

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla  
Professur für Elektrische Bahnen

# Fahrdynamik Bahnfahrzeuge

## VL 06: Energiebedarf und Fahrzeitrechnung

Sommersemester 2023

# Energiebedarf

Berechnungsgang für Energiebedarfsermittlung:  
Ausgangspunkt: Bilanzierung am Treibradumfang

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

**Beschleunigungsvorgänge**

$$F_T = \sum F_W$$

**Beharrungsfahrt**

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

**Allgemeiner Fall**

$$W_T = \int F_T ds$$

**Beharrungsfahrt**

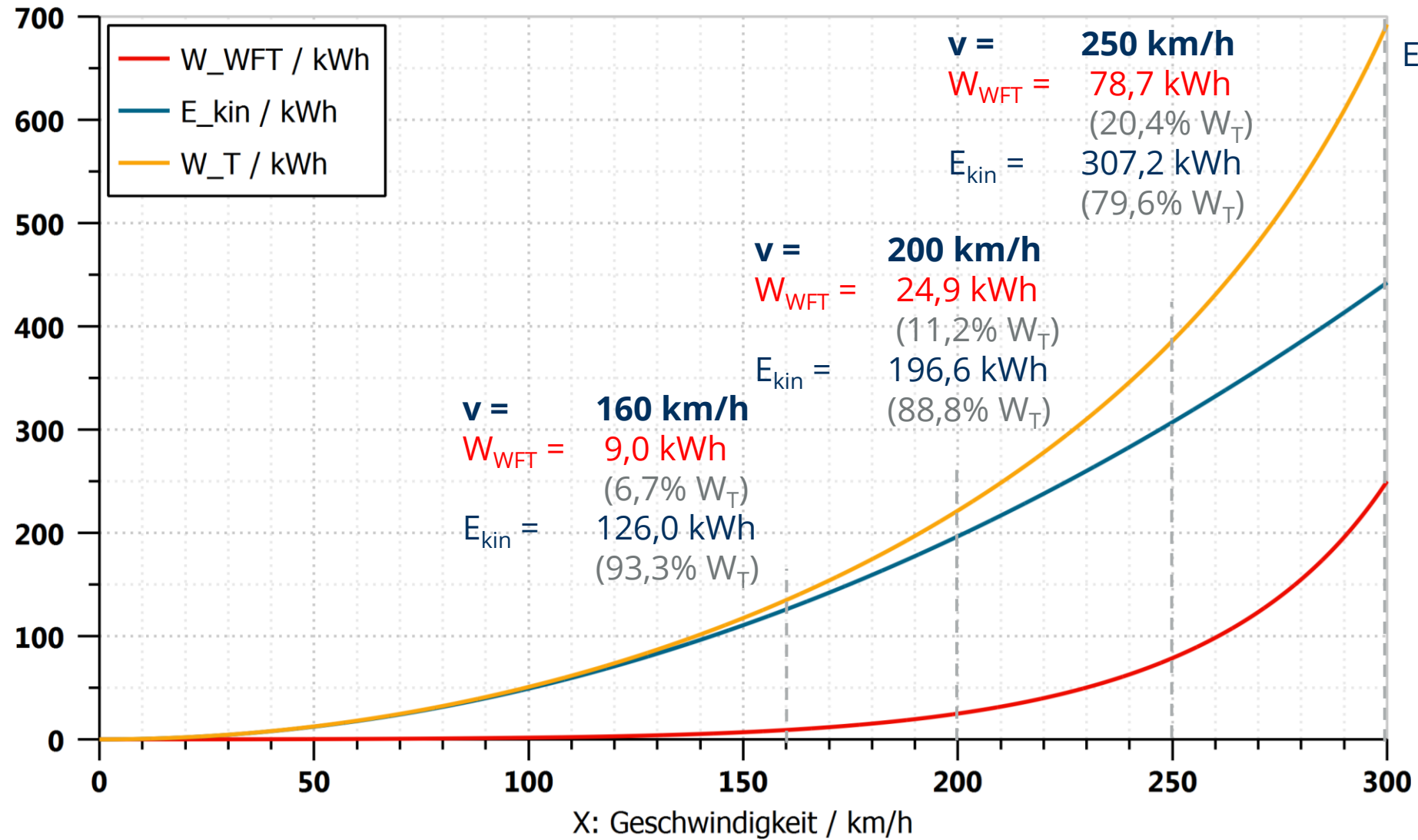
Ermittlung des Energiebezuges (aus Tank, ab Oberleitung):

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

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)



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

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

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

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

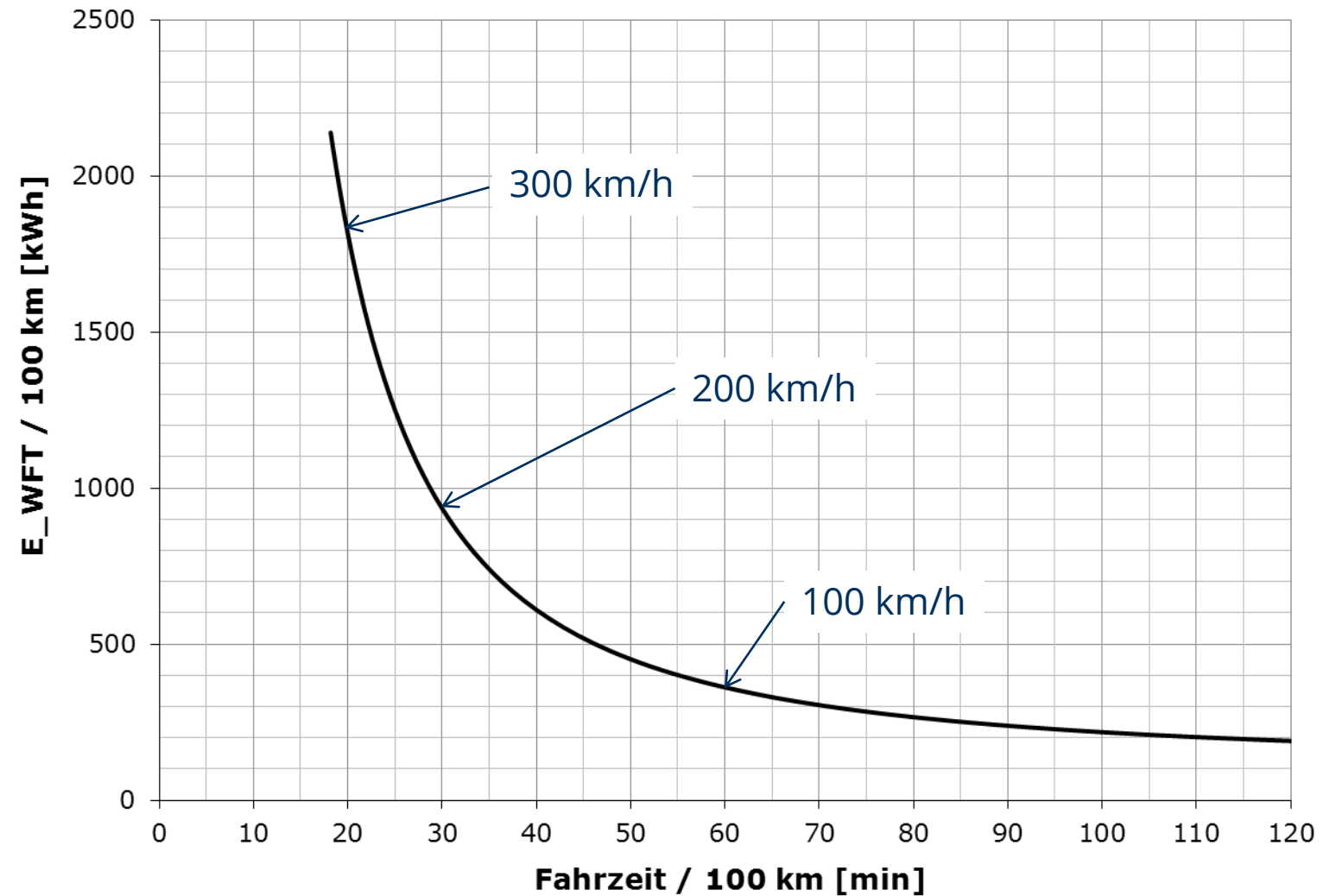
200 km/h:

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

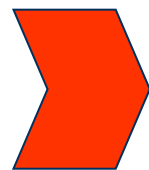


# Energiebilanz ICE 3

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%

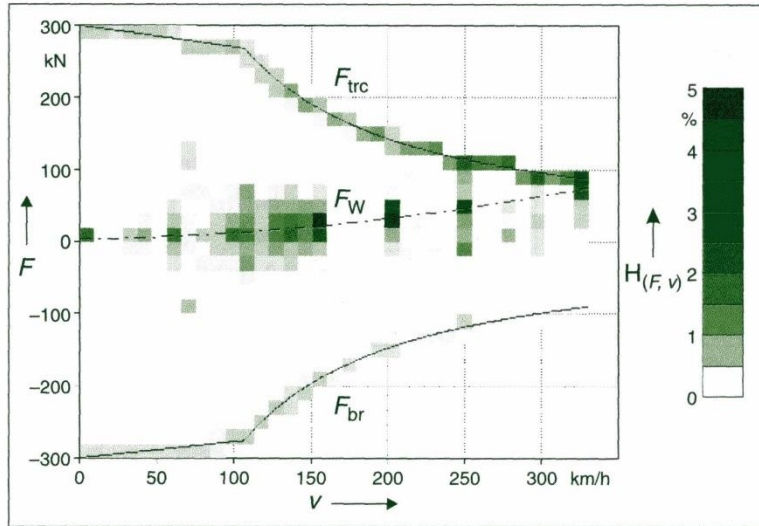
Trafo  $\approx$  9 %

4 QS  $\approx$  4 %

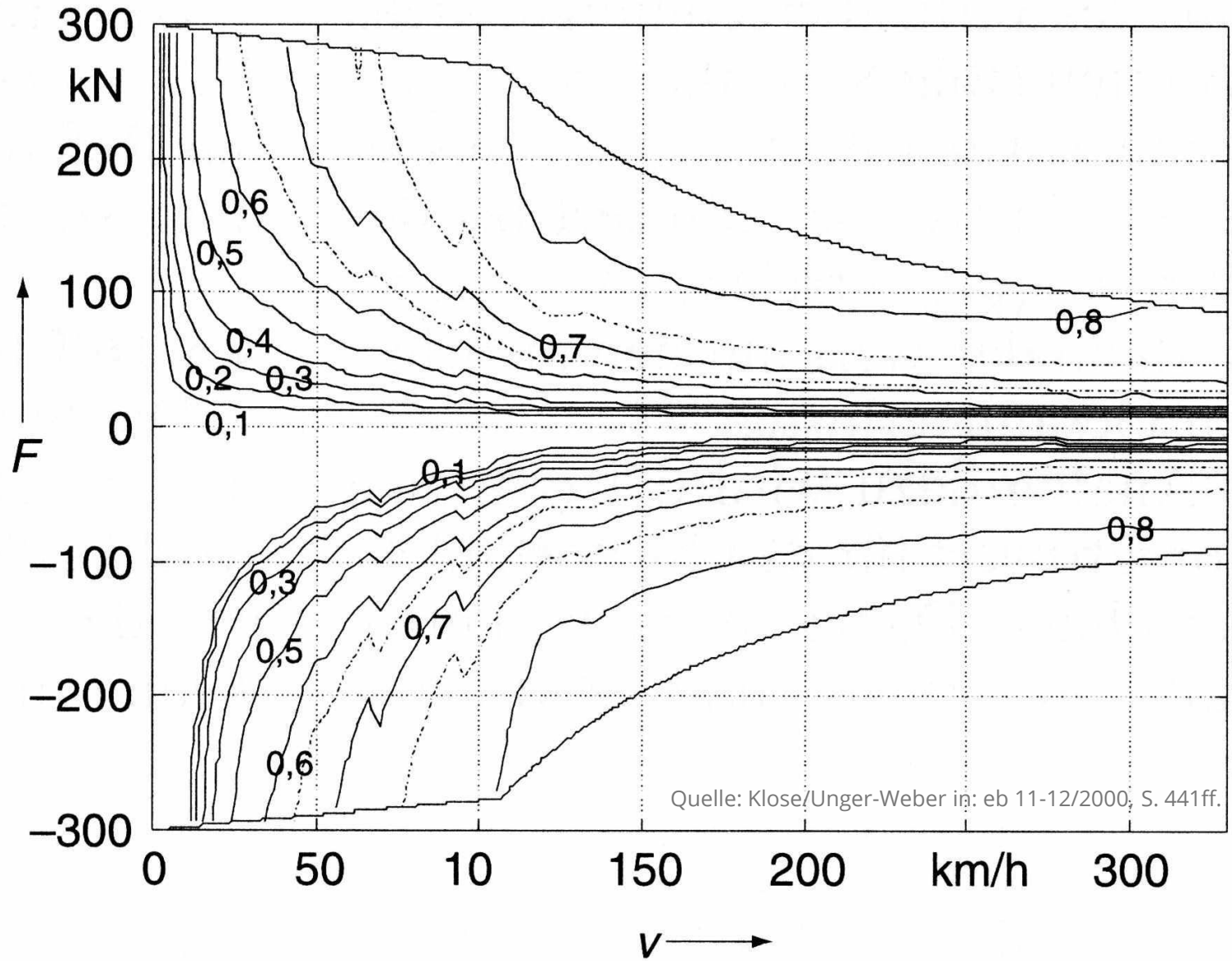
Getriebe  $\approx$  2 %

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**

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

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

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

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

Tfz-Wirkungsgrad: ca. 0,65

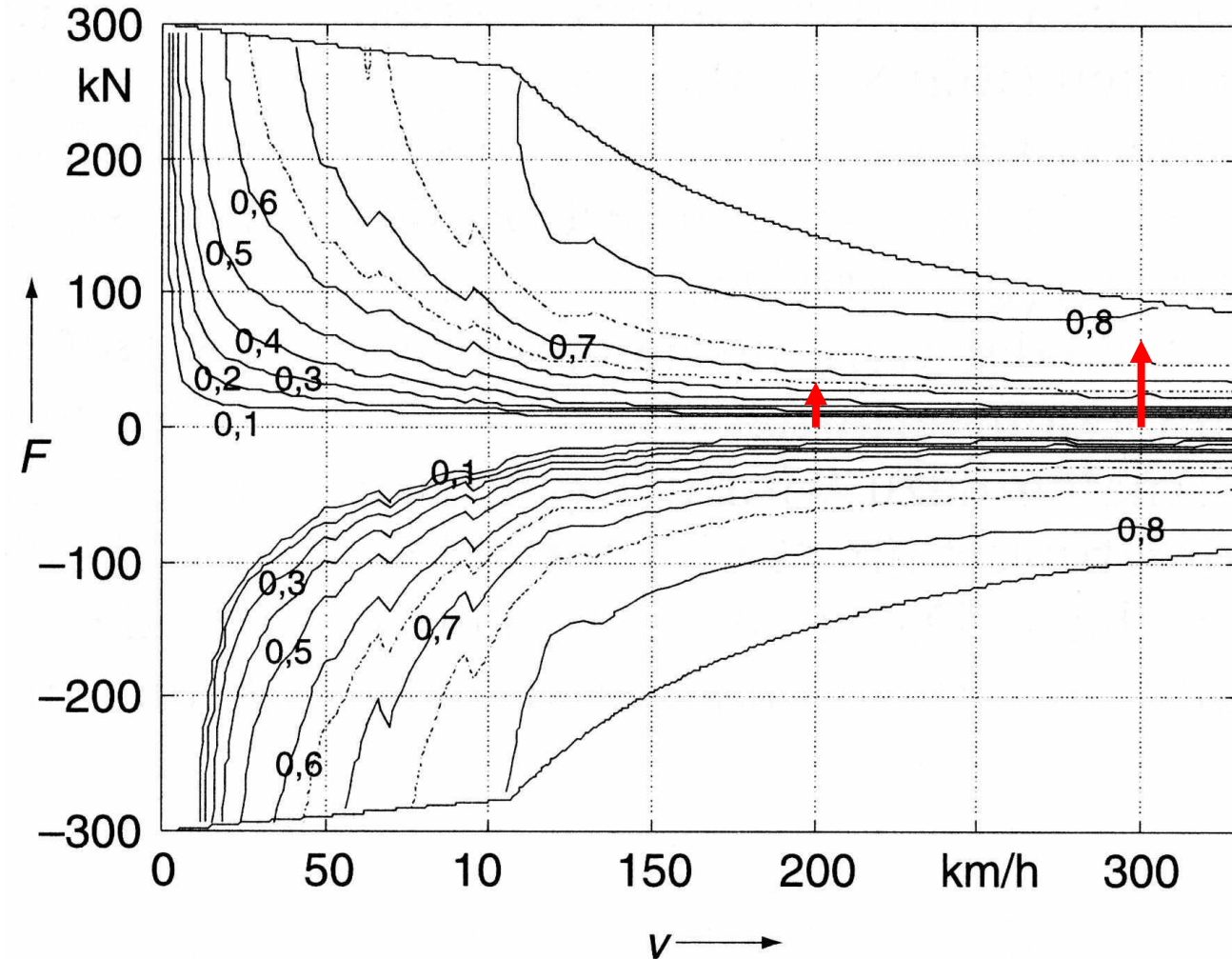
Energiebezug ab Oberleitung: 14,4 kWh/km

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

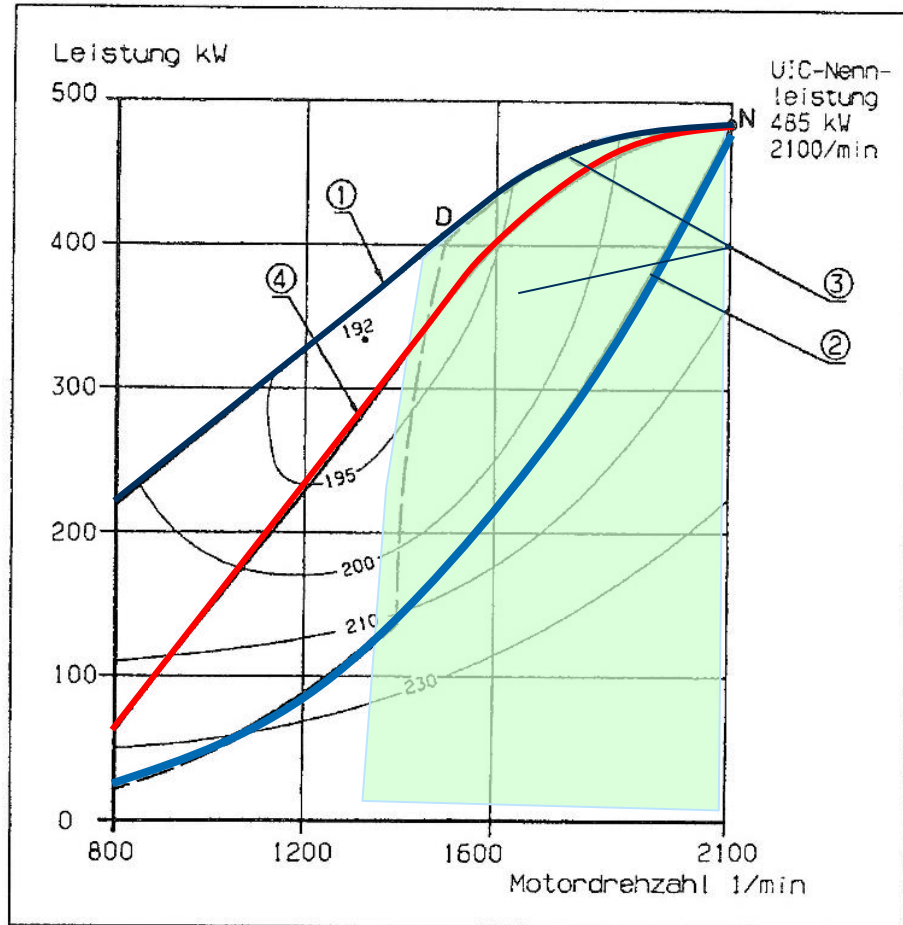
$$w_{T,s} = 18,1 \text{ kWh/km}$$

Tfz-Wirkungsgrad: ca. 0,77

Energiebezug ab Oberleitung: 23,6 kWh/km



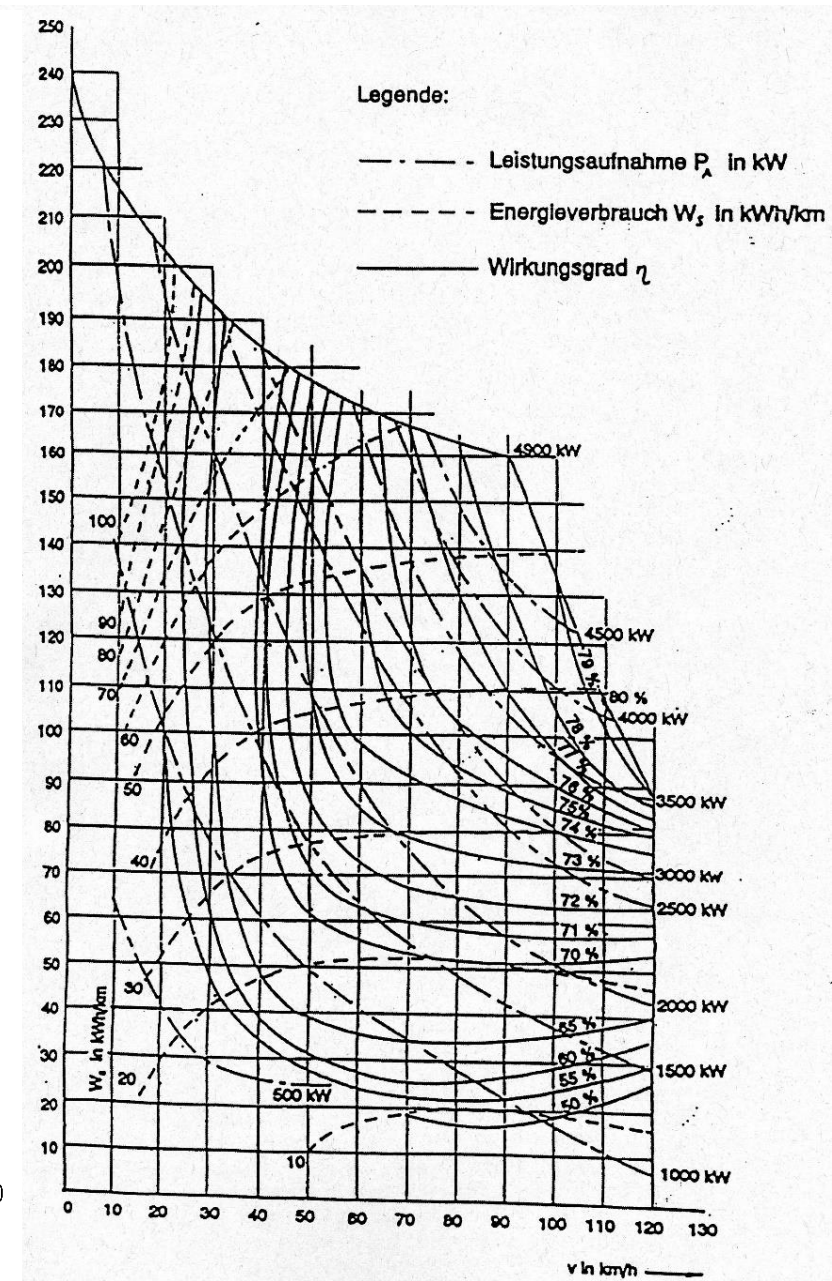
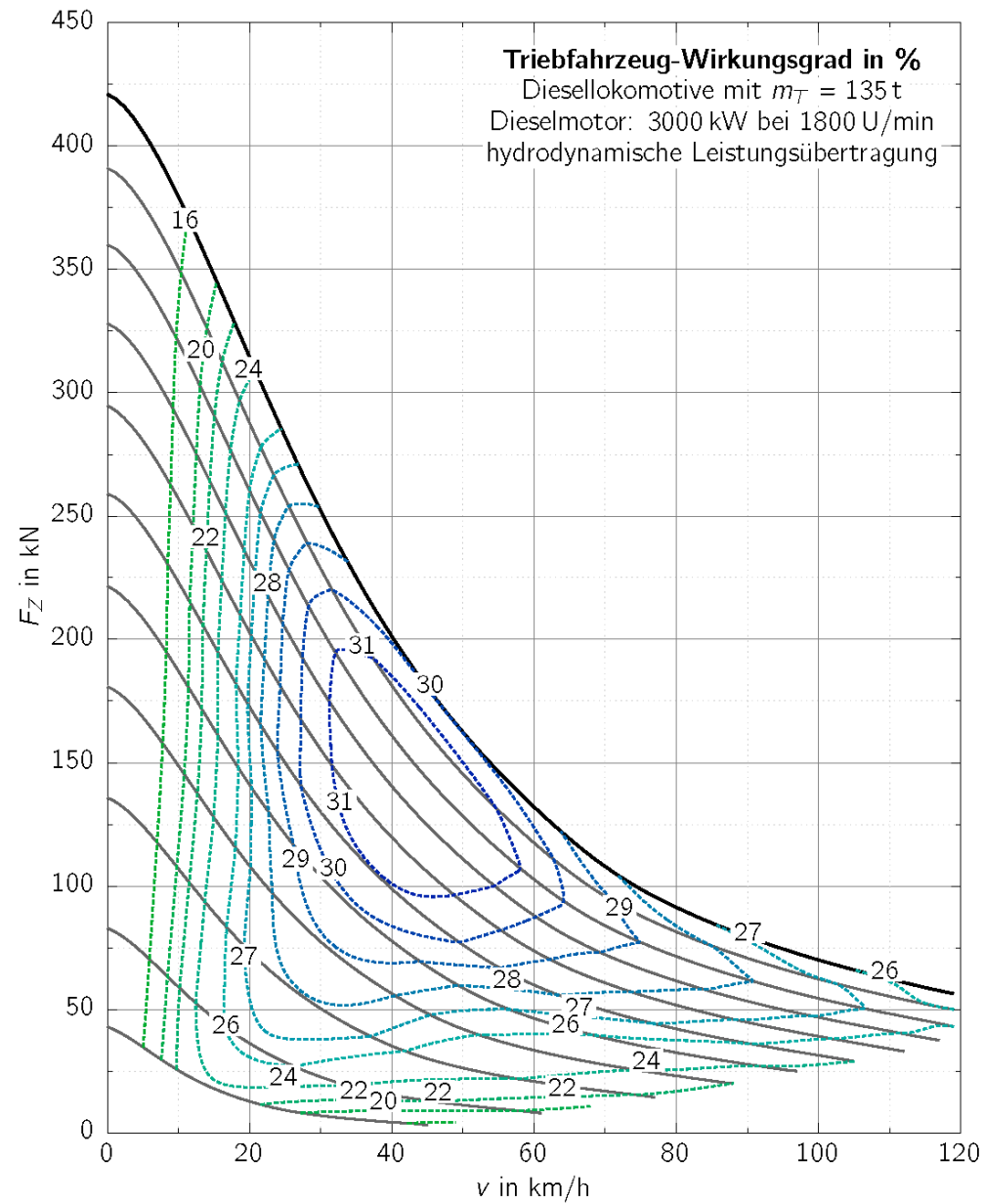
# Dieseltraktion: Bedeutung des Zusammenspiels von DM und Lü



- 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.

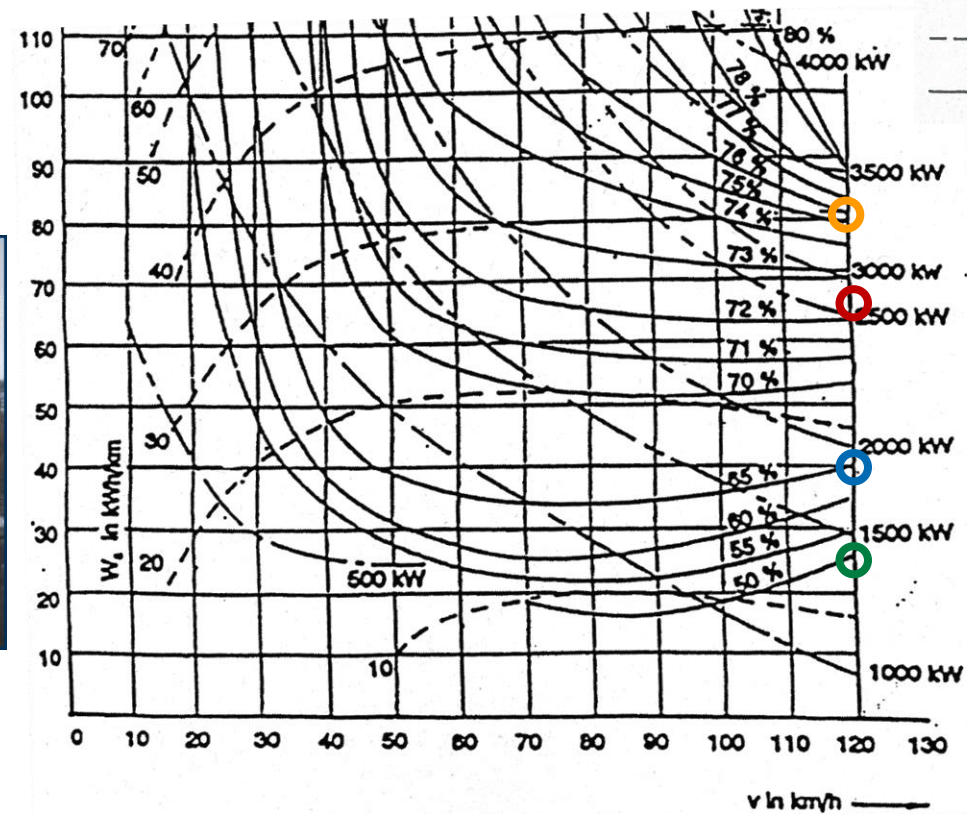
# Kennlinienfelder



# 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  $\eta$

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



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

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



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

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



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

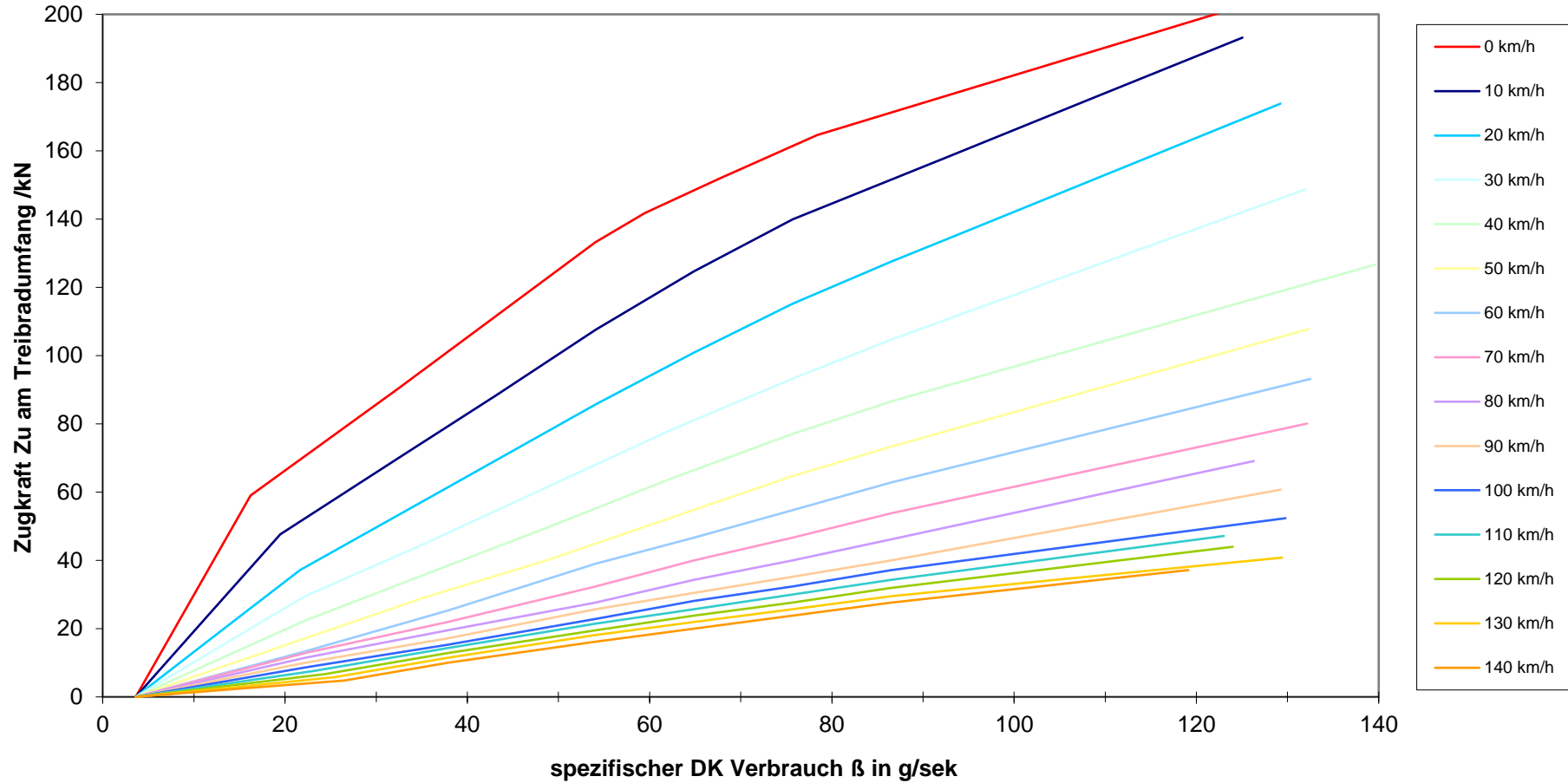
$i = 25 \text{ ‰} : F_{Z,erf} = 81,5 \text{ kN}$



$W_s = 29,7 \text{ kWh/km}$  (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  $v = 120 \text{ km/h}$

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

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

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

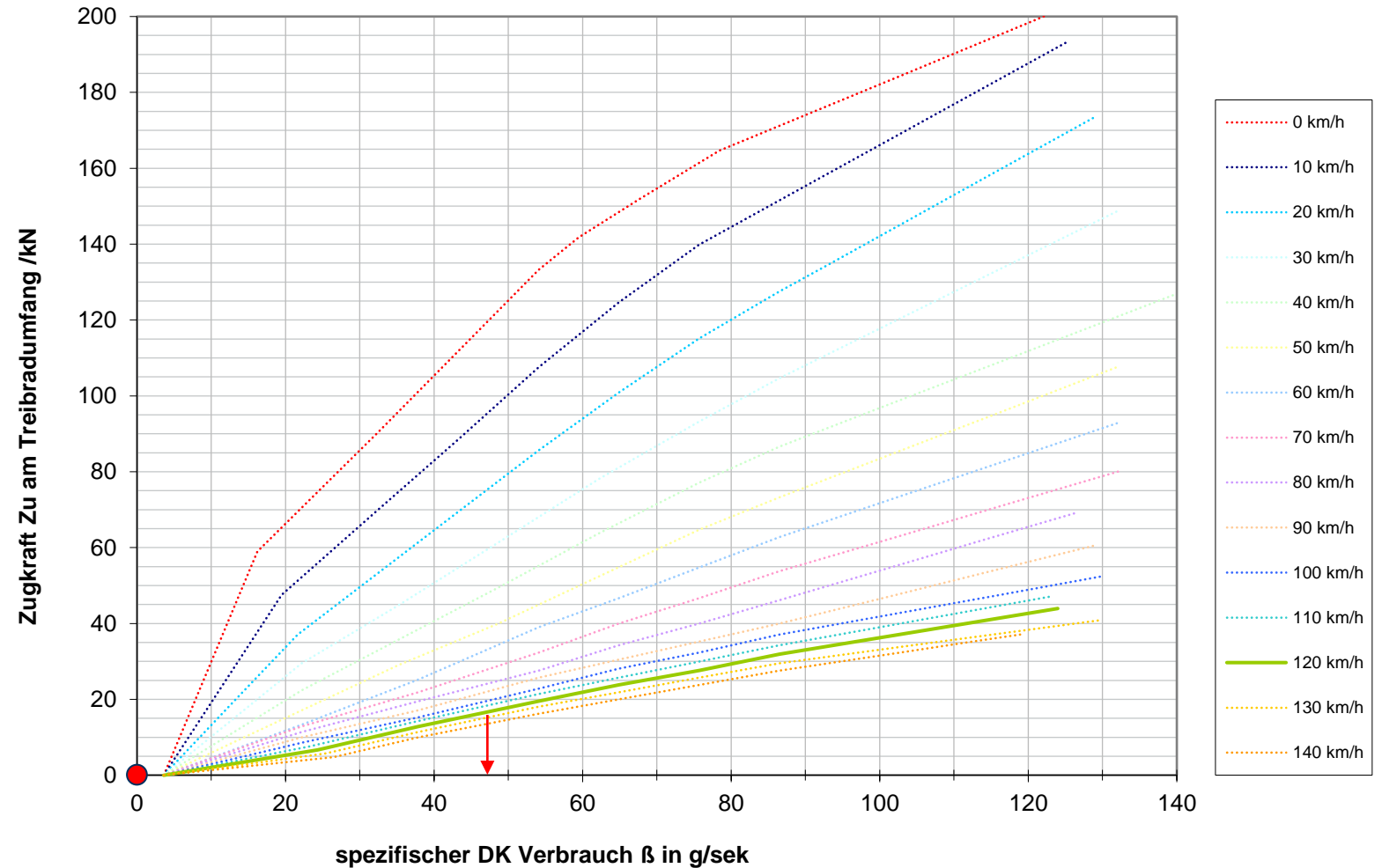
$$B_{DK} = 336 \text{ l/100 km}$$

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

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

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

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:

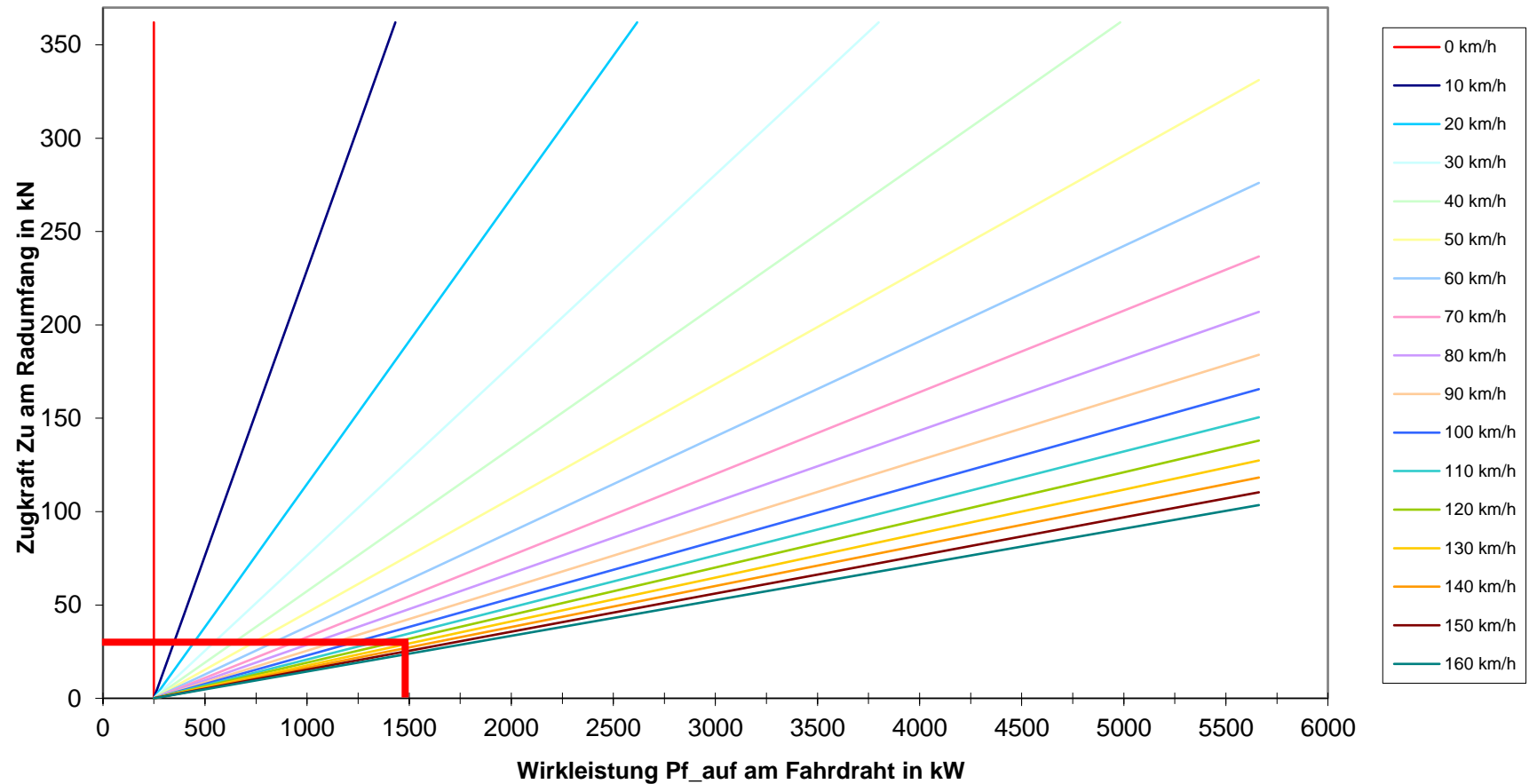
$$P = F \cdot v$$

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

## Wirkungsgrad:

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

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

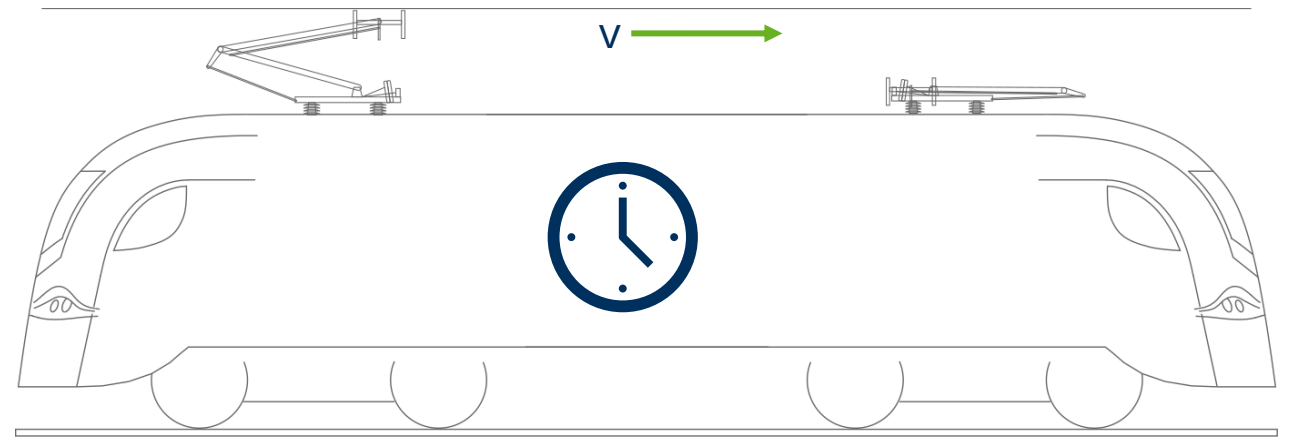


Quelle: DB Netz

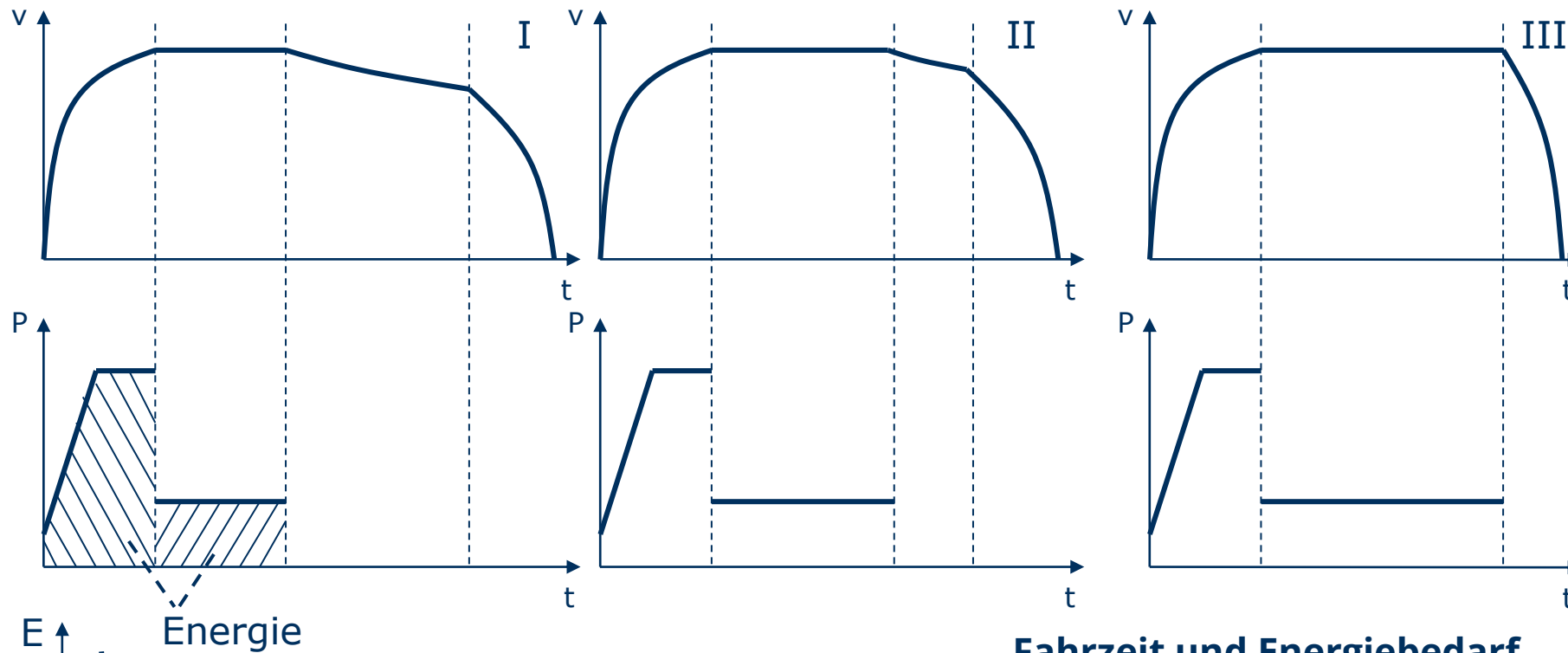
# Vorlesungsinhalte

Schwerpunkt Schienenverkehr

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



# Grundzüge des Energiesparenden Fahrens



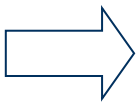
$$t_I > t_{II} > t_{III}$$

und

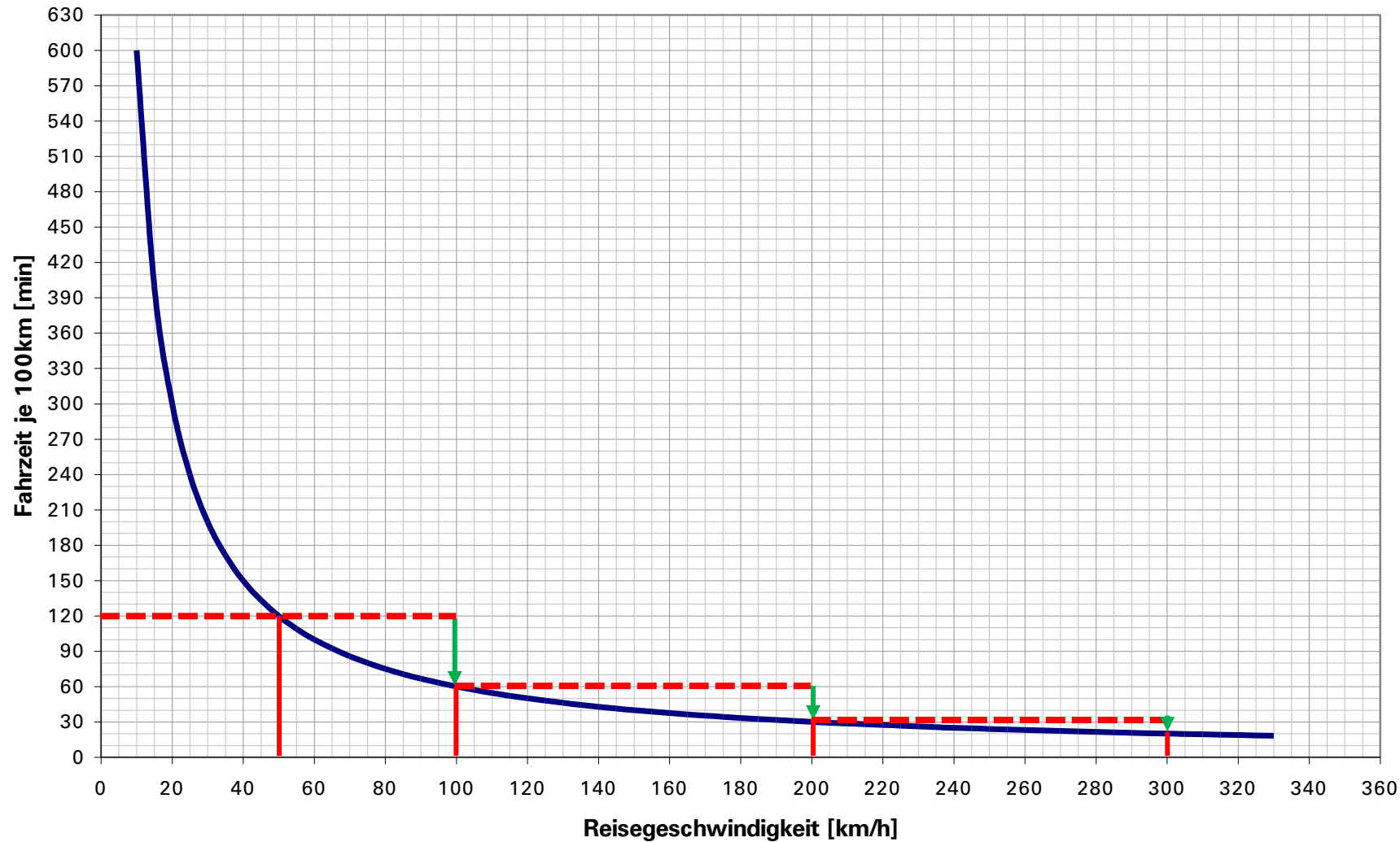
$$E_I < E_{II} < E_{III}$$

## 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

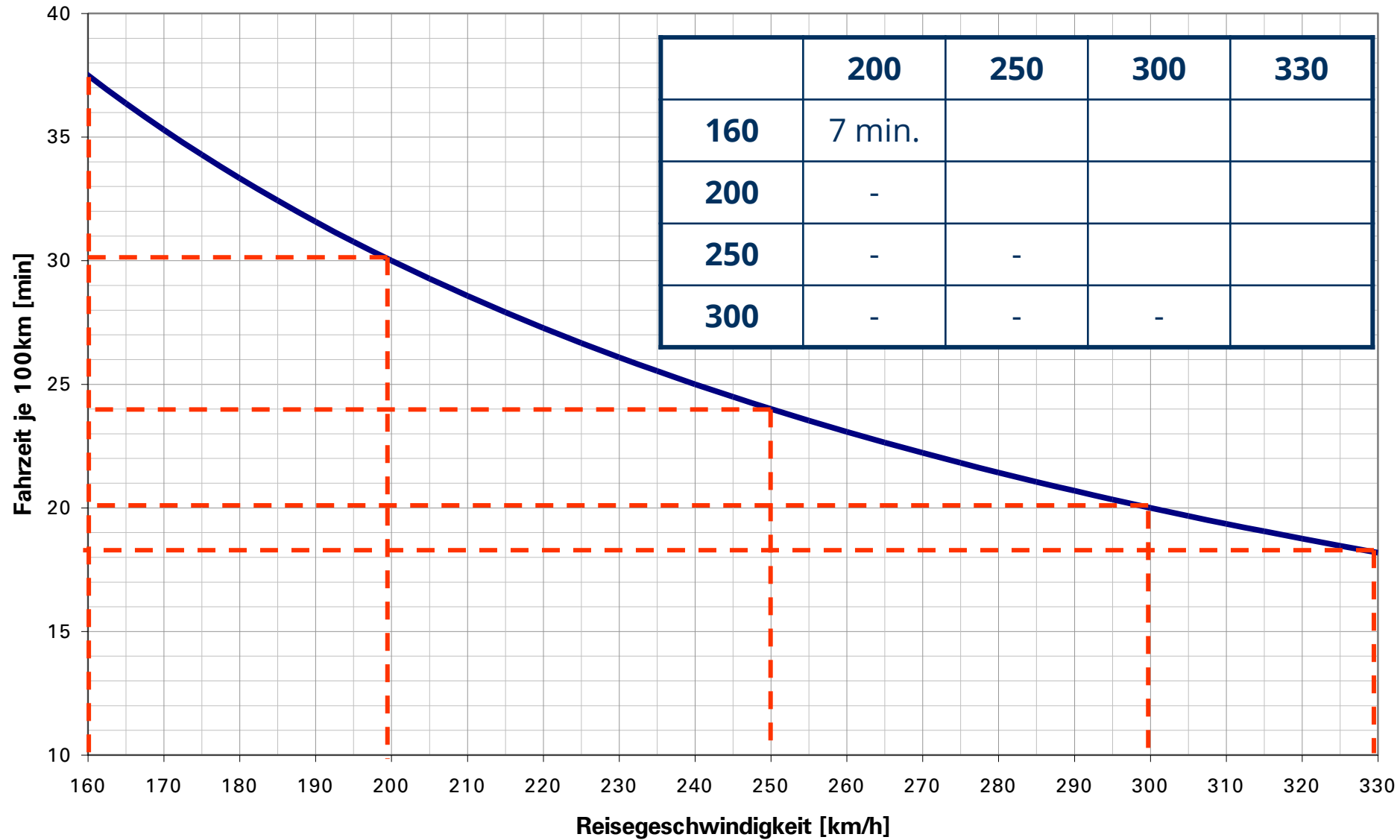
-30 Min

200 km/h:  
30 min/100 km

-10 Min

300 km/h:  
20 min/100 km

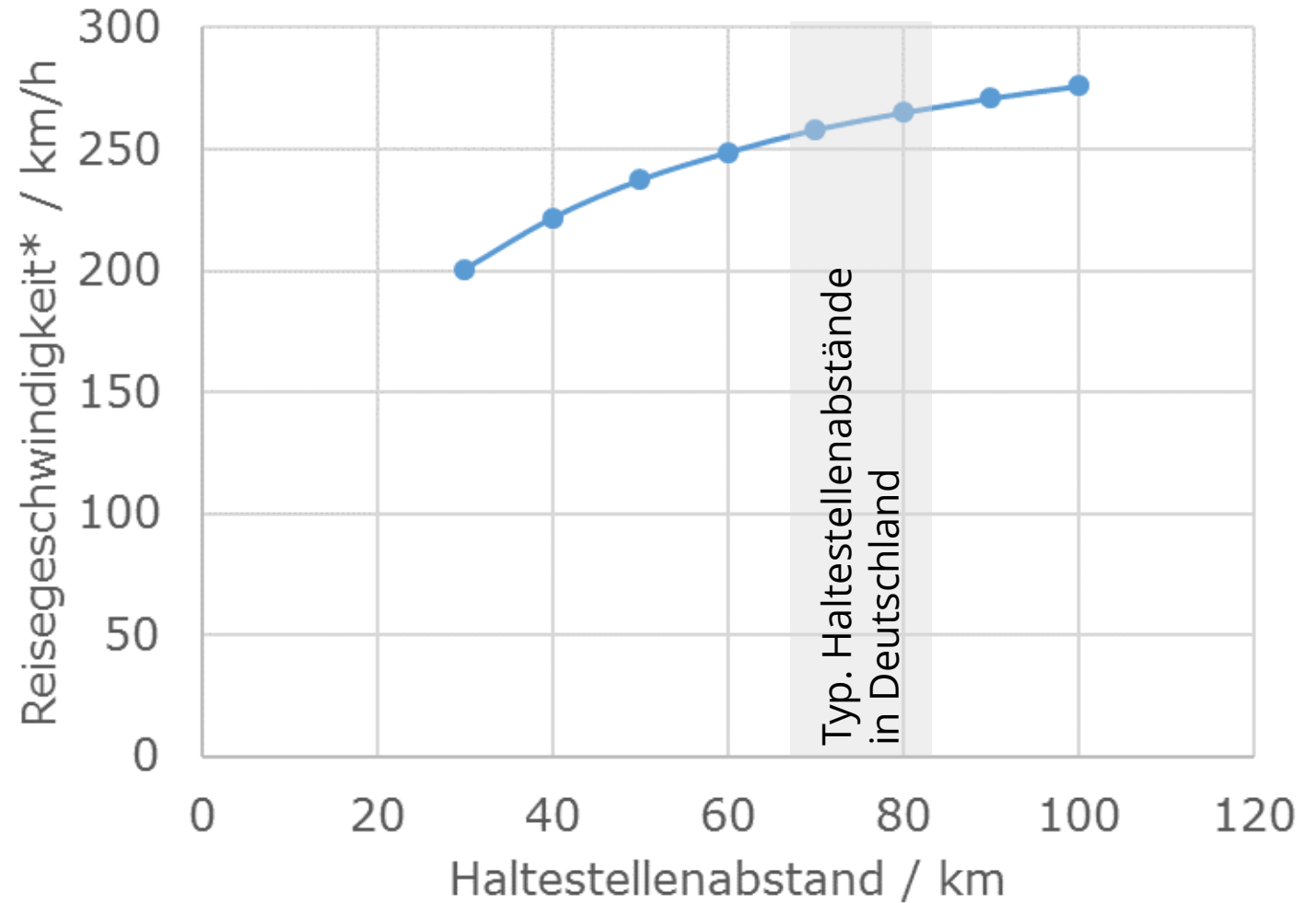
# Reisegeschwindigkeit und Reisezeit II



# 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 %)

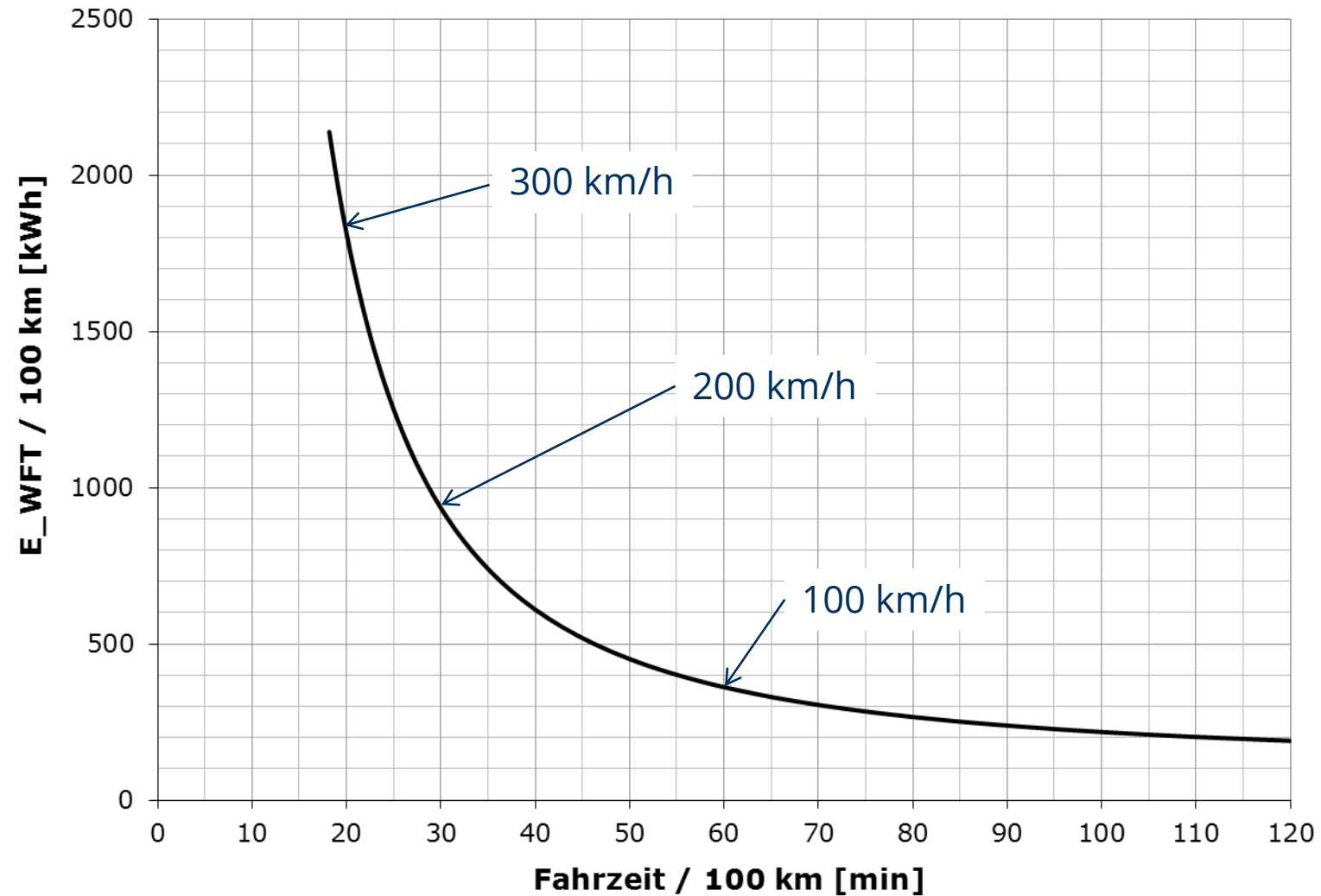
200 km/h:

30 min/100 km  
930 kWh/100 km

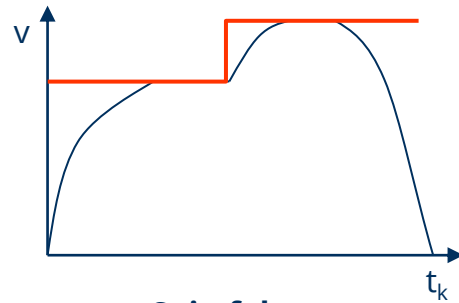
-10 min (67%)  
+910 kWh (198 %)

300 km/h:

20 min/100 km  
1840 kWh/100 km

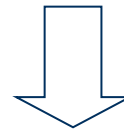


# Fahrplankonstruktion (Prinzip)



**Spitzfahrt -**  
Vorausberechnung der  
kürzesten Fahrzeit

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



Fahrzeitreserve

Anwendung der  
Energiesparenden  
Fahrweise

kurzfristige Langsamfahrstellen  
verlängerter Fahrgastwechsel  
außerplanmäßige Halte  
Zwangsbremnungen

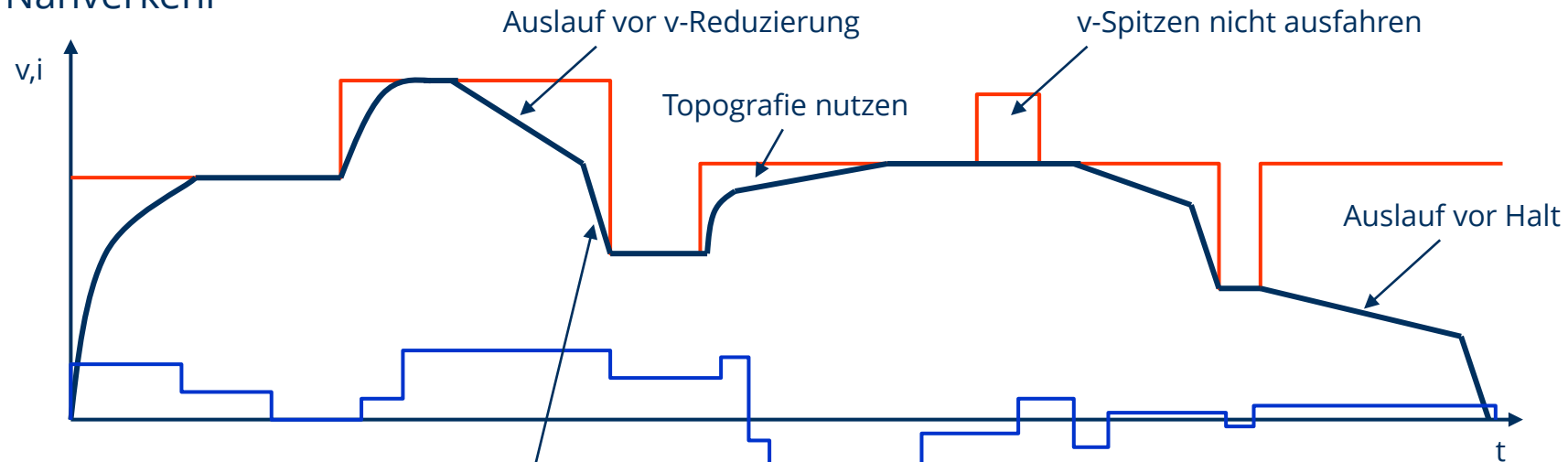
Traktionsenergie sparen



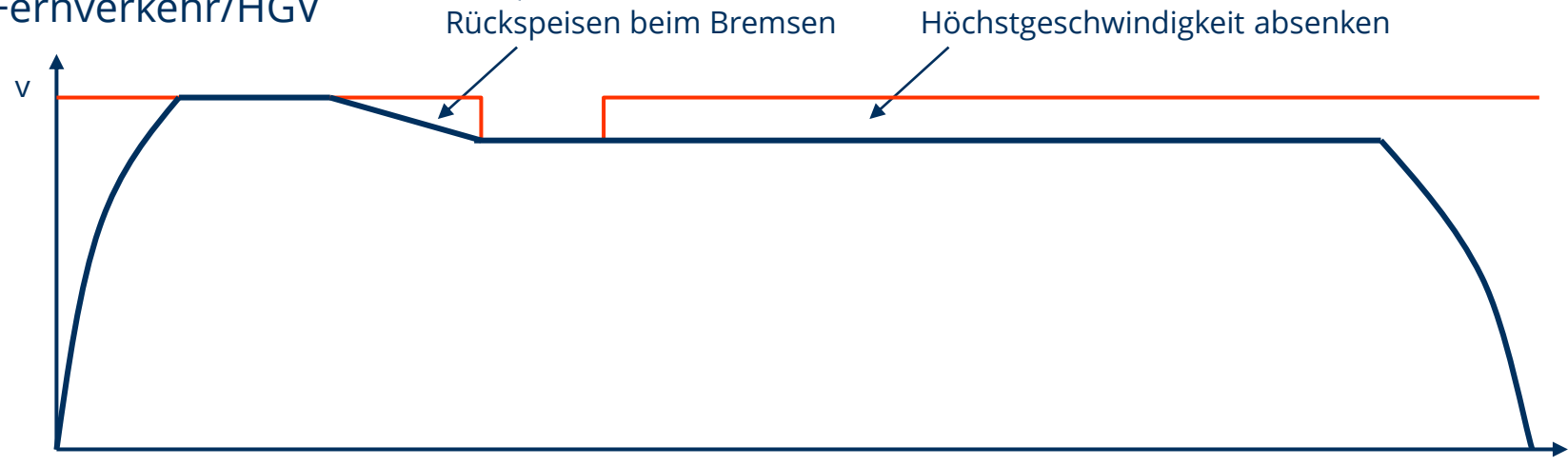
Fahrplan einhalten

# Energiesparendes Fahren – betriebliche Eingriffsmöglichkeiten

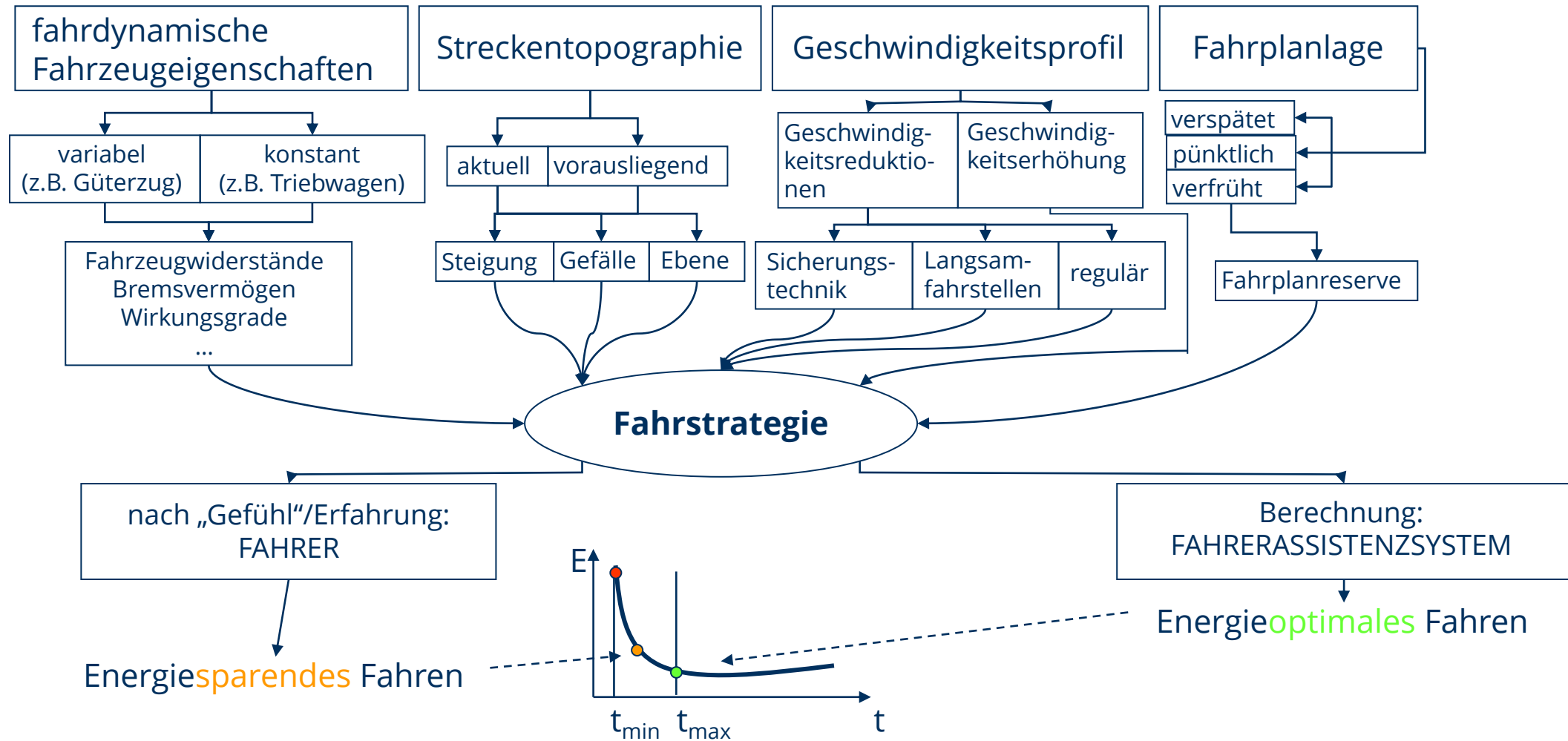
Nahverkehr



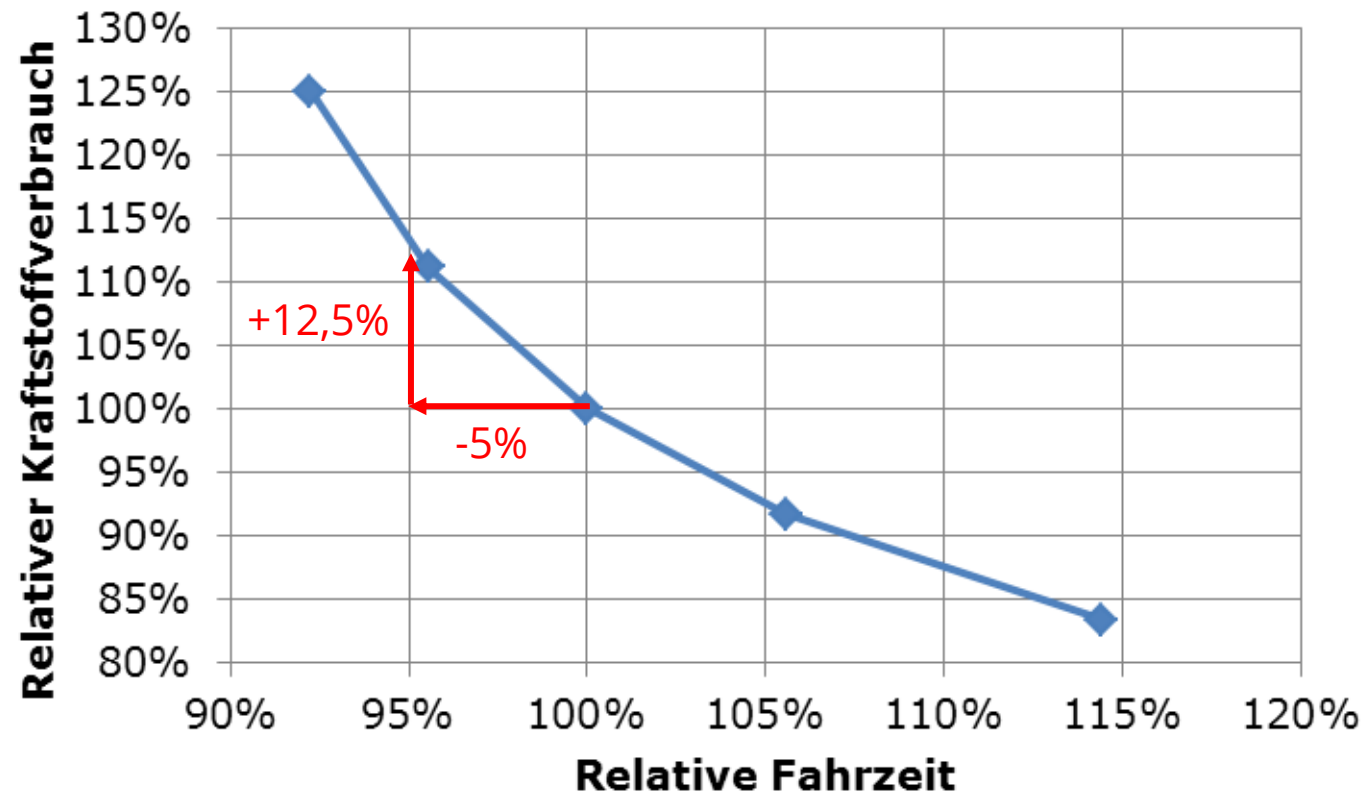
Fernverkehr/HGV



# Energiesparendes Fahren – Fahrstrategie und Einflussfaktoren



# Energiesparendes Fahren - Praxisbeispiel 1



Messungen der Deutschen Reichsbahn (DDR, 1983):

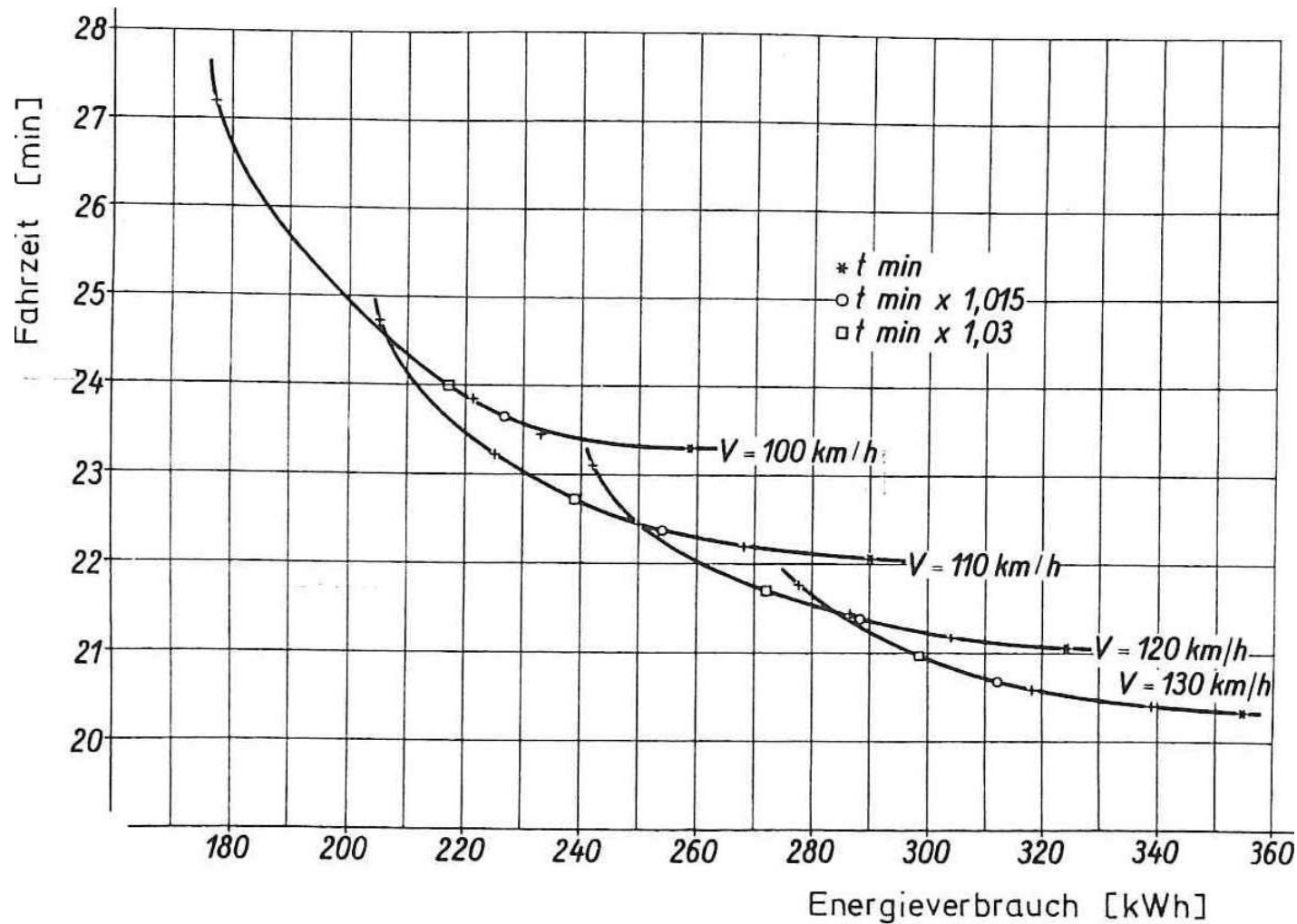
- dieselhydraulische Lokomotive (BR 118)
- Vorortverkehr

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

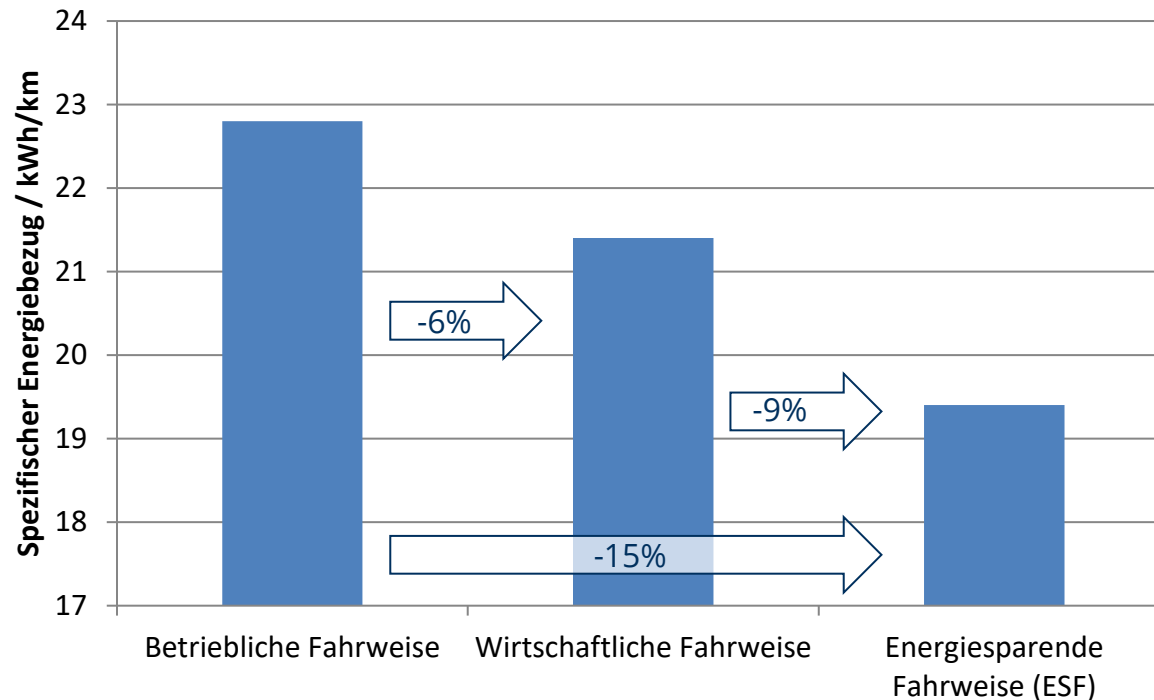
## Empirische Analyse gemessener Energiebezüge der ICE 1 – Flotte der DB

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	
60	345,2	600 A	
		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

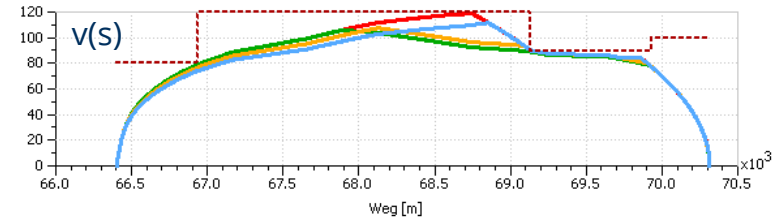
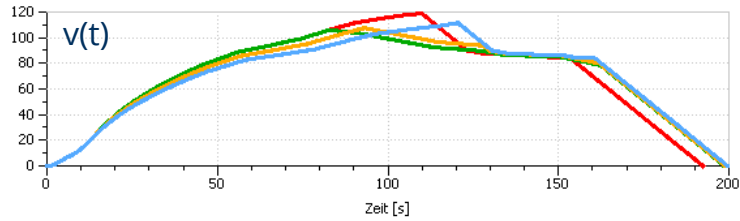
Zug FSD LaD LaT LW GW Zeit G

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

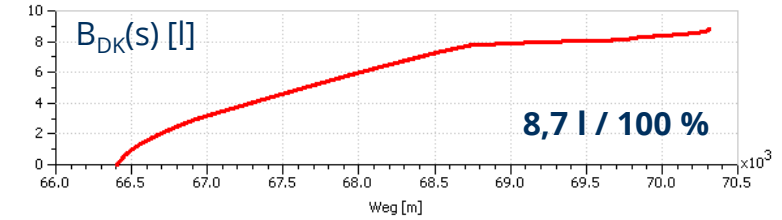
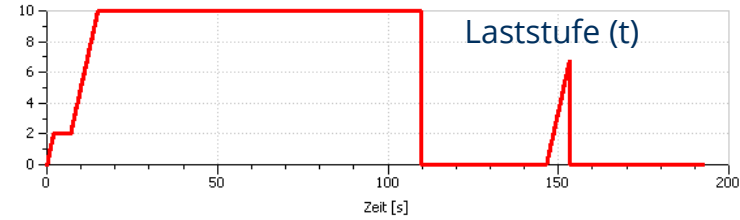
# Energiesparendes Fahren – Praxisbeispiel 4



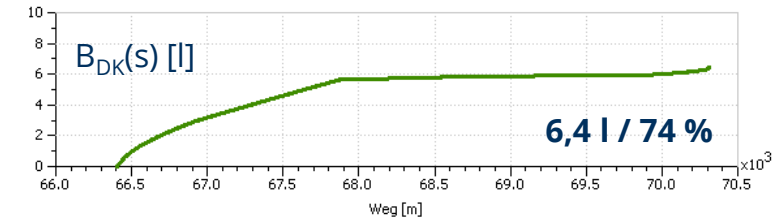
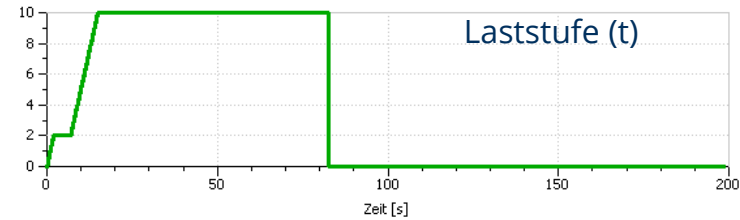
BR 612



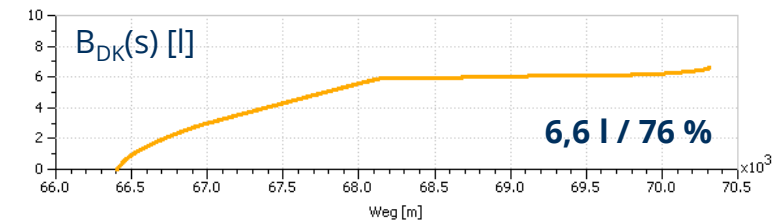
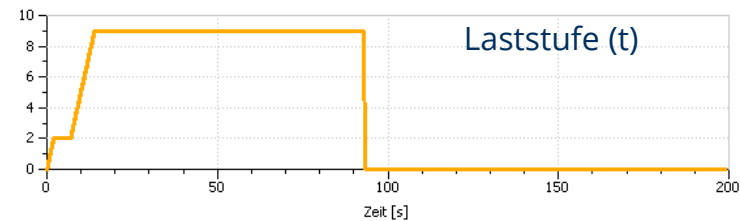
Vergleich der simulierten Fahrspiele



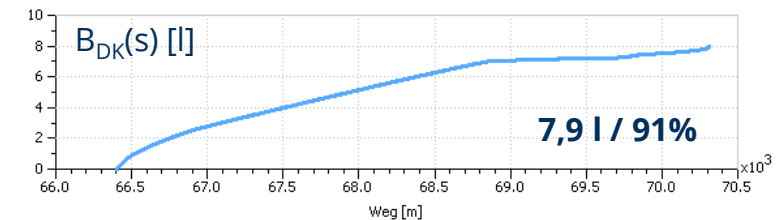
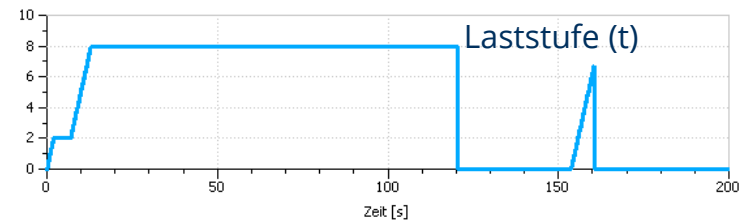
Strategie 1:  
Spitzfahrt



Strategie 2:  
Energiesparend mit maximaler Traktionsleistung



Strategie 3:  
Energiesparend mit 90% Traktionsleistung



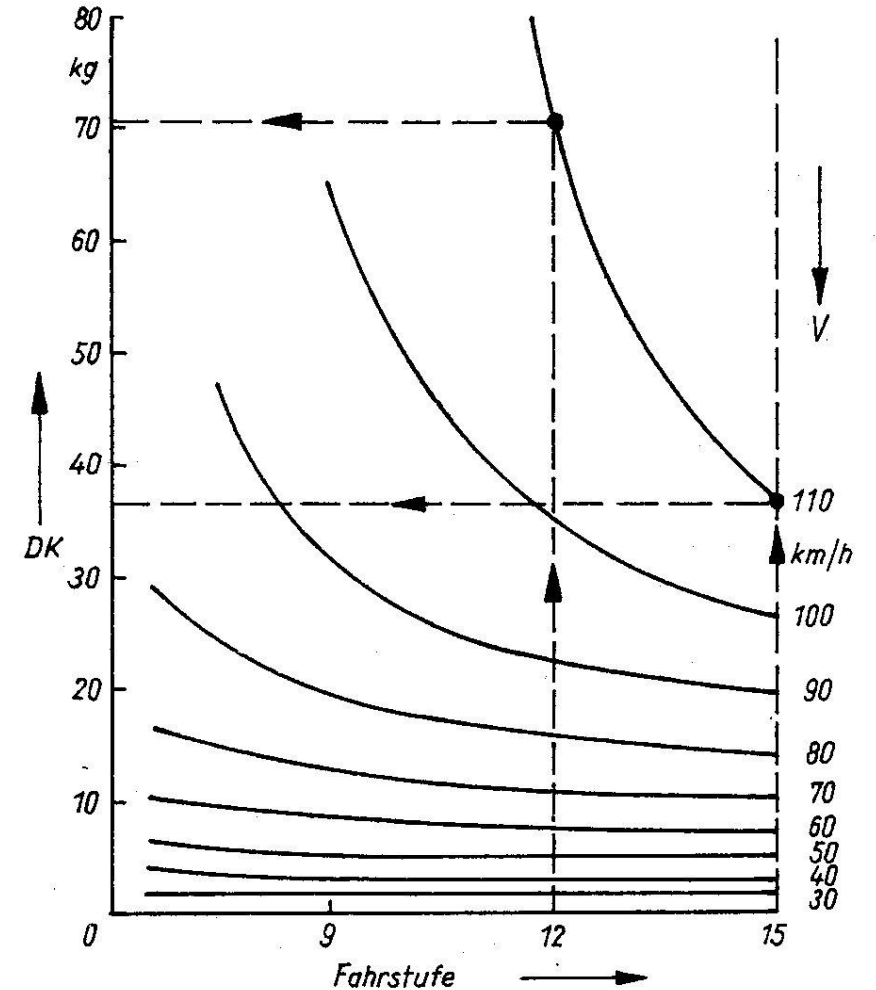
Strategie 4:  
Energiesparend mit 80% Traktionsleistung

# Energiesparendes Fahren – Praxisbeispiel 5



## Beispiel BR 232

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



**Bild 1** DK-Verbrauch für die Beschleunigungsphase (Anfahren) 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

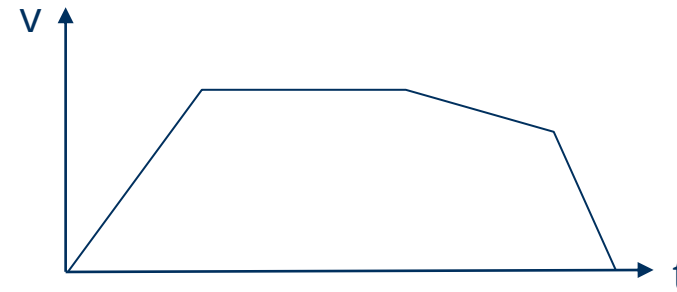
**Integration der Bewegungsgleichung:**

$$a = f(v)$$

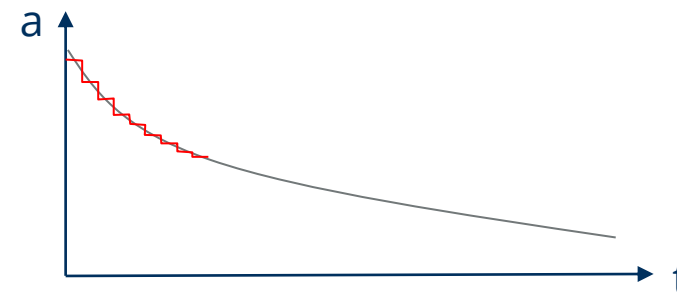
$$t = \int \frac{1}{a(v)} dv$$

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

Lösungsansatz 1: Linearisierung



Lösungsansatz 2: Diskretisierung

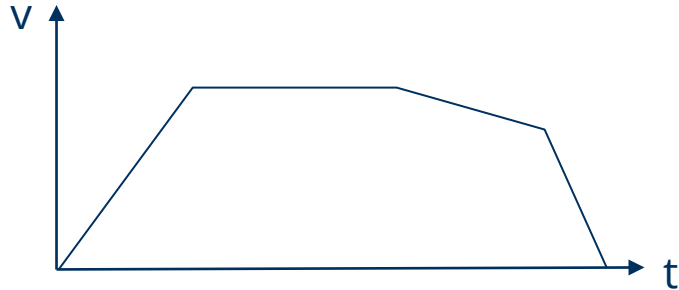


Lösungsansatz 3: Integrationsverfahren



# Fahrzeitermittlung

## Lösungsansatz 1: Linearisierung



**Grundidee: Rechnen mit konstanten, mittleren Beschleunigungen/Verzögerungen**

### Vorteile

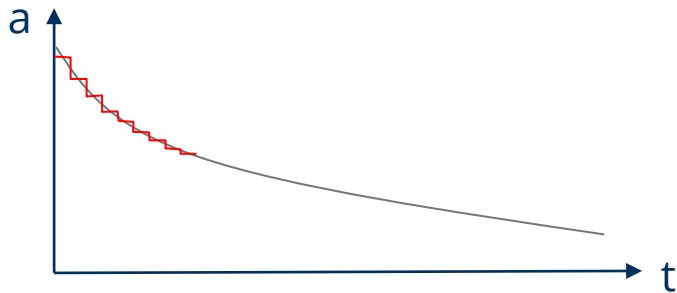
- + Reduktion auf einfache mathematische Zusammenhänge
- + „Handrechnung“ möglich

### 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**

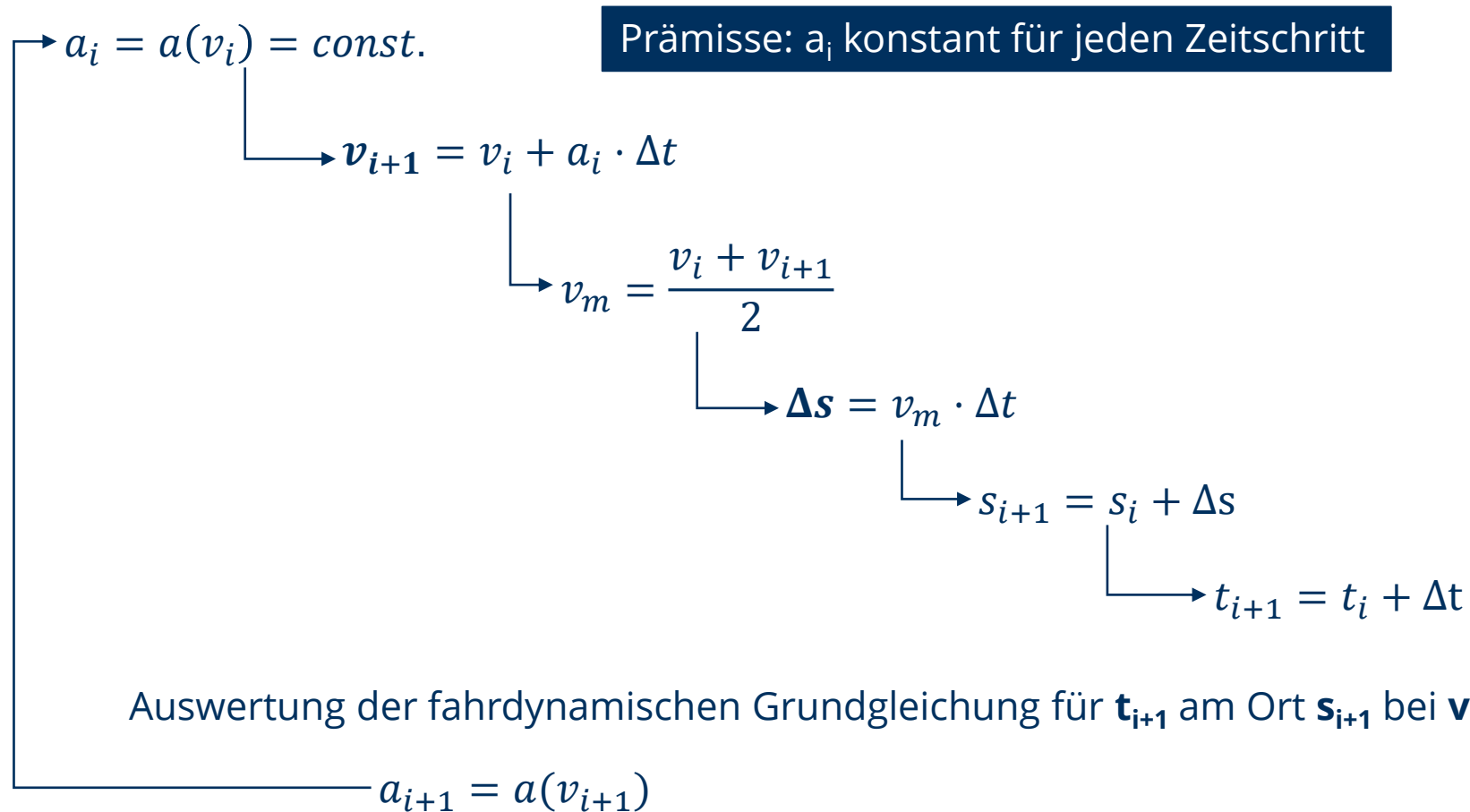
- + Reduktion auf einfache mathematische Zusammenhänge
- + Berechnung mit MS-Excel möglich
- + hinreichend genau bei sinnvoll gewählten Intervallen
- + detaillierte Darstellung des Fahrtverlaufes möglich

**Nachteile**

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

# Zeitschrittverfahren

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



# Fahrzeitermittlung

## Lösungsansatz 3: Integrationsverfahren



- Nutzung von Integraltabellen
- Nutzung numerischer Integratoren

### Grundidee:

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

### Vorteile

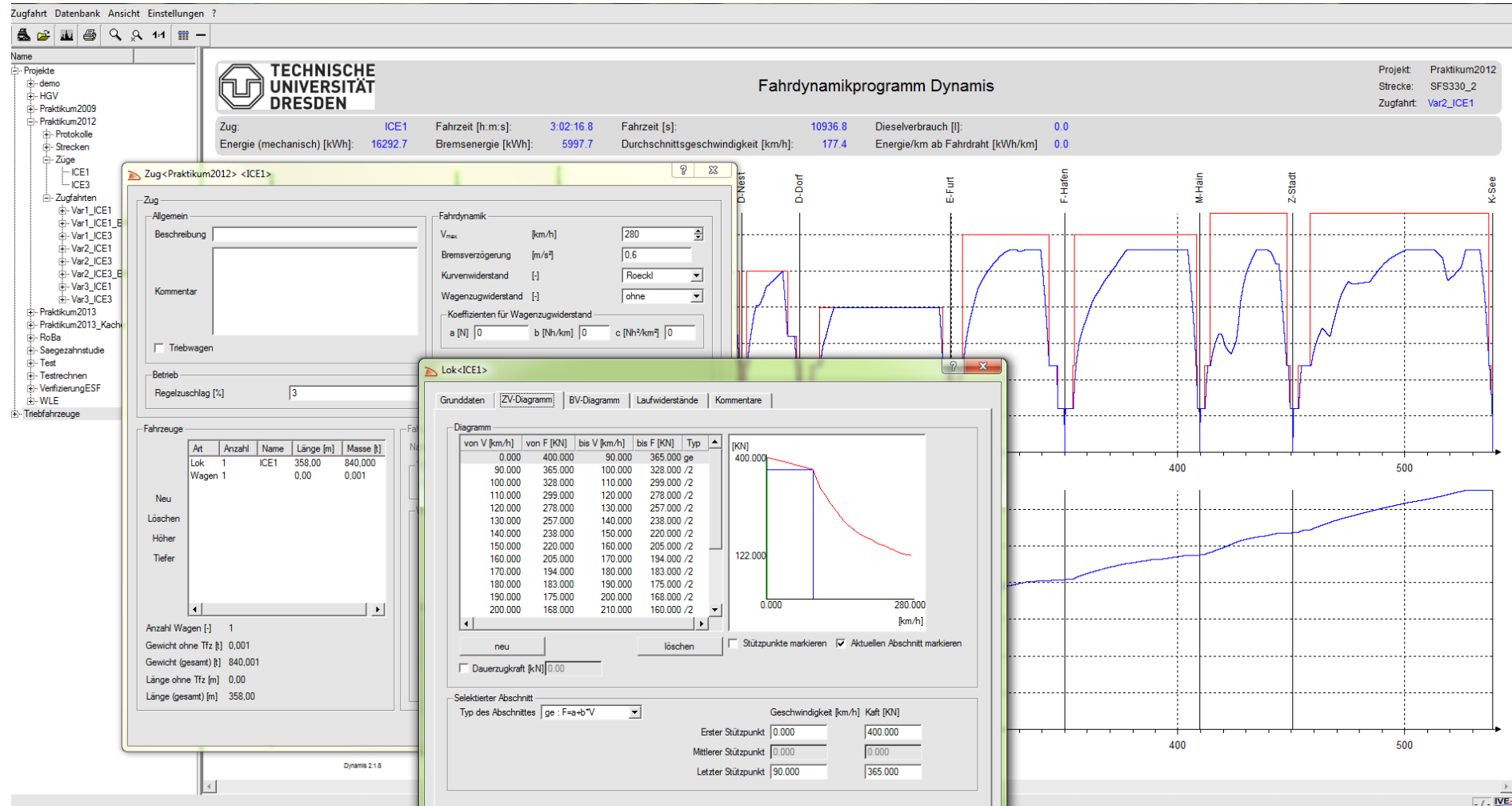
- + sehr hohe Genauigkeit möglich
- + detaillierte Darstellung des Fahrtverlaufes möglich (nicht bei allen Verfahren)

### 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“

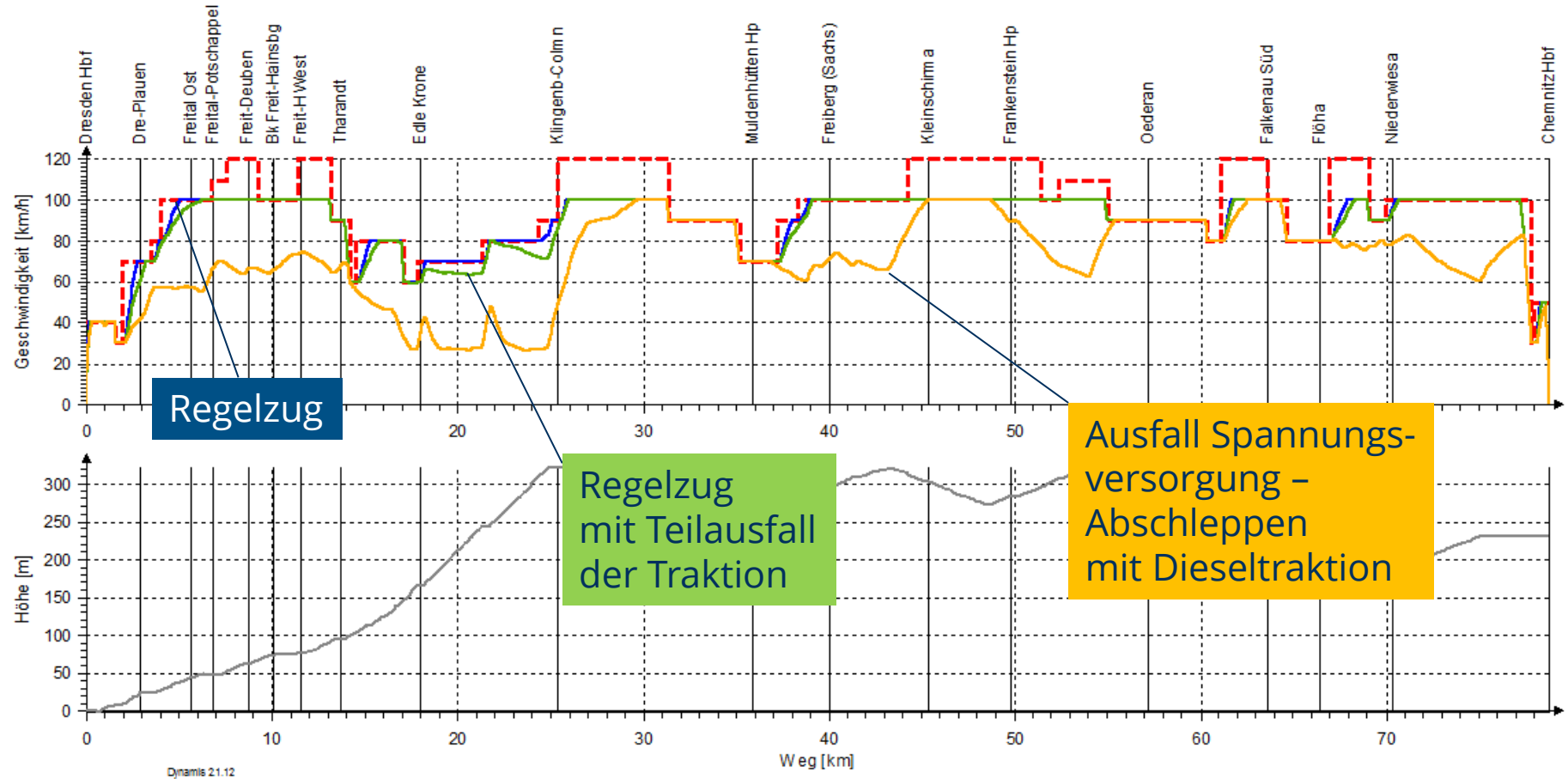


## Fahrdynamikprogramm Dynamis

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 Fahrdrakt [kWh/km]	0.0	0.0	0.0

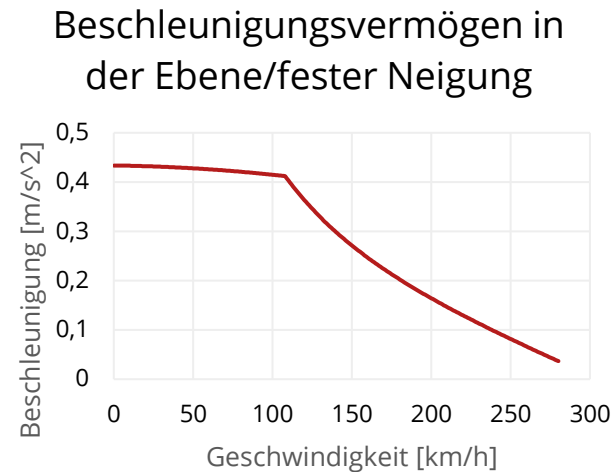
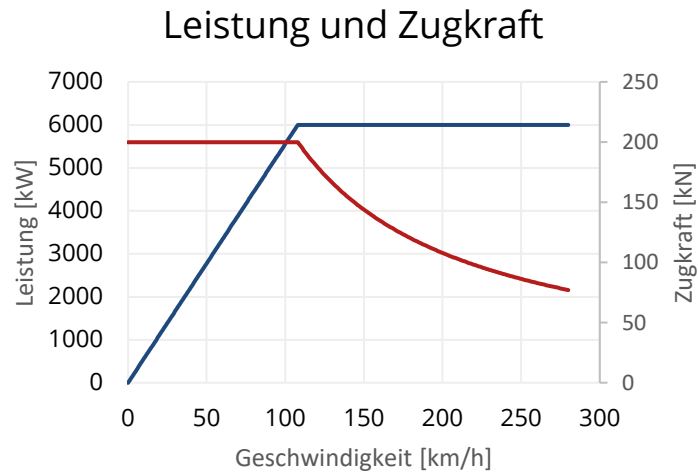


# Objektorientierte Längsdynamikberechnung mit Python

## Beispiel

### Ansatz

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

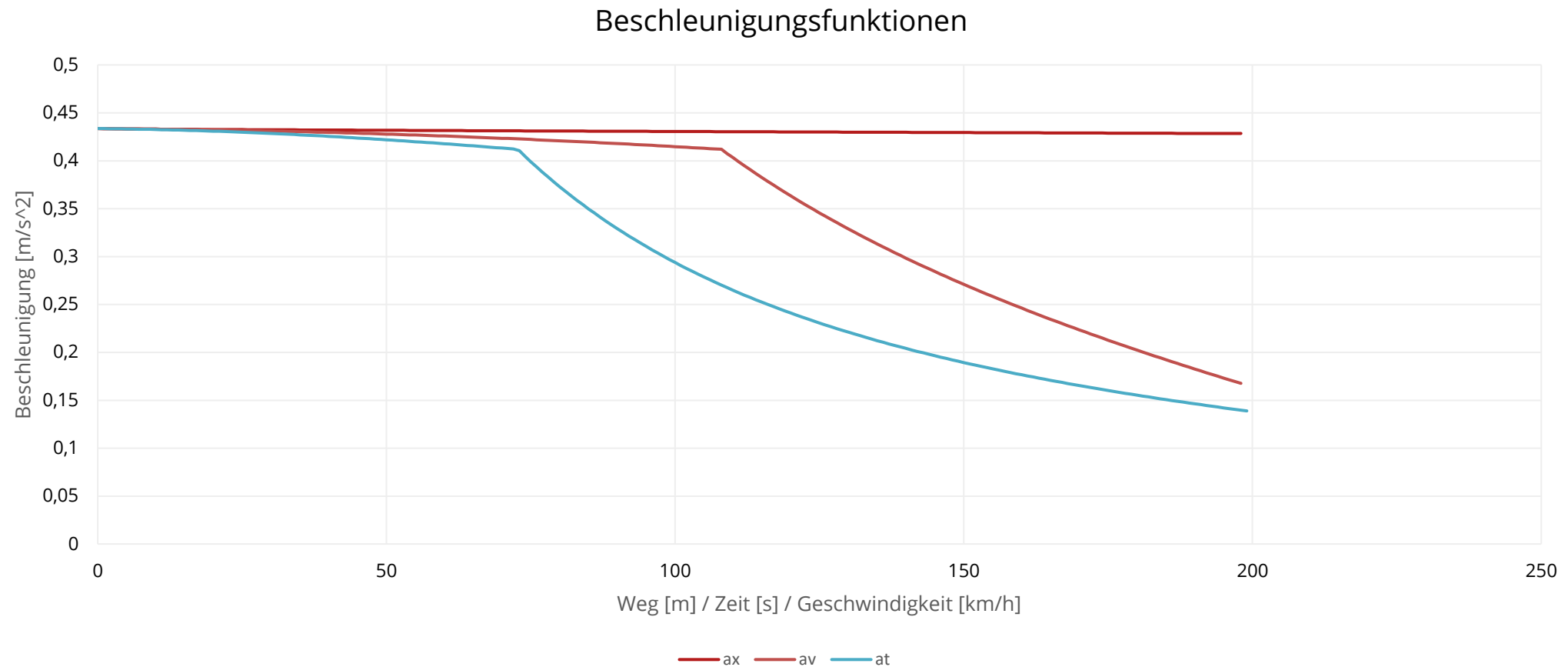


```
1 from enum import Enum
2 from .enumerations import *
3
4 class c_vp_tractionForce( object ):
5     yName = "Zugkraft"
6     xName = "Geschwindigkeit"
7     yUnit = "kN"
8     xUnit = "km/h"
9     color = "black"
10    style = e_pltLineStyle.solidLine.value
11
12 class c_vp_vehicleResistance( object ):
13    yName = "Fahrzeugwiderstand"
14    xName = "Geschwindigkeit"
15    yUnit = "kN"
16    xUnit = "km/h"
17    color = "blue"
18    style = e_pltLineStyle.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.FRICITION_MASS_REL in self.tractionData:
186         #Relative Reibmasse angegeben
187         m = self.tractionData[ aux.e_tractionForceCalcConst.FRICITION_MASS_REL ] * self.veh
188
189     if aux.e_tractionForceCalcConst.FRICITION_MASS_ABS in self.tractionData:
190         #Absolute Reibmasse
191         m = self.tractionData[ aux.e_tractionForceCalcConst.FRICITION_MASS_ABS ]
192
193     #Konstanten, mu Geschwindigkeitsabh. möglich
194     g = aux.constants.C_GRAVITY
195     mu = self.tractionData[ aux.e_tractionForceCalcConst.FRICITION_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
```

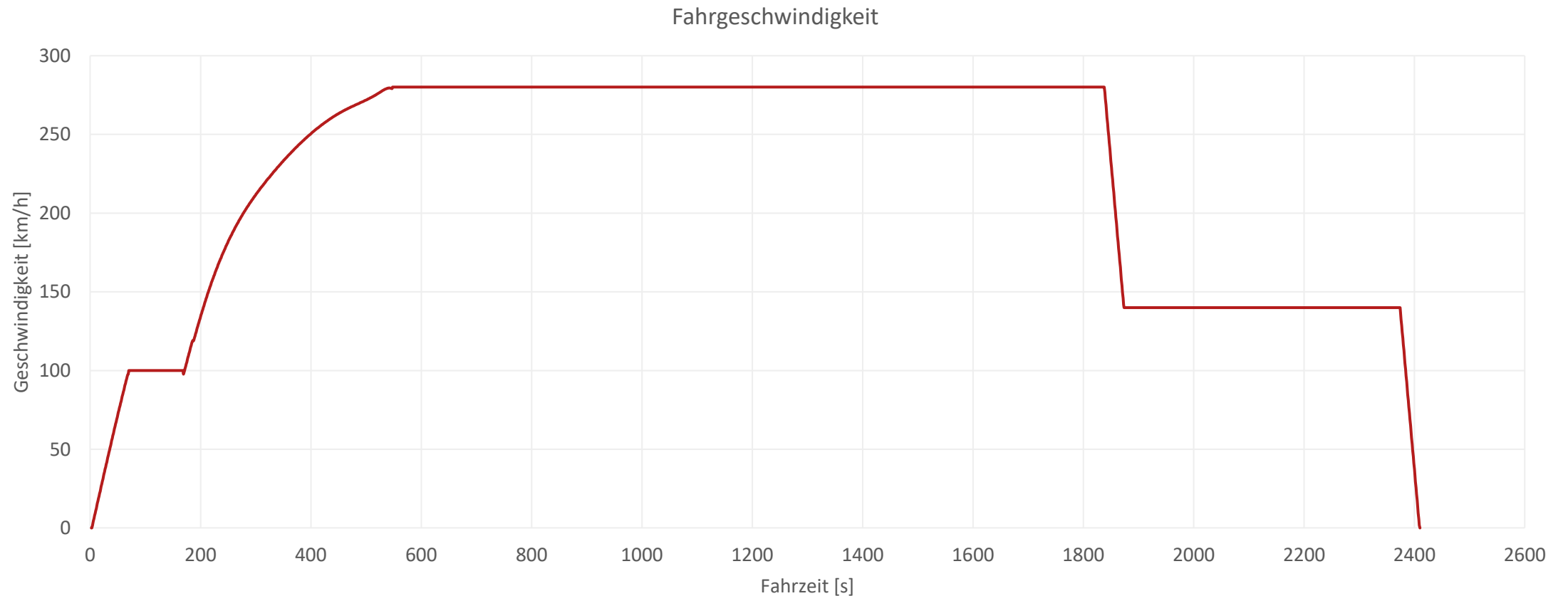
# Objektorientierte Längsdynamikberechnung mit Python

## 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