

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge

RECHENÜBUNGEN ZUR VORLESUNG FAHRDYNAMIK/BAHNFAHRZEUGE

Dr.-Ing. Martin Kache

29. März 2019

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| 1 Übungskomplex Grundlagen | 4 |
| 2 Übungskomplex Fahrwiderstand | 7 |
| 3 Übungskomplex Zugkraft | 16 |
| 4 Übungskomplex Antriebstechnik | 22 |
| 5 Übungskomplex Auslegung und Leistungsfähigkeit | 25 |
| 6 Übungskomplex Energiebedarf | 29 |
| 7 Übungskomplex Fahrzeit | 34 |

HINWEISE

Die Übungsaufgaben in dieser Aufgabensammlung sollten im Idealfall vorlesungsbegleitend während des Semesters gelöst werden. Sie sind vornehmlich für das Selbststudium gedacht, da der zeitliche Umfang der Vorlesungen wenig Spielraum für ausführliche Rechenübungen lässt. In der Regel stehen Ihnen während des Semesters Fahrdynamik-Tutoren zu Konsultationen zur Verfügung, mit denen regelmäßige Termine für Gruppenübungen oder sporadische Individualtermine vereinbart werden können.

Als Hilfsmittel zur Lösung der Aufgaben stehen Ihnen neben Ihren Vorlesungsunterlagen auch die Formelsammlung sowie das zu diesem Heft gehörige Lösungsheft zur Verfügung. Letzteres sollte allerdings nur dann konsultiert werden, wenn Sie bereits eine eigene Lösung entwickelt haben. Bei Fragen und Unklarheiten ist zunächst die fachliche Diskussion mit Kommilitoninnen oder Kommilitonen bzw. mit den Tutorinnen und Tutoren einer vorschnellen Konsultation der Musterlösung vorzuziehen.

Um Ihnen eine bessere Orientierung bei dem Umgang mit den Übungsaufgaben zu geben, wurden diese verschiedenen Niveaus, die im folgenden Näher erörtert werden.

- **Niveau 1:** Dies sind die einfachsten Aufgaben. Sie weisen eine geringe Komplexität auf und lassen sich ohne Probleme mit Hilfe der Formelsammlung und eines Taschenrechners lösen.

„Kommt sowas in der Klausur dran?“ - Definitiv!

- **Niveau 2:** Dies sind Aufgaben mit höherer Komplexität, deren Lösung nicht immer sofort ersichtlich ist.

„Kommt sowas in der Klausur dran?“ - Wahrscheinlich.

- **Niveau 3:** Dies sind Aufgaben mit hoher Komplexität und/oder hohem Arbeitsaufwand, für deren Lösung die Arbeit in (Klein-)gruppen empfohlen wird (zwingend ist sie nicht).

„Kommt sowas in der Klausur dran?“ - Möglicherweise, aber dann mit reduziertem Umfang.

Sollten Sie Unstimmigkeiten oder Fehler in der Aufgabensammlung finden, werden Sie gebeten, diese vorzugsweise per E-mail an den Verfasser zu übermitteln.

1 ÜBUNGSKOMPLEX GRUNDLAGEN

NIVEAU 1

1. Berechnen Sie den fahrdynamischen Massenfaktor eines Zuges, der aus zwei Lokomotiven mit einer Masse von 84 t und einem Massenfaktor von jeweils 1,10 sowie 12 beladenen Wagen (Masse: jeweils 80 t, Massenfaktor: jeweils 1,03) und 15 leeren Wagen (Masse: jeweils 24,5 t, Massenfaktor: jeweils 1,08) besteht.
2. Ein Wagenpark mit einer Masse von 400 t weist einen Massenfaktor von 1,06 auf. Welche Masse müsste eine Lokomotive (Massenfaktor: 1,15) haben, damit sich der Massenfaktor des gesamten Zuges gegenüber dem Wagenpark um 3 % erhöht?
3. Betrachtet wird ein Nahverkehrszug, der aus einer Lokomotive (Masse: 87 t, Massenfaktor: 1,16) sowie vier Wagen (Masse: 50 t, Massenfaktor: 1,06) und einem Steuerwagen (Masse: 55 t, Massenfaktor: 1,05) besteht. Dieser Zug bewege sich mit einer Geschwindigkeit von $v=160$ km/h.
 - (a) Welche kinetische Energie (Angabe in kWh) steckt bei der genannten Geschwindigkeit in dem beschriebenen Zug?
 - (b) Welchen Anteil haben Lokomotive, Zwischen- und Steuerwagen jeweils an der gesamten kinetischen Energie des Zuges?
 - (c) Geben Sie jeweils den absoluten Betrag der kinetischen Energie der Rotation sowie der kinetischen Energie der Translation für den gesamten Zug an.
 - (d) Bei welcher Geschwindigkeit hat sich die kinetische Energie des Zuges halbiert (Bezug: 160 km/h)?

4. Bestimmen Sie die Zugkraft F_T , die erforderlich ist, damit ein S-Bahn-Zug, bestehend aus einer E-Lok und vier Waggons bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h eine Momentanbeschleunigung von $0,8 \text{ m/s}^2$ erreichen kann. Gehen Sie dabei von folgenden Parametern aus:
- Triebfahrzeugmasse: $m_T=84 \text{ t}$,
 - gesamte Wagenzugmasse: $\sum m_W=200 \text{ t}$,
 - Massenfaktor Triebfahrzeug: $\xi_T=1,11$,
 - Massenfaktor Wagenzug: $\xi_W=1,06$,
 - Fahrzeugwiderstandskraft $F_{WF}(50 \text{ km/h})=5 \text{ kN}$,
 - Streckenwiderstandskraft $F_{WS}(7,5 \text{ ‰})=21 \text{ kN}$.
5. Welche Momentanbeschleunigung erreicht ein ICE 1 auf geradem Gleis in der Ebene bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h? Legen Sie Ihrer Berechnung folgende Annahmen zugrunde:
- Zugmasse: 815 t,
 - Massenfaktor: 1,08,
 - Treibradzugkraft bei 200 km/h: 172,8 kN,
 - Fahrzeugwiderstandskraft: 62,3 kN.



NIVEAU 2

6. Ein beladener Güterwagen (Masse: 60 t, Massenfaktor: 1,04) wird einen Ablaufberg (Höhe: 2,5 m) hinabgestoßen.
- Welche Geschwindigkeit kann der Wagen am Ende der Neigung maximal erreichen, wenn vereinfachend alle wirkenden Widerstandskräfte vernachlässigt werden?
 - Wie ändert sich diese Geschwindigkeit, wenn ein gleichartiger Wagen (Eigenmasse: 24,5 t) unbeladen abgestoßen wird?
7. Ein Güterganzzug (Massenfaktor inkl. Triebfahrzeug: 1,03), der eine Gefällestrecke befährt, soll mit einer Betriebsbremsung (mittlere Verzögerung: $0,45 \text{ m/s}^2$) aus 80 km/h im nächsten Bahnhof zum Stehen gebracht werden. Die Lokomotive erzeugt eine elektrodynamische Bremskraft von maximal 150 kN, die zwischen 5 und 0 km/h linear auf den Wert 0 abgeregelt wird. Welche Bremskraft müssen die mechanischen Radbremsen bei 60 km/h und kurz vor dem Stillstand (2 km/h) aufbringen, damit die erforderliche Verzögerung erreicht wird? Zur Beantwortung der Frage seien ferner folgende Randbedingungen vorgegeben:
- Zugmasse (inkl. Triebfahrzeug): 1680 t,
 - Triebfahrzeugwiderstandskraft bei $v=60 \text{ km/h}$: 3,5 kN,
 - Triebfahrzeugwiderstandskraft bei $v=2 \text{ km/h}$: 1,5 kN,
 - Wagenzugwiderstandskraft bei $v=60 \text{ km/h}$: 28,9 kN,
 - Wagenzugwiderstandskraft bei $v=2 \text{ km/h}$: 15,7 kN,
 - Streckenwiderstandskraft im Gefälle: -82,4 kN,
 - Streckenwiderstandskraft im Bahnhof: 0,75 kN.



2 ÜBUNGSKOMPLEX FAHRWIDERSTAND

NIVEAU 1-2

8. Ein Güterganzzug mit einer Wagenzugmasse von 2000 t soll auf ebener, gerader Strecke befördert werden.
Sein spezifischer Wagenzugwiderstand betrage:

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

- (a) Welche Zugkraft muss eine Lokomotive dafür am Zughaken bei einer Geschwindigkeit $v=80$ km/h generieren?
- (b) Die zur Beförderung des Zuges vorgesehene Lok weist einen Triebfahrzeugwiderstand auf, der sich nach folgender Gleichung berechnen lässt:

$$F_{WFT} = 1,45 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,8 \left(\frac{v+15}{100}\right)^2$$

Berechnen Sie die Zugkraft, die an den Treibrädern zur Verfügung stehen muss, um besagten Güterzug mit 80 km/h zu befördern.

- (c) Um wieviel Prozent erhöht sich der Gesamtwiderstand des Zuges, wenn die Geschwindigkeit auf 100 km/h angehoben wird?
- (d) Die Treibradleistung der Lokomotive beträgt 6400 kW. Berechnen Sie den Leistungsüberschuss bei der Beförderung des Güterzuges bei 80 und 100 km/h.
- (e) Ist es möglich, den Güterzug auch in einer Steigung von 5 Promille noch mit $v=80$ km/h zu befördern? Die Masse der Lokomotive beträgt 87 t.

9. Betrachtet wird ein Triebfahrzeug (Masse: 84 t), das sowohl im Güter- als auch im Reisezugdienst eingesetzt werden kann. Die generierte Traktionsleistung am Treibradumfang beträgt 1750 kW (Güterverkehr) bzw. 1500 kW (Reisezug). Der Triebfahrzeugwiderstand kann mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$F_{WFT} = 2,1 + 2,6 \left(\frac{v + 15}{100} \right)^2$$

- (a) Warum ist die Traktionsleistung der Diesellokomotive bei Reisezügen geringer anzusetzen als bei Güterzügen?
- (b) Welche Treibradleistung muss die Lokomotive generieren, um einen Güterzug (Wagenzugmasse: 1000 t) bei mit konstant 80 km/h in der Ebene zu befördern, wenn der Wagenzugwiderstand mit folgender Gleichung angesetzt wird:

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

- (c) Welche Steigung könnte die Lokomotive mit dem Güterzug mit konstant 80 km/h maximal befahren, wenn keine Leistungsreserve zur weiteren Beschleunigung erforderlich ist?
- (d) Welche Geschwindigkeit kann die Lokomotive mit einem Reisezug (Wagenzugmasse: 320 t) in einer Steigung von 10‰ maximal erreichen? Setzen Sie für den spezifischen Wagenzugwiderstand folgende Gleichung an:

$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0028 \left(\frac{v}{100} \right)^2$$



NIVEAU 2-3

10. Betrachtet wird ein Triebwagen mit folgenden technischen Parametern:

| | |
|-------------------------------|--|
| Fahrzeugmasse: | 100 t |
| Höchstgeschwindigkeit: | 160 km/h |
| Fahrzeugwiderstand: | $F_{WFT}[N] = 1580 + 10,3v + 0,29(v + 15)^2$ |
| Fahrdynamischer Massenfaktor: | $\xi = 1,05$ |

- Stellen Sie den Fahrzeugwiderstand graphisch über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich dar.
- Vereinfacht soll angenommen werden, dass der Grundwiderstand von den konstanten und linearen Gliedern der Widerstandsgleichung abgedeckt wird und das quadratische Glied den Luftwiderstand darstellt. Bei welcher Geschwindigkeit sind dann beide Widerstandsanteile gleich groß? Bilden Sie das Verhältnis von Luftwiderstandskraft zu Gesamtwiderstandskraft für die Geschwindigkeiten 20, 40, 80, 100, 120 und 160 km/h und stellen Sie Ihre Ergebnisse graphisch über der Geschwindigkeit dar.
- Das Fahrzeug durchfährt die in Abbildung 2.1 dargestellte Strecke von A nach B. Es wird angenommen, dass die auf dem Fahrzeug installierte Antriebsleistung ausreicht, um die Soll-Geschwindigkeit zu erreichen. Prüfen Sie, auf welchen Streckenabschnitten im Gefälle die zulässige Geschwindigkeit nur eingehalten werden kann, wenn eine Beharrungsbremse eingeleitet wird. Bestimmen Sie für jeden Abschnitt die erforderliche Bremskraft und Bremsleistung sowie die an den Bremsen umgesetzte Energie.
- Der betrachtete Triebwagen fährt auf gerader ebener Strecke mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h. Der Triebfahrzeugführer schaltet die Zugkraft ab und lässt das Fahrzeug rollen.

Wie weit kann das Fahrzeug in der Ebene rollen, bis die Hälfte der kinetischen Energie der Fahrzeugbewegung an den Fahrwiderständen umgesetzt worden ist? Linearisieren Sie die Beschleunigungsfunktion mittels einer Sekante, die die Anfangs- und Endbeschleunigung für den betrachteten Auslaufvorgang enthält.



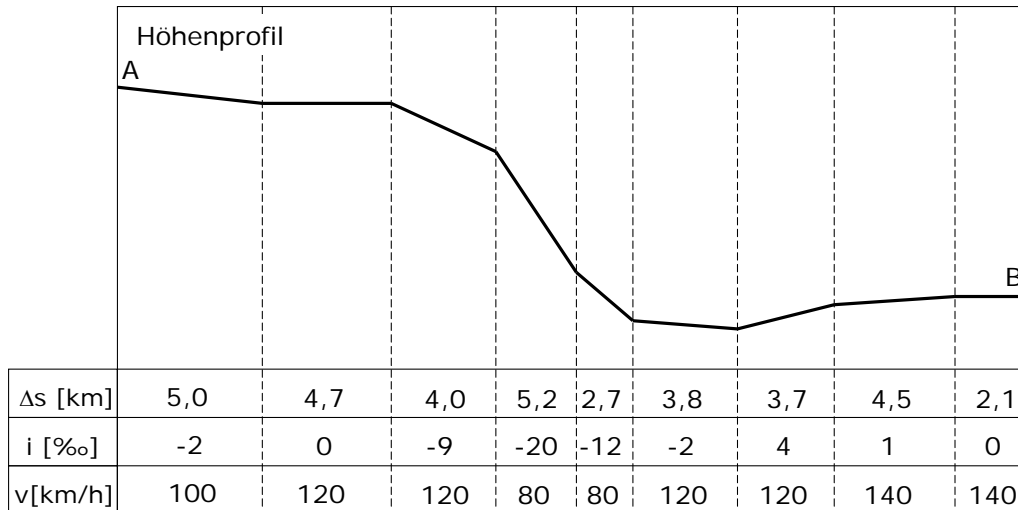


Abbildung 2.1: Streckenprofil für die Fahrt des Triebwagens von A nach B

- 11.** Es wird eine Neubaustrecke geplant, auf der TGV-Duplex-Züge (Treibradleistung: 8,8 MW) mit einer Geschwindigkeit von 300 km/h verkehren sollen.
- Bestimmen Sie die obere Grenze für die Längsneigung, die aus fahrdynamischer Sicht unterschritten werden muss, damit diese Fahrten realisiert werden können. Berücksichtigen Sie dabei, dass der reale Fahrzeugwiderstand um $\pm 10\%$ um den errechneten Nennwert schwanken kann.
 - Um welchen Betrag reduziert sich die erreichbare Höchstgeschwindigkeit in der ermittelten maximalen Neigung, wenn aufgrund einer Störung in der Antriebstechnik nur mit 75 % der Treibrad-Nennleistung gefahren werden kann? Ermitteln Sie den zusätzlichen Fahrzeitbedarf je Kilometer (Annahme: Beharrungsfahrt).



NIVEAU 3

12. Betrachtet wird ein Ganzzug aus einer Lokomotive (84 t, 19,5 m) und 30 Containerwagen von je 19,74 m Länge (siehe Abbildung 2.2). Jeder Wagen hat eine Eigenmasse von 20 t und kann maximal drei 20'-ISO-Standardcontainer mit einer Masse von je 24 t aufnehmen. Der spezifische Grundwiderstand des Wagenzuges kann zu $f_{W0W}=0,0015$ angenommen werden. (Annahmen: Luftdichte $\rho_L=1,225 \text{ kg/m}^3$, Gegenwindzuschlag: $\Delta v 15 \text{ km/h}$, Luftwiderstandsbeiwert der Wagen: siehe Formelsammlung und: $c_{w,W1} = c_{w,Wm}$ sowie $c_{w,Wn} = 2,5 \cdot c_{w,Wm}$).
- Berechnen Sie den Zugkraftbedarf am Zughaken, wenn der vollständig ausgelastete Containerzug mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h auf gerader, ebener Strecke verkehrt.
 - Um wieviel Prozent erhöht sich der Zugkraftbedarf wenn die Geschwindigkeit auf 100 km/h angehoben wird?
 - Fallweise kann die Auslastung des Zuges auf 60 % absinken. Die Fahrzeugumläufe erfordern es jedoch, alle Wagen in den Zug einzustellen. Die Verteilung der Container ist von vielen Faktoren abhängig und kann sehr unterschiedlich erfolgen. Vergleichen Sie die in den Abbildungen 2.3 und 2.4 gezeigten Varianten hinsichtlich Ihres Zugkraftbedarfes bezüglich des vollständig ausgelasteten Zuges bei sonst gleichen Randbedingungen ($v=100 \text{ km/h}$, gerade und ebene Strecke).
 - Der Zug wird an einem Signal gestellt, sodass unterschiedliche Zugteile in unterschiedlichen Neigungen stehen (siehe Abbildungen 2.2-2.4). Berechnen Sie für alle 3 gezeigten Fälle die effektiv auf den Zugverband wirkende Neigungskraft und legen Sie jeweils das homogene und das inhomogene Massenband-Modell zugrunde. Vergleichen Sie die ermittelten Kräfte und bewerten Sie, inwiefern die jeweiligen Ansätze geeignet sind.



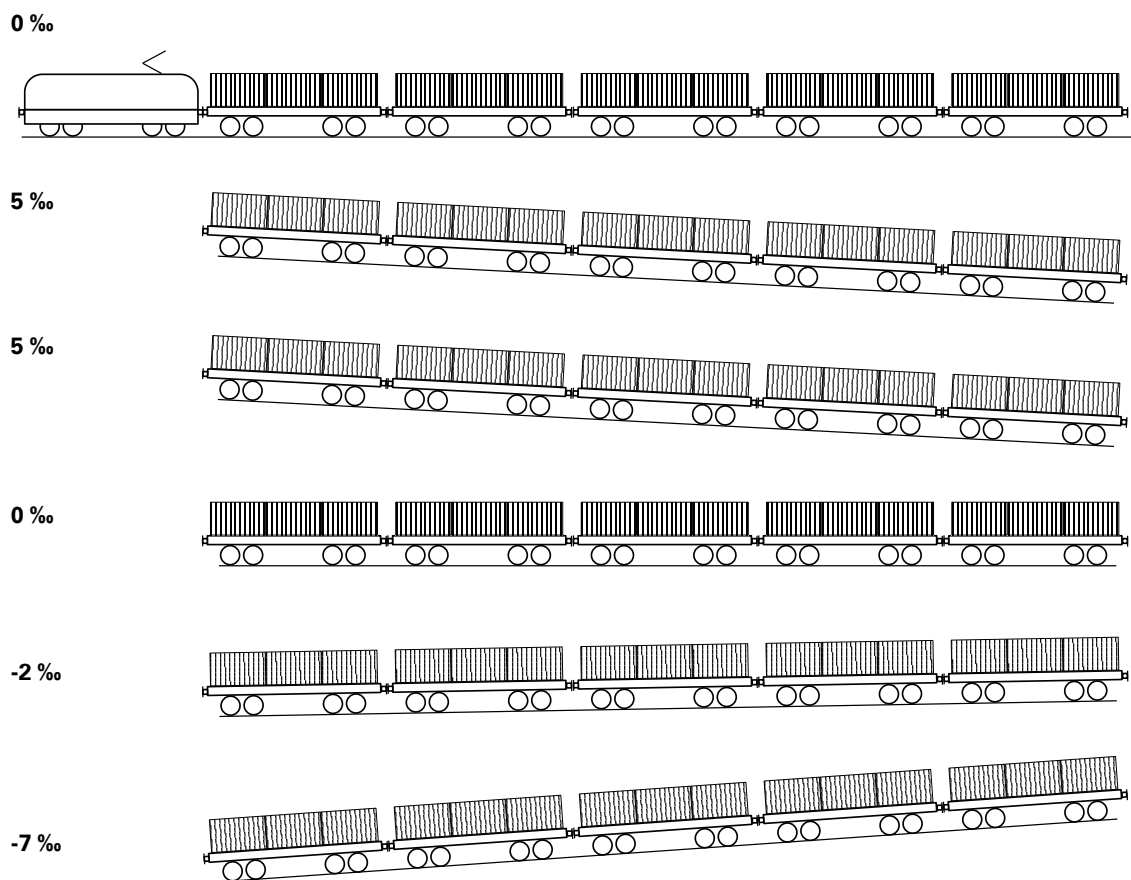


Abbildung 2.2: Containerzug (Auslastung 100 %)

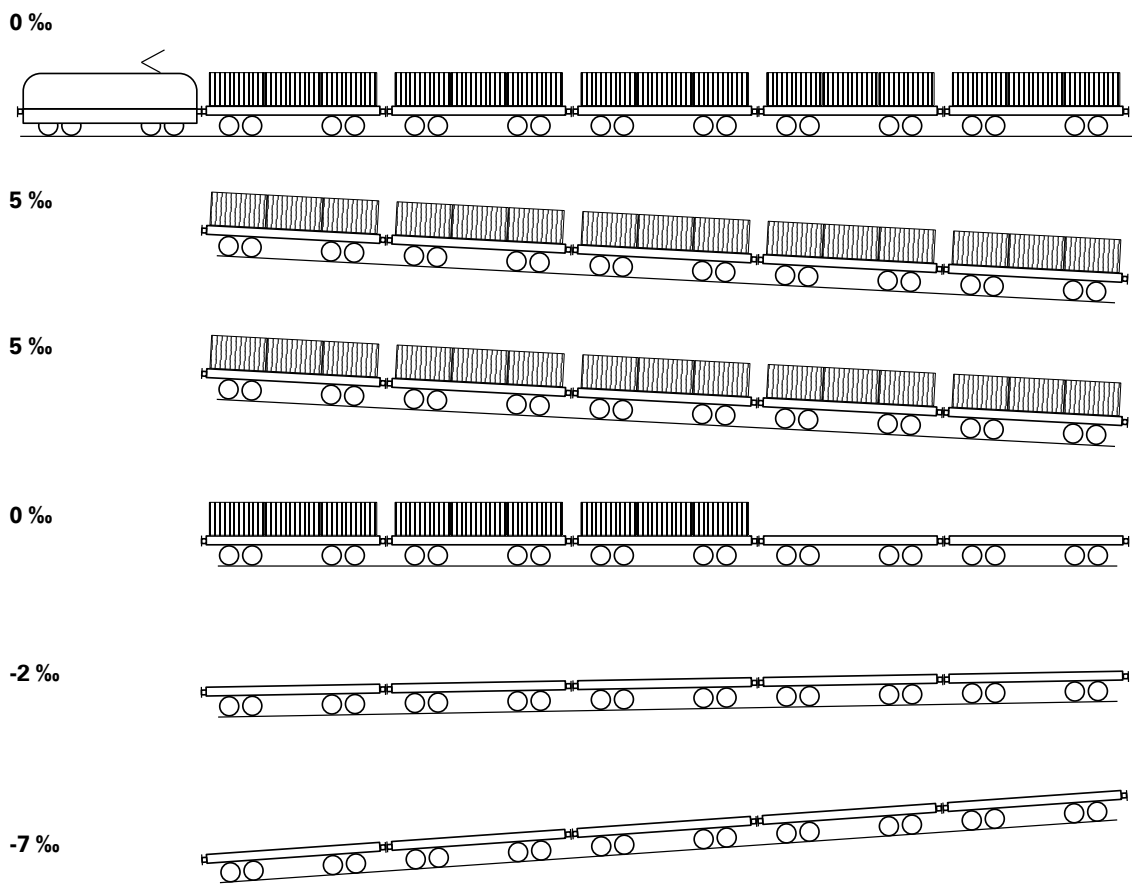


Abbildung 2.3: Containerzug (Auslastung 60 %) mit gruppierten Leerwagen

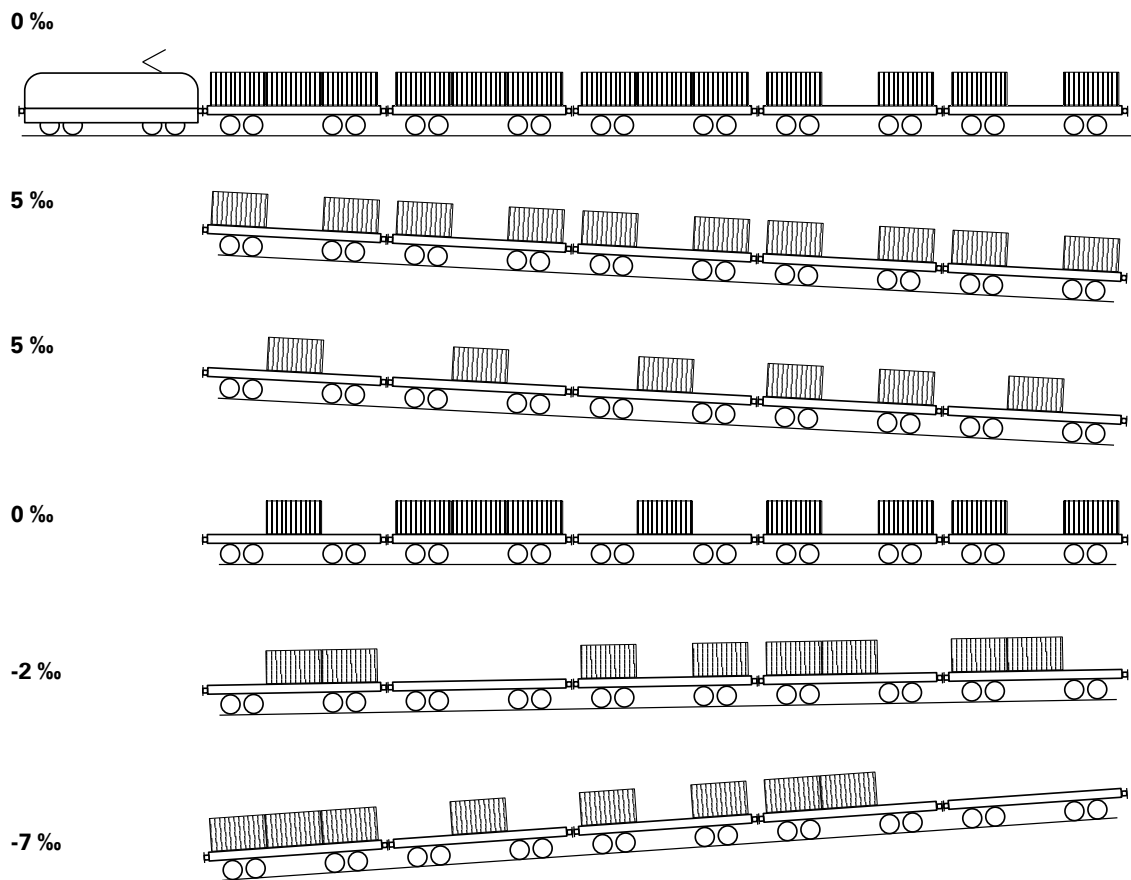


Abbildung 2.4: Containerzug (Auslastung 60 %) mit unregelmäßig verteilter Belastung

13. Schätzen Sie den Fahrzeugwiderstand für folgende Fahrzeuge bzw. Fahrzeugverbände ab und nutzen Sie dazu die Formelsammlung (insbesondere die Anhänge A.4 bis A.7):

(a) S-Bahn-Triebzug der BR 420 bei $v=80$ km/h



(b) ICE 3 (BR 403) bei $v=250$ km/h



(c) Drehstromlok BR 186 (TRAXX AC 2) mit Güterganzzug ($m_W=1600$ t) bei $v=80$ km/h



(d) Doppeltraktion aus BR 232 mit gemischtem Güterzug ($m_W=2000$ t) bei $v=80$ km/h



3 ÜBUNGSKOMPLEX ZUGKRAFT

NIVEAU 1

14. Berechnen Sie die maximale Zugkraft, die von einer Lokomotive generiert werden kann, auf deren angetriebenen Radsätzen eine Masse von 84 t ruht. Gehen Sie davon aus, dass ein Kraftschlussbeiwert von $\tau = 0,33$ ausgenutzt werden kann.
15. Ein Hersteller gibt an, dass eine von ihm produzierte Lokomotive (Masse: 80 t) in der Lage ist, eine Anfahrzugkraft von 330 kN zu erzeugen. Welchem ausgenutzten Kraftschlussbeiwert entspricht das?
16. Welche Treibradzugkraft kann von einer Lokomotive bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h entwickelt werden, wenn die Treibradleistung mit 5,6 MW angegeben wird?

NIVEAU 2

17. Ein Unternehmen, das über drei durch das unten stehende Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm charakterisierte Lokomotiven ($m_T=86\text{ t}$) verfügt, soll zeitgleich die folgenden Transportaufgaben erfüllen:

- (a) Beförderung eines Güterzuges ($\xi_Z=1,03$) mit einer Masse von 1600 t in einer Steigung von 6‰ mit minimal 60 km/h. Die Beschleunigung von 55 auf 60 km/h soll dabei maximal 5 Minuten dauern (*Hinweis: Überschlagsrechnung genügt*).
- (b) Beförderung eines Reisezuges mit einer Masse von 250 t in einer Steigung von 10‰ mit minimal 100 km/h.

Können beide Beförderungsaufträge mit den vorhandenen Triebfahrzeugen **gleichzeitig** angenommen werden?

Treffen Sie für die Fahrzeugwiderstandskräfte folgende Annahmen:

- Fahrzeugwiderstandskraft der Lokomotiven:

$$F_{WFT} = 1,5 + 3,2 \left(\frac{v + 12}{100} \right)^2$$

- spezifischer Wagenzugwiderstand des Güterzuges:

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

- spezifischer Wagenzugwiderstand des Reisezuges:

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

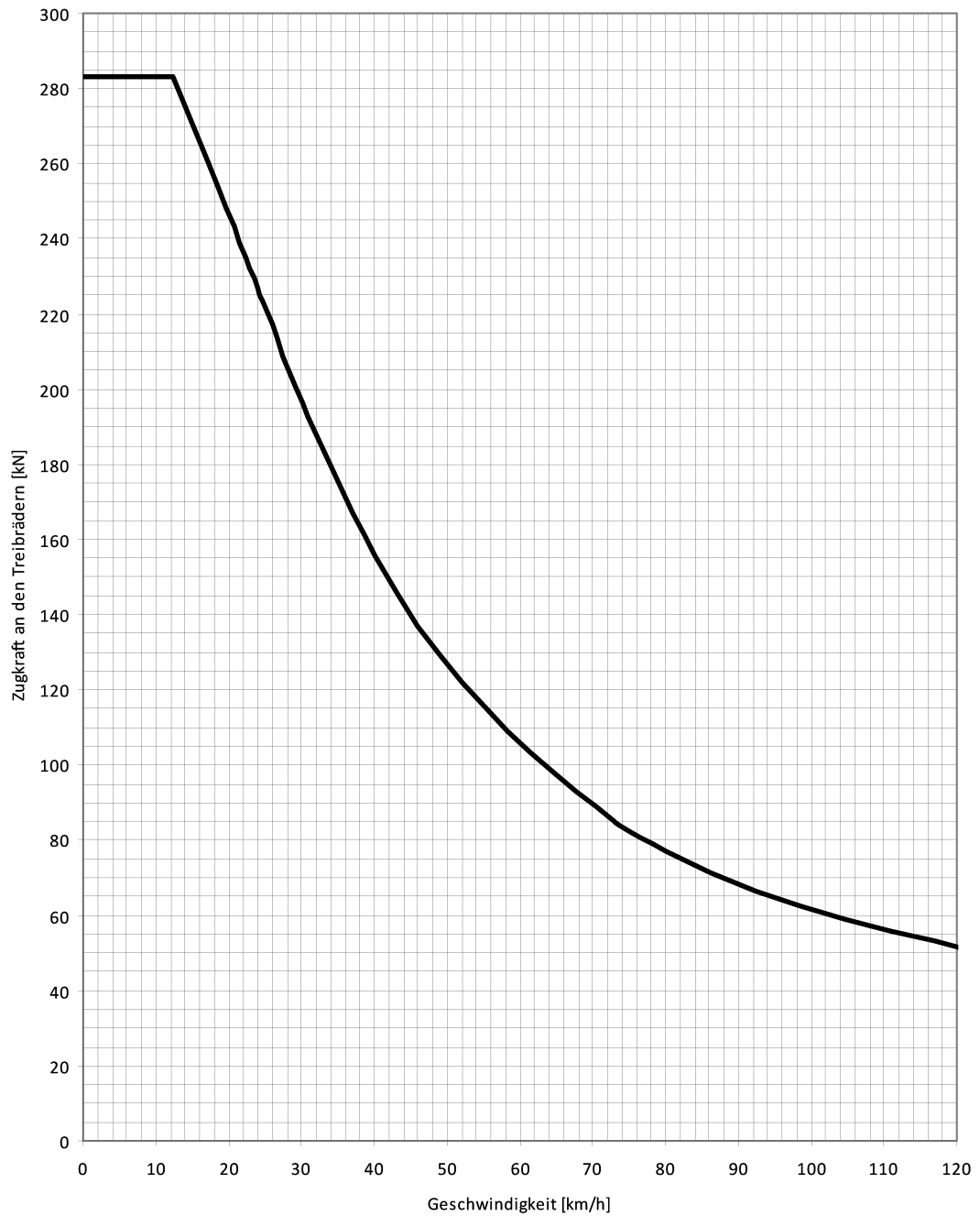


Abbildung 3.1: Zugkraftdiagramm der zur Verfügung stehenden Lokomotiven (Aufgabe 2)

NIVEAU 2-3

18. Für eine in groben Zügen dimensionierte Drehstromlokomotive soll ein Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm entwickelt werden. Folgende Eckdaten der Lokomotive sind bekannt:
- Anzahl der Radsätze 6
 - maximale Radsatzfahrmasse: 22 t je Radsatz
 - maximale Leistung am Treibradumfang je Treibrad: 1,6 MW
 - maximal ausnutzbarer Kraftschluss bei $v=0$ km/h: $\tau=0,36$
 - Höchstgeschwindigkeit: $v_{\max}=160$ km/h
- (a) Zeichnen Sie das Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm mit der Maßgabe, dass die Zugkraft an der Kraftschlussgrenze linear mit 0,35 kN / km/h abfällt. Bestimmen Sie die Übergangsgeschwindigkeit.
- (b) Die betrachtete Lokomotive soll optional mit einem Hilfsdieselmotor ausgerüstet werden, der es ermöglicht, Rangierfahrten ($v_{\max}=40$ km/h) in nicht elektrifizierten Bahnhöfen/Bahnhofsteilen und auf Anschlussgleisen durchzuführen. Ergänzen Sie das Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm um die Zugkraftkurve im Dieselmotor und legen Sie dabei eine Dieselmotorleistung von 235 kW sowie einen vereinfacht als konstant angenommenen Leistungsübertragungswirkungsgrad von 0,8 zugrunde.
19. Ein gemischter Güterzug ($\xi_Z=1,03$) mit einer Wagenzugmasse m_W von 1200 t soll von einer Elektrolokomotive (Masse $m_T=123$ t) mit konventionellem Antrieb (Einphasen-Wechselstrom-Fahrmotoren mit Reihenschlusscharakteristik) über die durch untenstehendes Höhenprofil charakterisierte Strecke befördert werden. Für den Zug gilt dabei planmäßig (**Fahrt A**) eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h.
- (a) Beurteilen Sie mit Hilfe des unten abgebildeten $F_Z(v)$ - Diagrammes, ob die planmäßige Fahrt des Zuges hinsichtlich der Erwärmung der Fahrmotoren unbedenklich ist oder nicht. Gehen Sie davon aus, dass der Zug bei der Einfahrt in den ersten geneigten Streckenabschnitt seine planmäßige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h bereits erreicht hat.
- (b) Durch einen Signaldefekt wird die Höchstgeschwindigkeit in dem 6,4 km langen Streckenabschnitt mit der größten Längsneigung auf 40 km/h beschränkt (**Fahrt B**). Bewerten Sie auch die Fahrt B hinsichtlich einer etwaigen kritischen Erwärmung der Fahrmotoren. (Hinweis: Der Beschleunigungsvorgang nach dem passieren des Signals kann abgeschätzt und muss nicht detailliert nachgerechnet werden.)

Der Fahrzeugwiderstand des Wagenzuges kann mit folgender Gleichung angesetzt werden:

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0057 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

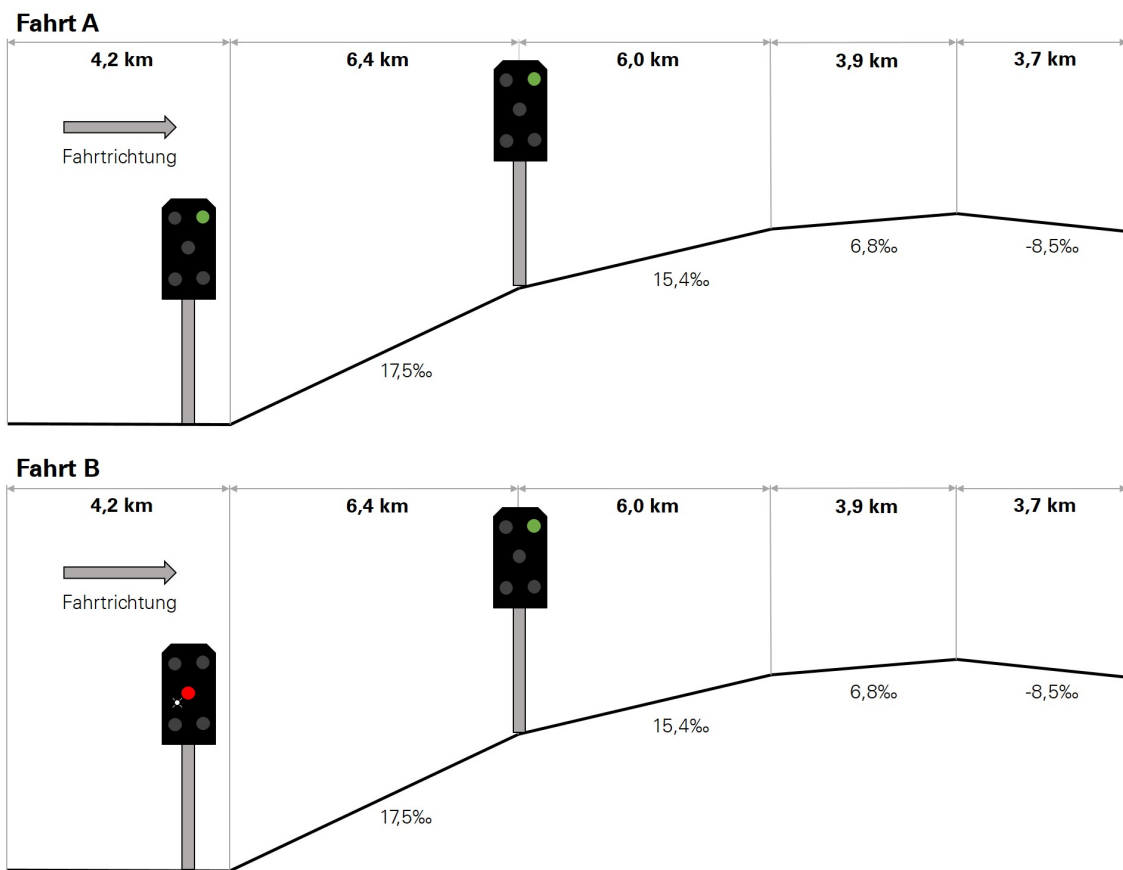


Abbildung 3.2: Neigungsprofil der betrachteten Strecke

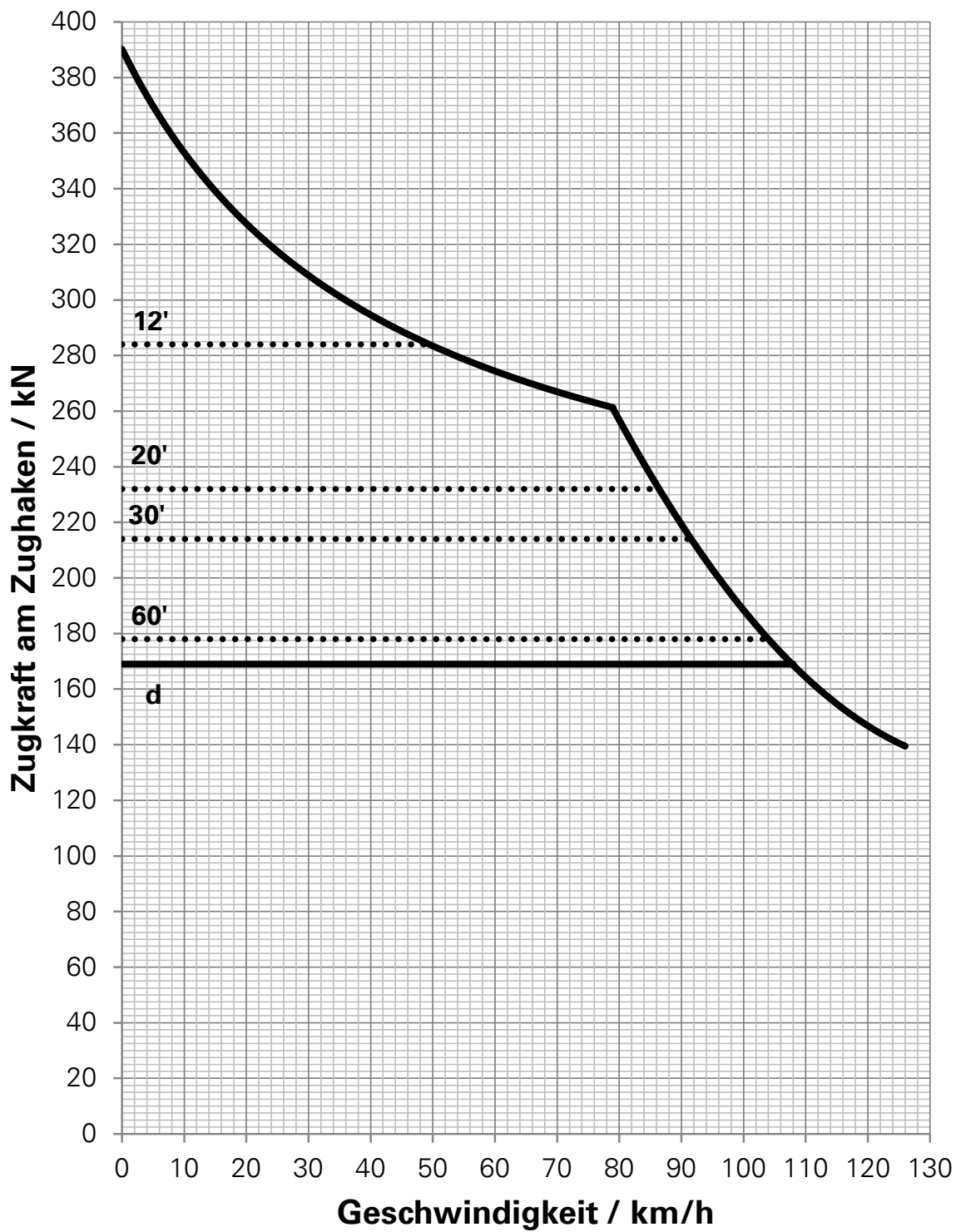


Abbildung 3.3: Zugkraftdiagramm der elektrischen Lokomotive mit konventioneller Antriebstechnik

4 ÜBUNGSKOMPLEX ANTRIEBSTECHNIK

NIVEAU 1

20. Ein Fahrzeug mit mechanischer Leistungsübertragung, dessen Dieselmotor mit maximal 2100 U/min betrieben werden darf, soll im höchsten Gang eine Geschwindigkeit von 120 km/h erreichen.
- (a) Welches Übersetzungsverhältnis des Schaltgetriebes muss dafür gewählt werden, wenn der Durchmesser der Treibräder 820 mm beträgt und das Radsatzgetriebe ein Übersetzungsverhältnis i_{RG} von 3,15 aufweist?
 - (b) Welche Zugkraft kann an den Treibrädern maximal erzielt werden, wenn der Dieselmotor ein Drehmoment von höchstens 1900 Nm abgibt, das Übersetzungsverhältnis i_{SG} im ersten Gang einen Wert von 4,8 aufweist, der Hilfsbetriebefaktor ψ zu 0,05 angenommen werden kann und der Gesamtwirkungsgrad der mechanischen Übersetzungen 0,92 beträgt?
 - (c) Welcher Kraftschlussausnutzung entspricht die zuvor berechnete Treibradzugkraft, wenn zwei von vier Radsätzen des Fahrzeuges angetrieben werden und eine annähernd gleichmäßige Verteilung der Fahrzeugmasse (40 t) auf alle Radsätze angenommen wird? Ist der berechnete Betrag für die Zugkraft realistisch?

NIVEAU 2-3

21. Es soll ein Dieseltriebwagen (Radsatzfolge: B'2'B', Fahrzeugmasse: 56 t, fahrdynamischer Massenfaktor: 1,05) mit zwei Antriebsanlagen und hydro-mechanischer Leistungsübertragung projektiert werden. Als Antriebsmaschinen sollen Dieselmotoren dienen, deren Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik durch die unten stehende Abbildung gegeben ist. Der Drehzahlbereich, in dem die Dieselmotoren in Kombination mit den mechanischen Getriebestufen betrieben werden sollen, ist in der Abbildung farblich hervorgehoben (1300 bis 2030 U/min).

Die hydromechanischen Getriebe, mit dem die beiden Dieselmotoren jeweils gekoppelt werden sollen, weisen in den mechanischen Gängen folgende Übersetzungen auf:

| Gang | Getriebeübersetzung |
|---------|---------------------|
| 1. Gang | $i_{SG,1}=4,14$ |
| 2. Gang | $i_{SG,2}=2,90$ |
| 3. Gang | $i_{SG,3}=2,05$ |
| 4. Gang | $i_{SH,4}=1,43$ |
| 5. Gang | $i_{SG,5}=1,00$ |
| 6. Gang | $i_{SG,6}=0,70$ |

- Bestimmen Sie die Nennleistung des Dieselmotors mit Hilfe des Diagramms (Abbildung 4.1)
- Die Höchstgeschwindigkeit des Triebwagens soll 140 km/h betragen. Legen Sie die Übersetzung der Radsatzgetriebe unter Berücksichtigung der Tatsache fest, dass das Fahrzeug im Rahmen der lauffechnischen Zulassung eine maximale Geschwindigkeit erreichen soll, die 10 Prozent über der nominellen Höchstgeschwindigkeit liegt. Der Durchmesser der Treibräder beträgt im Neuzustand 770 mm und im abgenutzten Zustand 710 mm.
- Entwickeln Sie das Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm (unter Nutzung des mittleren Treibraddurchmessers) des Triebwagens für die mechanischen Gangstufen unter Berücksichtigung der nachfolgend genannten Randbedingungen und geben Sie den Geschwindigkeitsbereich an, der Ihrer Ansicht nach mit dem Anfahrwandler abgedeckt werden muss.

Randbedingungen:

- Leistungsübertragungswirkungsgrad: 0,92
 - Leistungsbedarf der Hilfs- und Nebenbetriebe: 36 kW (gesamtes Fahrzeug)
- Stellen Sie die Dieselmotordrehzahl in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit mit Hilfe eines Diagramms dar (unter Nutzung des mittleren Treibraddurchmessers) .

- (e) Vervollständigen Sie das Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm (unter Nutzung des mittleren Treibraddurchmessers) im Anfahrbereich unter Berücksichtigung der Vorgabe, dass eine Anfahrbeschleunigung von $1,5 \text{ m/s}^2$ in der Ebene erreicht und über einem Geschwindigkeitsintervall von 10 km/h konstant gehalten werden soll. Überprüfen Sie bei dieser Gelegenheit auch, ob eine solche Beschleunigung überhaupt physikalisch möglich ist und begründen Sie Ihre Aussage.

Hinweis: Der Fahrzeugwiderstand kann mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$F_{WFT} = 1,8 + 3,3 \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

- (f) Zeichnen Sie (unter Nutzung des mittleren Treibraddurchmessers) das Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Diagramm für den betrachteten Triebwagen.
- (g) Zeichnen Sie (unter Nutzung des mittleren Treibraddurchmessers) das Steigfähigkeits-Diagramm für den betrachteten Triebwagen. Schätzen Sie mit dessen Hilfe ab, welche Geschwindigkeit ein solches Fahrzeug auf der Strecke zwischen Tharandt und Klingenberg-Colmnitz mit einer maximalen Steigung von $26,5 \text{ ‰}$ erreichen könnte.
- (h) **Zusatzfrage:** Welches Schaltregime würden Sie in der Getriebesteuerung hinterlegen? Begründen Sie Ihre Antwort und diskutieren Sie in der Gruppe, ob es hinsichtlich der Getriebeauslegung noch Optimierungsbedarf gäbe oder nicht.

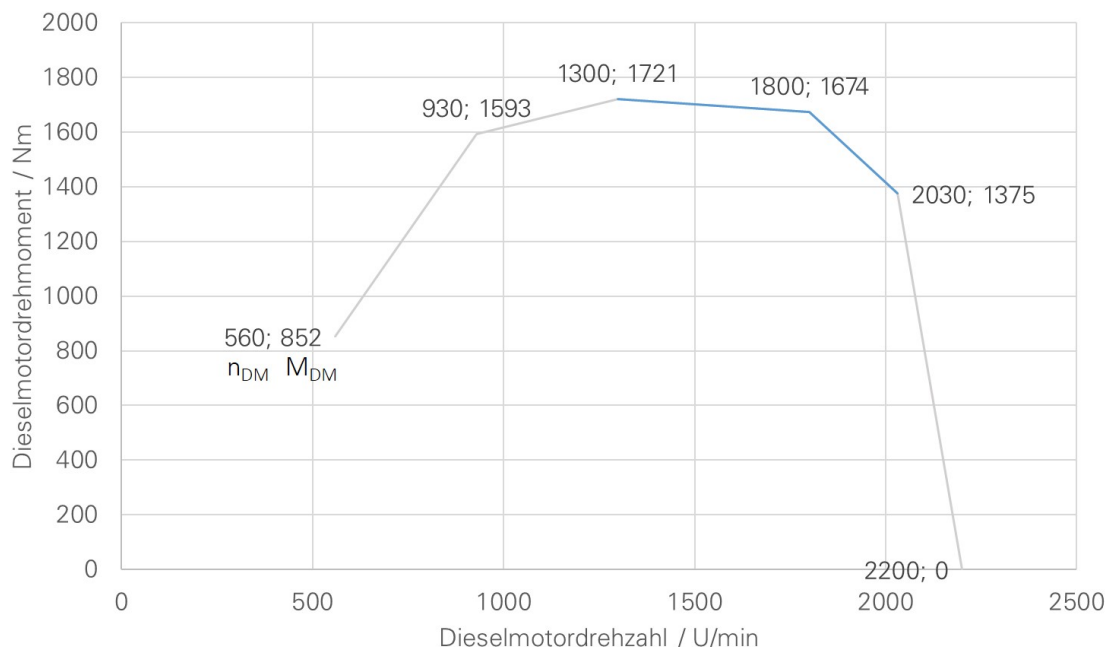


Abbildung 4.1: Drehmoment-Charakteristik der betrachteten Dieselmotoren

5 ÜBUNGSKOMPLEX AUSLEGUNG UND LEISTUNGSFÄHIGKEIT

NIVEAU 1

22. Betrachtet wird ein Hochgeschwindigkeitszug TGV PSE.

- (a) Der Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h eine Rampe von 5‰ hinauf. Ermitteln Sie den Leistungsbedarf an den Treibrädern.
- (b) Anschließend wird ein Gefälle von 10‰ durchfahren. Muss dabei an den Treibrädern Leistung zu- oder abgeführt werden?
- (c) Ermitteln Sie die Leistungsaufnahme oder -abgabe am Stromabnehmer, wenn ein Wirkungsgrad von 0,6 zwischen Treibrädern und Stromabnehmer angenommen wird.



NIVEAU 2

23. Ein Eisenbahnverkehrsunternehmen benötigt neue elektrische Lokomotiven mit 4 angetriebenen Radsätzen (max. Radsatzfahrmasse: 22 t) und hat deswegen eine Ausschreibung veröffentlicht, die folgende fahrdynamisch relevanten Forderungen enthält:

- Beförderung von Fernreisezügen mit Zugmassen bis 500 t mit maximal 230 km/h in der Ebene.
- Beförderung von Fernreisezügen mit Zugmassen bis 500 t mit maximal 200 km/h in Steigungen bis 5 ‰.
- Beförderung von Nahverkehrszügen mit Zugmassen bis zu 300 t mit einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h, die auch in Steigungen von bis zu 10 ‰ gehalten werden soll. Dabei ist das Fahrzeug so auszulegen, dass der Verkehr auf Strecken mit hoher Zugfolgedichte so wenig wie möglich behindert wird.

Ermitteln Sie die Leistung der Fahrmotoren unter der Maßgabe, dass ein Radsatzeinzelantrieb ($\eta_{RS}=0,92$) gewünscht ist. Treffen Sie für die Fahrwiderstände folgende Annahmen:

- Lokomotive:

$$F_{WFT} = 1,4 + 0,84 \frac{v}{100} + 2,8 \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

- Fernverkehrszug:

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

- Nahverkehrszug:

$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0028 \left(\frac{v}{100} \right)^2$$



24. Betrachtet wird ein S-Bahn-Zug mit einer Masse von 150 t. Das Zugkraftdiagramm inklusive ausgewählter numerischer Stützstellen (Wertepaare $[v; F_T]$) kann Abbildung 5.1 entnommen werden.

- (a) Entwickeln Sie auf Grundlage der Zugkraftcharakteristik ein Steigfähigkeitsdiagramm dieser Fahrzeuge. Setzen Sie für den Fahrzeugwiderstand folgende Gleichung an:

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

- (b) Welche Steigung kann der Zug mit einer Geschwindigkeit von konstant 120 km/h maximal befahren?
- (c) Auf welchen Wert reduziert sich dieser Steigungsbetrag, wenn der Zug bei Einfahrt in die Steigung die Zielgeschwindigkeit noch nicht erreicht und deshalb eine spezifische Beschleunigungsreserve $f_a=0,0020$ berücksichtigt werden muss?

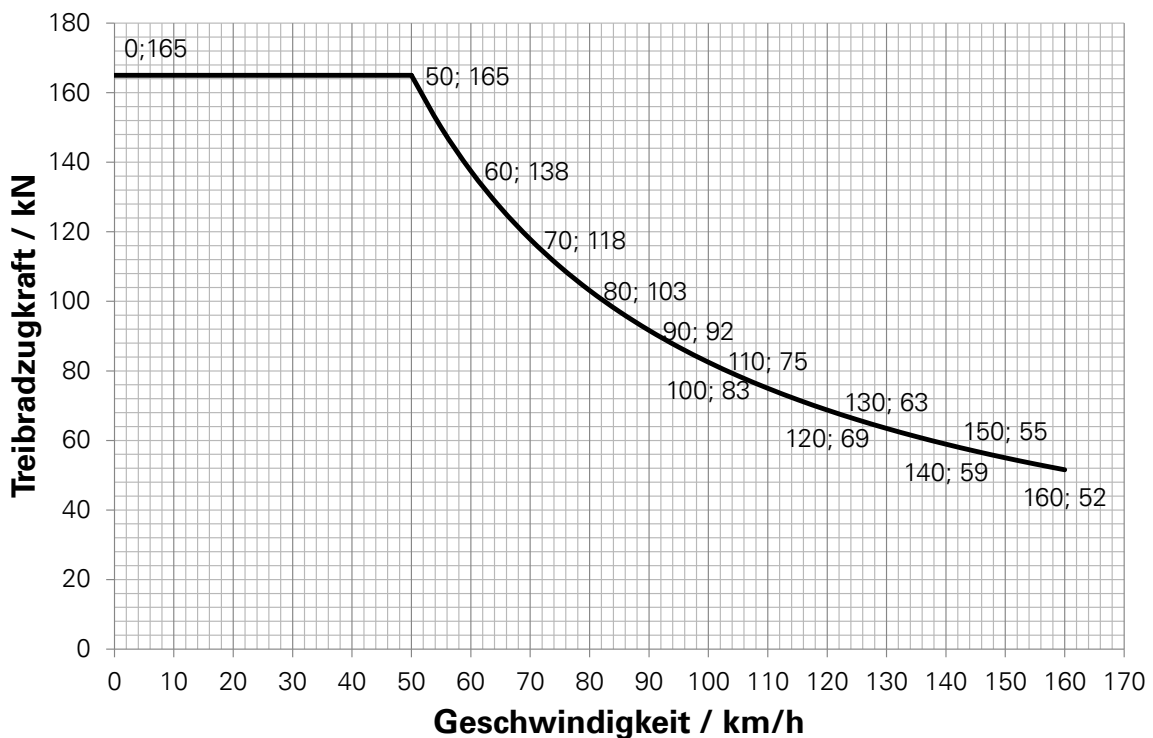


Abbildung 5.1: Zugkraft-Diagramm des betrachteten S-Bahn-Zuges

NIVEAU 2-3

25. Es soll die fahrdynamische Auslegung einer Rangierlok (Radsatzfolge: B'B' oder Bo'Bo') vorgenommen werden, die folgende Leistungen erfüllen kann:

- Anfahren und Verschieben von Güterganzzügen (Wagenzugmasse: 3000 t) in der Ebene mit maximal 25 km/h
 - Überführung von gemischten Güterzügen (Wagenzugmasse: 1000 t) mit mindestens 40 km/h in Steigungen bis 10 ‰
- (a) Legen Sie zunächst die Masse der Lokomotive unter der Maßgabe fest, dass eine Ausnutzung des Kraftschlusses auf einen Wert von $\tau = 0,25$ begrenzt werden soll. Welche Radsatzfahrmasse wird die Lok deshalb mindestens aufweisen?
- (b) Bestimmen Sie die erforderliche Nennleistung des Dieselmotors für beide infrage kommenden Leistungsübertragungsarten. Nehmen Sie den Hilfsbetriebfaktor jeweils zu $\psi = 0,05$ an.
- (c) Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse hinsichtlich der praktischen Umsetzbarkeit und nennen Sie ein real existierendes Referenzfahrzeug, das bezüglich des Fahrzeugtyps und der Leistungsklasse ähnlich dem betrachteten Beispielfahrzeug ist.

Annahme Triebfahrzeugwiderstandskraft:

$$F_{WFT} = 0,9 + 3,8 \left(\frac{v + 15}{100} \right)^2$$

Annahme Wagenzugwiderstandskraft Güterganzzüge:

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

Annahme Wagenzugwiderstandskraft gemische Güterzüge:

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



6 ÜBUNGSKOMPLEX

ENERGIEBEDARF

NIVEAU 1

26. Ein Hochgeschwindigkeitszug TGV PSE fährt mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h eine 5 km lange Rampe von 5 ‰ hinauf.

- (a) Ermitteln Sie den Energieumsatz an den Treibrädern.
- (b) Um welchen Betrag erhöht sich die potentielle Energie des Zuges während des Durchfahrens der Rampe und in welchem Verhältnis steht die Änderung der potentiellen Energie zur verrichteten Arbeit an den Treibradsätzen?
- (c) Anschließend wird ein 3 km langes Gefälle von 17,5 ‰ durchfahren. Welcher Energiebetrag kann dabei in das Netz zurückgespeist werden, wenn ein Gesamtwirkungsgrad zwischen Treibrad und Stromabnehmer von 65 % zugrunde gelegt wird?

27. Eine Lokomotive ($m_T = 84$ t) schleppt einen Güterzug mit einer Masse von 1600 t bei einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 80$ km/h eine Steigung von 5 ‰ hinauf.

- (a) Welche Arbeit wird an den Treibrädern verrichtet, wenn die Steigung eine Länge von 2200 m aufweist?

Gehen Sie von folgenden Annahmen aus:

$$F_{WFT} = 1,47 + 2,65 \cdot \left(\frac{v + 20}{100}\right)^2$$

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

- (b) Bestimmen Sie den Energiebedarf pro km für die betrachtete Fahrt ab Fahrdraht, wenn der Wirkungsgrad des gesamten Fahrzeuges 68 % beträgt.
- (c) Ein Güterzug gleicher Masse und Zugkonfiguration durchfährt die Strecke in umgekehrter Richtung. Dabei wird die während des Bremsens an den Treibrädern umgesetzte Energie mit einem Wirkungsgrad von 50 % in das Fahrleitungsnetz zurückgespeist. Ermitteln Sie den Betrag der zurückgespeisten Energiemenge.

NIVEAU 2

28. Betrachtet wird die Fahrt eines Regionalexpresses, bestehend aus einer Elektrolok (Typ 1) mit konventioneller Antriebstechnik ($m_T=83$ t) und 5 Personenzug-Wagen ($m_W=157$ t). Die Widerstände von Lok und Wagenzug werden durch die folgenden Gleichungen angenähert:

- Lok:

$$F_{WFT} = 3,66 + 4,63 \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

- Wagenzug:

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

Berechnen Sie unter Zuhilfenahme des TLV-Diagrammes (siehe Abbildung 6.1) den Energiebedarf je Kilometer für die folgenden Fälle:

- (a) Der Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h in der Ebene.
- (b) Der Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h in einer Steigung von 12 ‰.
- (c) Der Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h in einer Steigung von 20 ‰.



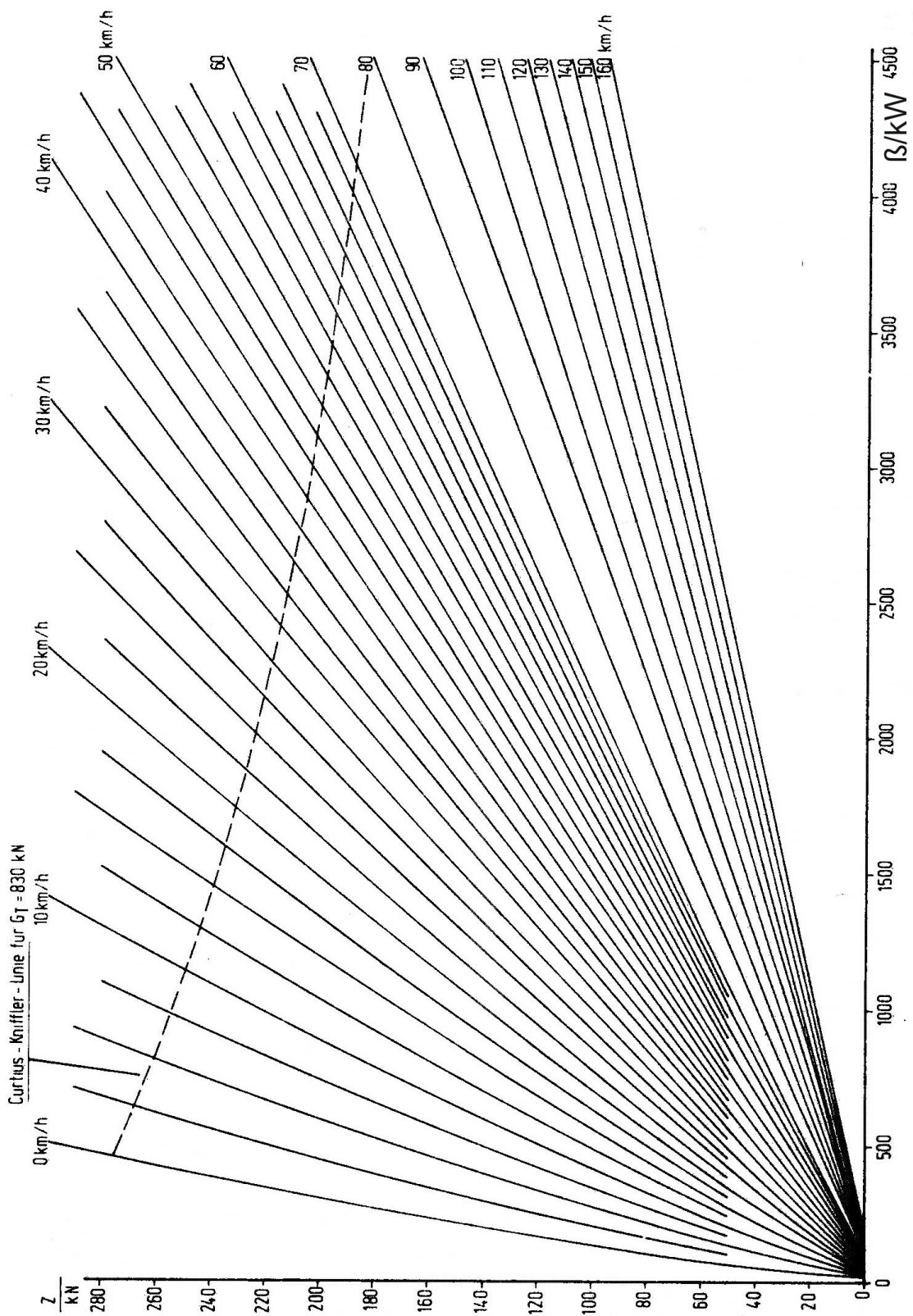


Abbildung 6.1: TLV-Diagramm Ellok Typ 1 (konventionelle Antriebstechnik), **Bezugspunkt: Treibradumfang**

29. Eine Ellok vom Typ 2 schleppt einen Güterzug ($m_W=1600\text{ t}$) mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v=80\text{ km/h}$ über eine Strecke mit wechselnden Neigungen.

- Wagenzugwiderstand:

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0057 \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

- Streckencharakteristik:

| | | | | |
|-------------------|------|------|-------|-------|
| Streckenlänge [m] | 2000 | 1500 | 1700 | 2300 |
| Neigung [%] | 1,75 | 3,05 | -0,15 | -4,00 |

- Ermitteln Sie unter Zuhilfenahme des Kennlinienfeldes (siehe Abbildung 6.2) den Energiebedarf sowie den durchschnittlichen Energiebedarf pro km und pro tkm (Bezug: Wagenzugmasse) für die betrachtete Gesamtstrecke.
- Ermitteln Sie für alle Teilstrecken den Fahrzeugwirkungsgrad und tragen Sie die Wirkungsgrade in einem Diagramm über der Zughakenleistung auf.

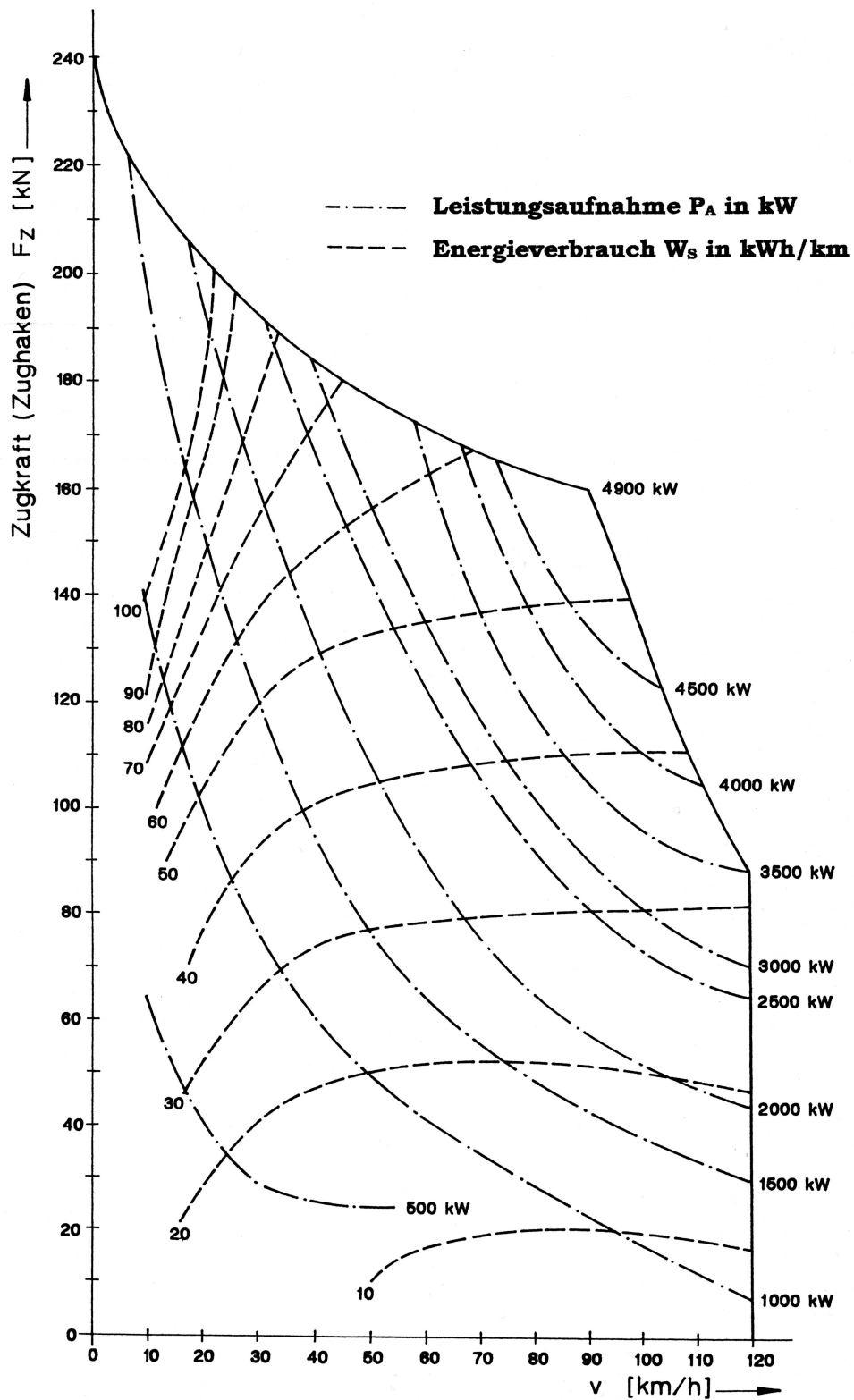


Abbildung 6.2: Kennlinienfeld Ellok Typ 2 (konventionelle Antriebstechnik), **Bezugspunkt: Zughaken**

7 ÜBUNGSKOMPLEX FAHRZEIT

NIVEAU 1

30. Eine elektrische Lokomotive (Masse: 87 t) mit Drehstromantriebstechnik erzeuge an den Treibrädern eine Anfahrzugkraft von 300 kN, die bis zur Übergangsgeschwindigkeit (84 km/h) linear auf 274 kN abfällt. Die Lokomotive befördert einen Güterzug mit einer Wagenzugmasse von 2000 t in einer leichten Steigung (2,5‰). Der Massenfaktor des gesamten Zuges betrage 1,04 und die Fahrzeugwiderstände von Lok und Wagenzug können anhand der folgenden Gleichungen abgeschätzt werden:

$$F_{WFT} = 1,45 + 0,84 \frac{v}{100} + 2,8 \left(\frac{v + 15}{100} \right)^2$$

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

- (a) Ermitteln Sie die Anfangsbeschleunigung des Zuges bei $v=5$ km/h.
- (b) Welche Beschleunigung erreicht der Zug bei 60, welche bei 80 km/h?
- (c) Welche mittlere Verzögerung müsste für den Auslaufvorgang in einem Geschwindigkeitsintervall zwischen 80 und 70 km/h angesetzt werden?
- (d) Wie lang würde solch ein Auslaufvorgang dauern und welcher Weg wird während dessen zurückgelegt?

NIVEAU 2-3

31. Es soll die Fahrzeit für ein einfaches Fahrspiel eines S-Bahn-Zuges (Technische Daten: siehe Tabelle 7.1) berechnet werden. Dabei gilt es, die Beschleunigungen/Verzögerungen in der Beschleunigungs- und Auslaufphase auf fahrdynamischer Basis sinnvoll abzuschätzen.

Die Zugkraftcharakteristik des Zuges ist der Abbildung 7.1 zu entnehmen.

Die entlang der Strecke auftretenden mittleren Längsneigungen liefert das Streckenband (Abbildung 7.2). Die streckenseitig zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt durchgängig 120 km/h.

Für die Betriebsbremsung am Ende des Fahrspiels kann eine mittlere Bremsverzögerung von $0,6 \text{ m/s}^2$ angenommen werden.

- (a) Berechnen Sie die kürzeste Fahrzeit (kein Auslauf) mit Hilfe angenäherter mittlerer Beschleunigungen. Setzen sie für den Streckenwiderstand vereinfacht die mittlere Längsneigung für die gesamte durchfahrene Strecke an.
- (b) Berechnen Sie das Fahrspiel erneut unter Berücksichtigung eines Fahrzeugauslaufes zwischen 120 und 113 km/h. Ermitteln Sie den Auslaufweg. Um wieviel Prozent (bezogen auf die kürzeste Fahrzeit) verlängert sich die Gesamtfahrzeit durch das Einfügen des Auslaufabschnittes?
- (c) Welche Veränderung erwarten Sie, wenn die Fahrzeit nicht mit gemittelten Werten für Widerstände und Beschleunigungen gerechnet wird, sondern mit den exakten Werten (Simulation)? Begründen Sie Ihre Antwort.

Tabelle 7.1: Technische Daten des S-Bahn-Zuges

| | |
|--------------------|--|
| Masse | 150 t |
| Fahrzeugwiderstand | $F_{WFT} = 2,1 + 2,5 \frac{v}{100} + 3,7 \left(\frac{v}{100}\right)^2$ |
| Massenfaktor | 1,06 |

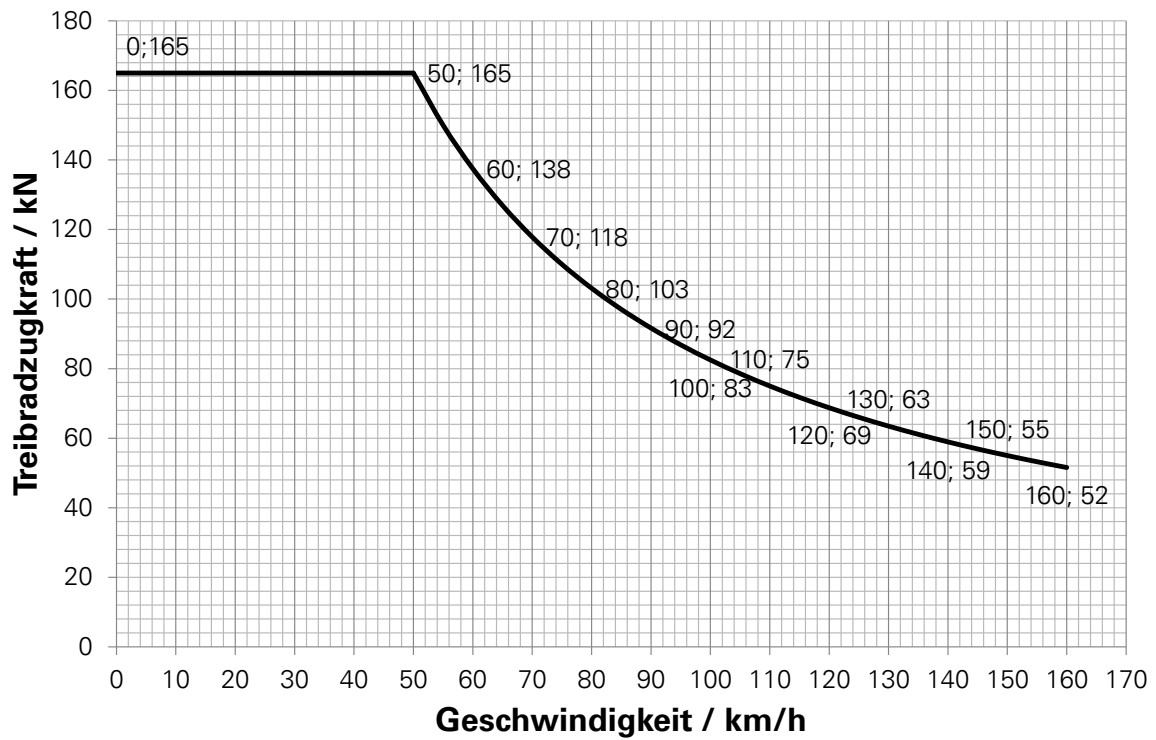


Abbildung 7.1: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm des S-Bahn-Zuges

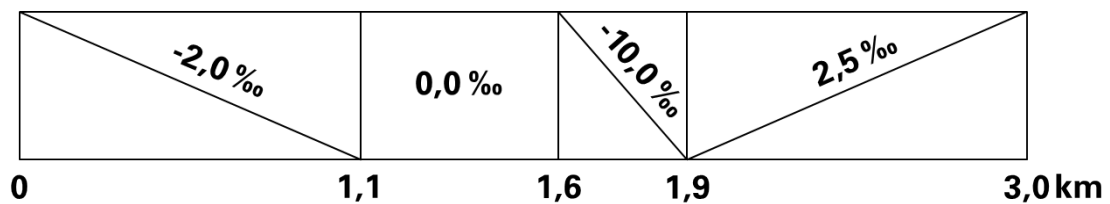


Abbildung 7.2: Streckenband für das zu berechnende Fahrspiel