

ÜBUNGSAUFGABEN ZUR VORLESUNG „FAHRDYNAMIK FÜR VERKEHRSINGENIEURE“

Dr.-Ing. M. Kache

3. April 2019

Inhaltsverzeichnis

1 Anmerkungen und Hinweise	2
2 Übungskomplex Kinematik und fahrdynamische Grundgleichung	3
2.1 Aufgaben zum Selbststudium	3
2.2 Aufgaben zur 1. Gruppenübung	4
3 Übungskomplex Fahrwiderstände	6
3.1 Aufgaben zum Selbststudium	6
3.2 Aufgaben zur 2. Gruppenübung	7
4 Übungskomplex Antriebskräfte	11
4.1 Aufgaben zum Selbststudium	11
4.2 Aufgaben zur 3. Gruppenübung	12
5 Übungskomplex Leistungsbedarf	14
5.1 Aufgaben zum Selbststudium	14
5.2 Aufgaben zur 4. Gruppenübung	15
6 Übungskomplex Energiebedarf	19
6.1 Aufgaben zum Selbststudium	19
6.2 Aufgaben zur 5. Gruppenübung	20
7 Übungskomplex Fahrdynamische Anwendungen	25
7.1 Aufgaben zum Selbststudium	25
7.2 Aufgaben zur 6. Gruppenübung	26

1 Anmerkungen und Hinweise

Dieses Übungsheft enthält alle Übungsaufgaben, die Sie für die Gruppenübungen zur Vorlesung „Fahrodynamik für Verkehrsingenieure“ benötigen. Es wird dringend empfohlen, dass Sie diese Aufgaben in ausgedruckter oder gut lesbarer elektronischer Form zu allen Übungen mitbringen. Des Weiteren sollten Sie die Lösung der Aufgaben möglichst von Anfang an mit Hilfe der Formelsammlung zur Vorlesung angehen. Der sichere Umgang mit der Formelsammlung wird es Ihnen in der Prüfung gestatten, die vorhandene Zeit in substantielle Arbeitsleistung anstatt in das Durchsuchen der Formelsammlung zu investieren.

Darüber hinaus sind in diesem Heft „Aufgaben zum Selbststudium“ enthalten, die Sie idealerweise als „Erwärmung“ vor den Gruppenübungen lösen sollten, damit Sie mit den wichtigsten Gleichungen und Zusammenhängen schon besser vertraut sind. Es handelt sich um verhältnismäßig einfache Aufgaben, die mit überschaubarem zeitlichen Aufwand (<30 min.) gelöst werden können. Aufgrund ihrer Einfachheit erscheinen zu diesen Aufgaben auch keine ausführlichen Lösungen, sondern lediglich die Endergebnisse in dem zu dieser Aufgabensammlung gehörigen Lösungsheft. Sollten Sie dennoch Probleme haben, die Aufgaben zu lösen, nutzen Sie bitte zunächst die Möglichkeit, sich mit Ihren Kommilitonen zu verständigen. Dazu wurde in dem zu der Vorlesung gehörigen OPAL-Kurs ein Forum eingerichtet, zu dessen Nutzung Sie ausdrücklich eingeladen sind.

2 Übungskomplex Kinematik und fahrdynamische Grundgleichung

2.1 Aufgaben zum Selbststudium

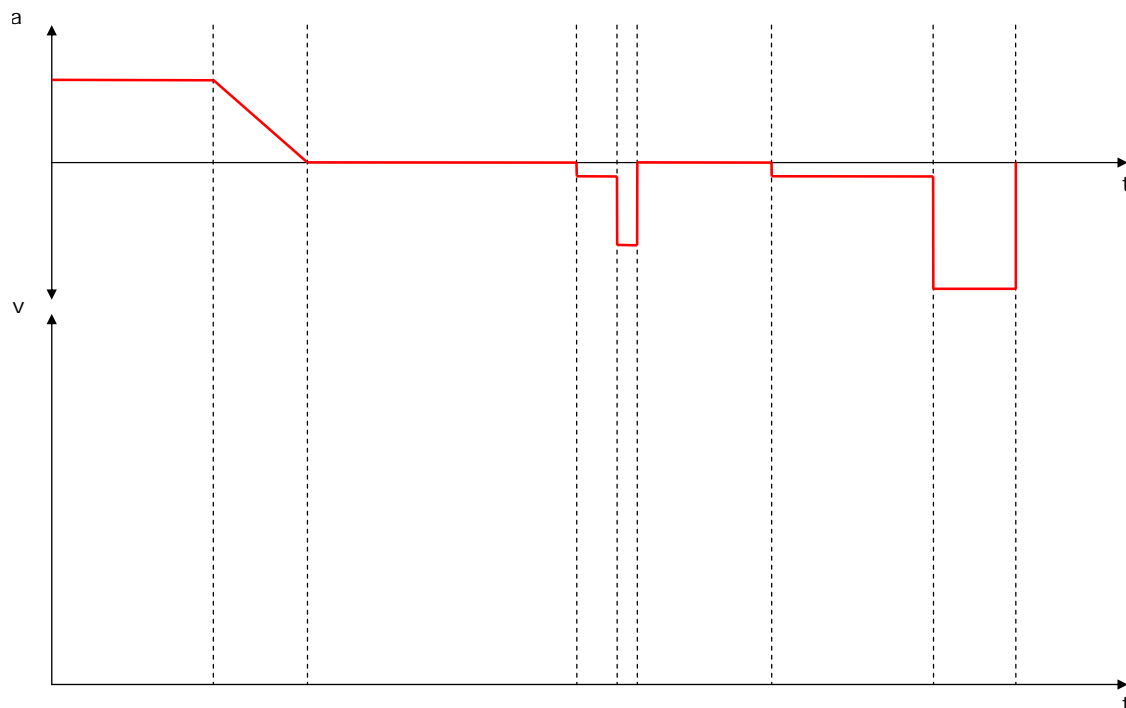
1. Betrachtet wird ein Güterzug mit einer Masse von 1600 t. Er besteht aus beladenen Güterwagen gleicher Bauart, für die ein fahrdynamischer Massenfaktor von 1,04 angenommen wird.
 - (a) Der Zug wird mit einer Lokomotive bespannt, die eine Masse von 85 t und einen fahrdynamischen Massenfaktor von 1,11 aufweist. Berechnen Sie den fahrdynamischen Massenfaktor des gesamten Zuges.
 - (b) Welchen Massenfaktor müsste die Lokomotive aufweisen, damit sich der Massenfaktor des gesamten Zuges im Vergleich zum Wagenzug um 1 % erhöht?
 - (c) Die Wagen werden entladen, sodass sich die Masse des Wagenzuges auf 350 t reduziert. Welcher Massenfaktor ist in diesem Fall für den gesamten Zug anzusetzen?
 - (d) Welche Zugkraft muss die Lokomotive an den Treibrädern aufbringen, wenn der beladene Zug mit einer Beschleunigung von $0,1 \text{ m/s}^2$ in der Ebene beschleunigt werden soll und Lokomotive und Wagenzug zusammen eine Widerstandskraft von 15 kN generieren?
 - (e) Wie hoch darf die Streckenwiderstandskraft sein, wenn der leere Zug mit der gleichen Zugkraft und der gleichen Beschleunigung in einer Steigung gefahren werden soll?

Hinweise

Zur Lösung der Aufgaben zum Selbststudium benötigen Sie lediglich die Formelsammlung (Abschnitt: „Grundlagen“) und ggf. einen Taschenrechner. Durch konsequente Anwendung der dort gegebenen Gleichungen ergibt sich die Lösung mit geringem zeitlichen Aufwand.

2.2 Aufgaben zur 1. Gruppenübung

1. Diskutieren Sie mit Hilfe der fahrdynamischen Grundgleichung, welche Bewegungszustände im Fahrzeugauslauf eintreten können und charakterisieren Sie diese.
2. Leiten Sie aus dem nachfolgend gegebenen Beschleunigungs-Zeit-Verlauf den Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf ab und tragen Sie die Geschwindigkeit qualitativ richtig in das Schaubild ein.



3. Bestimmen Sie die erforderliche Zugkraft am Zughaken F_Z , die erforderlich ist, damit ein S-Bahn-Zug, bestehend aus einer E-Lok ($m_T=84\text{ t}$, $\xi_T=1,11$) und 4 Waggons ($\sum m_W=200\text{ t}$, $\xi_W=1,06$) bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h eine Momentanbeschleunigung von $0,8\text{ m/s}^2$ erreichen kann. Nehmen Sie dabei folgende Widerstandskräfte an:
 $F_{WF}(50\text{ km/h})=5\text{ kN}$, $F_{WS}(7,5\text{ ‰})=21\text{ kN}$.
4. Es wird die Beschleunigung eines Zuges aus dem Stand auf eine Endgeschwindigkeit von 80 km/h betrachtet. Dabei soll ein Anfahr- sowie ein daran anschließender Beschleunigungsvorgang untersucht werden. Während des Anfahrvorganges wird während eines Zeitintervalls von 35 s linear eine Beschleunigung von $0,31\text{ m/s}^2$ aufgebaut. Während des daran anschließenden Beschleunigungsvorganges liegt eine Abhängigkeit der Beschleunigung von der Geschwindigkeit vor.
 - (a) Bestimmen Sie den Ruck während des Anfahrens.

- (b) Welche Geschwindigkeit wird erreicht, wenn der Anfahrvorgang abgeschlossen ist und welcher Weg wird bis dahin zurückgelegt?
- (c) Stellen Sie den zeitlichen Verlauf der Größen Ruck, Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg für den Anfahrvorgang graphisch dar.
- (d) Berechnen Sie Beschleunigungsweg und -zeit für den restlichen Beschleunigungsvorgang. Legen Sie dabei die Annahme zugrunde, dass der Beschleunigungsverlauf wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$a(v) = mv + n = -0,0046v + 0,334 \quad a \text{ in m/s}^2, v \text{ in m/s}$$

3 Übungskomplex Fahrwiderstände

3.1 Aufgaben zum Selbststudium

1. Ein Güterganzzug (spezifischer Wagenzugwiderstand: $f_{WFW} = 0,0012 + 0,0025 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$) mit einer Masse von 2000 t soll befördert werden.
 - (a) Welche Zugkraft muss eine Lokomotive dafür am Zughaken bei $v=80$ 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.
2. Ein Mittelklassewagen (Masse: 1,5 t) fährt mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h eine mit einer Steigung von 5% entlang.
 - (a) Welcher Neigungswiderstand muss dabei überwunden werden und welche Leistung muss dafür an den Rädern zur Verfügung gestellt werden?
 - (b) Berechnen Sie den Fahrzeugwiderstand unter der Annahme folgender Werte: Fahrzeug-Querschnittsfläche = 2 m^2 , Luftwiderstandsbeiwert = 0,31, $\rho_L=1,225 \text{ kg/m}^3$, spezifischer Rollwiderstand = 0,010.
 - (c) Welche Leistung muss an den Rädern zur Überwindung des Fahrzeugwiderstandes bereitgestellt werden?
 - (d) In welcher Steigung und bei welcher Geschwindigkeit würde sich die zur Überwindung der Fahrwiderstände benötigte Leistung zu gleichen Teilen auf den Roll-, Luft- und Steigungswiderstand aufteilen?

Hinweise

Zur Lösung der Aufgaben zum Selbststudium benötigen Sie lediglich die Formelsammlung (Abschnitt: „Widerstandskräfte“), die Erkenntnis, dass sich die Leistung bei konstanter Geschwindigkeit und Kraft als Produkt aus diesen beiden Größen ergibt, und ggf. einen Taschenrechner.

3.2 Aufgaben zur 2. Gruppenübung

Wahlaufgabe 1A: Schienenverkehr

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:	$\xi = 1,05$

1. Stellen Sie den Fahrzeugwiderstand graphisch über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich dar.
2. 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.
3. Das Fahrzeug durchfährt die in Abbildung 3.1 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.

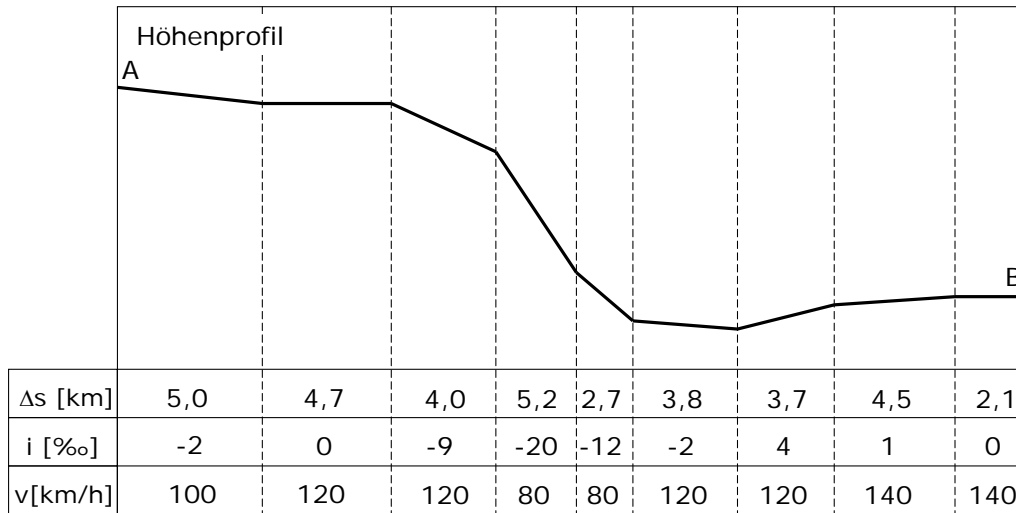


Abbildung 3.1: Streckenprofil von A nach B zur **Wahlaufgabe Schienenverkehr**

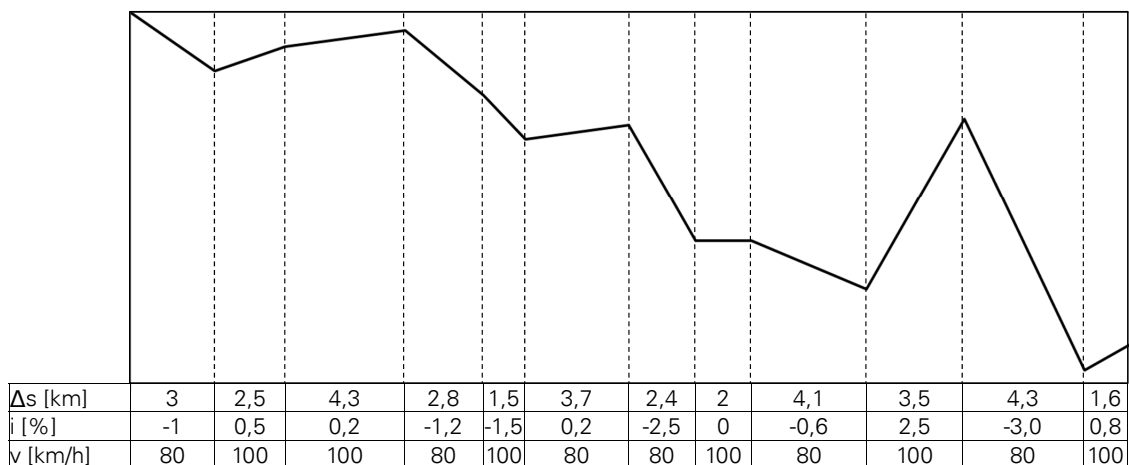


Abbildung 3.2: Streckenprofil von A nach B zur **Wahlaufgabe Straßenverkehr**

Wahlaufgabe 1B: Straßenverkehr

Betrachtet wird ein Bus mit folgenden technischen Parametern:

Fahrzeugmasse:	20 t
Höchstgeschwindigkeit:	100 km/h
spezifischer Grundwiderstand:	$f_{WR} = 0,0075 + 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot v$
Luftwiderstandsbeiwert:	$c_W = 0,45$
Stirnfläche:	$A = 9 \text{ m}^2$
fahrdyn. Massenfaktor im höchsten Gang:	$\xi = 1,05$

1. Stellen Sie den Fahrzeugwiderstand graphisch über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich dar (Annahme: $\rho_L = 1,225 \text{ kg/m}^3$).
2. Bei welcher Geschwindigkeit sind die Widerstandsanteile Luftwiderstand und Rollwiderstand gleich groß? Bilden Sie das Verhältnis von Luftwiderstandskraft zu Gesamtwiderstandskraft für die Geschwindigkeiten 20, 40, 60, 80 und 100 km/h und stellen Sie Ihre Ergebnisse graphisch über der Geschwindigkeit dar.
3. Das Fahrzeug durchfährt die in Abbildung 3.2 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 Beharrungsbremmung eingeleitet wird. Bestimmen Sie für jeden Abschnitt die erforderliche Bremskraft und Bremsleistung sowie die an den Bremsen umgesetzte Energie. Berücksichtigen Sie dabei die Tatsache, dass sich bei Straßenfahrzeugen beim Ausrollen mit eingelegtem Gang eine zusätzliche Widerstandskraft ergibt, die aus dem Schleppmoment des Motors im Schubbetrieb (Motor wird über die Räder mitgedreht) resultiert. Setzen Sie dafür im vorliegenden Fall für $v = 80 \text{ km/h}$ eine Kraft von 1,6 kN und für $v = 100 \text{ km/h}$ eine Kraft von 1,9 kN an.

Aufgabe 2

Der in Aufgabe 1A 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.

1. 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.
2. Führen Sie die gleiche Rechnung mit denselben Randbedingungen für ein Auto durch, wenn folgende Parameter bekannt sind:

Fahrzeugmasse:	1,8 t
Höchstgeschwindigkeit:	195 km/h
Grundwiderstand:	$f_{WF0} = 0,01 + 0,01 \frac{v[\text{km/h}]}{100}$
Fahrdynamischer Massenfaktor:	$\xi = 1,02$
Fahrzeugquerschnittsfläche:	$A = 2 \text{ m}^2$
Luftwiderstandsbeiwert:	$c_W = 0,3$
Luftdichte:	$\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$
Windgeschwindigkeit:	$v_W = 4,2 \text{ m/s}$

3. Sind die mittels Linearisierung berechneten Auslaufwege größer oder kleiner als im Falle der Integration der exakten Beschleunigungsfunktion? Begründen Sie Ihre Antwort.

4 Übungskomplex Antriebskräfte

4.1 Aufgaben zum Selbststudium

1. 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.
2. 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?
3. Welche Treibradzugkraft kann von einer Lokomotive bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h entwickelt werden, wenn die Treibradleistung mit 5,6 MW angegeben wird?
4. Ein Bus soll im 1. Gang eine maximale Zugkraft von 55 kN an den Treibrädern aufbringen können. Das maximale Drehmoment des Dieselmotors wird mit 870 Nm angegeben. Wie muss die Gesamtübersetzung (Schalt- und Radsatzgetriebe) gewählt werden, um dies zu erreichen? Der Radius der Räder kann zu 0,46 m und der gesamte Übertragungswirkungsgrad zu 0,9 angenommen werden. Hilfsbetriebe müssen nicht berücksichtigt werden.

Hinweise

Zur Lösung der Aufgaben zum Selbststudium benötigen Sie lediglich die Formelsammlung (Abschnitt: „Antriebskräfte“) und einen Taschenrechner.

4.2 Aufgaben zur 3. Gruppenübung

Aufgabe 1

Von einem Pkw sind folgende Daten bekannt:

- Getriebe:

Gang	Übersetzung
1	3,8
2	2,1
3	1,4
4	1,0
5	0,8

- Motor:

Drehzahl [1/min]	Drehmoment [Nm]
1000	150
2200	280
5500	280
6500	230

- Rollradius der Räder: 0,3 m
 - Achsgetriebeübersetzung: 4,5
1. Zeichnen Sie jeweils ein Diagramm für das Motordrehmoment und die Motorleistung in Abhängigkeit von der Motordrehzahl unter der Annahme, daß das Drehmoment zwischen den Stützstellen linear verläuft.
 2. Zeichnen Sie ein Diagramm, in dem für jeden Gang die Drehzahl über der Geschwindigkeit aufgetragen ist. Welche Grenzen sind der Fahrzeuggeschwindigkeit durch den Arbeitsbereich des Motors gesetzt? Geben Sie die relevanten Geschwindigkeiten an.
 3. Zeichnen Sie das Zugkraftdiagramm für das Fahrzeug unter der Annahme eines konstanten Gesamtwirkungsgrades des Antriebsstranges zwischen Motorwelle und Rädern von 0,8 und einem Hilfsleistungsfaktor ψ von 0,03.

Aufgabe 2

Die Zugkraftcharakteristik einer im folgenden betrachteten elektrischen Lokomotive mit Drehstromantriebstechnik lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Maximale Anfahrzugkraft: 300 kN
- linearer Zugkraftabfall bis 85 km/h auf 271 kN
- Zugkraftentwicklung entlang einer Leistungshyperbel mit einer Leistung an den Treibrädern von $P_T = 6,4$ MW von 85 bis 220 km/h

1. Zeichnen Sie das Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm für die Treibräder als Bezugspunkt.
2. Berechnen Sie den Verlauf der prozentualen Abweichung, wenn statt mit der Zughakenzugkraft mit der Zugkraft an den Treibrädern gerechnet wird. Ermitteln Sie dazu die Zugkraft am Zughaken für die Geschwindigkeiten 0, 30, 60, 85, 120, 160, 200 und 220 km/h und setzen Sie für die Triebfahrzeugwiderstandskraft folgende Gleichung an:

$$F_{WFT}[kN] = 1,38 + 0,84 \cdot \frac{v[km/h]}{100} + 2,796 \cdot \left(\frac{v[km/h] + 12}{100} \right)^2$$

3. Berechnen Sie die Wagenzugmasse, die von dieser Lokomotive ($m_T = 85$ t) mit 100 km/h eine Steigung von 25‰ hochgeschleppt werden kann, wenn eine Restbeschleunigung von $0,03$ m/s² verfügbar sein soll, der Massenfaktor für den gesamten Zug 1,06 beträgt und der Wagenzugwiderstand der betrachteten Zuggattung mit folgender Formel abgeschätzt wird:

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

5 Übungskomplex Leistungsbedarf

5.1 Aufgaben zum Selbststudium

1. Welche Leistung muss an den Treibrädern einer Lokomotive ($m_T = 84 \text{ t}$) bereitgestellt werden, wenn diese einen Güterzug mit einer Masse von 1600 t in einer Steigung von 5 ‰ mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 80 \text{ km/h}$ befördern soll?

Gehen Sie von folgenden Annahmen aus:

$$F_{WFT} = 1,47 + 2,65 \cdot \left(\frac{v + 20}{100}\right)^2$$
$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$$

2. Um welchen Betrag erhöht sich die in der voranstehenden Teilaufgabe ermittelte Leistung, wenn zusätzlich sichergestellt werden soll, dass die Lok den Zug bei 80 km/h noch mit einer Beschleunigung von $0,05 \text{ m/s}^2$ beschleunigen kann? Der fahrdynamische Massenfaktor des Zuges kann zu $1,05$ angenommen werden.
3. Genügt die zuvor ermittelte Leistung, um den genannten Zug mit 100 km/h in der Ebene zu befördern?

Hinweise

Zur Lösung der Aufgaben zum Selbststudium benötigen Sie lediglich die Formelsammlung (Abschnitte: „Antriebskräfte“, „Fahrzustandsdiagramme“ und „Leistungsbedarf“) und einen Taschenrechner.

5.2 Aufgaben zur 4. Gruppenübung

Wahlaufgabe 1A (Schienenverkehr)

Es soll eine elektrische Lokomotive mit 4 angetriebenen Radsätzen und Einzelradsatzantrieb für den Güterverkehr ausgelegt werden. Sie soll in der Lage sein, einen Güterganzzug mit 1600 t Wagenzugmasse in einer Steigung von 3 ‰ mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h zu befördern. Folgende Randbedingungen müssen zusätzlich berücksichtigt werden:

- Beschleunigungsreserve: $f_a = 3 \text{ N/kN}$
- Fahrzeugwiderstand der Lokomotive: $F_{WFT} = 1,42 + 0,84 \frac{v}{100} + 2,8 \left(\frac{v+12}{100}\right)^2$
- Wagenzugwiderstand: $f_{WFW} = 0,0012 + 0,0025 \left(\frac{v}{100}\right)^2$
- Lokomotivmasse: 84 t
- Wirkungsgrad des Radsatzantriebes: 0,97

1. Wählen Sie aufgrund der gegebenen fahrdynamischen Anforderungen einen Fahrmotor geeigneter Leistung aus. Es stehen dabei drei verschiedene Fahrmotortypen mit unterschiedlicher Leistung zur Verfügung:

Motor A: 1250 kW, Motor B: 1450 kW, Motor C: 1650 kW.

2. Für welche Nennleistung muss der Transformator der Lokomotive ausgelegt werden? Nehmen Sie für den Wirkungsgrad der Leistungselektronik zwischen Trafo und Fahrmotoren einen Wert von 0,97 an. Ein Hilfsleistungsbedarf von 900 kW ist zu berücksichtigen.
3. Ist die Lokomotive in der Lage, den Güterzug eine Rampe mit einer Steigung von 10 ‰ hinaufzuziehen und dabei eine Geschwindigkeit von mindestens 100 km/h zu erzielen?

Wahlaufgabe 1B (Straßenverkehr)

Es soll ein Dieselmotor für eine Sattelzugmaschine (18 t) ausgewählt werden. Diese soll in der Lage sein, einen Sattelaufleger mit einer Masse von 26 t in der Ebene mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h zu befördern. Folgende Randbedingungen müssen zusätzlich berücksichtigt werden:

- Restbeschleunigung bei $v = 80 \text{ km/h}$: $0,1 \text{ m/s}^2$
- Massenfaktor im höchsten Gang: 1,03
- Rollwiderstandsbeiwert: $f_{WR} = 0,01$
- größte Fahrzeugquerschnittsfläche: $A = 9 \text{ m}^2$
- Luftwiderstandsbeiwert: $c_W = 0,58$
- Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstranges zwischen Dieselmotor und Antriebsrädern: 0,9
- Hilfs-/Komfortleistungsbedarf: 30 kW

1. Wählen Sie aufgrund der gegebenen fahrdynamischen Anforderungen einen Dieselmotor geeigneter Leistung aus. Es stehen dabei drei Aggregate mit unterschiedlicher Leistung zur Verfügung:

Motor A: 175 kW, Motor B: 265 kW, Motor C: 310 kW.

2. Ist der Sattelzug in der Lage, eine Steigung von 6 % zu bewältigen, ohne dass die Geschwindigkeit unter 65 km/h absinkt?

Aufgabe 2

Auf der in Abbildung 5.1 gezeigten Strecke sollen neuartige Triebwagen mit die-selelektrischem Antrieb eingesetzt werden. Diese verfügen über 2 identische Antriebsanlagen, deren Dieselmotoren eine Nennleistung von je 495 kW aufweisen. Um Kraftstoff zu sparen, lässt sich eine Antriebsanlage optional abschalten. Überprüfen Sie, in welchem der drei Streckenabschnitte eine solche Maßnahme aus fahrdynamischer Sicht möglich wäre und legen Sie bei Ihren Berechnungen folgende Annahmen zugrunde:

- Fahrzeugmasse: 68 t
- Zuladung: 160 Passagiere (je 75 kg)
- Hilfsbetriebefaktor: $\psi=0,05$
- Fahrzeugwiderstandsgleichung:

$$F_{\text{WFT}} = 0,84 + 0,41 \frac{v}{100} + 2,52 \left(\frac{v + 15}{100} \right)^2$$

- Wirkungsgrad der Leistungsübertragungsanlage: 0,83
- spezifische Beschleunigungsreserve: 0,0030
- Komfortleistungsbedarf: 50 kW

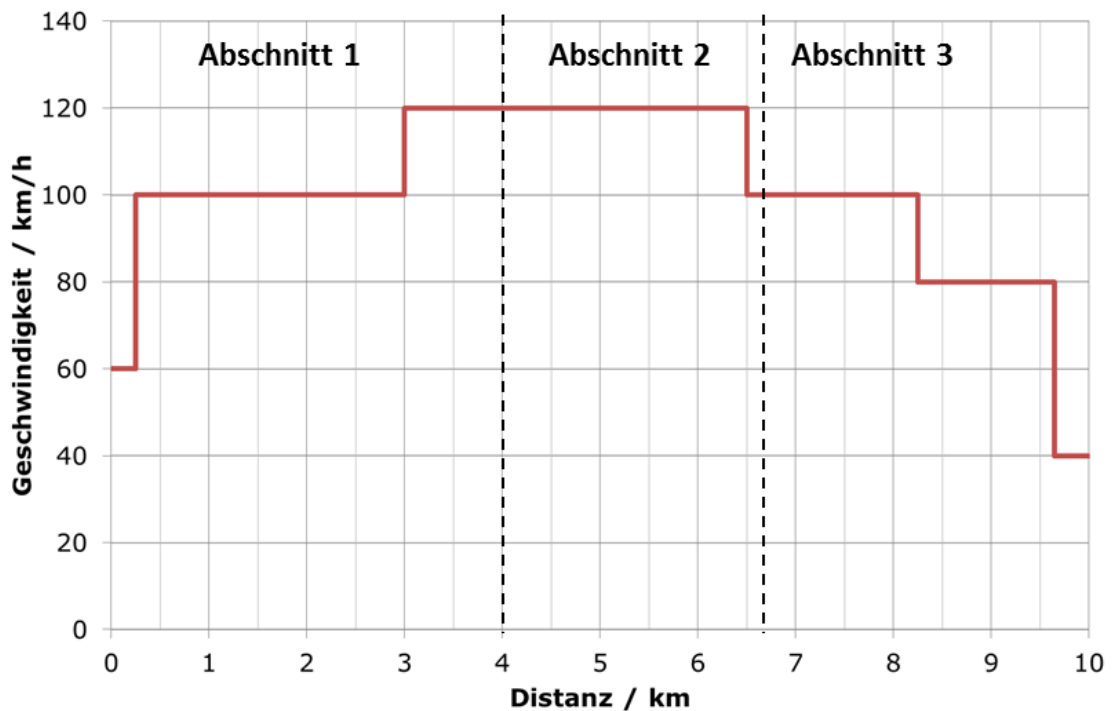
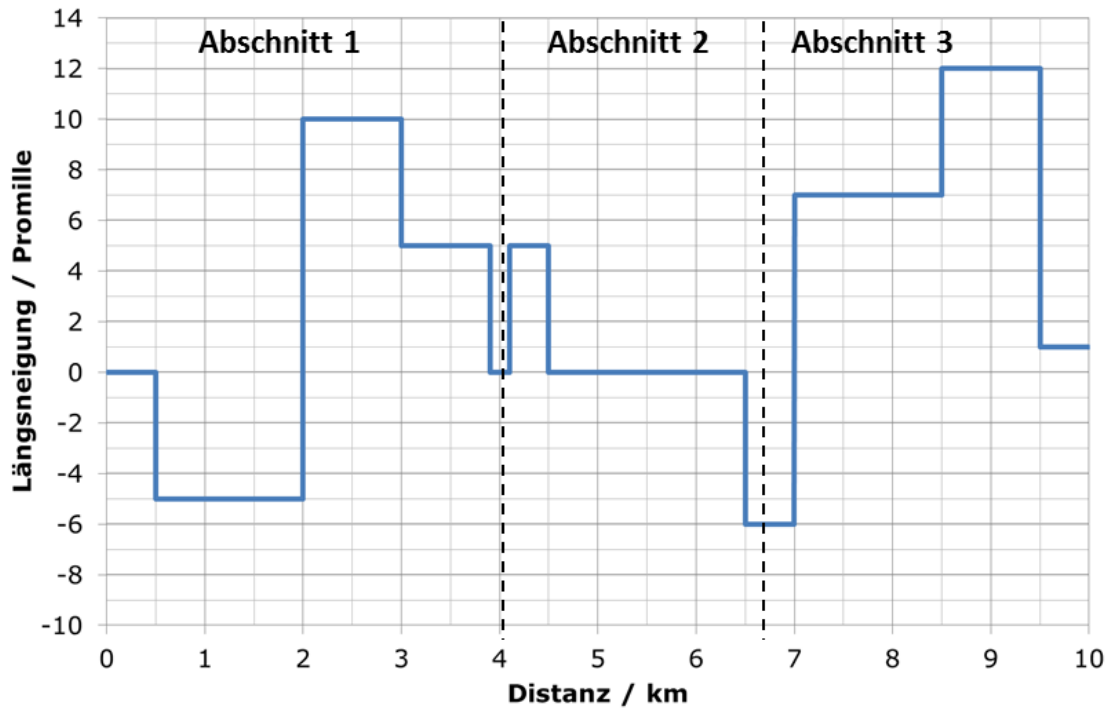


Abbildung 5.1: Neigungs- und Geschwindigkeitsprofil (Aufgabe 2)

6 Übungskomplex Energiebedarf

6.1 Aufgaben zum Selbststudium

1. Eine Lokomotive ($m_T = 84 \text{ t}$) schleppt einen Güterzug mit einer Masse von 1600 t bei einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 80 \text{ km/h}$ eine Steigung von 5 ‰ hinauf. Welche Arbeit wird an den Treibrädern verrichtet, wenn diese eine Länge von 2200 m aufweist?

Gehen Sie von folgenden Annahmen aus:

$$F_{WFT} = 1,47 + 2,65 \cdot \left(\frac{v + 20}{100}\right)^2$$
$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$$

2. Bestimmen Sie den Energiebedarf pro km für die betrachtete Fahrt ab Fahrdracht, wenn der Wirkungsgrad des gesamten Fahrzeuges 68 ‰ beträgt.
3. 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.

Hinweise

Zur Lösung der Aufgaben zum Selbststudium benötigen Sie lediglich die Formelsammlung (Abschnitte: „Antriebskräfte“, „Fahrzustandsdiagramme“ und „Leistungsbedarf“) und einen Taschenrechner.

6.2 Aufgaben zur 5. Gruppenübung

Aufgabe 1

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:

1. Der Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h in der Ebene.
2. Der Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h in einer Steigung von 12 %.
3. Der Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h in einer Steigung von 20 %.

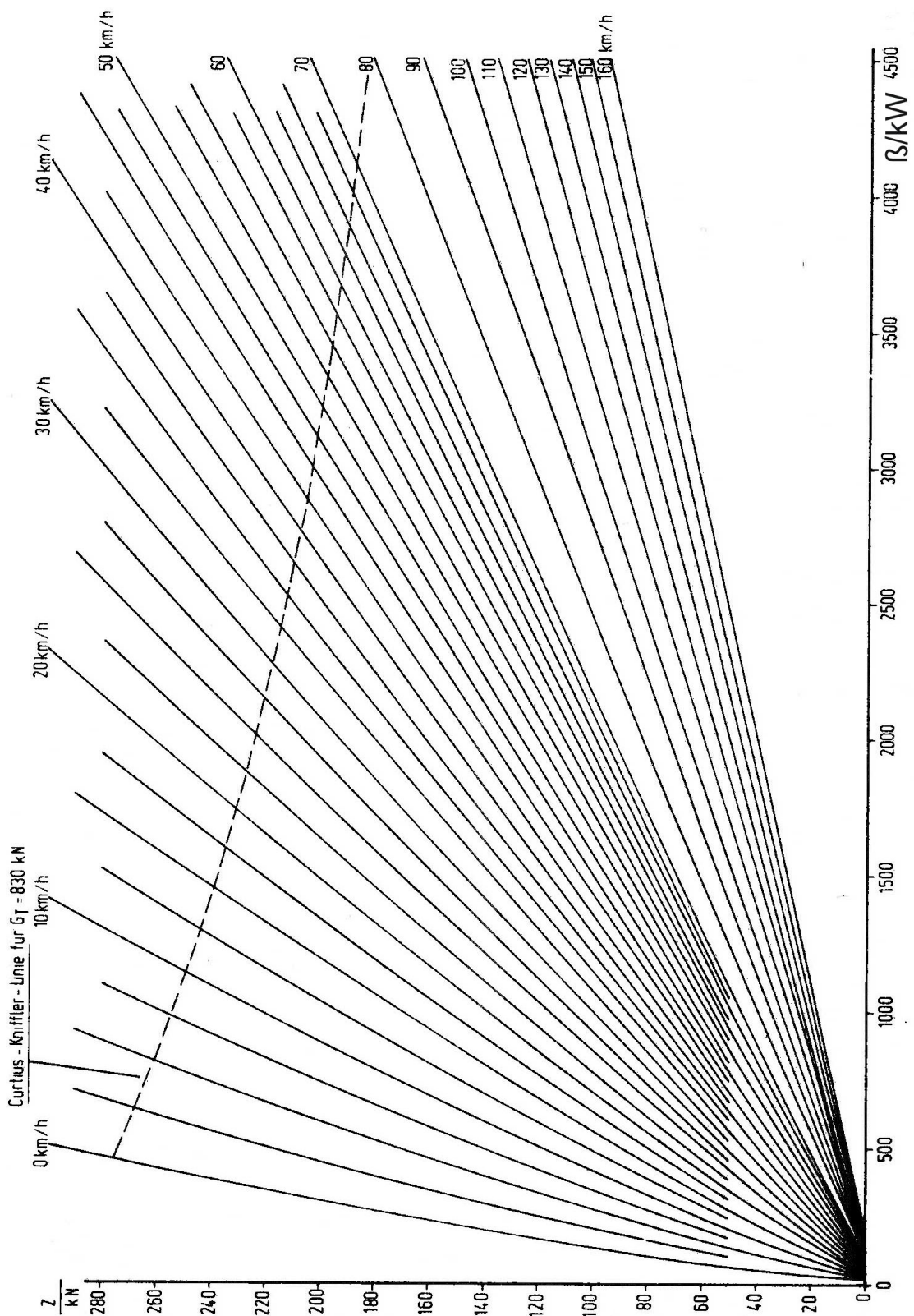


Abbildung 6.1: TLV-Diagramm Ellok Typ 1 (konventionelle Antriebstechnik), **Bezugspunkt: Treibradumfang**

Aufgabe 2

Eine Ellok vom Typ 2 schleppt einen Güterzug ($m_W=1600$ t) mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v=80$ 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

1. 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.
2. Ermitteln Sie für alle Teilstrecken den Fahrzeugwirkungsgrad und tragen Sie die Wirkungsgrade in einem Diagramm über der Zughakenleistung auf.

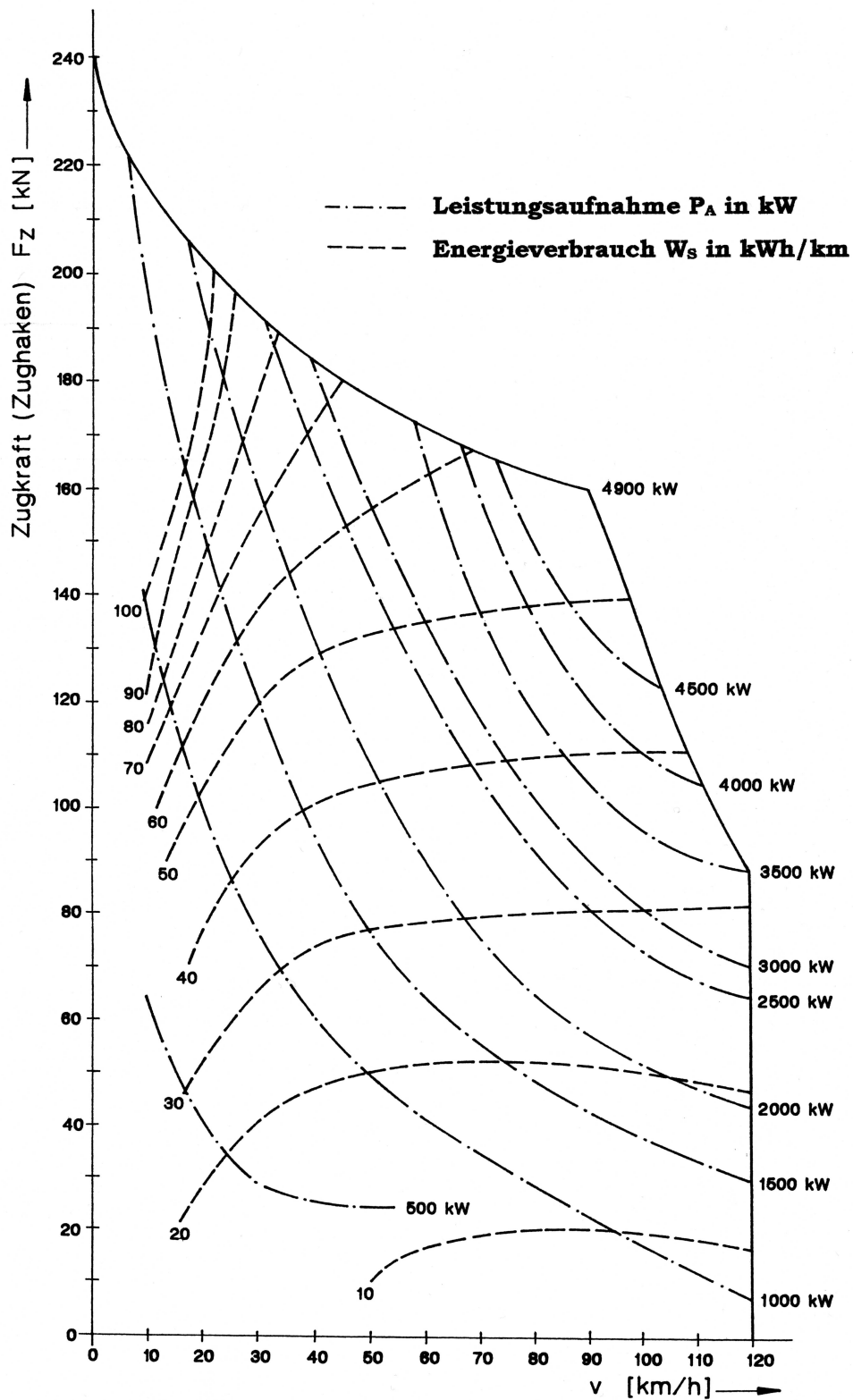
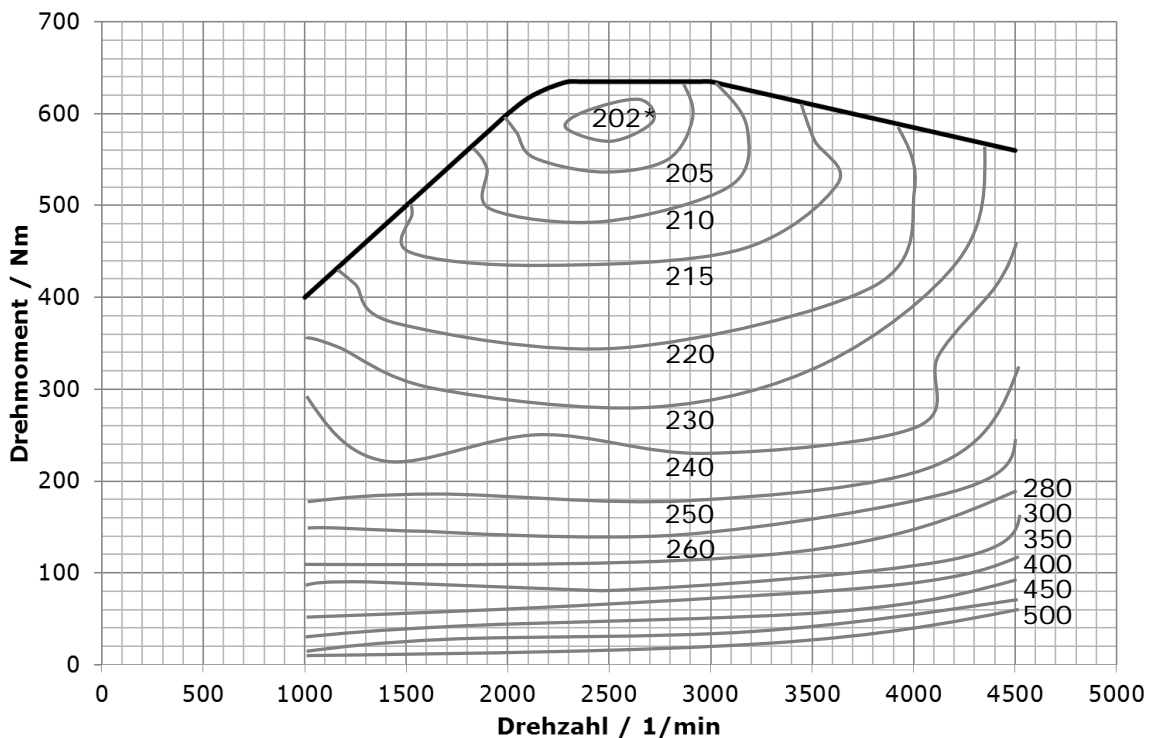


Abbildung 6.2: Kennlinienfeld Ellok Typ 2 (konventionelle Antriebstechnik), **Bezugspunkt: Zughaken**

Aufgabe 3

Ein Nutzfahrzeug mit einer Fahrzeuggesamtmasse von 4,5 t fährt mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h auf der Autobahn. Dabei treten Längsneigungen zwischen 0,5 und 1 % auf. Ermitteln Sie den Bereich des Kraftstoffverbrauches, der sich bei diesen Randbedingungen für eine Distanz von 25 km ergibt. Nutzen Sie dafür das in Abbildung 6.3 gegebene Kennfeld des Dieselmotors und gehen Sie dabei von folgenden Annahmen aus:

- Luftwiderstandsbeiwert: $c_W = 0,35$
- Fahrzeugquerschnittsfläche: $A = 3 \text{ m}^2$
- spezifischer Rollwiderstand: $f_{WR} = 0,008$
- Hilfsleistungsfaktor: $\psi = 0,05$
- Komfortleistungsbedarf: 6 kW
- Getriebewirkungsgrad: 0,92
- Getriebeübersetzung (inkl. Radsatzgetriebe): 4,3
- Rollradius der Antriebsräder: 0,3 m



*spezifischer Kraftstoffverbrauch / g/kWh

Abbildung 6.3: Kennfeld des Nutzfahrzeug-Dieselmotors (Aufgabe 3)

7 Übungskomplex Fahrdynamische Anwendungen

7.1 Aufgaben zum Selbststudium

1. Eine Diesellok (Masse: 80 t), die bei 80 km/h eine Treibradzukraft von 50 kN erzeugen kann, zieht einen Güterzug, dessen Wagenzugmasse 420 t beträgt. Welche Steigung kann der Zugverband mit der angegebenen konstanten Geschwindigkeit maximal befahren? Setzen Sie für den Wagenzugwiderstand von Lokomotive und Wagenzug folgende Gleichungen an:

$$F_{WFT} = 1,96 + 6,5 \left(\frac{v + 15}{100} \right)^2$$
$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0025 \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

2. Welche Wagenzugmasse kann die vorstehend charakterisierte Lokomotive in einer Längsneigung von 25 ‰ maximal mit $v = \text{const.} = 80 \text{ km/h}$ befördern?
3. Um welchen Betrag müsste die Wagenzugmasse reduziert werden, wenn in der genannten Steigung bei der genannten Geschwindigkeit noch eine (Momentan-)Beschleunigung von $0,05 \text{ m/s}^2$ erzielt werden soll? (Massenfaktor des Zuges: 1,03)
4. Auf welchen Betrag wird die Momentanbeschleunigung in dem vorstehend beschriebenen Fall bei $v = 90 \text{ km/h}$ abgesunken sein, wenn vereinfachend davon ausgegangen werden kann, dass die Zugkraftentwicklung in dem Intervall zwischen 80 und 90 km/h näherungsweise entlang der Leistungshyperbel erfolgt?

Hinweise

Zur Lösung der Aufgaben zum Selbststudium benötigen Sie lediglich die Formelsammlung (Abschnitt: „Fahrdynamische Charakteristiken“) und einen Taschenrechner.

7.2 Aufgaben zur 6. Gruppenübung

Aufgabe 1

Über Fahrversuche mit einer elektrischen Lokomotive (Drehstromantriebstechnik) wurde folgendes veröffentlicht:

„In Schweden wurde ein Güterzug mit rund 2300 t eine sechs Kilometer lange 10-Promille-Rampe hinaufgezogen. Die Zuglok [...] mit einer Leistung (Anmerkung: an den Treibrädern) von 6.400 kW sorgte für eine konstante Zuggeschwindigkeit von 40 km/h über die komplette Steigung hinweg.“ (Zitat: LokMagazin 1/2014)

Folgende Daten der Lokomotive sind außerdem bekannt:

Masse der Lokomotive:	87 t
maximale Zugkraft an den Treibrädern:	300 kN
Zugkraft bei max. Leistung:	250 kN

Schätzen Sie die Größenordnung des Fahrzeugwiderstandes des gesamten Zuges ab und legen Sie dabei einen linearen Verlauf der Zugkraft zwischen $v = 0$ und $v = v_{\ddot{u}}$ zugrunde.

Wahlaufgabe 2A (Schienenverkehr)

Es soll die in der Abbildung 7.1 dargestellte Anfahrssituation eines Güterzuges untersucht werden. Es handelt sich um einen Ganzzug, der nur beladene Wagen der gleichen Bauart enthält. Der Zug wurde an einem Signal gestellt, das sich kurz hinter einem Steigungsabschnitt befindet. Aufgrund der Neigungswechsel vor der Anfahrstelle kann der Güterzug in Abhängigkeit der Zuglänge in unterschiedlichen Neigungen stehen. Die Lokomotive (Masse: 80 t, Länge: 20 m) kann, wie in der Abbildung gezeigt, eine Anfahrzugkraft von maximal 250 kN erzeugen. Berechnen Sie die maximale Zugmasse, die an dem skizzierten Streckenpunkt mit der betrachteten Lokomotive angefahren werden kann. Ermitteln Sie anschließend die Masse, um die die Wagenzugmasse reduziert werden müsste, wenn der verfügbare Kraftschluss durch ungünstige äußere Bedingungen um 25 % gegenüber dem in dem gezeigten Diagramm zugrunde gelegten Wert reduziert wird. Folgende weitere Randbedingungen sind bei der Berechnung zu beachten:

- Triebfahrzeugwiderstand der Lokomotive:

$$F_{WFT} = 2,5 + 3,7 \left(\frac{v + 12}{100} \right)^2$$

- Zuglängenfaktor: 0,38 m/t
- Anfahrwiderstand des Wagenzuges:

$$f_{WFW,0} = 0,006 + 0,3i$$

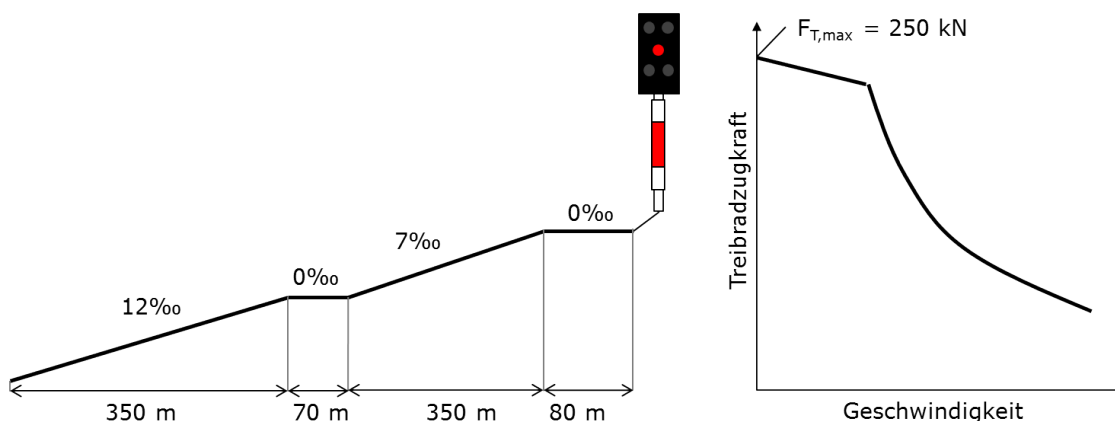
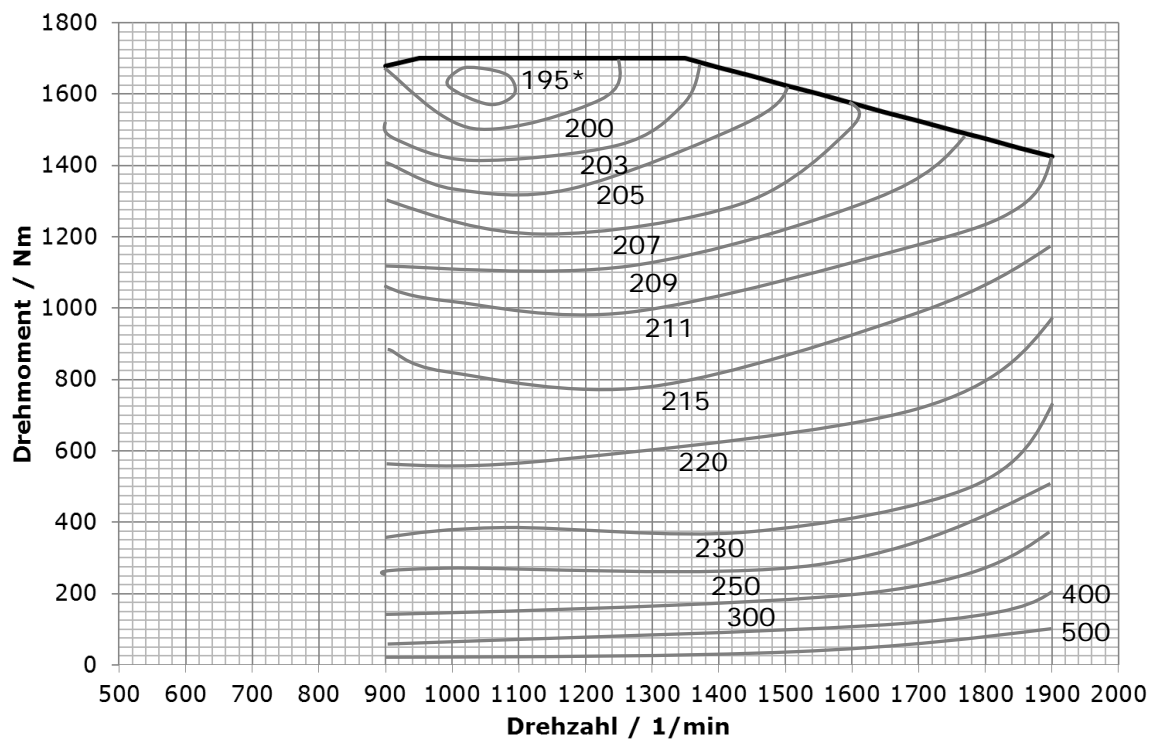


Abbildung 7.1: Anfahrssituation (Aufgabe 2A)

Wahlaufgabe 2B (Straßenverkehr)

Betrachtet wird ein Fernreisebus mit einer Gesamtmasse von 30 t, der von dem in Abbildung 7.2 charakterisierten Dieselmotor angetrieben wird. Typischerweise wird das Fahrzeug im Geschwindigkeitsbereich zwischen 80 und 100 km/h auf Autobahnen unterwegs sein. Die auftretenden Längsneigungen liegen dabei in der Regel unterhalb von 60‰. Für den Bus soll das mechanische Übersetzungsverhältnis des Schaltgetriebes so ausgelegt werden, dass sich für die Beharrungsfahrt mit 90 km/h in geringer Längsneigung (10‰) ein günstiger Kraftstoffverbrauch ergibt. Überprüfen Sie anschließend, ob der Bus mit der so ermittelten Getriebeübersetzung eine Steigung von 30‰ mit mindestens 70 km/h befahren kann. Dabei sollen folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Luftwiderstandsbeiwert des Busses: 0,4
- Fahrzeugquerschnittsfläche: 9 m²
- Getriebewirkungsgrad (gesamt): 0,9
- Rollradius der Antriebsräder: 0,5 m
- Getriebeübersetzung des Radsatzgetriebes: 5,1
- spezifischer Rollwiderstand: 0,008
- Komfortleistungsbedarf: 16 kW
- Hilfsleistungsfaktor: 0,07



*spezifischer Kraftstoffverbrauch / g/kWh

Abbildung 7.2: Kennfeld des Bus-Motors (Aufgabe 2A)