

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
Professur für Elektrische Bahnen

Fahrdynamik für das Verkehrsingenieurwesen

VL 06: Energiebedarf und Fahrzeitrechnung

Sommersemester 2023

Energiebedarf

Berechnungsgang für Energiebedarfsermittlung:
Ausgangspunkt: Bilanzierung am Treibradumfang

$$F_T = F_{T,max}$$

$$F_T = \sum F_W$$

$$W_T = \int P_T dt = \int (F_T v) dt$$

$$W_T = \int F_T ds$$

Beschleunigungsvorgänge

Beharrungsfahrt

Allgemeiner Fall

Beharrungsfahrt

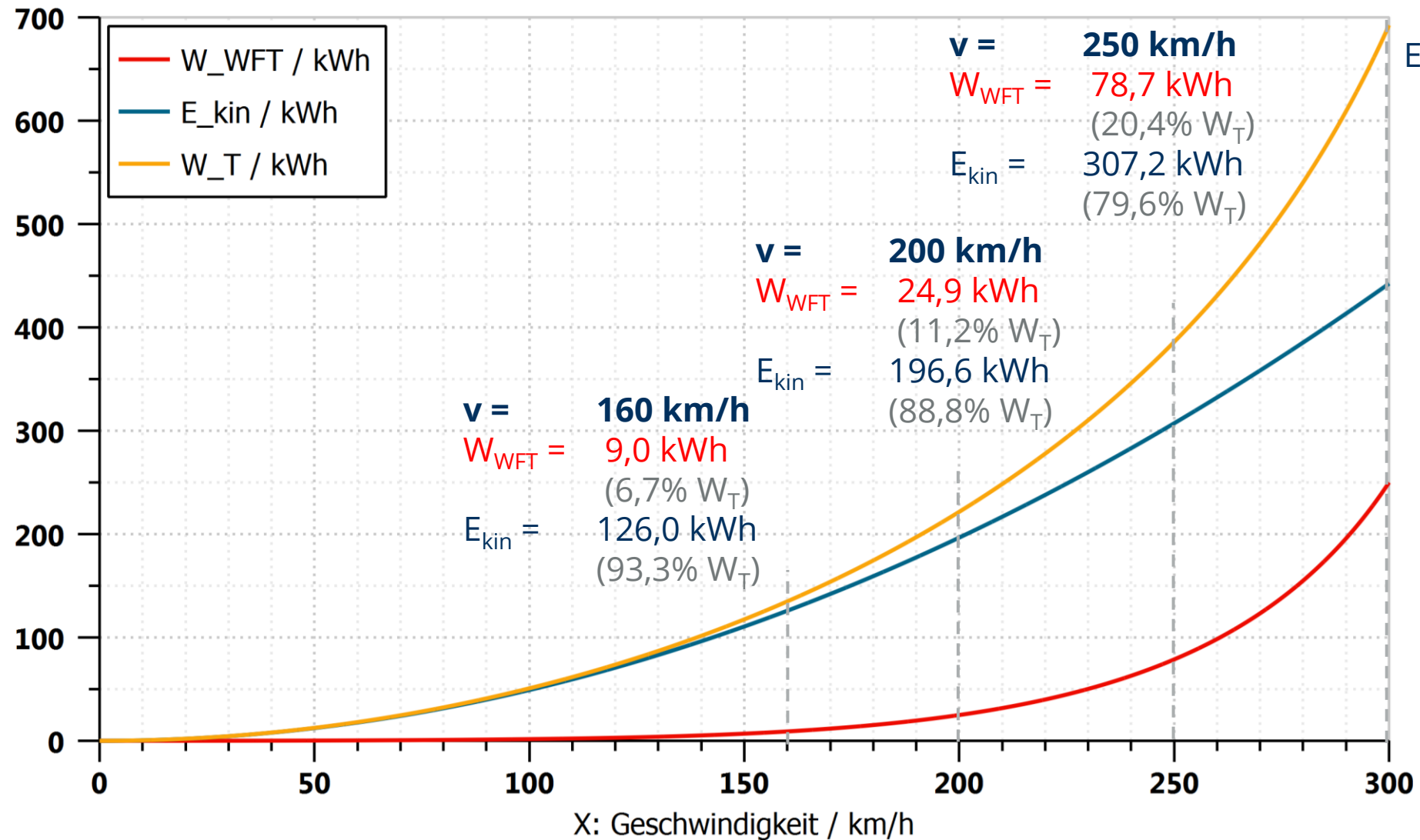
Ermittlung des Energiebezuges (aus Tank, ab Oberleitung):

$$W = \int \frac{P_T}{\eta_{Tfz}(F_T, v)} dt = \int \frac{F_T v}{\eta_{Tfz}(F_T, v)} dt$$

Triebfahrzeugwirkungsgrad: Produkt aus Einzelwirkungsgraden der Glieder des Antriebsstranges

Hoher Aufwand → Nutzung von Kennlinienfeldern oder TLV-Tafeln

Beschleunigung auf v_{\max} in der Ebene (Bsp. ICE 3)



$v = 300$ / km/h
 $W_{WFT} = 250,0$ kWh
 (36,1% W_T)
 $E_{kin} = 442,0$ kWh
 (63,9% W_T)

$v = 250$ km/h
 $W_{WFT} = 78,7$ kWh
 (20,4% W_T)
 $E_{kin} = 307,2$ kWh
 (79,6% W_T)

$v = 200$ km/h
 $W_{WFT} = 24,9$ kWh
 (11,2% W_T)
 $E_{kin} = 196,6$ kWh
 (88,8% W_T)

$v = 160$ km/h
 $W_{WFT} = 9,0$ kWh
 (6,7% W_T)
 $E_{kin} = 126,0$ kWh
 (93,3% W_T)

Beharrungsfahrt: Energiebedarf an den Treibrädern (ICE 3)

Fahrzeit und Energie ICE 3

100 km/h:

60 min/100 km
360 kWh/100 km

-30 min (50%)
+570 kWh (258 %)

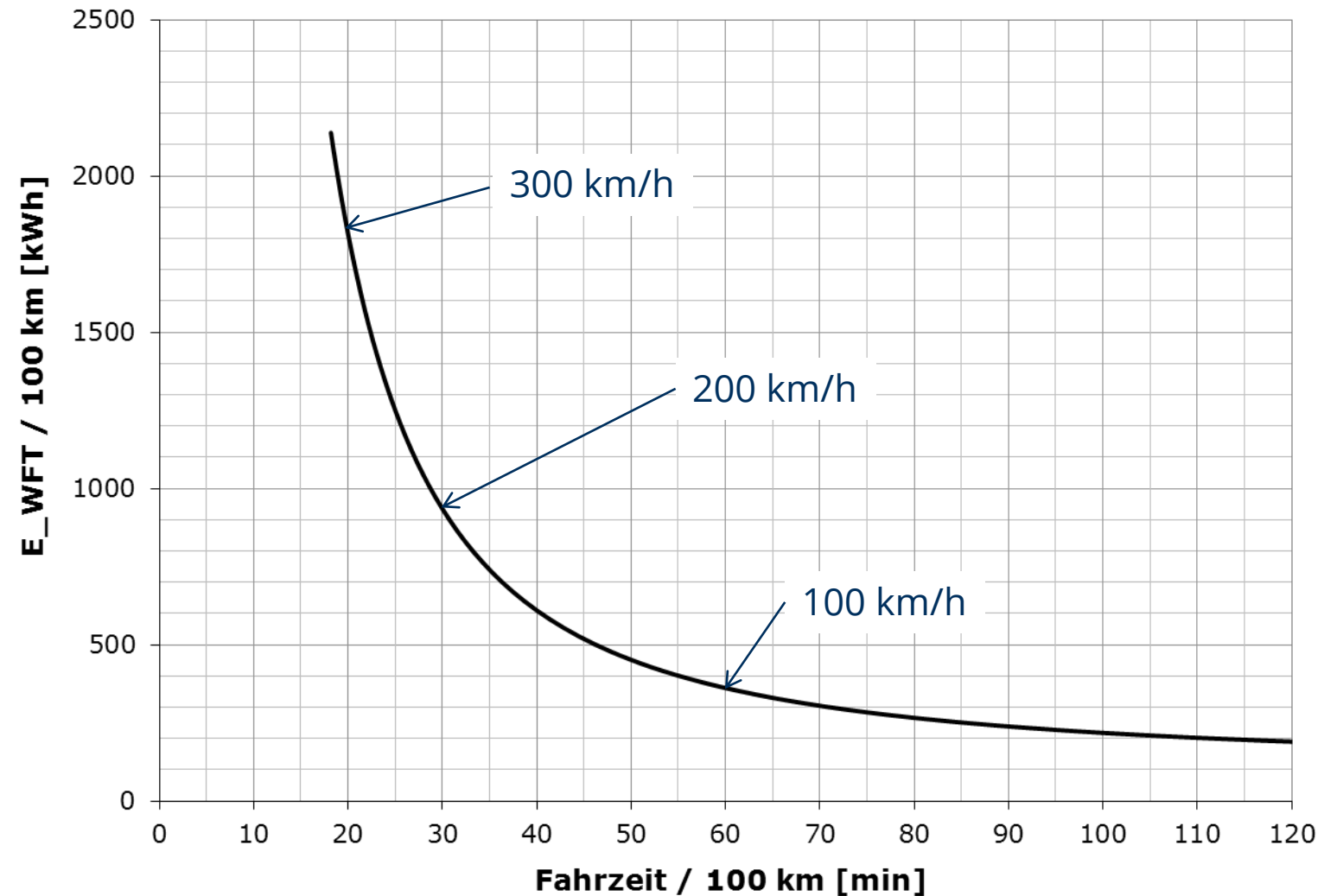
200 km/h:

30 min/100 km
930 kWh/100 km

-10 min (67%)
+910 kWh (198 %)

300 km/h:

20 min/100 km
1840 kWh/100 km

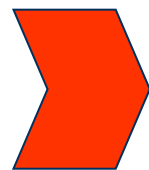


Energiebilanz ICE 3

Quelle: Klose/Unger-Weber in: eb 11-12/2000, S. 441ff.



Netzleistung = 100 %



Radleistung \approx 62 %

Komfortleistung \approx 4 %

Hilfsbetriebsleistung \approx 4 %

Verlustleistung \approx 30 %



Fahrmotoren \approx 14%

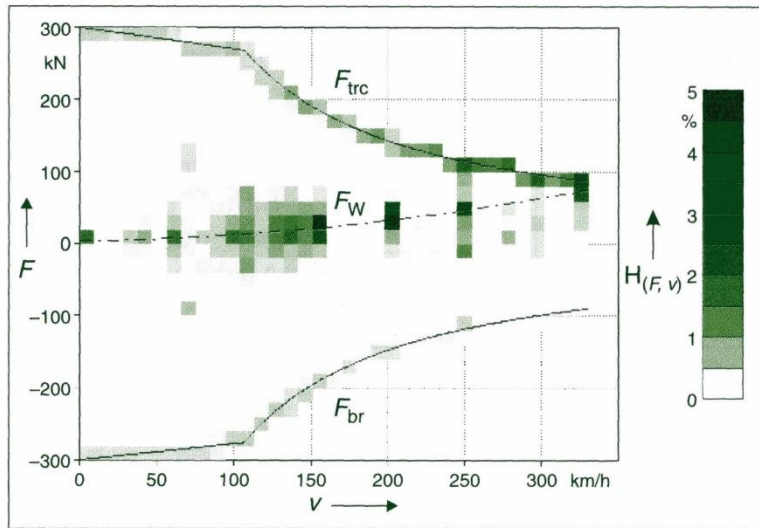
Trafo \approx 9 %

4 QS \approx 4 %

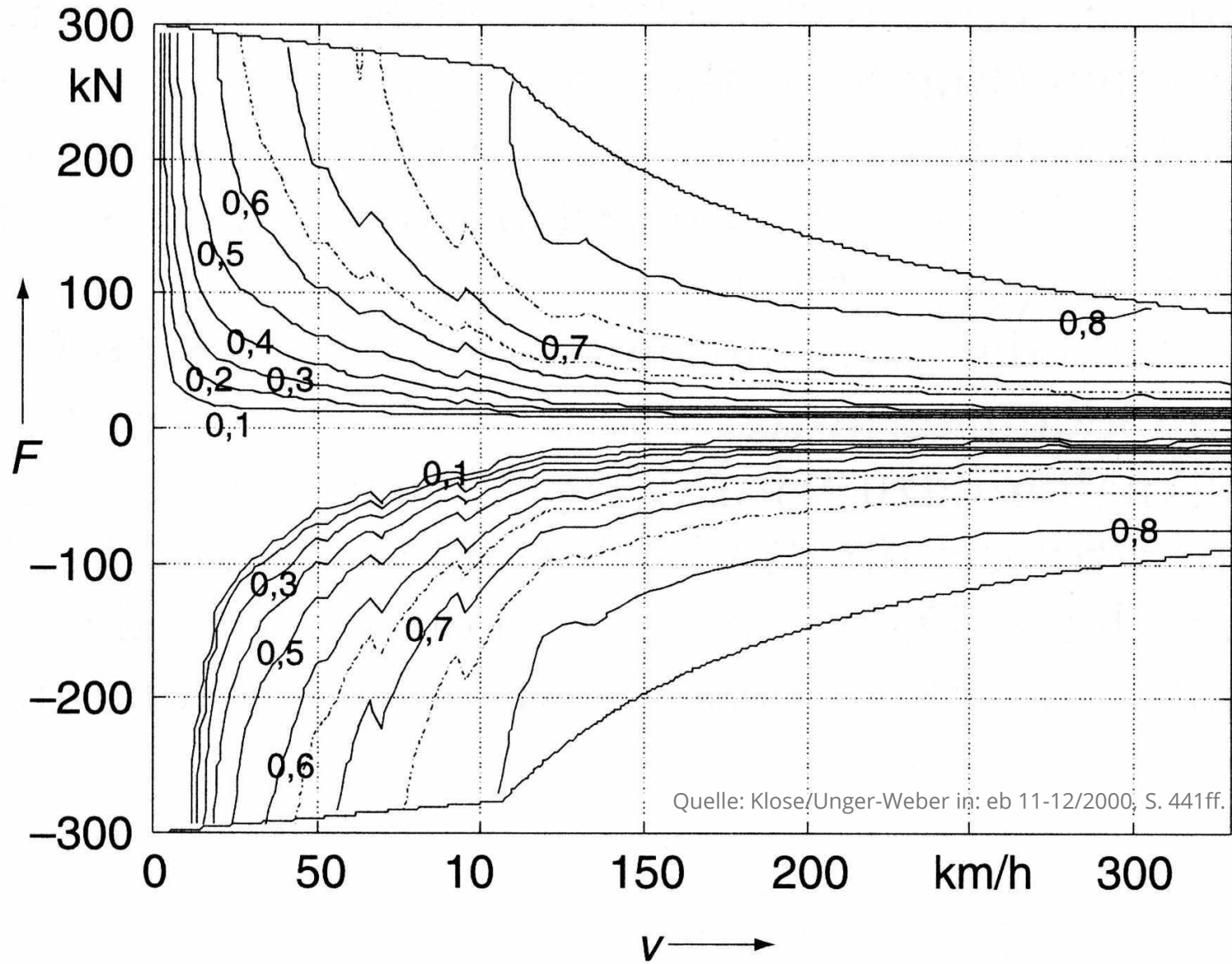
Getriebe \approx 2 %

Pulswechselrichter \approx 2 %

Kennlinienfeld ICE 3



Typische statistische Verteilung der Betriebspunkte.
 $F_{trc/br/W}$ Zug-/Brems-/Fahrwiderstandskraft
 H Häufigkeit



Quelle: Klose/Unger-Weber in: eb 11-12/2000, S. 441ff.

Kennlinienfeld ICE 3

Beispiel

Fahrt mit $v = 200$ km/h

$$F_{WFT} = 33,7 \text{ kN}$$

$$1 \text{ kJ} = 1 \text{ kW s}$$

$$W_T(1\text{km}) = 33,7 \text{ kN} \cdot 1000 \text{ m} = 33.700 \text{ kJ}$$

$$w_{T,s} = 9,36 \text{ kWh/km}$$

Tfz-Wirkungsgrad: ca. 0,65

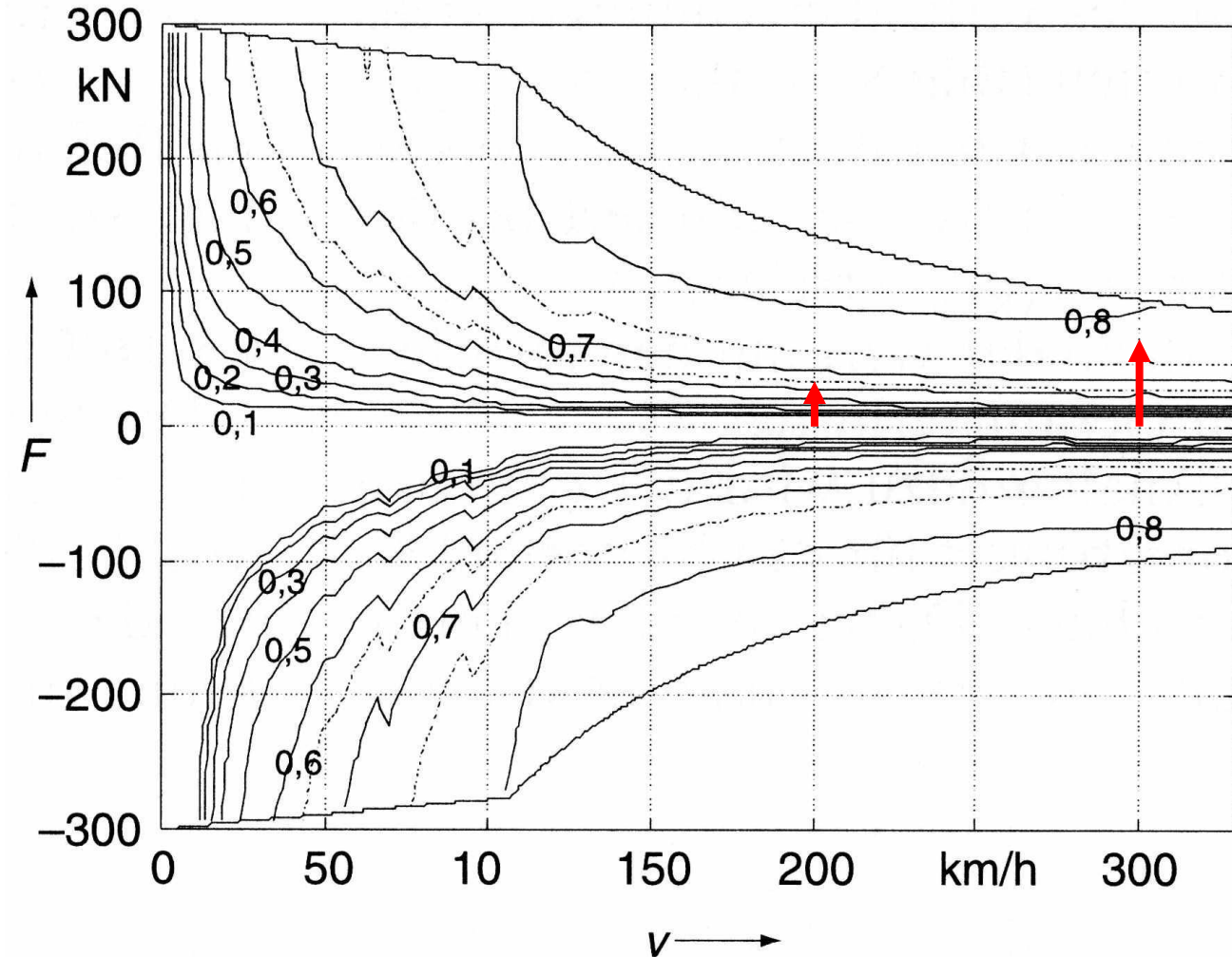
Energiebezug ab Oberleitung: 14,4 kWh/km

Fahrt mit $v = 300$ km/h: $F_{WFT} = 65,3 \text{ kN}$

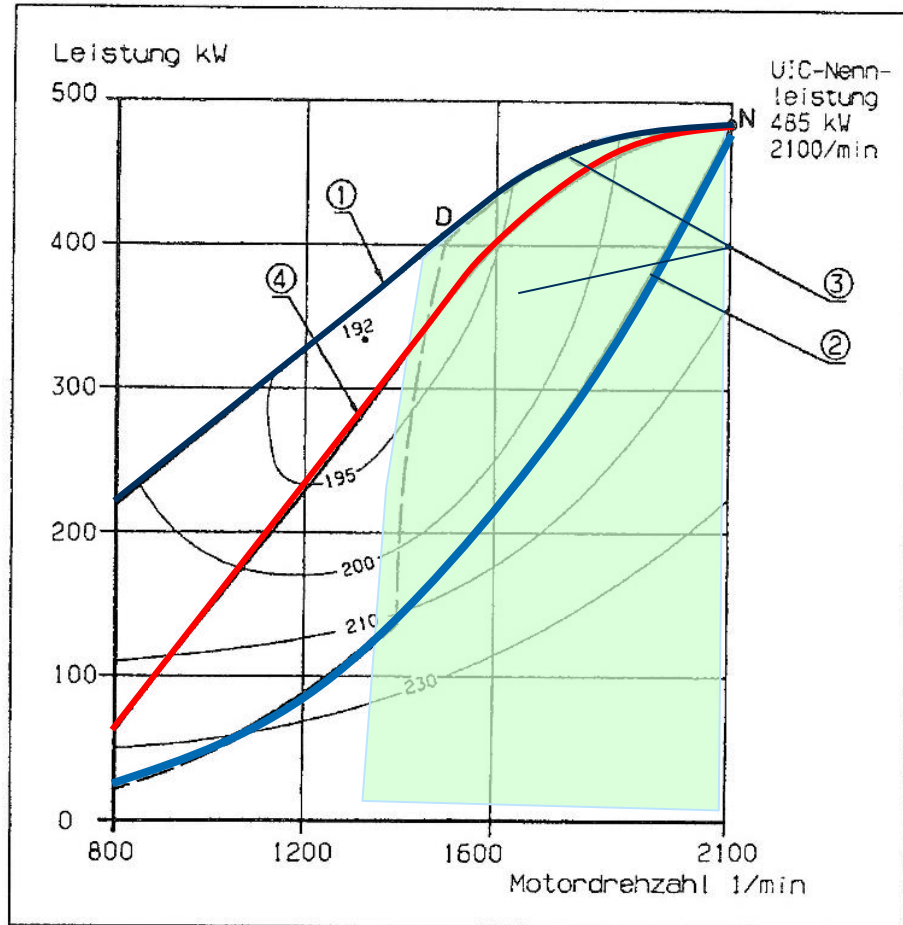
$$w_{T,s} = 18,1 \text{ kWh/km}$$

Tfz-Wirkungsgrad: ca. 0,77

Energiebezug ab Oberleitung: 23,6 kWh/km



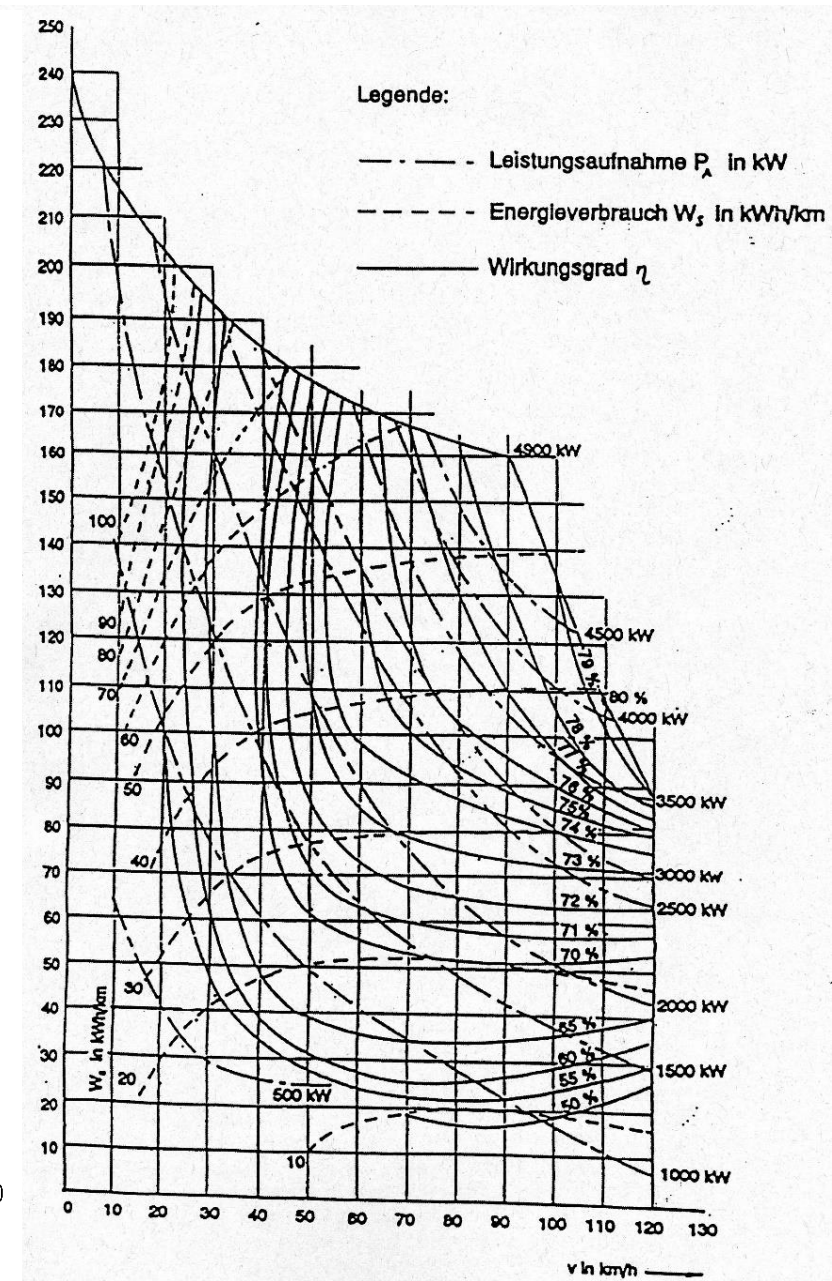
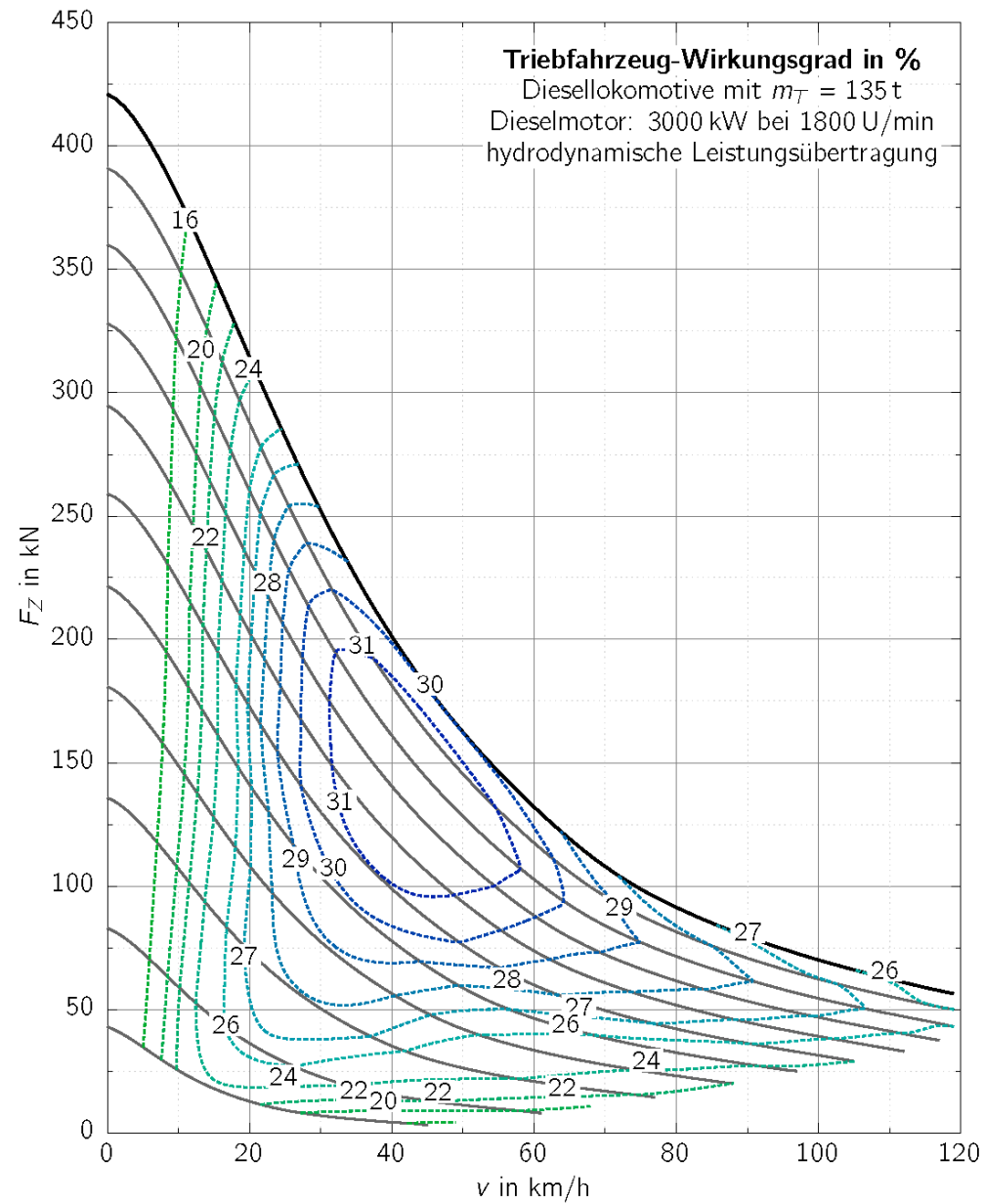
Dieseltraktion: Bedeutung des Zusammenspiels von DM und Lü



- 1 Volllast-Kennlinie des Dieselmotors
- 2 Belastung des Motors im Wandlerbetrieb
- 3 Belastung des Motors im Kupplungsbetrieb und bei Kopplung mit mechanischem Getriebe
- 4 Belastung des Motors bei elektrischer Leistungsübertragung

Quelle: Nick, Manfred: „Antriebsanlagen für Dieseltriebwagen“, in: Der Eisenbahningenieur Bd. 45 (1994), H. 12, S 867ff.

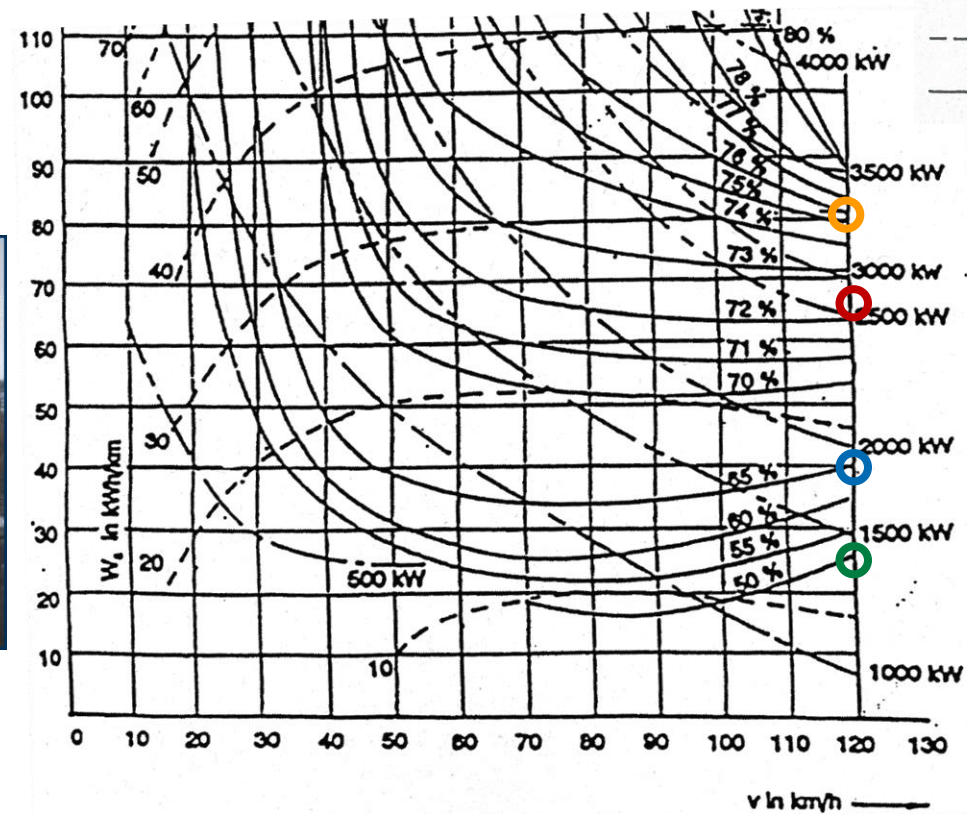
Kennlinienfelder



Kennlinienfeld

Beispiel :

BR 143 + Regionalzug
in variabler Steigung mit
 $v = 120 \text{ km/h}$



Legende:

- Leistungsaufnahme P_A in kW
- Energieverbrauch W_s in kWh/km
- Wirkungsgrad η

$i = 5 \text{ ‰} : F_{Z,erf} = 26,1 \text{ kN}$

$i = 10 \text{ ‰} : F_{Z,erf} = 39,9 \text{ kN}$

$i = 15 \text{ ‰} : F_{Z,erf} = 67,7 \text{ kN}$

$i = 25 \text{ ‰} : F_{Z,erf} = 81,5 \text{ kN}$



$W_s = 14,5 \text{ kWh/km}$ (Zughaken: 7,3 kWh/km)



$W_s = 17,1 \text{ kWh/km}$ (Zughaken: 11,1 kWh/km)



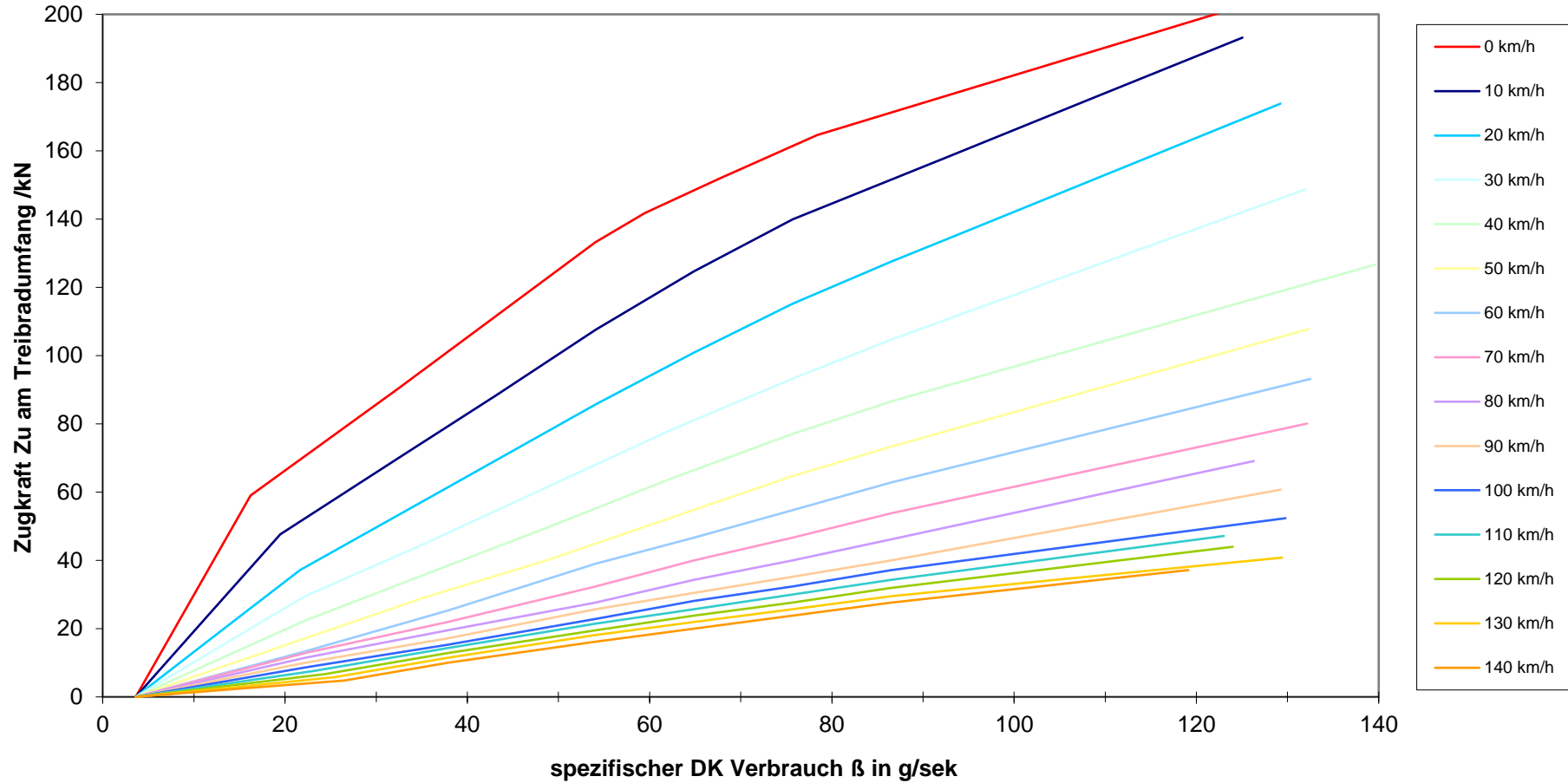
$W_s = 26,0 \text{ kWh/km}$ (Zughaken: 18,8 kWh/km)



$W_s = 29,7 \text{ kWh/km}$ (Zughaken: 22,6 kWh/km)

Triebfahrzeug-Leistungs- und Verbrauchs-Tafel eines Diesel-Tfz

Beispiel
Dieselkraftstoff Verbrauchs-Kennlinienfeld



Quelle: DB Netz

TLV-Tafel - Beispiel



IC-Zug (10 Wagen) mit 2 x BR 218 im Flachland bei $v = 120 \text{ km/h}$

$$\text{Beta} = 47 \text{ g/s} \times 2 = 94 \text{ g/s}$$

$$120 \text{ km/h: } 30 \text{ s/km}$$

$$B_{\text{DK}} = 2,82 \text{ kg/km}$$

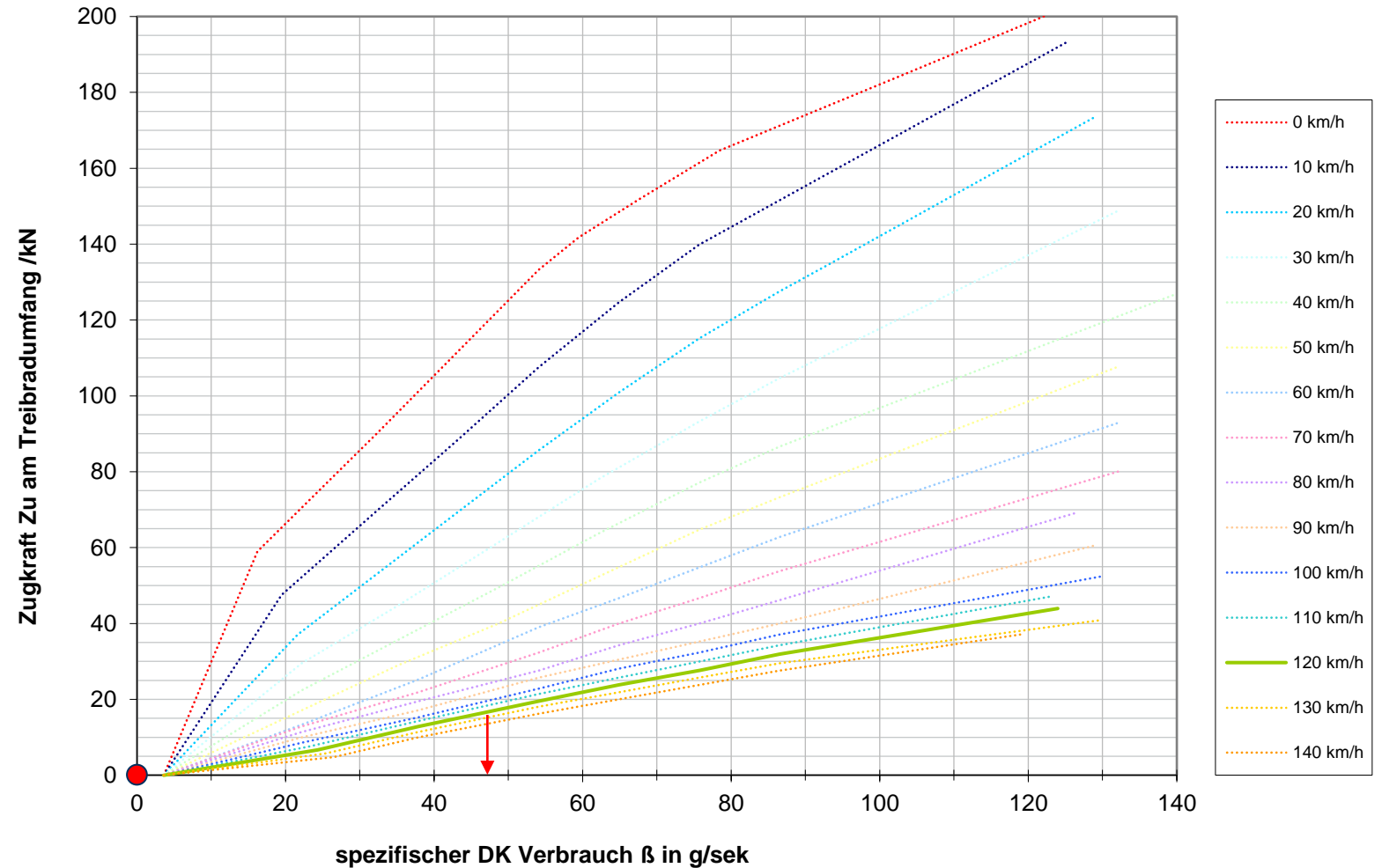
$$B_{\text{DK}} = 336 \text{ l/100 km}$$

$$F_{\text{WFT}} = 2 \times 9,2 \text{ kN} = 18,4 \text{ kN}$$

$$F_{\text{WFW}} = 20,3 \text{ kN}$$

$$F_{\text{WF}} = 38,7 \text{ kN} = 19,4 \text{ kN/Lok}$$

Beispiel Dieselkraftstoff Verbrauchs-Kennlinienfeld



TLV-Tafel (fiktives elektrisches Tfz)

fiktive TLV BR 4xx 4,6 MW
- Bezug -
Wirkleistung am Fahrdrabt

Beispiel:

30 kN @ 120 km/h

Wirkleistungsaufnahme:

Ca. 1.500 kW

Treibradleistung:

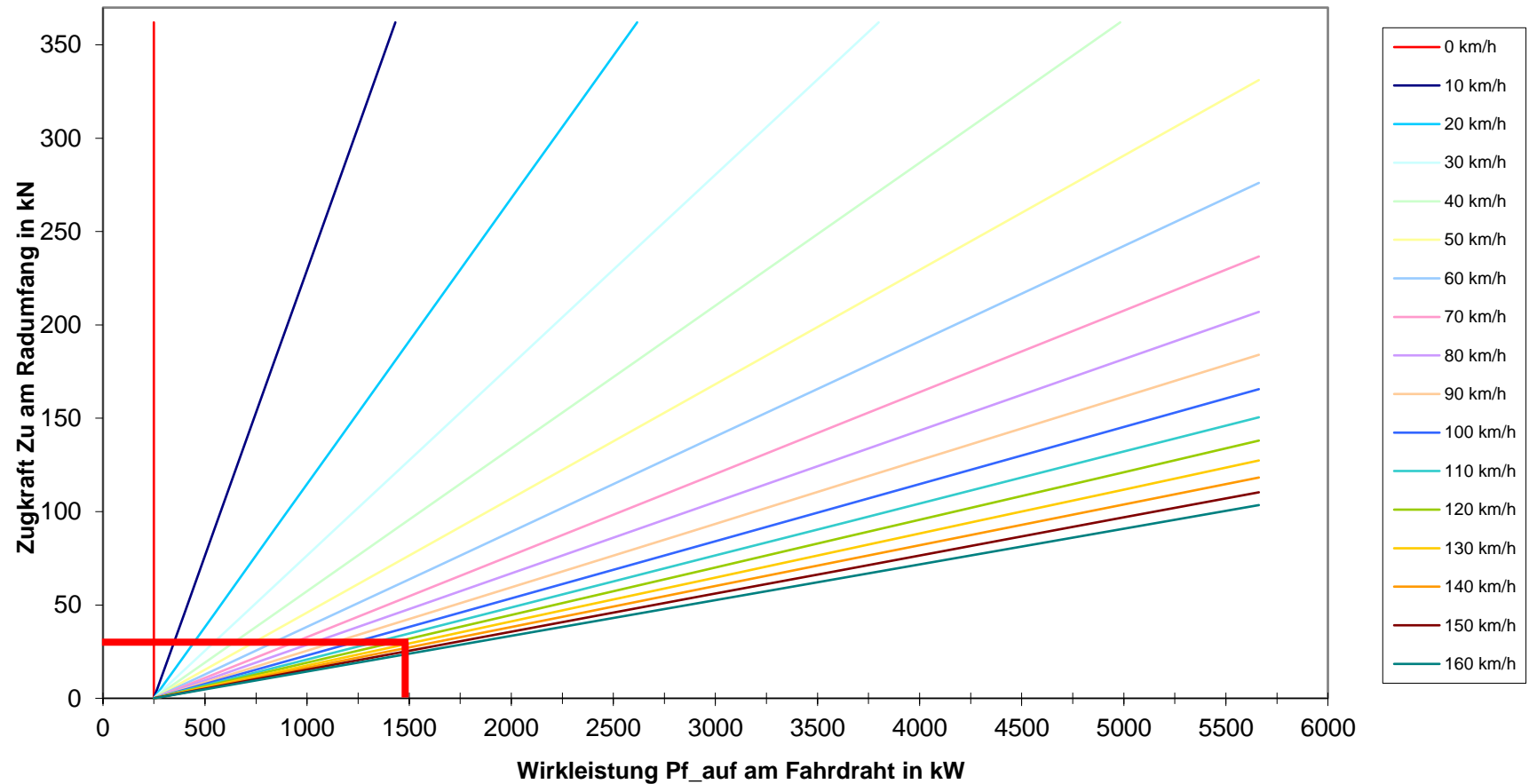
$$P = F \cdot v$$

$$30 \text{ kN} \cdot 120 / 3,6 = 1.000 \text{ kW}$$

Wirkungsgrad:

$$P_{\text{nutz}} / P_{\text{zu}}$$

$$1.000 \text{ kW} / 1.500 \text{ kW} = 67 \%$$

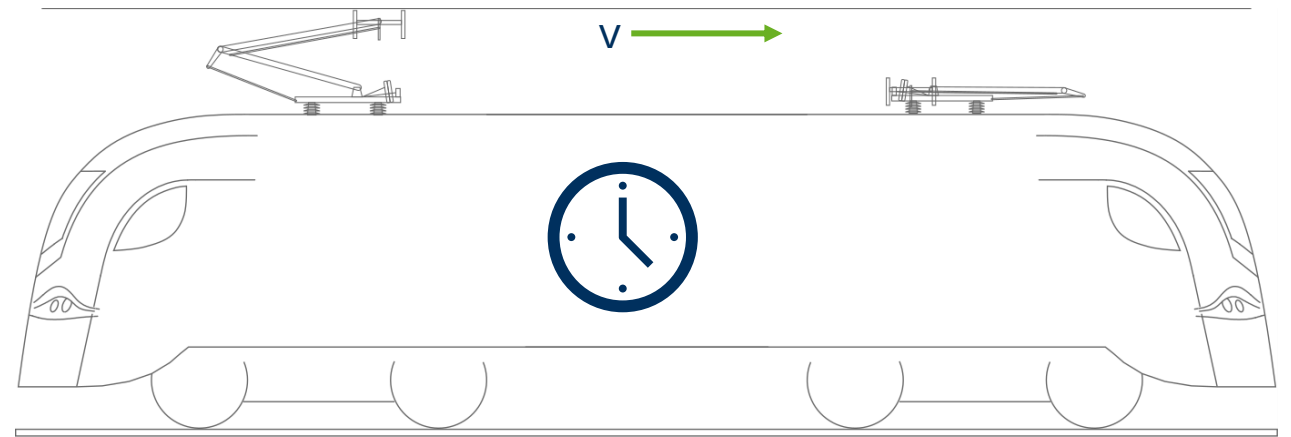


Quelle: DB Netz

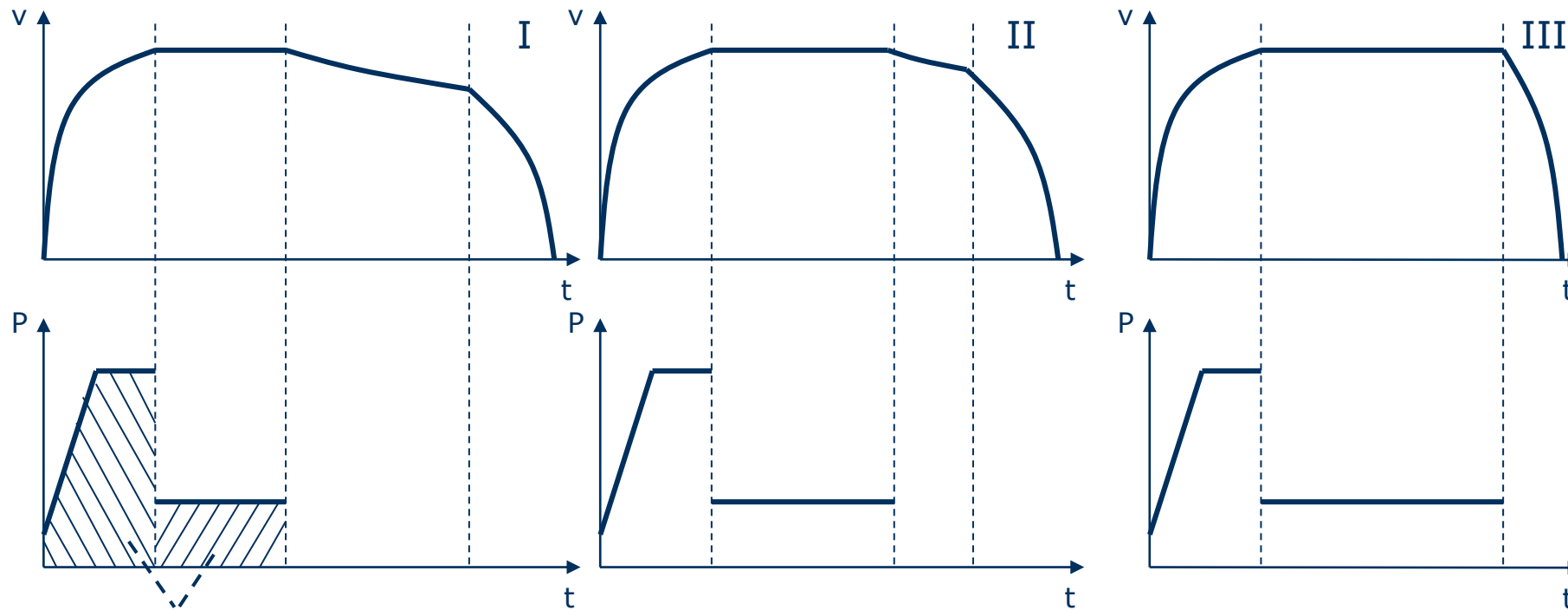
Vorlesungsinhalte

Schwerpunkt Schienenverkehr

- Einführung
- Grundlagen
- Fahrwiderstandskräfte
- Antriebskräfte
- Traktionsvermögen
- Leistungs- und Energiebedarf
- **Grundlagen der Fahrzeitberechnung**



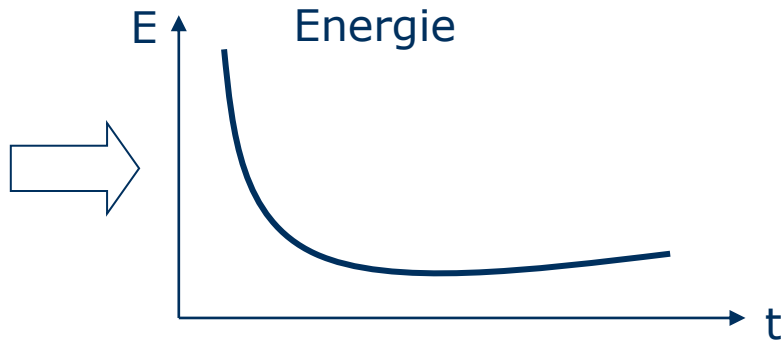
Grundzüge des Energiesparenden Fahrens



$$t_I > t_{II} > t_{III}$$

und

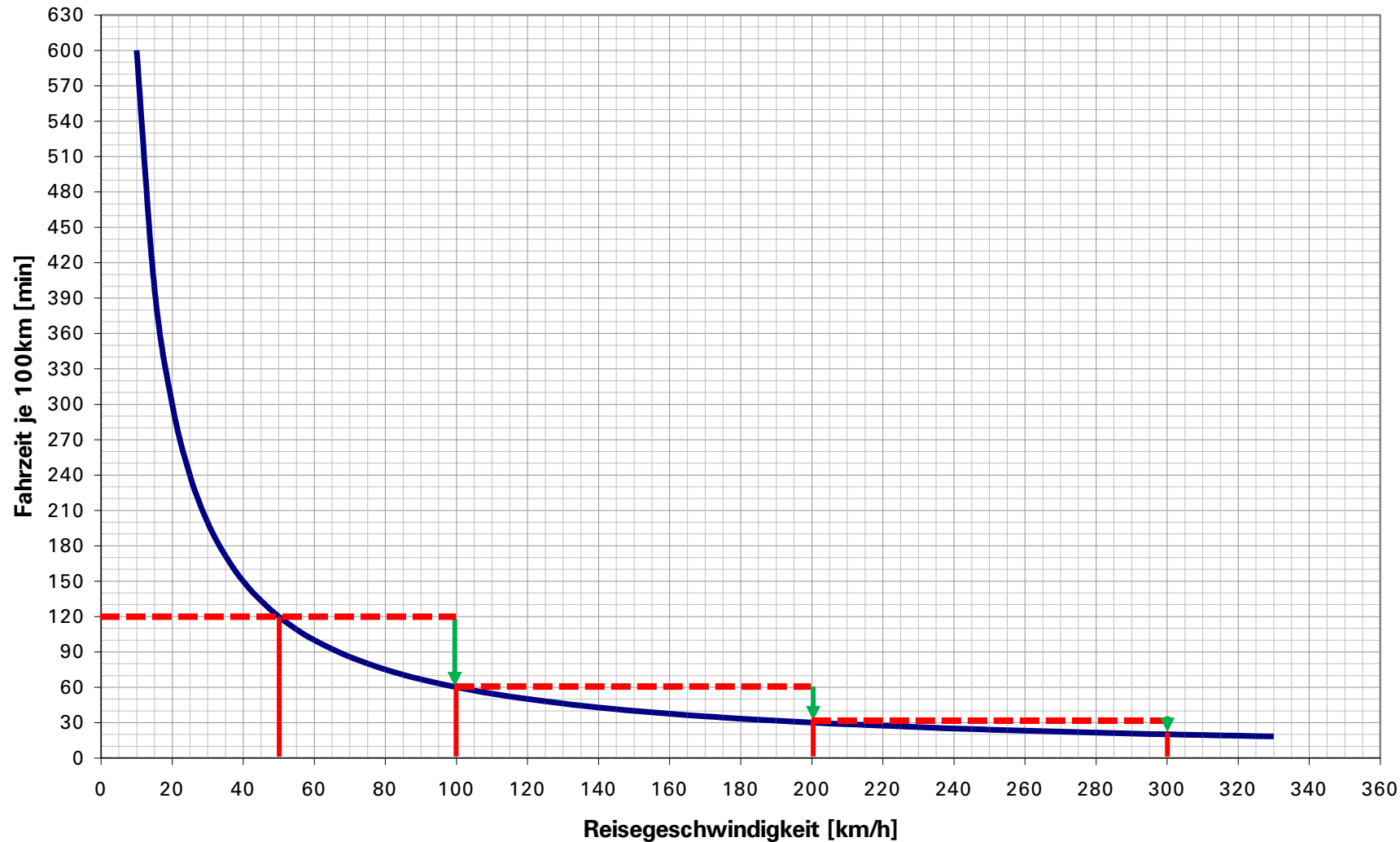
$$E_I < E_{II} < E_{III}$$



Fahrzeit und Energiebedarf

- verhalten sich grundsätzlich gegenläufig
- Fahrzeitverkürzungen bei gleicher Fahrzeugkonfiguration mit Mehrbedarf an Energie verbunden
- Senkung des Traktionsenergiebedarfes durch betriebliche Maßnahmen bedeutet Fahrzeitverlust

Reisegeschwindigkeit und Reisezeit



50 km/h:
120 min/100 km

-60 Min

100 km/h:
60 min/100 km

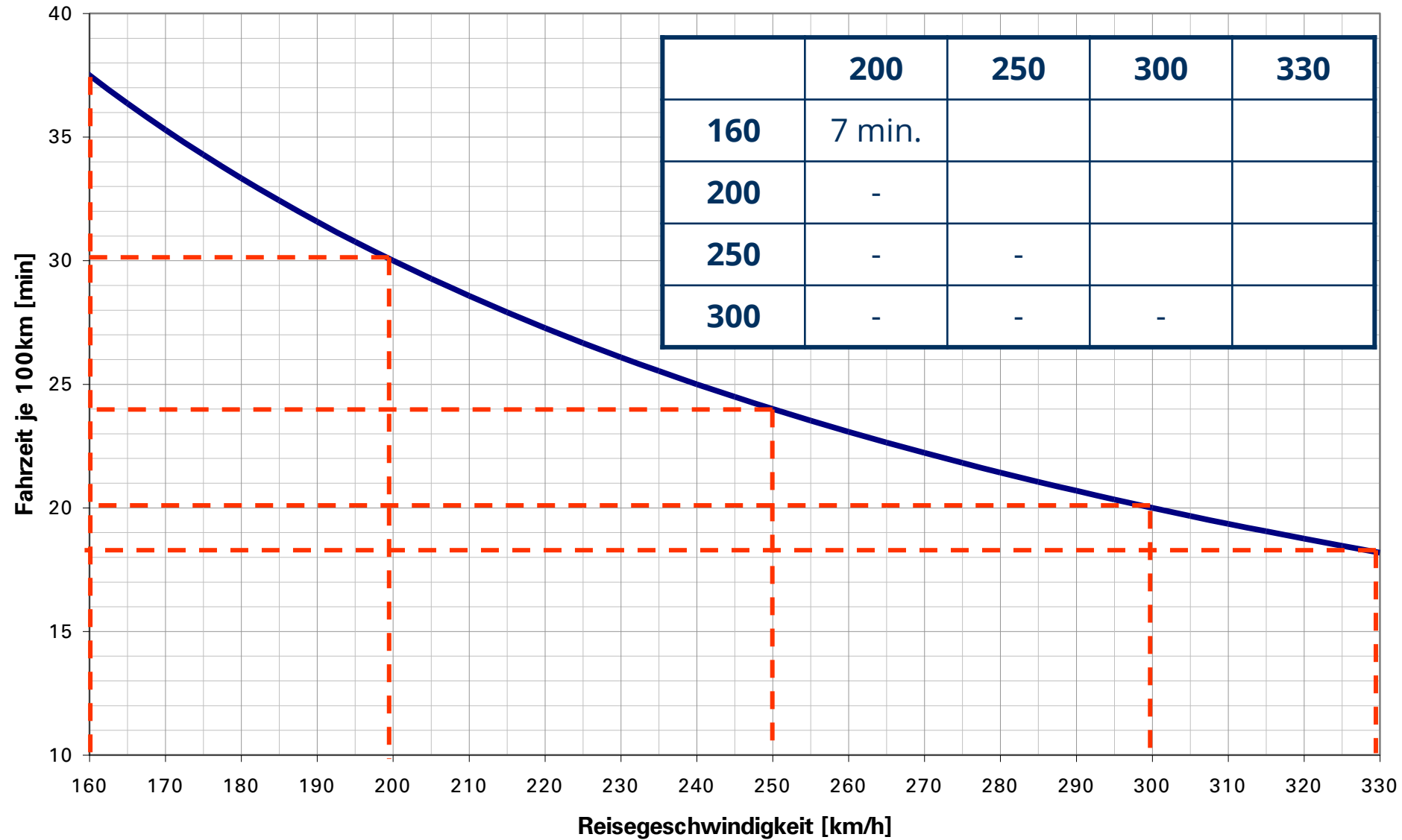
-30 Min

200 km/h:
30 min/100 km

-10 Min

300 km/h:
20 min/100 km

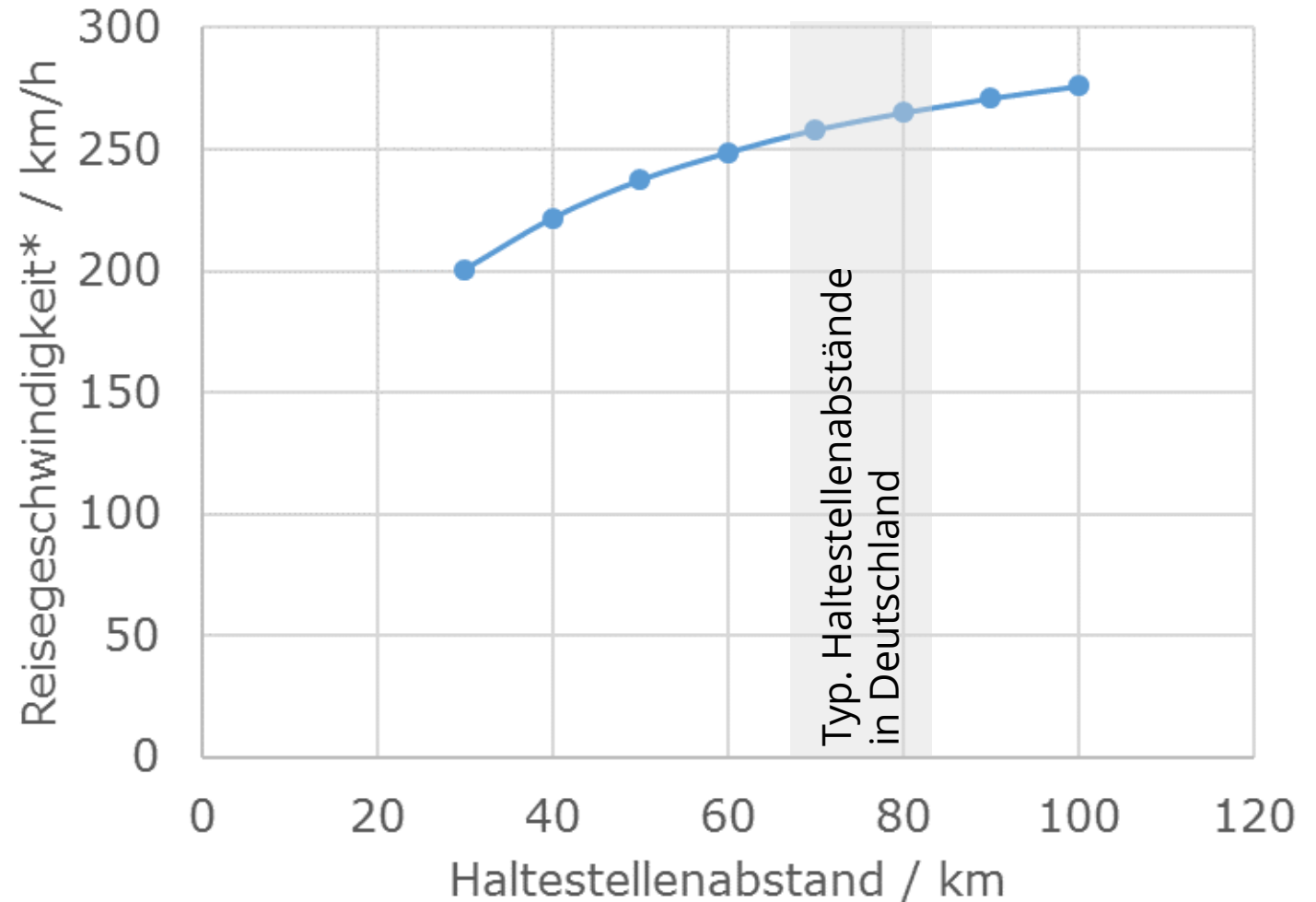
Reisegeschwindigkeit und Reisezeit II



Reisegeschwindigkeit und Haltestellenabstand

Randbedingungen: ideales Fahrspiel aus

- Beschleunigung mit maximaler Beschleunigung/ Leistung bis max. 330 km/h
- Beharrung (wenn möglich)
- Bremsung mit $0,5 \text{ m/s}^2$ (Betriebsbremsung)
- ebene Strecke
- Variation des Haltestellenabstandes



Energiebedarf an den Treibrädern

Beispiel ICE 3

Fahrzeit und Energie ICE 3

100 km/h:

60 min/100 km
360 kWh/100 km

-30 min (50%)
+570 kWh (258 %)

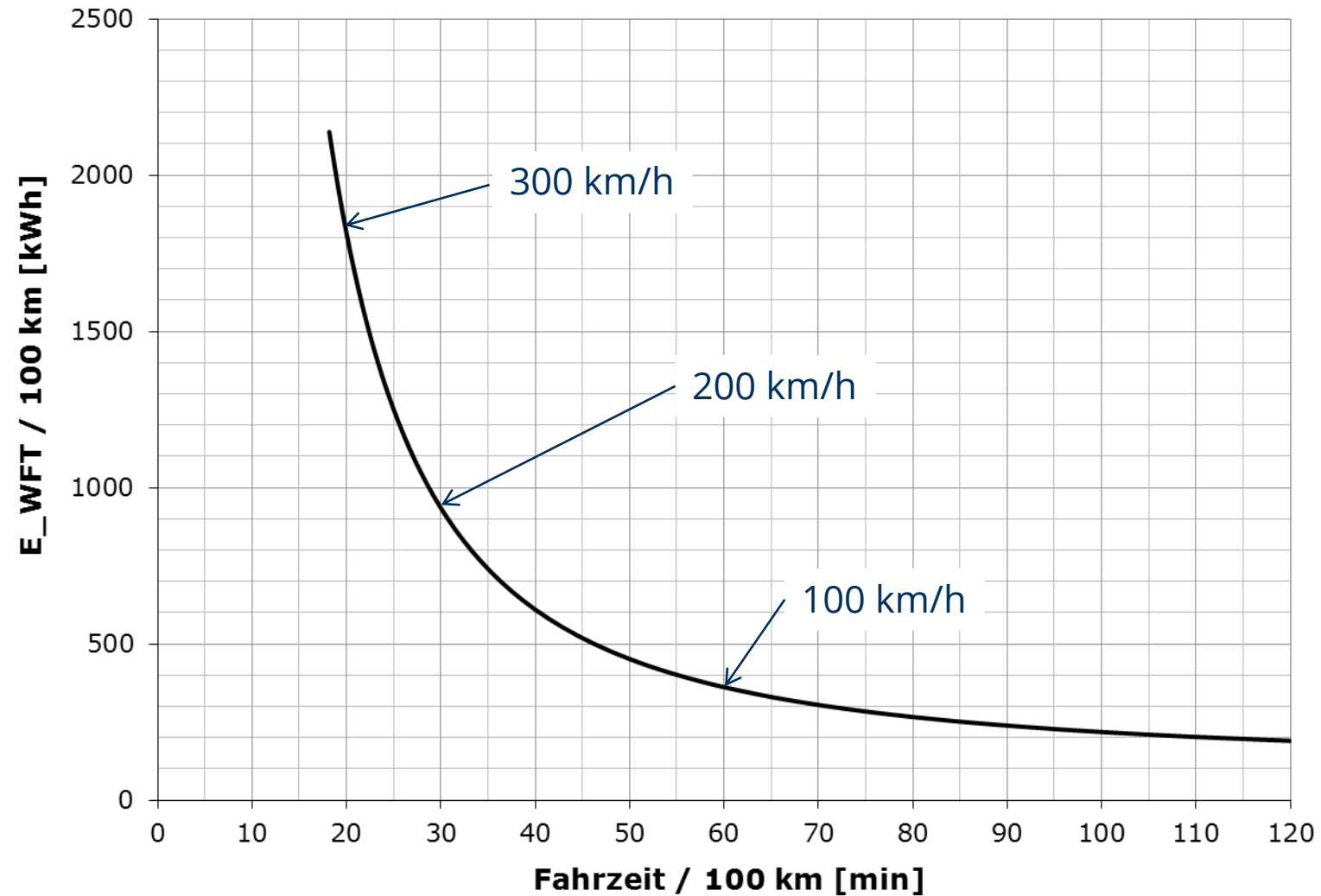
200 km/h:

30 min/100 km
930 kWh/100 km

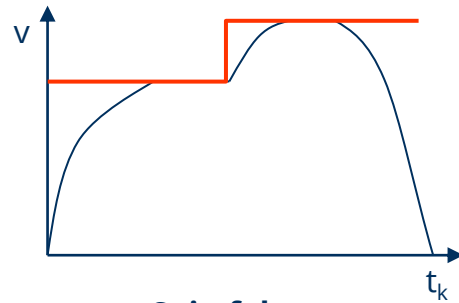
-10 min (67%)
+910 kWh (198 %)

300 km/h:

20 min/100 km
1840 kWh/100 km

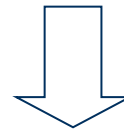


Fahrplankonstruktion (Prinzip)



Spitzfahrt -
Vorausberechnung der
kürzesten Fahrzeit

Regelzuschlag
+
Sonderzuschläge = Fahrplan-Fahrzeit (Soll-Fahrzeit)



Fahrzeitreserve

Anwendung der
Energiesparenden
Fahrweise

kurzfristige Langsamfahrstellen
verlängerter Fahrgastwechsel
außerplanmäßige Halte
Zwangsbremnungen

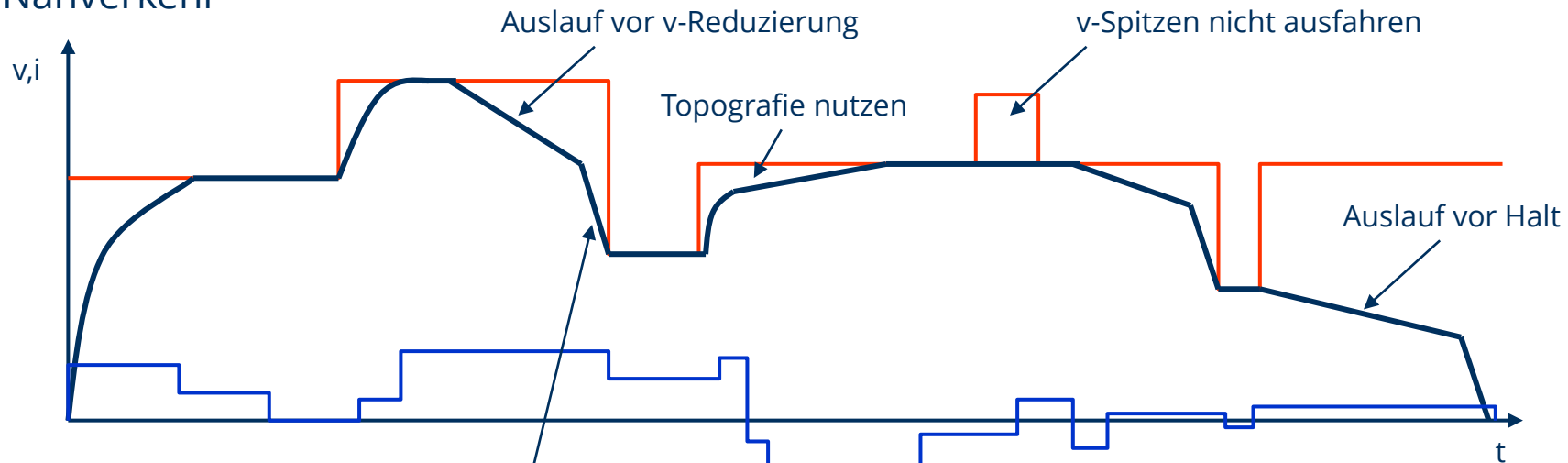
Traktionsenergie sparen



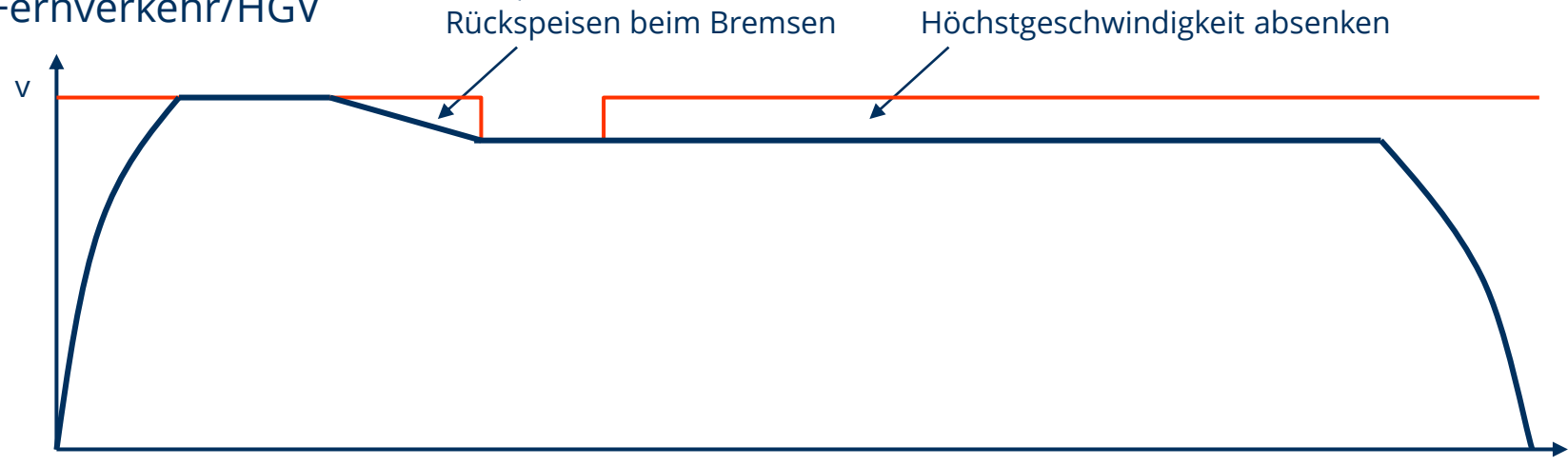
Fahrplan einhalten

Energiesparendes Fahren – betriebliche Eingriffsmöglichkeiten

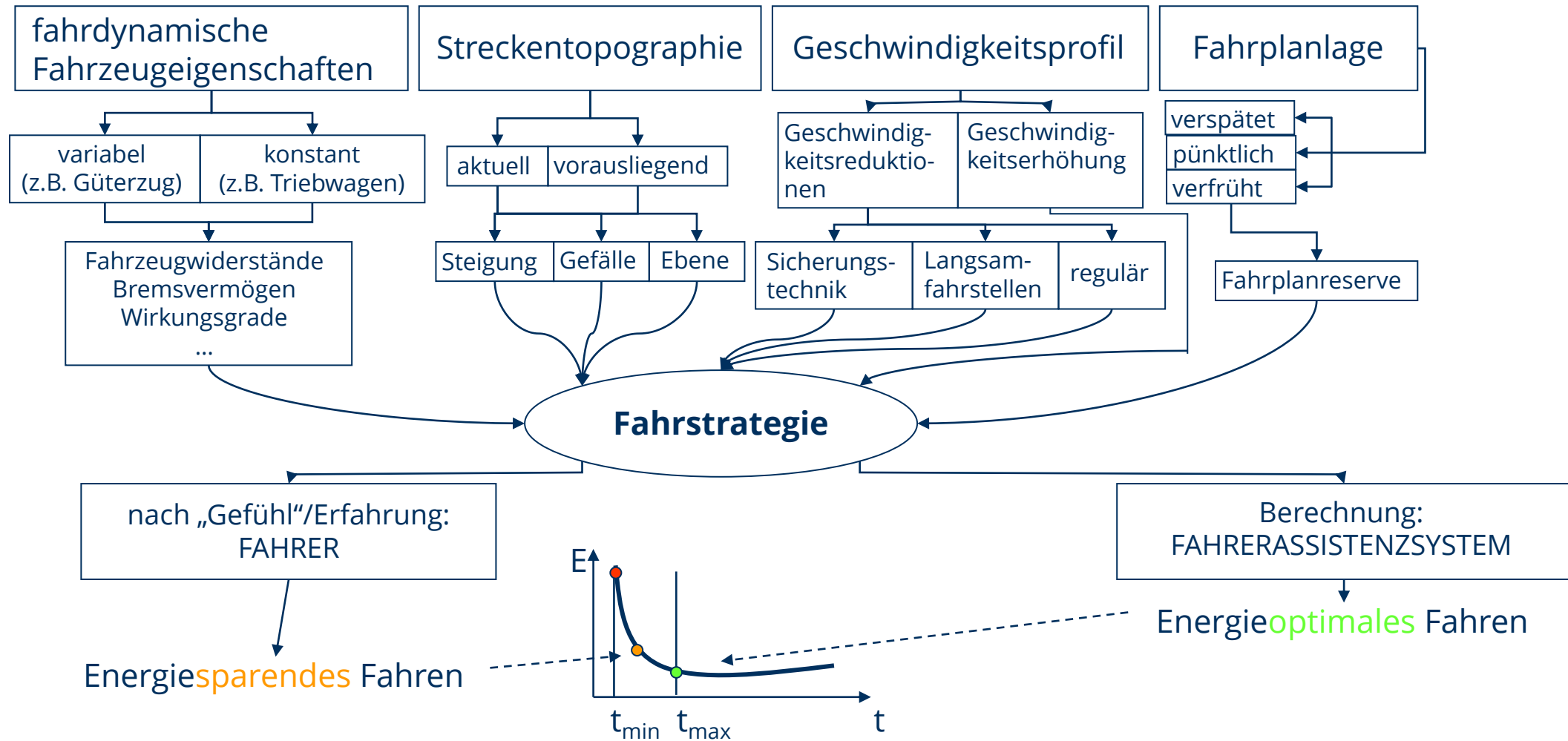
Nahverkehr



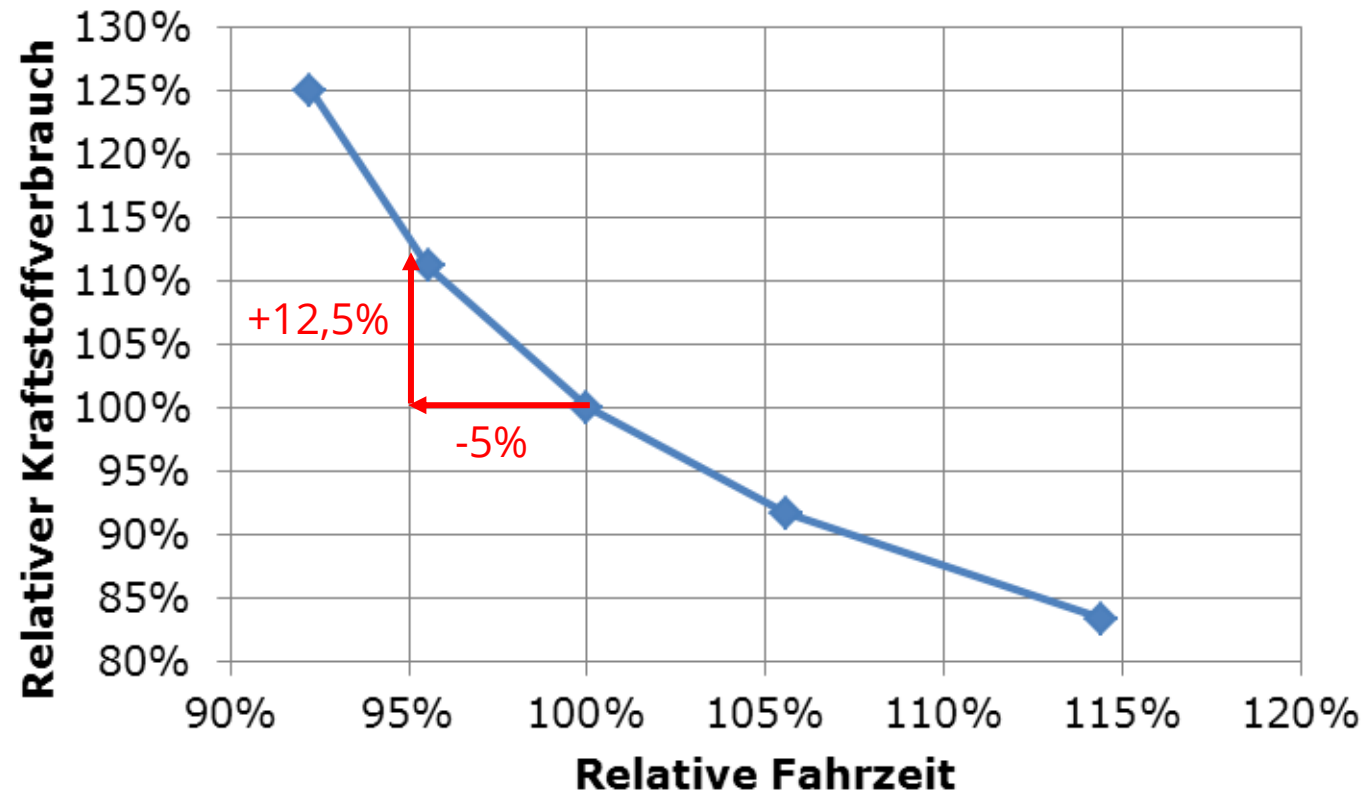
Fernverkehr/HGV



Energiesparendes Fahren – Fahrstrategie und Einflussfaktoren



Energiesparendes Fahren – Praxisbeispiel 1



Messungen der Deutschen Reichsbahn (DDR, 1983):

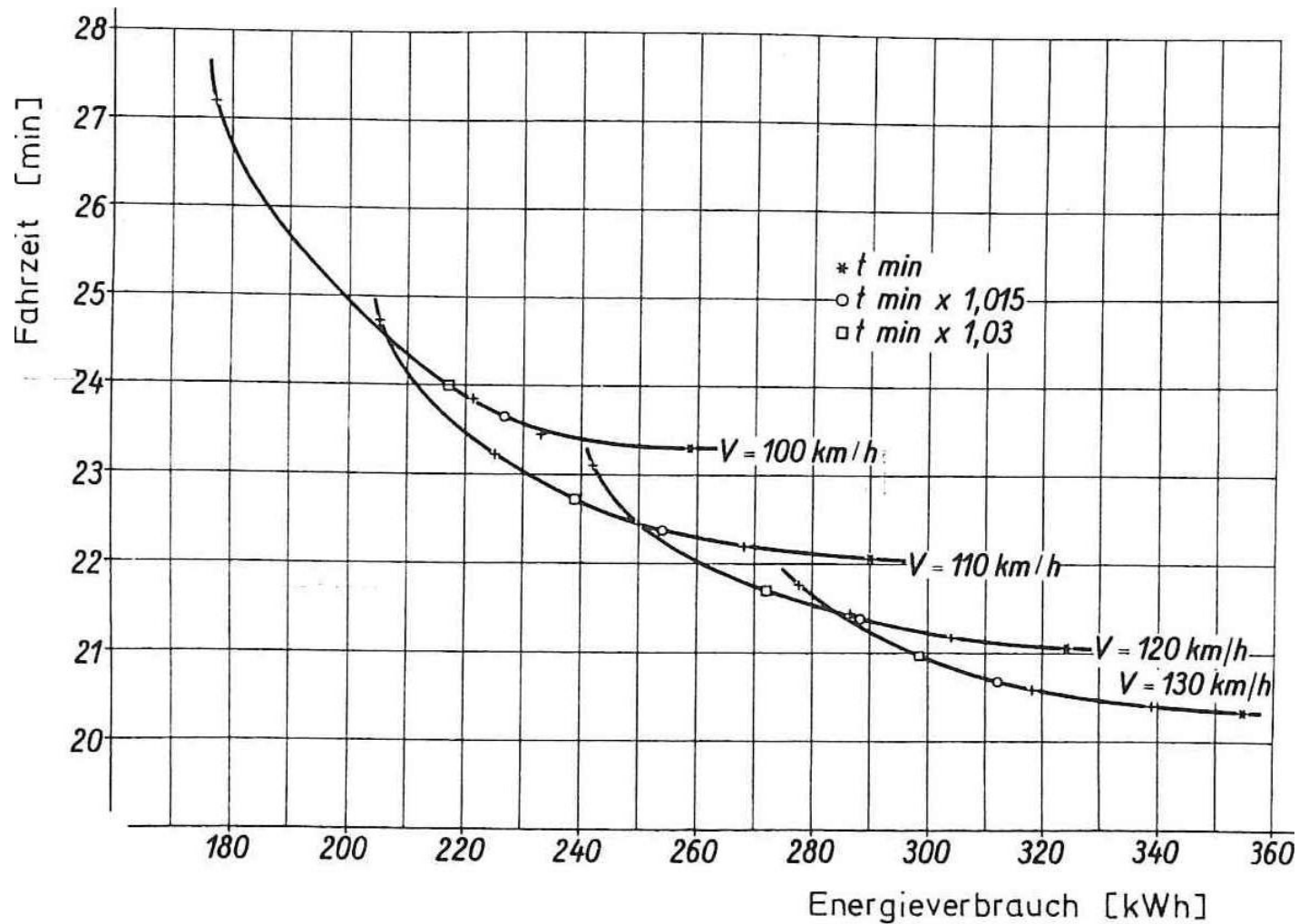
- dieselhydraulische Lokomotive (BR 118)
- Vorortverkehr

Quelle: Greifenberg, Schienenfahrzeuge 4/1983, S. 185 ff.



BR 118 (DR)

Energiesparendes Fahren – Praxisbeispiel 2



Berechnungen der Deutschen Bundesbahn (1983):

- S-Bahn Züge
- S-Bahn-Verkehr (Dortmund-Hamm)
- unterschiedliche Höchstgeschwindigkeiten (100/110/120/130 km/h) auf versch. Streckenabschnitten

Quelle: Hochbruck, ZEV-Glas. Ann. 12/1983, S. 417 ff.



Foto: Martin Rese

Energiesparendes Fahren – Praxisbeispiel 3

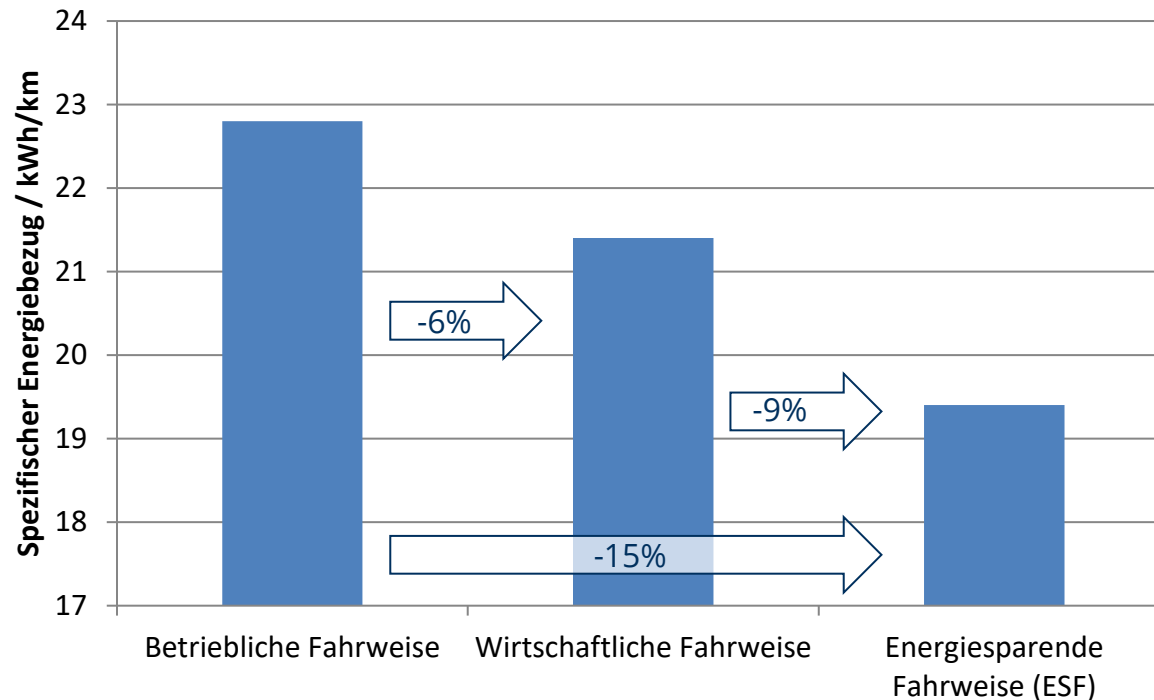
Empirische Analyse gemessener Energiebezüge der ICE 1 – Flotte der DB

Quelle: Lehmann, EB Elektrische Bahnen, 7/2007, S. 397 ff.

Analyse von 5092 Fahrten (1996/1997):



©Jens Hauptert



ZusiDisplay -> Buchfahrplan

aus S i St V>0 V=0 UD

12102 Fahrplan gültig! 01.05.1987 14:55:14
La-Daten für 01.05.1987!

ab km 326,4: 90 km/h Nächster Halt: Mönchehof

km	La	Ort	Zeit
100	334,0		
	334,0		
	337,5	Esig	
	337,5	Asig	
	337,7		
	338,4	Obervellmar	15:04.0 15:05.0
	341,2	Esig	
	341,5	Bksig	
	341,5	Bk Ksl-Harlesh Hp	14:59.3 15:00.0
110	342,4		
	344,0		
100	344,0		
	344,6	Asig	
	345,2	600 A	
60	345,2	Kassel Hbf	14:55.0 14:56.0
		- ZBF A 78 -	

Ort RW / r 600 A A 78 -0.4 m ESF 0 kWh - 0 kWh

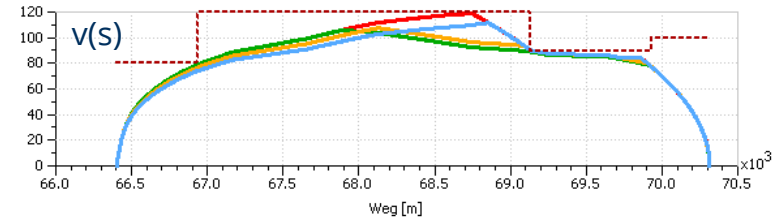
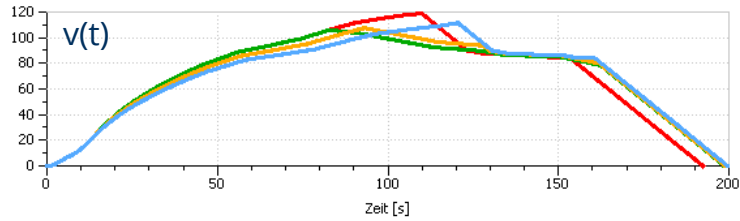
Zug FSD LaD LaT LW GW Zeit G

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

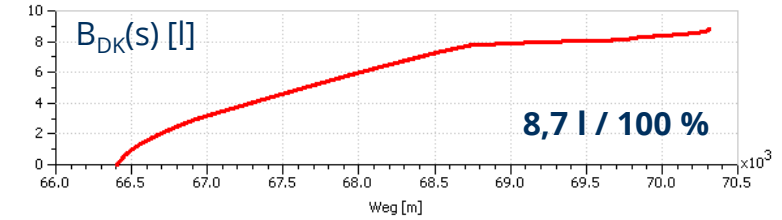
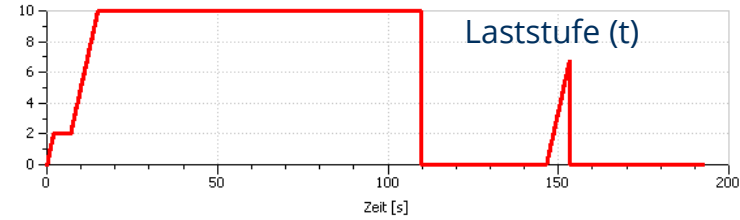
Energiesparendes Fahren – Praxisbeispiel 4



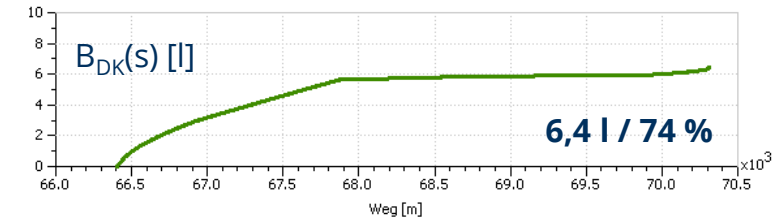
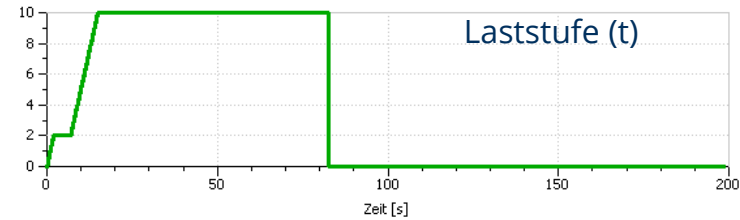
BR 612



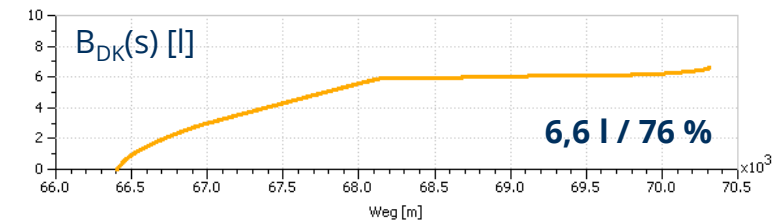
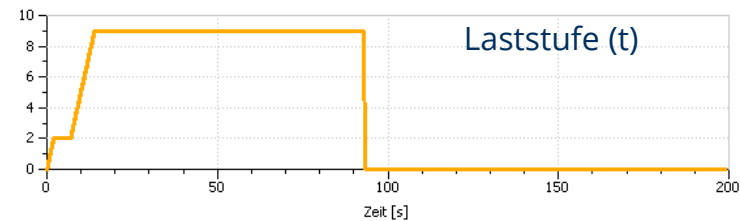
Vergleich der simulierten Fahrspiele



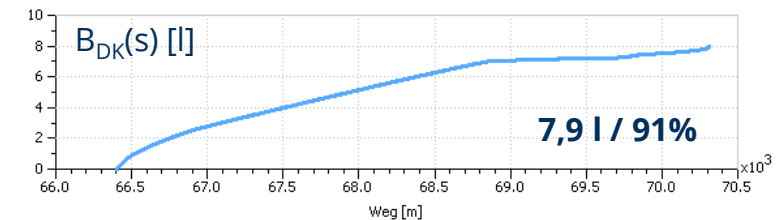
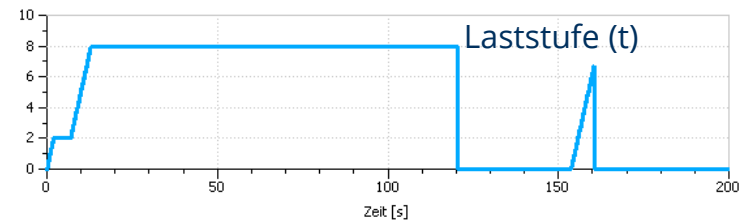
Strategie 1:
Spitzfahrt



Strategie 2:
Energiesparend mit maximaler Traktionsleistung



Strategie 3:
Energiesparend mit 90% Traktionsleistung



Strategie 4:
Energiesparend mit 80% Traktionsleistung

Energiesparendes Fahren – Praxisbeispiel 5



Beispiel BR 232

Verdopplung (!) des Kraftstoffverbrauches für einen Beschleunigungsvorgang bei ungünstig gewählter Fahrstufe

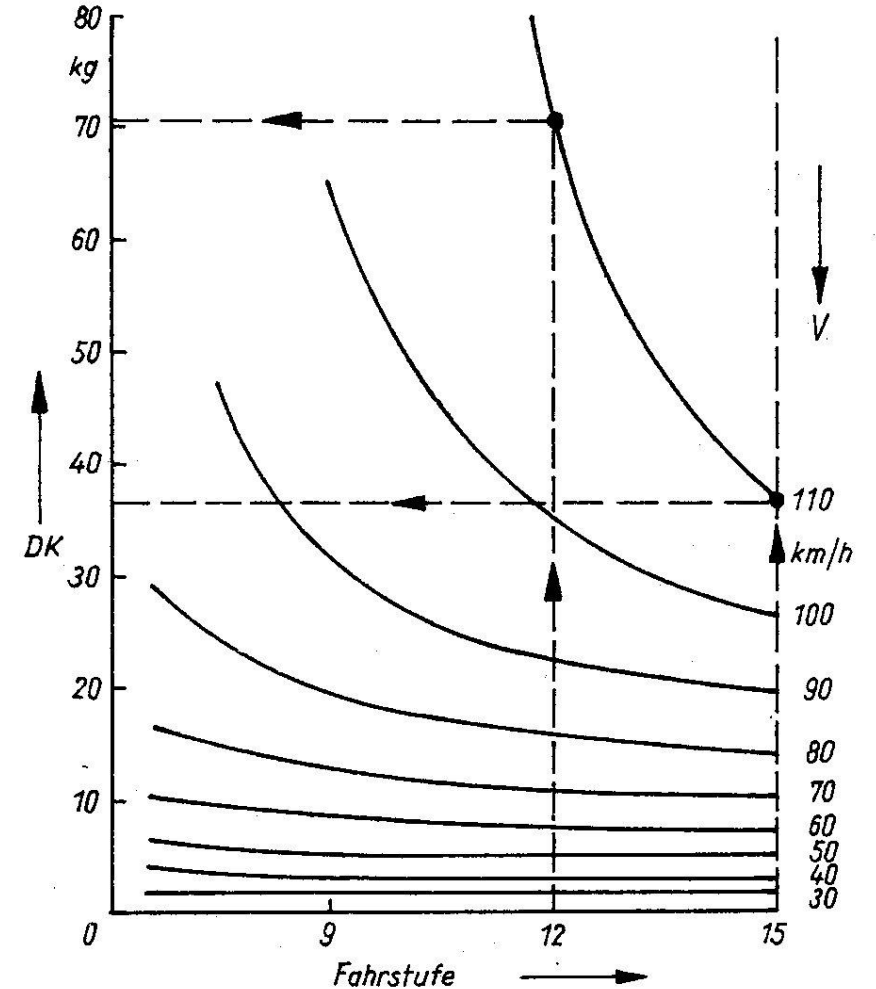


Bild 1 DK-Verbrauch für die Beschleunigungsphase (Antfahren) in Abhängigkeit der Fahrstufenerstellung
BR 132 Zugmasse = 400 t

Fahrzeitermittlung

Ausgangspunkt: Fahrdynamische Grundgleichung

$$-\ddot{x}\xi m + F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B = 0$$

$$\ddot{x}\xi m = F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B$$

$$\ddot{x} = \frac{F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B}{\xi m}$$

$$\ddot{x} = \frac{F_T(t, v) - F_{WFT}(v) - F_{WFW}(s, v) - F_{WS}(s) - F_B(t, v, \theta)}{\xi m}$$

Geschlossene Lösung aufgrund komplexer Abhängigkeiten in der Regel nicht möglich

Nutzung von Näherungsverfahren sowie numerischer Methoden

Fahrzeitermittlung

Grundproblem

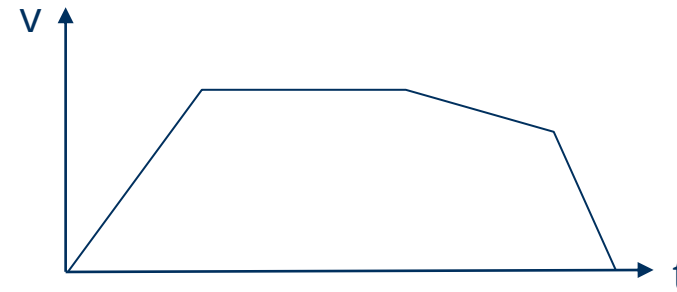
Integration der Bewegungsgleichung:

$$a = f(v)$$

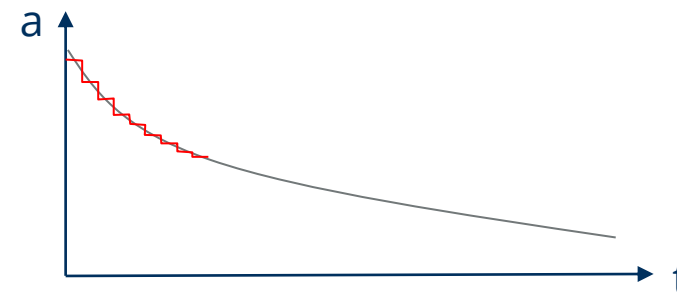
$$t = \int \frac{1}{a(v)} dv$$

$$s = \int \frac{v}{a(v)} dv$$

Lösungsansatz 1: Linearisierung



Lösungsansatz 2: Diskretisierung

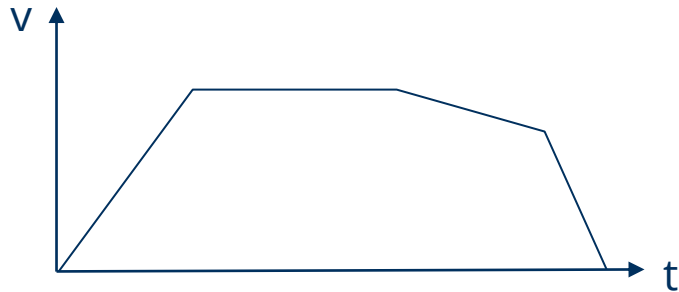


Lösungsansatz 3: Integrationsverfahren



Fahrzeitermittlung

Lösungsansatz 1: Linearisierung



Grundidee: Rechnen mit konstanten, mittleren Beschleunigungen/Verzögerungen

Vorteile

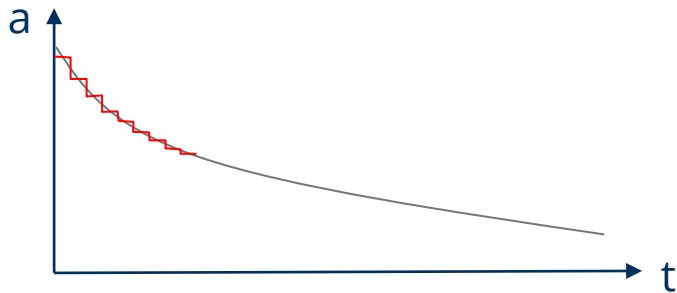
- + Reduktion auf einfache mathematische Zusammenhänge
- + „Handrechnung“ möglich

Nachteile

- ungenaue Ergebnisse
- schwierige Ermittlung sinnvoller „mittlerer“ Beschleunigungen
- keine detaillierte Darstellung des Fahrtverlaufes

Fahrzeitermittlung

Lösungsansatz 2: Diskretisierung



„Schrittverfahren“:

- **Zeitschrittverfahren**
- **Wegschrittverfahren**
- **Geschwindigkeitsschrittverfahren**

Grundidee:

Annahme **konstanter** Beschleunigung für **kleine** (Zeit-/Weg-/Geschwindigkeits-) **Intervalle**

Vorteile

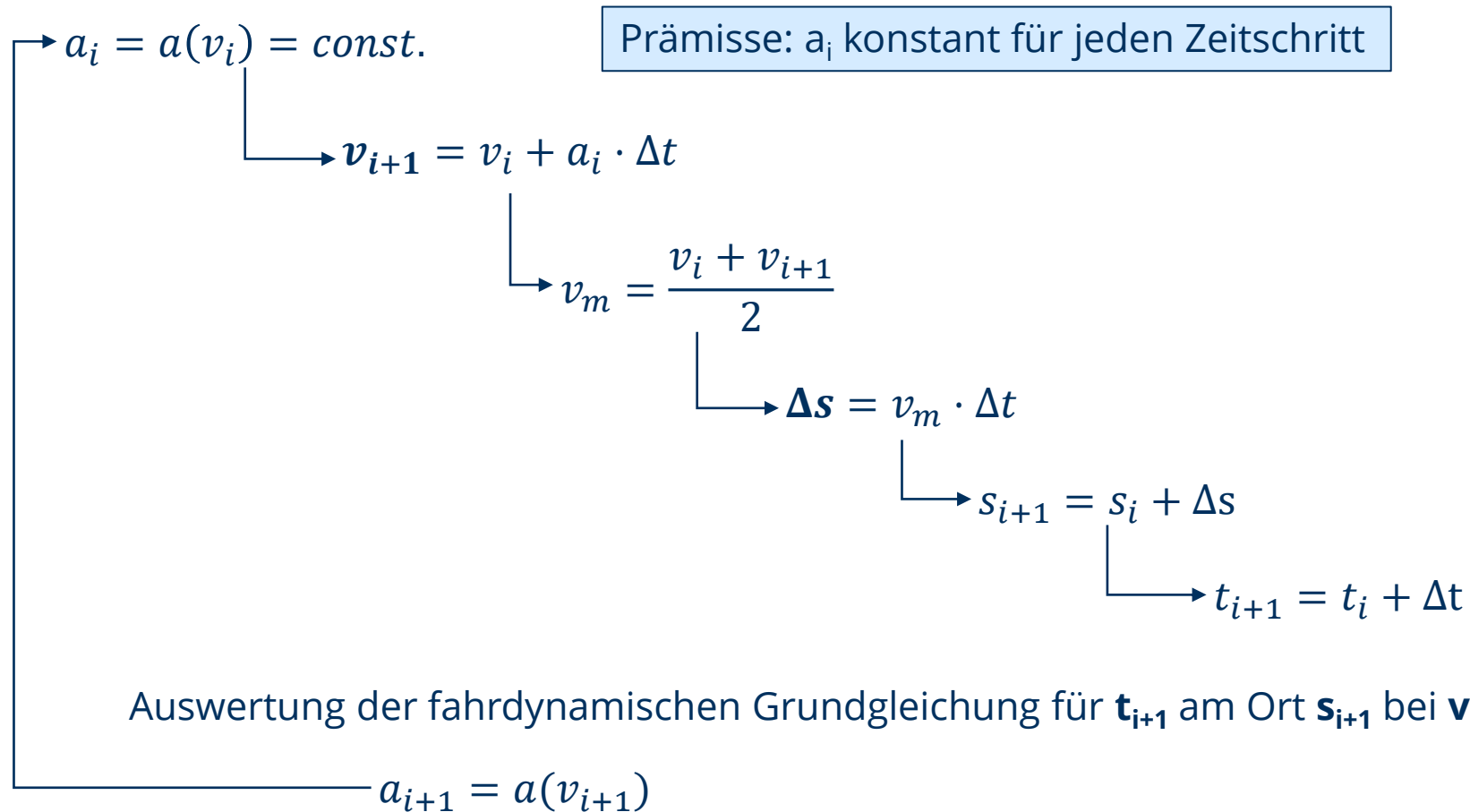
- + Reduktion auf einfache mathematische Zusammenhänge
- + Berechnung mit MS-Excel möglich
- + hinreichend genau bei sinnvoll gewählten Intervallen
- + detaillierte Darstellung des Fahrtverlaufes möglich

Nachteile

- hoher Rechenaufwand und große Datenmengen (insbes. Zeitschrittverfahren)
- nicht für alle Bewegungsabschnitte geeignet (Geschwindigkeitsschrittverfahren)
- z.T. Iterationsschritte nötig (abhängig von Genauigkeitsanforderungen)

Zeitschrittverfahren

Fahrzeug erfährt hat zum Zeitpunkt t_i die Beschleunigung $a_i(v_i)$ – Auswertung fahrdyn. Grundgl.:



Fahrzeitermittlung

Lösungsansatz 3: Integrationsverfahren



- Nutzung von Integraltabellen
- Nutzung numerischer Integratoren

Grundidee:

Auffinden geeigneter Näherungsfunktionen für $a(v)$ und anschließende Integration

Vorteile

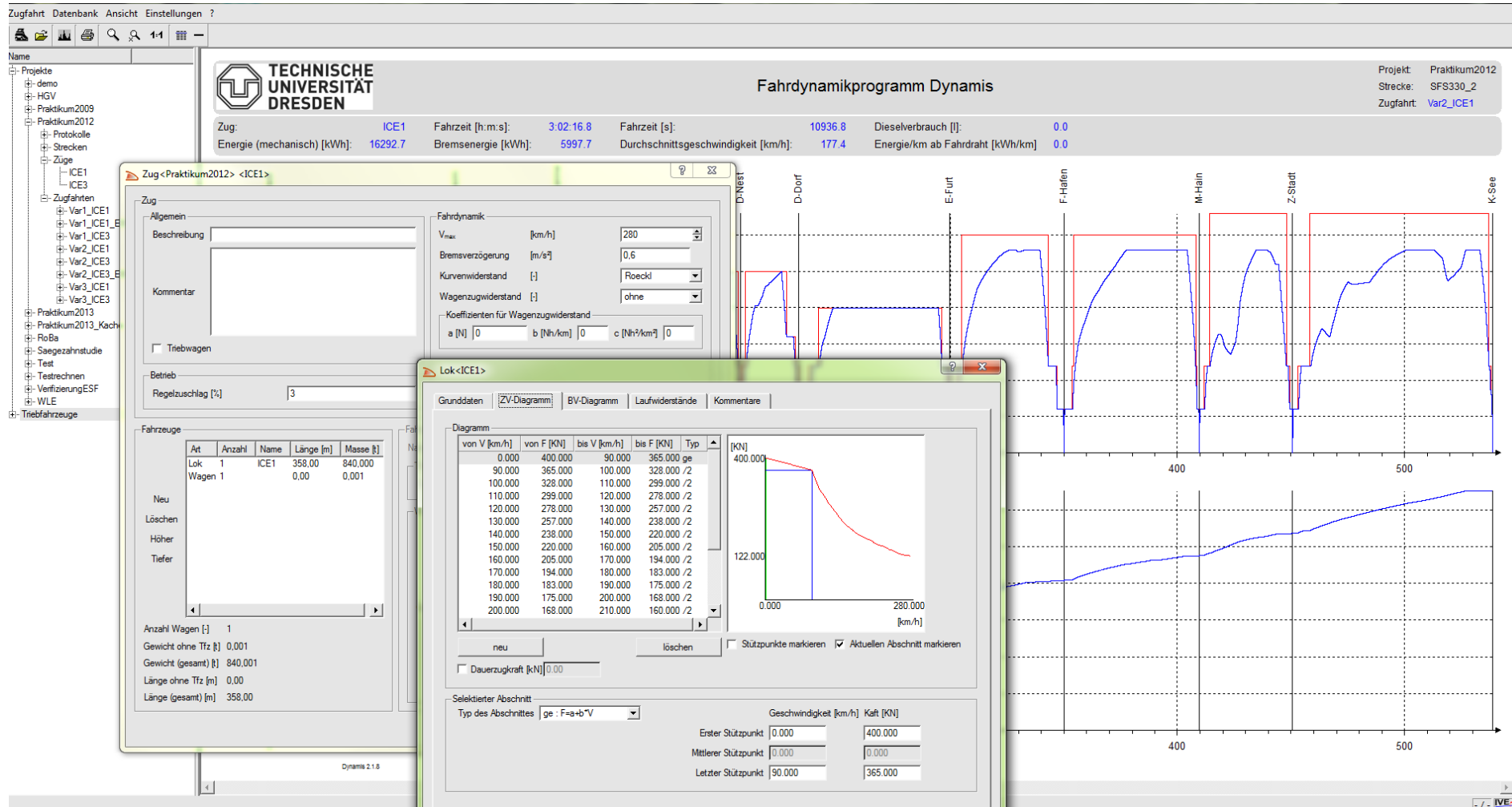
- + sehr hohe Genauigkeit möglich
- + detaillierte Darstellung des Fahrtverlaufes möglich (nicht bei allen Verfahren)

Nachteile

- Nutzung spezieller Software nötig
- hoher Aufwand im Falle einer „Handrechnung“
- z.T. hoher Aufwand zur Vorbereitung der Rechnung (Implementierung von Algorithmen)

Numerische Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung

Beispiel: Zugfahrtsimulations-Programm „Dynamis“



Numerische Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung

Beispiel: Zugfahrtsimulationsprogramm „Dynamis“

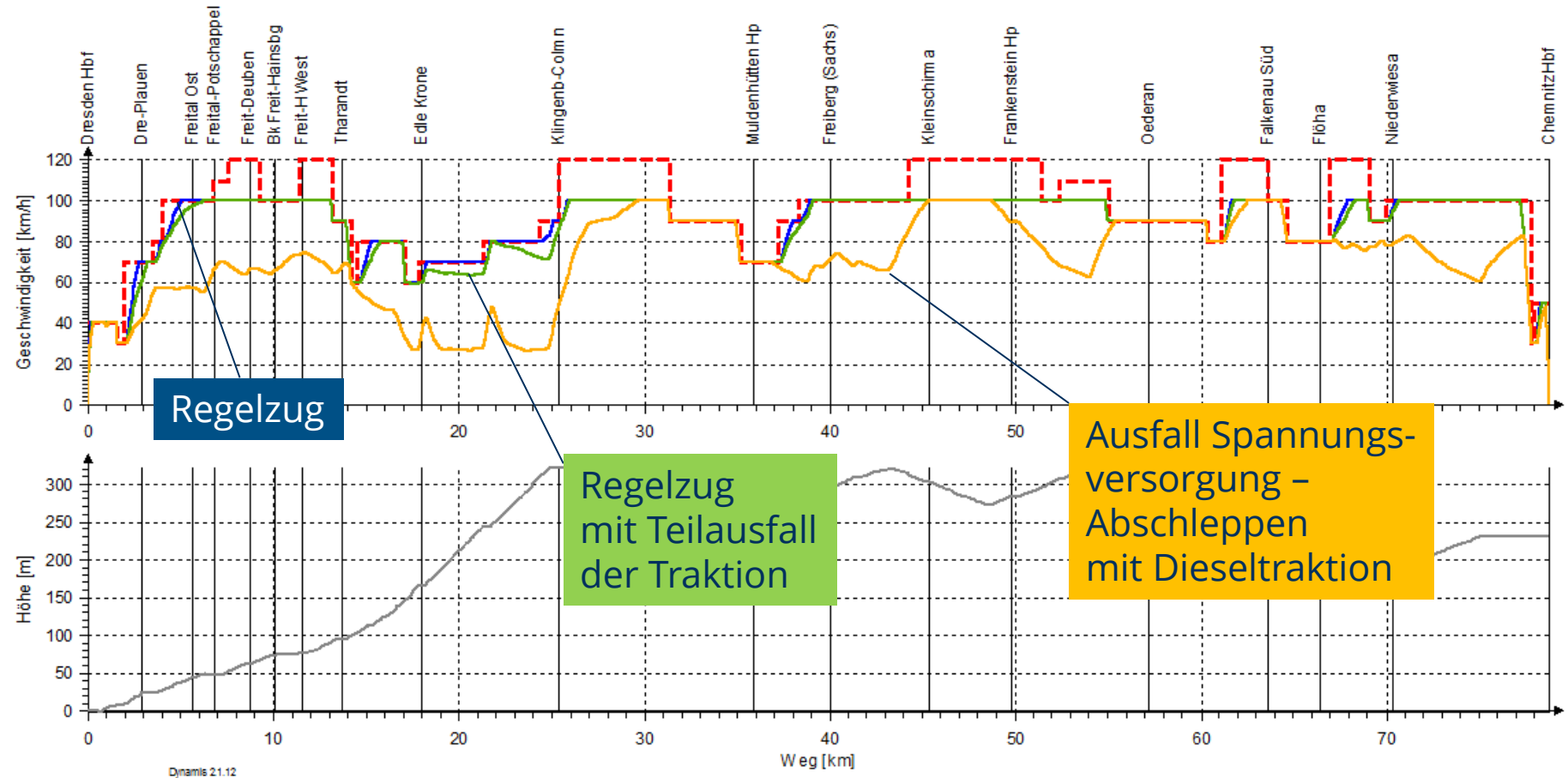


Fahrdynamikprogramm Dynamis

Projekt: Praktikum 2009 / Strecke: DDCh

Zugfahrt: DDCh152, DDCh152Sch, DDCh232152

Zug:	BR152Gz	BR152Gz	BR152_232	Fahrzeit [h:m:s]:	0:56:20.2	0:57:16.0	1:17:18.1
Fahrzeit [s]:	3380.2	3436.0	4638.1	Dieserverbrauch [l]:	0.0	0.0	0.0
Energie (mechanisch) [kWh]:	1932.0	1917.6	1854.0	Bremsenergie [kWh]:	-360.3	-358.9	-301.1
Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]:	83.9	82.5	61.1	Energie/km ab Fahrdrat [kWh/km]	0.0	0.0	0.0

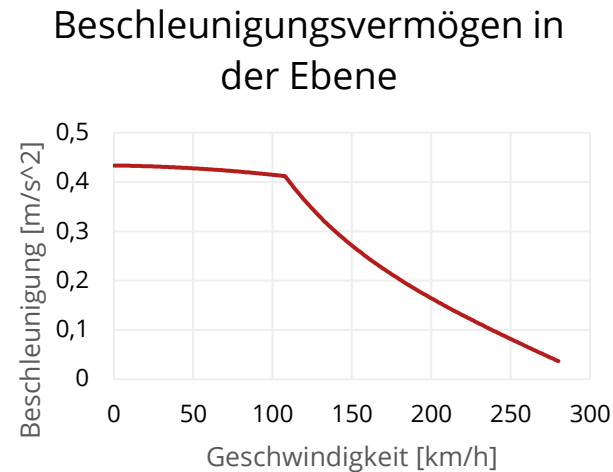
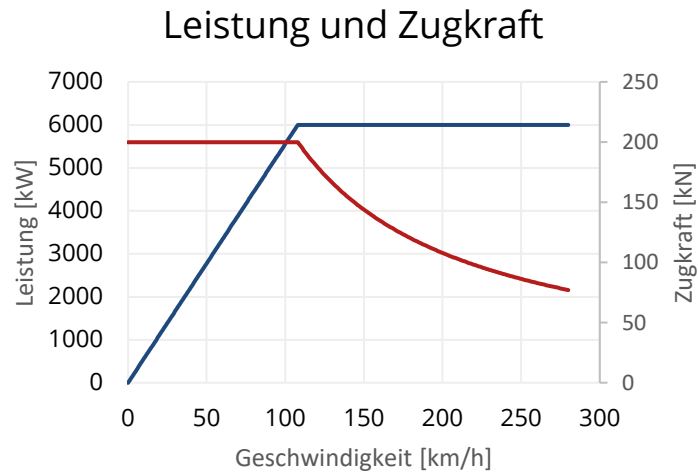


Objektorientierte Längsdynamikberechnung mit Python

Beispiel

Ansatz

- Objektorientierte Abbildung von Fahrzeugantrieb und Infrastruktur
- Verwendung anonymer Funktionen zur Übergabe von Verläufen (Python: Lambdafunktion)
- Ermittlung der Beschleunigungsfunktion $a(v)$ im Fahrabschnitt

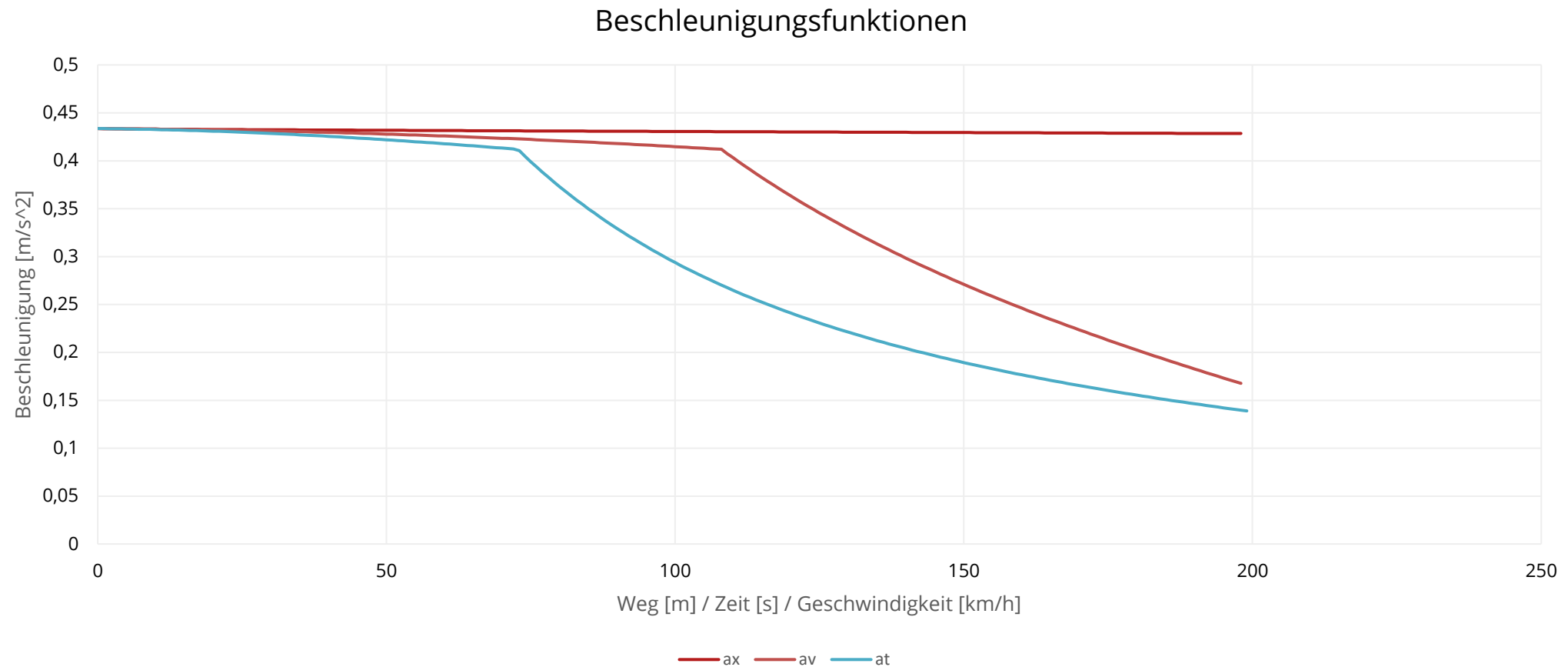


```
1 from enum import Enum
2 from .enumerations import *
3
4 class c_vp_tractionForce( object ):
5     yName = "Zugkraft"
6     xName = "Geschwindigkeit"
7     yUnit = "kN"
8     xUnit = "km/h"
9     color = "black"
10    style = e_pjtLineStyle.solidLine.value
11
12 class c_vp_vehicleResistance( object ):
13     yName = "Fahrzeugwiderstand"
14     xName = "Geschwindigkeit"
15     yUnit = "kN"
16     xUnit = "km/h"
17     color = "blue"
18     style = e_pjtLineStyle.solidLine.value
19
20 class c_vp_brakingForce( object ):
21     yName = "Bremskraft"
22     xName = "Geschwindigkeit"
```

```
173 #Übergangsgeschwindigkeit
174 return sy.solve( F_adh-F_pwr, v )[0]
175
176 def get_frictionForceSym( self ):
177     """Gibt eine Sympy Funktion zur Berechnung der Adhäsionskraft zurück
178
179     Returns:
180         Symbol: Funktion zur Berechnung der Adhäsionskraft, kN
181     """
182
183     F,m,g,mu = sy.symbols("F m g mu")
184
185     if aux.e_tractionForceCalcConst.FRICTIION_MASS_REL in self.tractionData:
186         #Relative Reibmasse angegeben
187         m = self.tractionData[ aux.e_tractionForceCalcConst.FRICTIION_MASS_REL ] * self.veh
188
189     if aux.e_tractionForceCalcConst.FRICTIION_MASS_ABS in self.tractionData:
190         #Absolute Reibmasse
191         m = self.tractionData[ aux.e_tractionForceCalcConst.FRICTIION_MASS_ABS ]
192
193     #Konstanten, mu Geschwindigkeitsabh. möglich
194     g = aux.constants.C_GRAVITY
195     mu = self.tractionData[ aux.e_tractionForceCalcConst.FRICTIION_COEF ]
196
197     F = m*g*mu
198
199     return F
200
201 def create_tractionForceLam( self ):
202     """Gibt eine Lambdafunktion für die Antriebskraft zurück
```

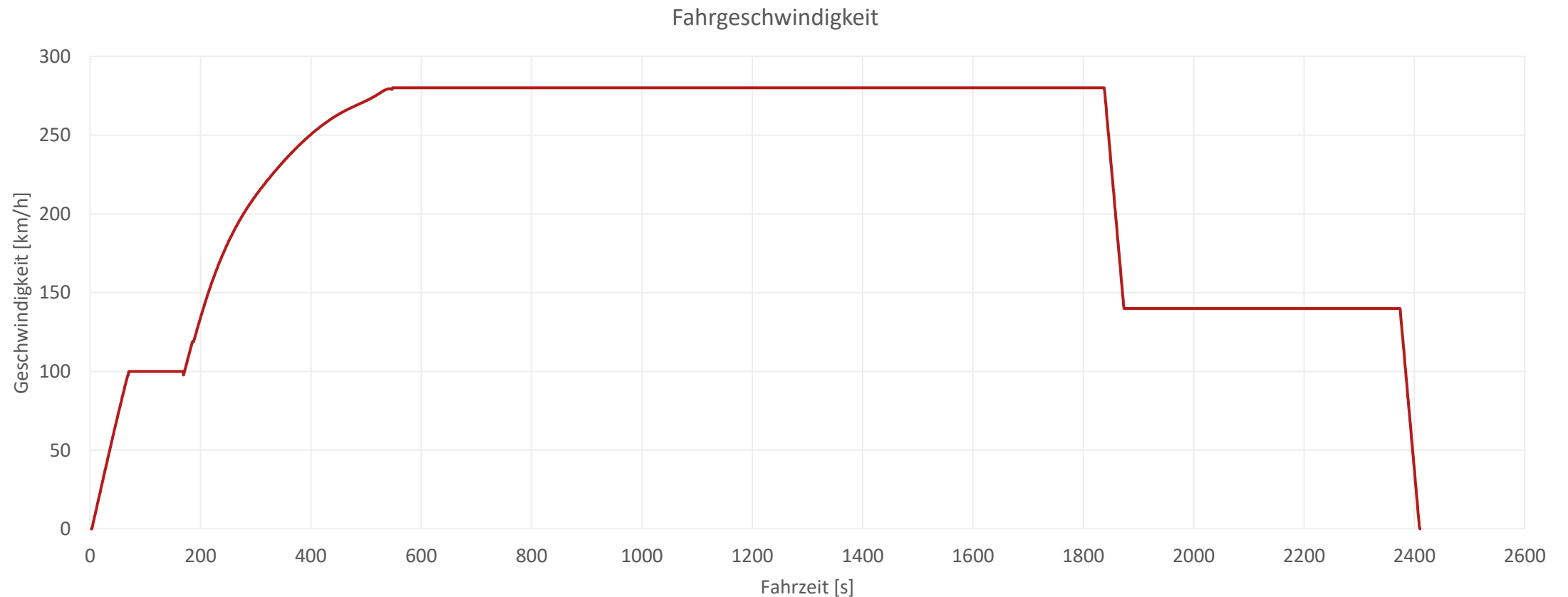
Objektorientierte Längsdynamikberechnung mit Python

Beispiel



Objektorientierte Längsdynamikberechnung mit Python

Beispiel



Ihr Lehrkontakt



Dipl.-Ing. Tobias Bregulla

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
tobias.bregulla@tu-dresden.de
+49 351 463-36577

Technische Universität Dresden
Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Professur für Elektrische Bahnen
<https://www.e-bahnen.de>

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit