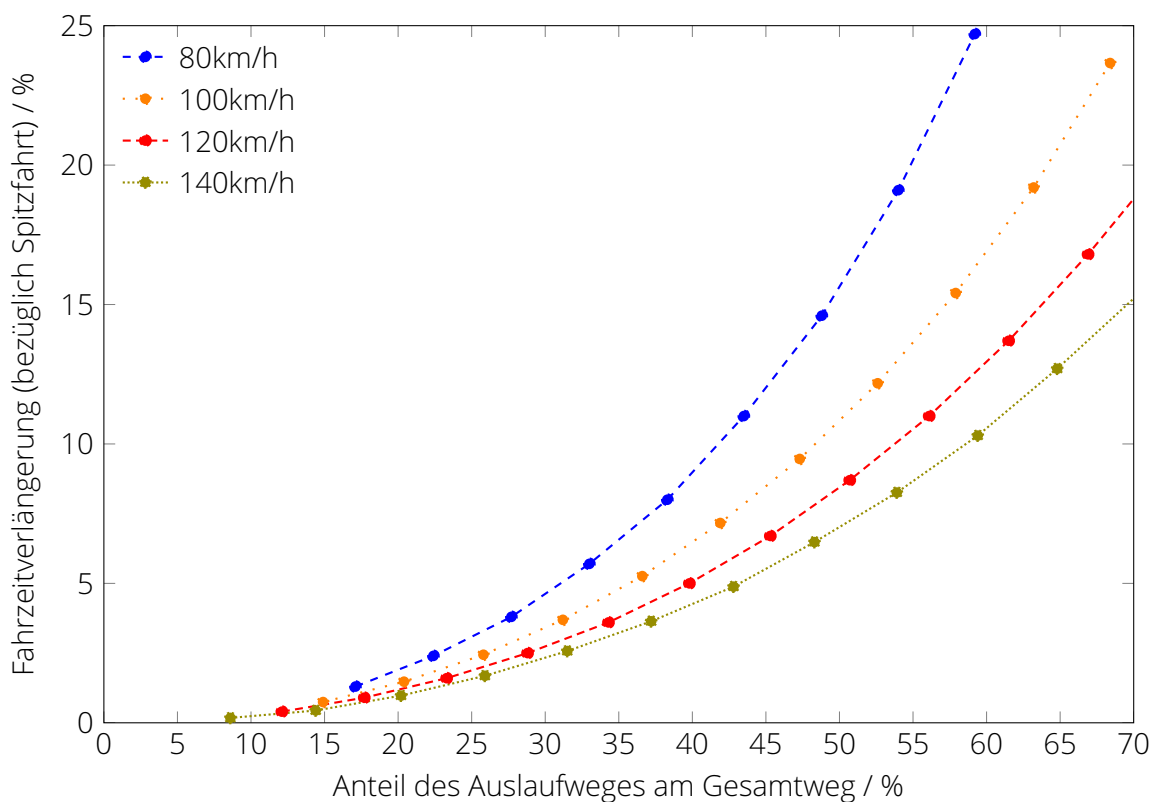


Abbildung 11.15: Zusammenhang von Auslaufweg und Fahrzeitverlängerung in der Ebene (Modellrechnung für einen zweiteiligen Dieseltriebwagen für den Regionalverkehr)

spiel in der Ebene, das von einem zweiteiligen Dieseltriebwagen absolviert wird. Für verschiedene Höchstgeschwindigkeiten (= Auslaufanfangsgeschwindigkeiten) wurde simuliert, inwieweit sich die Fahrzeit bezüglich der Spitzfahrt mit den jeweiligen Höchstgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Auslaufanteils am gesamten Fahrspiel verändert.

Wie zu erwarten ist, nimmt der mögliche Anteil des Auslaufweges am Gesamtweg bei gleicher Fahrzeitverlängerung deutlich zu, je höher die Höchstgeschwindigkeit liegt. Im Umkehrschluss müssen gleiche Auslaufwege bei unterschiedlichen Auslaufanfangsgeschwindigkeiten natürlich zu deutlich unterschiedlichen prozentualen Verlängerungen der Fahrzeit führen. Dieser Effekt verstärkt sich noch, wenn unterschiedliche Streckenneigungen betrachtet werden (Abbildung

11.16). Während sich Gefällestrecken erwartungsgemäß günstig auf die auslaufbedingte Fahrzeitverlängerung auswirken, können schon geringe Steigungen (in der Abbildung: 5 ‰) zu bei gleichem Auslaufweg zu sehr deutlichen Fahrzeitverlängerung führen.

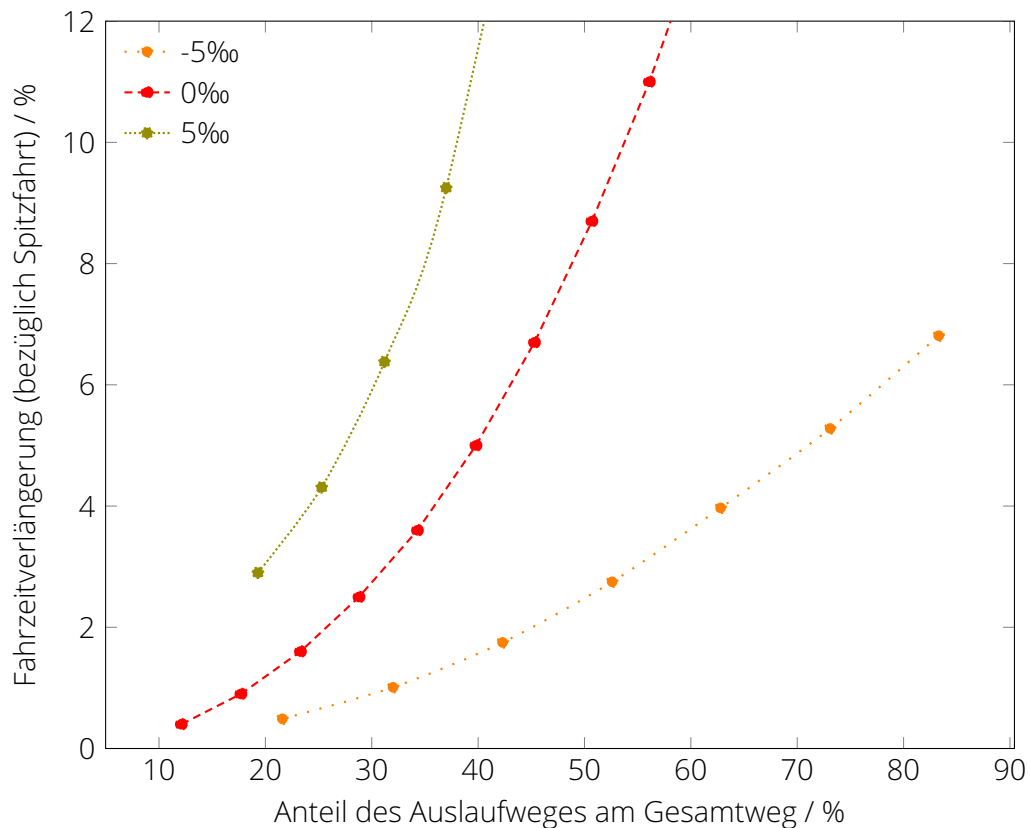


Abbildung 11.16: Zusammenhang von Auslaufweg und Fahrzeitverlängerung in Gefälle, Ebene und Steigung bei einer Auslaufanfangsgeschwindigkeit von 120 km/h (Modellrechnung für einen zweiteiligen Dieseltriebwagen für den Regionalverkehr)

Die Kunst beim energiesparenden Fahren besteht nun darin, den Auslaufweg bei wechselnden Steigungen und unterschiedlichen Ausgangsgeschwindigkeiten so zu bemessen, dass die sich ergebende Fahrzeitverlängerung den Fahrzeitrückhalt (oder was noch von diesem übrig ist) weder über-, noch überschreitet. Wird „zu früh“ in den Fahrzeugauslauf übergegangen, kann das Fahrspiel mit einer Ankunftsverspätung enden, die im nächsten Fahrspiel durch eine „straffe Fahrweise“ (Vermeidung von Fahrzeugauslauf) kompensiert werden müsste. Der Energieeinspareffekt würde so zunichte gemacht werden.

Erfolgt die Abschaltung der Traktionskraft demgegenüber „zu spät“, erfolgt eine verfrühte Ankunft¹² und der Zug „versteht“ seine Fahrzeitreserve im Bahnhof, statt sie während der Fahrt voll auszuschöpfen.

Die Triebfahrzeugpersonale müssen also sowohl die Streckentopographie gut kennen als auch die Auslaufwege und Restfahrzeiten gut einschätzen können. Bei entsprechender Schulung lassen sich mit erfahrenen Triebfahrzeugführern und Triebfahrzeugführerinnen beachtliche Ergebnisse erzielen.

¹²Bei einer Gesamtfahrzeit (ohne Zwischenhalt) von einer Stunde beliefe sich eine 5%ige Fahrzeitreserve auf 180 s (3 min). Würde ein Zug nur eine Minute zu früh ankommen, bliebe also ein Drittel der Fahrzeitreserve ungenutzt. Diese Überlegungen werden an dieser Stelle angestellt, um Ihnen ein Gefühl dafür zu geben, was „verfrühte Ankunft“ bedeutet - es geht um wenige Minuten oder sogar nur Sekunden.

Den „optimalen“ Zeitpunkt zur Einfügung von Auslaufabschnitten in das Fahrspiel zu finden wird aber in der Regel die menschlichen Fähigkeiten übersteigen. Hier können sogenannte Fahrerassistenzsysteme zum Einsatz kommen, die durch die Vorausberechnung verschiedener Fahrtvarianten entscheidende Informationen liefern können, um situationsangepasst die bezüglich des Energiebedarfes beste Entscheidung zu treffen. Aber auch das beste Fahrerassistenzsysteme müssen in die Lage versetzt werden, Auslaufwege und -zeiten zutreffend zu prognostizieren. Hierfür ist neben der Qualität der angewandten Algorithmen auch die Datenlage bezüglich der Fahrzeug- und Infrastruktur sowie der aktuellen Fahrplanlage entscheidend.

Energiesparende Fahrweise - Praxisbeispiel



Die ICE-1-Flotte der Deutschen Bahn wurde in den 1990er Jahren mit einem Fahrerassistenzsystem ausgerüstet, das den Triebfahrzeugpersonalen je nach Fahrplanlage Empfehlungen zur Abschaltung der Traktionsleistung gibt.

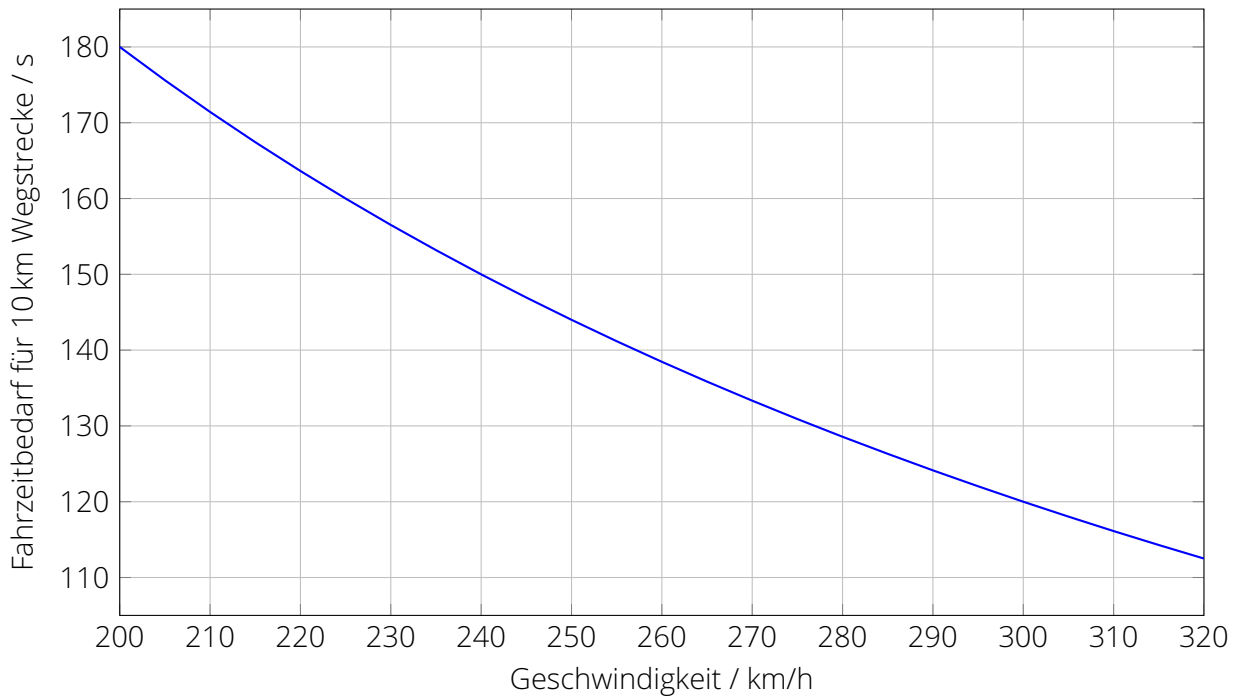
Um die Wirksamkeit dieses Systems zu beweisen, wurde eine umfangreiche Datenerhebung vorgenommen. Die Auswertung von 5092 Fahrten, die in den Jahren 1996/97 durchgeführt wurden, ergab, dass durch die Einführung des Fahrerassistenzsystems eine Einsparung von Traktionsenergie um 9 % gegenüber der bis dahin von den Triebfahrzeugpersonalen praktizierten „wirtschaftlichen Fahrweise“ erzielen konnte.

Für die „wirtschaftliche Fahrweise“, die auf der Schulung und Erfahrung der Triebfahrzeugpersonalen beruhte, konnte wiederum ein Einspareffekt von 6 % gegenüber der „straffen Fahrweise“ (Ziel: minimale Fahrzeit, z.B. zum Aufholen von Verspätungen) nachgewiesen werden. Der gesamte Einspareffekt durch das (rechnergestützte) energiesparende Fahren kann damit im Falle der ICE-1-Flotte mit 15 % angegeben werden. Das Projekt wurde von Lehmann im Rahmen einer ingenieurwissenschaftlichen Veröffentlichung dokumentiert [3].

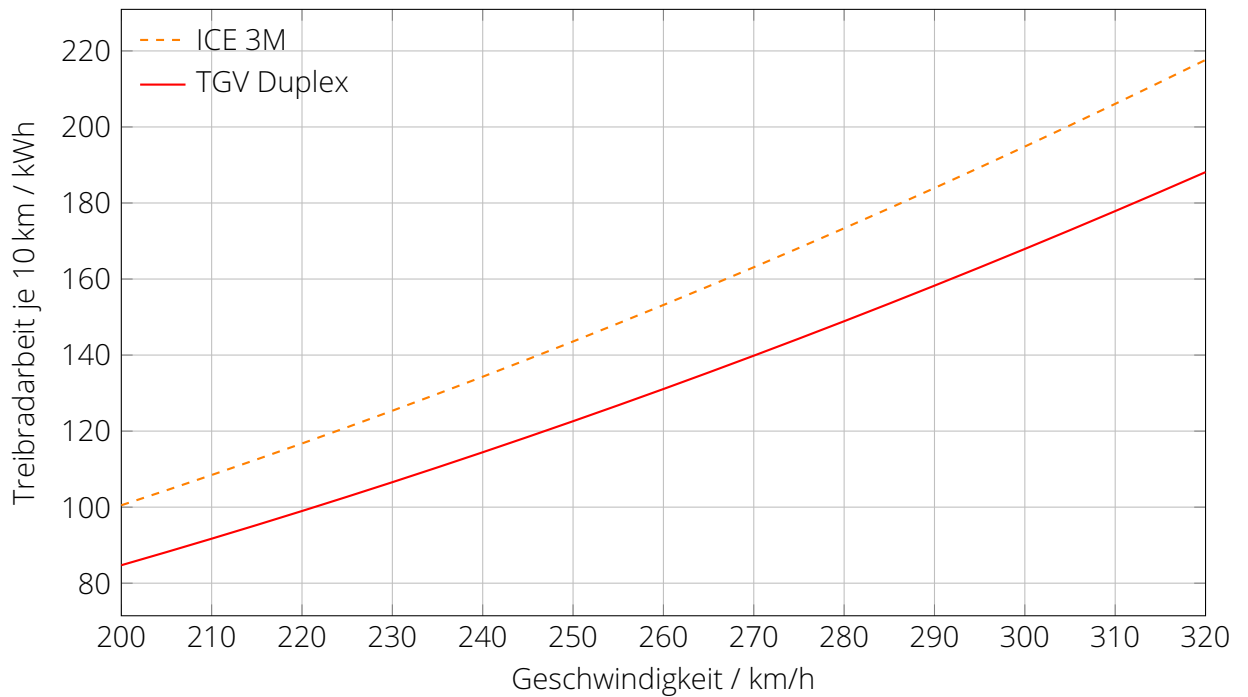
Variation der Höchstgeschwindigkeit

Die willentliche Absenkung der Höchstgeschwindigkeit kann insbesondere im hochwertigen Fernverkehr bzw. im Hochgeschwindigkeitsverkehr ein probates Mittel sein, um den Energiebedarf von Zugfahrten zu senken. Wie bereits anhand von Abbildung 11.13 erwähnt, ist der Fahrzeitgewinn- oder verlust bei einer Variation des Beharrungsgeschwindigkeit bei hohen Geschwindigkeiten vergleichsweise gering. Andererseits wird jedoch durch eine Reduktion der Geschwindigkeit der Energiebedarf zur Überwindung der Fahrzeugwiderstandskräfte deutlich gesenkt.

Abbildung 11.17 zeigt diese Zusammenhänge in dem für Hochgeschwindigkeitszüge relevanten Geschwindigkeitsbereich. Aufgrund der großen Haltestellenabstände im Hochgeschwindigkeitsverkehr, beziehen sich die Diagramme in der genannten Abbildung jedoch auf 10 km.



(a) Fahrzeitbedarf je 10 km Wegstrecke bei Beharrungsfahrt



(b) Treibradarbeit je 10 km zur Überwindung des Fahrzeugwiderstandes bei Beharrungsfahrt in der Ebene

Abbildung 11.17: Energieumsatz und Fahrzeitbedarf im Hochgeschwindigkeitsverkehr

In der Unterabbildung 11.17b wird der Energiebedarf an den Treibrädern zur Überwindung des Fahrzeugwiderstandes für sowohl für einen ICE 3M (BR 406) als auch für einen TGV Duplex dargestellt.

Betrachten wir nun den Fall, dass die Hochgeschwindigkeitszüge statt mit 320 km/h nur mit 300 km/h verkehren. Die zusätzliche Fahrzeit je 10 km beträgt dann (vgl. auch Abbildung 11.17a):

$$\Delta t = \left(\frac{10 \text{ km}}{300 \text{ km/h}} - \frac{10 \text{ km/h}}{320 \text{ km/h}} \right) \cdot 3600 \text{ s/h} = 120 \text{ s} - 112,5 \text{ s} = 7,5 \text{ s}.$$

Es handelt sich also um eine Fahrzeitverlängerung um 6,7 %.

Hinsichtlich des Energieumsatzes ergibt sich bei den angegebenen Geschwindigkeiten für den ICE 3M eine Differenz von -22,8 kWh/10 km, während es im Falle des TGV Duplex -20,2 kWh/10 km sind. Die prozentuale Energieersparnis an den Treibrädern beträgt damit 10,5 % (ICE) bzw. 10,7 % (TGV) und ist damit deutlich größer als die prozentuale Fahrzeitverlängerung.

Priorisierte Nutzung der rückspeisefähigen elektrodynamischen Bremse

Bei elektrischen Triebfahrzeugen mit Drehstromantriebstechnik stellt die größtmögliche Ausnutzung der elektrodynamischen Bremsleistung in Verbindung mit der Rückspeisung der dabei erzeugten elektrischen Energie in die Oberleitung eine weitere Möglichkeit des energiesparenden Fahrens dar.

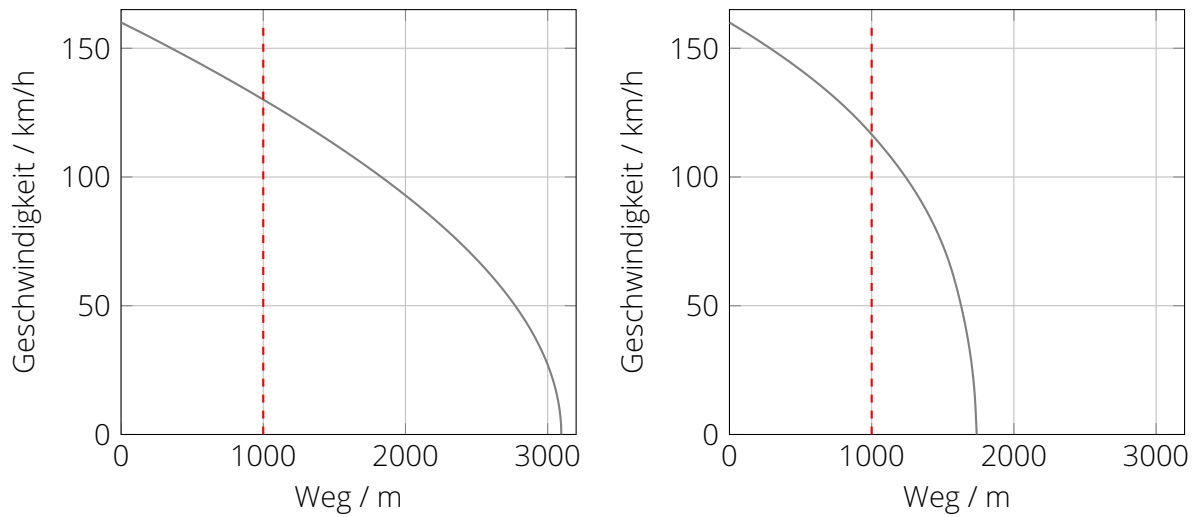
Damit das Potential dieser Massnahme optimal ausgenutzt werden kann, bedarf es jedoch neben rückspeisefähigen Fahrzeugen und eines aufnahmefähigen Netzes auch einer „grünen Welle“ bzw. einer Zugsicherungstechnik mit langen Vorschauwegen, da sich die Bremswege der Eisenbahnfahrzeuge bei ausschließlicher Nutzung der elektrodynamischen Bremsen deutlich verlängern können. Abbildung 11.18 zeigt dafür beispielhaft die simulierten Bremswege, die sich ergeben, wenn ein IC-Zug bzw. ein S-Bahn-Zug aus 160 km/h unter ausschließlicher Nutzung der elektrodynamischen Bremse abgebremst werden. Zur besseren Einordnung der Bremswege ist der in Deutschland übliche Vorsignalabstand auf Hauptstrecken von 1000 m in den Diagrammen ergänzt worden. Dieser wird in beiden Fällen deutlich überschritten, weshalb eine ausschließliche Nutzung von elektrodynamischen Bremsen betrieblich nicht statthaft ist. Trotzdem ist es lohnenswert, das Energieeinsparpotential zu untersuchen, dass durch die Wiedergewinnung von Bremsarbeit ausgeschöpft werden kann. Ein gutes Maß dafür ist der „Nutzbremsfaktor“ f_{NB} , der als das Verhältnis von kumulierter Bremsarbeit W_B zu kumulierter Traktionsarbeit an den Treibrädern W_T definiert ist:

$$f_{NB} = \frac{W_B}{W_T} \quad (11.14)$$

Der Nutzbremsfaktor kann als Energieeinsparpotential einer Fahrt mit vollständiger Bremsarbeitsrekuperation mit dem Wirkungsgrad 1 gedeutet werden. Der reale Wirkungsgrad für die Wandlung von kinetischer Energie in elektrische Energie und zurück ist deutlich kleiner als 1,¹³ weshalb die tatsächliche Einsparung geringer ausfallen wird.

Abbildung 11.19 zeigt die exemplarische Fahrt eines elektrischen Nahverkehrstriebzuges, für die die kumulierte Treibrad- und Bremsarbeit ermittelt wurde. Am Ende der Fahrt steht einer Treibradarbeit von 96,45 kWh eine Bremsarbeit von 51,85 kWh gegenüber, woraus sich ein Nutzbremsfaktor von 53,8 % ergibt. Bei idealem Wirkungsgrad (100 %) und unbegrenzter Bremsleistung der elektrodynamischen Bremsen könnte also etwa die Hälfte der notwendigen Treibradarbeit eingespart werden. Realistischer sind allerdings Einsparungen im Bereich von ca. 20...26 Prozent (unter Annahme eines Gesamtwirkungsgrades zwischen 0,36 und 0,49).

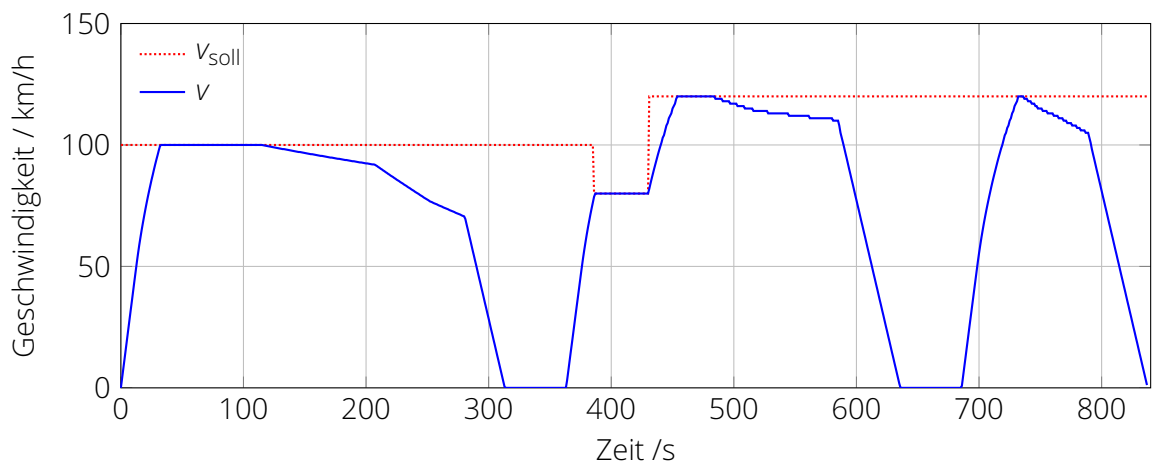
¹³Bei einem Wirkungsgrad von beispielsweise 0,7 pro Wandlung ergibt sich ein effektiver Wirkungsgrad von 0,49.



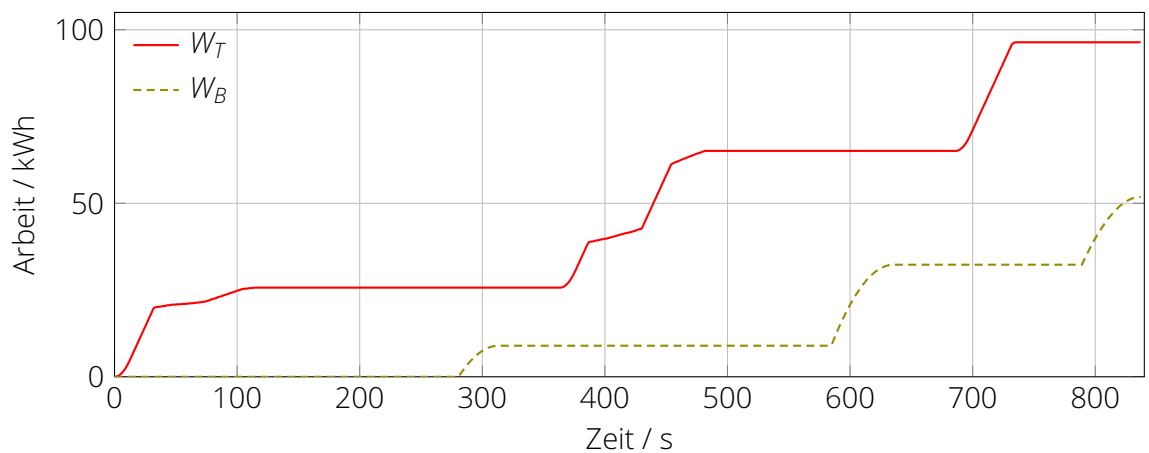
(a) Siemens Vectron (BR 193) mit einem Reisezug ($m_w=400\text{ t}$)

(b) S-Bahn-Zug (BR 425)

Abbildung 11.18: Simulierte Bremswege aus 160 km/h unter ausschließlicher Nutzung der elektrodynamischen Bremse



(a) Fahrtverlauf



(b) Kumulierte Zugkraft- und Bremsarbeit

Abbildung 11.19: Beispielfahrt zur Illustrierung des Nutzbremsefaktors



Energiesparendes Fahren

Energiesparende Fahrweisen nehmen bei der Eisenbahn einen immer wichtigeren Stellenwert ein (Reduzierung von Betriebskosten und Emissionen).

Die Voraussetzung für die Anwendung energiesparender Fahrstrategien ist ein pünktlicher Betrieb und somit das Vorhandensein eines Fahrzeitrückhaltes (sprich: einer Fahrzeitreserve), die den Triebfahrzeugpersonalen einen entsprechenden Handlungsspielraum bezüglich ihrer Bedienhandlungen eröffnen. Die Fahrzeitreserve wird auf Grundlage der Spitzfahrt (Fahrt mit kürzester Fahrzeit) unter Berücksichtigung prozentualer Fahrzeitzuschläge festgelegt.

Die Grundzüge einer energiesparenden Fahrweise lassen sich wie folgt umreißen.

- Möglichst rasche Beschleunigung auf die zulässige Geschwindigkeit, um einerseits die Fahrzeitreserve nicht für einen verlangsamten Anfahrvorgang aufzuzehren und andererseits den Fahrzeugantrieb möglichst gut auszulasten (Faustregel: hohe Triebfahrzeugwirkungsgrade bei hohen Zugkräften).
- Nutzung des Fahrzeugauslaufes, wann immer es die Fahrplanlage zulässt. Insbesondere bei hohen Auslaufanfangsgeschwindigkeiten und günstigen Neigungsverhältnissen können lange Auslaufwege bei geringen Fahrzeitverlusten realisiert werden.
- Ausnutzung von Streckenabschnitten mit starkem Gefälle, um das Fahrzeug bzw. den Zug zu beschleunigen.
- Absenkung der tatsächlichen Höchstgeschwindigkeit, wenn lange Distanzen mit hohen Geschwindigkeiten zurückgelegt werden (v.a. im Fern- bzw. Hochgeschwindigkeitsverkehr).
- Die elektrodynamische Bremse sollte so umfangreich wie zulässig ausgenutzt werden und es ist ein möglichst hohe Rückspeisegrad anzustreben.
- „Unnötige“ Fahrzeughalte und Geschwindigkeitsabsenkungen (hier sind zum Beispiel Zwangsbremungen gemeint, die auf Bedienfehler zurückzuführen sind) sollten vermieden werden.

Die Schulung und technische Unterstützung der Triebfahrzeugpersonale ist zur Erzielung möglichst großer Energieeinsparungen unabdingbar. Die Entwicklung von Algorithmen zur Prognose von Fahrtverläufen mit dem Ziel des Auffindens energetisch optimaler Fahrstrategien ist mathematisch anspruchsvoll und weist über das Themenspektrum einer Fahrdynamik-Grundlagenvorlesung hinaus.

12 Verständnisfragen

Komplex „Energiebedarf von Zugfahrten“

1. Wie lässt sich die an den Treibrädern während einer Zugfahrt verrichtete Arbeit rechnerisch bestimmen?
2. Wie hängen die Einheiten kWh, kW, kJ und MJ zusammen?
3. Woraus setzt sich der Energiebedarf von Zugfahrten grundsätzlich zusammen?
4. Nennen Sie Beispiele für Baugruppen auf Triebfahrzeugen, die einen signifikanten Energiebedarf haben, der nicht zur Traktionsenergie gezählt wird.
5. Nennen und erläutern Sie mindestens 4 Faktoren, die den Energiebedarf von Zugfahrten maßgeblich beeinflussen.
6. Nennen und erläutern Sie mindestens 4 Faktoren, die den Leistungsbedarf von Zugfahrten maßgeblich beeinflussen.
7. Was passiert mit der während eines Beschleunigungsvorganges an den Treibrädern verrichteten Arbeit?
8. Wie verändert sich der Betrag der zur Überwindung des Fahrzeugwiderstandes benötigten Arbeit über der Geschwindigkeit und welchen Einfluss hat die Streckenneigung auf diesen Verlauf?
9. Welcher Erkenntnisgewinn erwächst aus der Bestimmung des geschwindigkeitsabhängigen „Grenzgefälles“?
10. Wie lautet die fahrdynamische Energiebilanz im Falle des Fahrzeugauslaufes?
11. Wie verhalten sich die Auslaufwege für ein festes Geschwindigkeitsintervall in Abhängigkeit von der Auslaufanfangsgeschwindigkeit und wie lässt sich der Verlauf erklären?
12. Können aus dem zeitlichen Verlauf der kumulierten Treibradarbeit für ein Fahrspiel Rückschlüsse auf die jeweils aufgetretenen Fahrzustände gezogen werden und welcher Art sind diese Rückschlüsse gegebenenfalls?
13. Was muss getan werden, um von der Treibradarbeit auf den Traktionsenergiebedarf schließen zu können?

14. Welche Informationen benötigen Sie, um den Triebfahrzeugwirkungsgrad ermitteln zu können?
15. Ist der Triebfahrzeugwirkungsgrad eine Konstante? Begründen Sie Ihre Antwort.
16. Welche Informationen werden benötigt, um den Wirkungsgrad eines Dieselmotors bestimmen zu können?
17. Was ist ein Triebfahrzeug-Kennlinienfeld und wie kann es fahrdynamisch genutzt werden?
18. Was ist eine TLV-Tafel und wie kann sie fahrdynamisch genutzt werden?

Komplex „Grundzüge der energiesparenden Fahrweise“

1. Was ist die Grundvoraussetzung für die Anwendung energiesparender Fahrstrategien?
2. Was verstehen Sie unter einer „Spitzfahrt“?
3. Was ist der „Fahrzeitrückhalt“, wie setzt er sich zusammen und wie kann er alternativ bezeichnet werden?
4. Wie wird, ganz grundsätzlich, die Fahrzeit in einem Fahrplan festgelegt?
5. Was ist mit dem „Fahrstil“ von Triebfahrzeugführern oder Triebfahrzeugführerinnen gemeint?
6. Wie hängen Fahrzeitbedarf und Geschwindigkeit bei Beharrungsfahrten zusammen (Interpretation der mathematisch-physikalischen Zusammenhänge)?
7. Wie ist der qualitative Zusammenhang zwischen kumuliertem Energiebedarf und Gesamtfahrzeit bei einer Zugfahrt?
8. Wie wirkt sich die Berücksichtigung des Komfortenergiebedarfes auf den vorstehend genannten Zusammenhang aus?
9. Wovon ist die Fahrzeitverlängerung bei der Nutzung des Fahrzeugauslaufes abhängig?
10. Welche prinzipiellen Strategien zur Einsparung von Traktionsenergie gibt es?
11. Warum ist die Herabsetzung der Höchstgeschwindigkeit als Mittel zur Senkung des Traktionsenergiebedarfes im Falle von Güterzügen ein eher ungeeignetes Mittel?
12. Wann und warum ist es sinnvoll, die streckenseitig vorgegebene Höchstgeschwindigkeit nicht auszufahren, auch wenn dies hinsichtlich der vorhandenen Leistung und des Bremsvermögens sinnvoll wäre?
13. Welche Grenzen sind der Energieeinsparung durch Ausnutzung der elektrodynamischen Bremse gesetzt?



Arbeitsmaterialien

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

1. Foliensätze:
 - Folien_FD_19_Energie.pdf
 - Folien_FD_20_Energie_und_Fahrzeit.pdf
2. Testressourcen in OPAL:
 - Selbsttest „Energiebedarf“
 - Selbsttest „Energie und Fahrzeit“
3. Rechenübungen „Übungskomplex Energiebedarf“ im Übungsheft auf den Seiten 29-33
4. Formelsammlung S. 41-42

Literaturverzeichnis

- [1] Bomke, Thorsten: „Energieoptimierung bei Straßenbahnen“, in: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 63 (2015), Nr. 5, S. 62–66.
- [2] Giebel, Sascha: „Verfahren für ein Energiemanagement in Bordnetzen elektrischer Triebzüge“, Diss., Technische Universität Dresden, 2018.
- [3] Lehmann, Helmut: „Energiesparende Fahrweise bei der Deutschen Bahn“, in: *EB - Elektrische Bahnen*, Jg. 105 (2007), Nr. 7, S. 397–402.