

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
Professur für Elektrische Bahnen

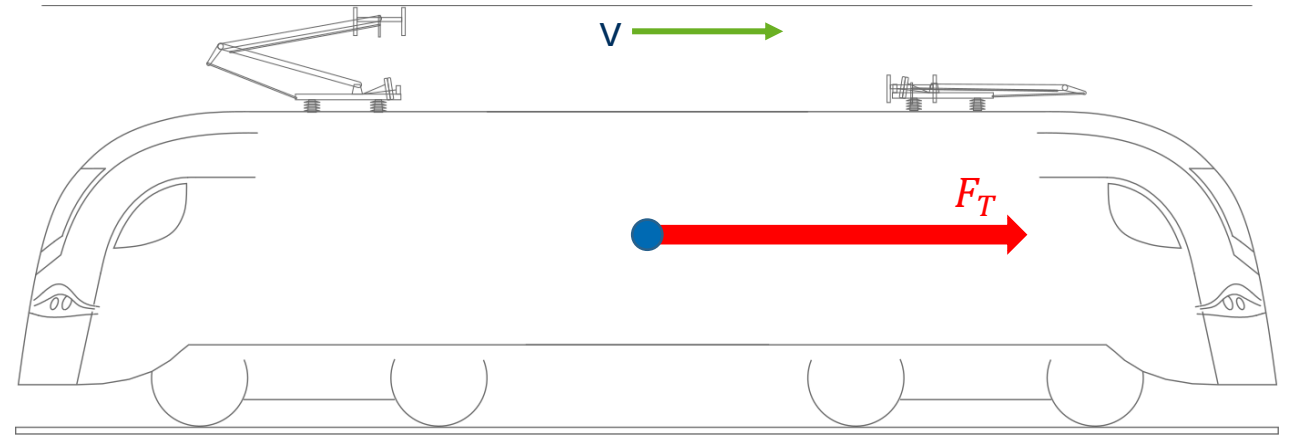
Fahrdynamik für Verkehrsingenieure

VL 06: Energiebedarf

Sommersemester 2022

Vorlesungsinhalte (Schwerpunkt: Schienenverkehr)

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



Energiebedarf

Berechnungsgang für Energiebedarfsermittlung:

Ausgangspunkt: Bilanzierung am Treibradumfang

$$F_T = F_{T,max} \quad \text{Beschleunigungsvorgänge}$$

$$F_T = \sum F_W \quad \text{Beharrungsfahrt}$$

$$W_T = \int P_T dt = \int (F_T v) dt \quad \text{allg. Fall}$$

$$W_T = \int F_T ds \quad \text{bes. bei Beharrung geeignet}$$

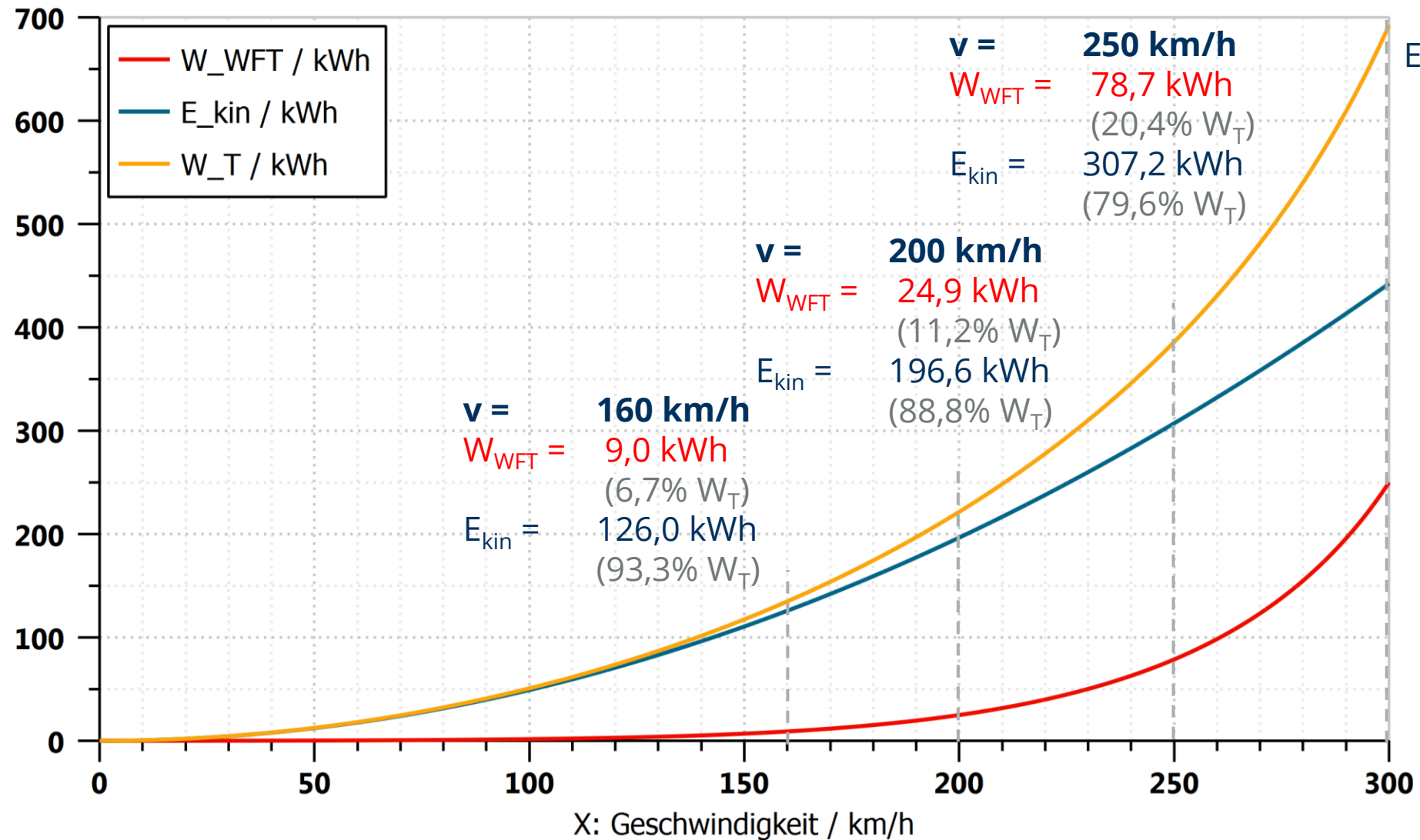
Ermittlung des Energiebezuges (aus Tank, ab Oberleitung):

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

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)



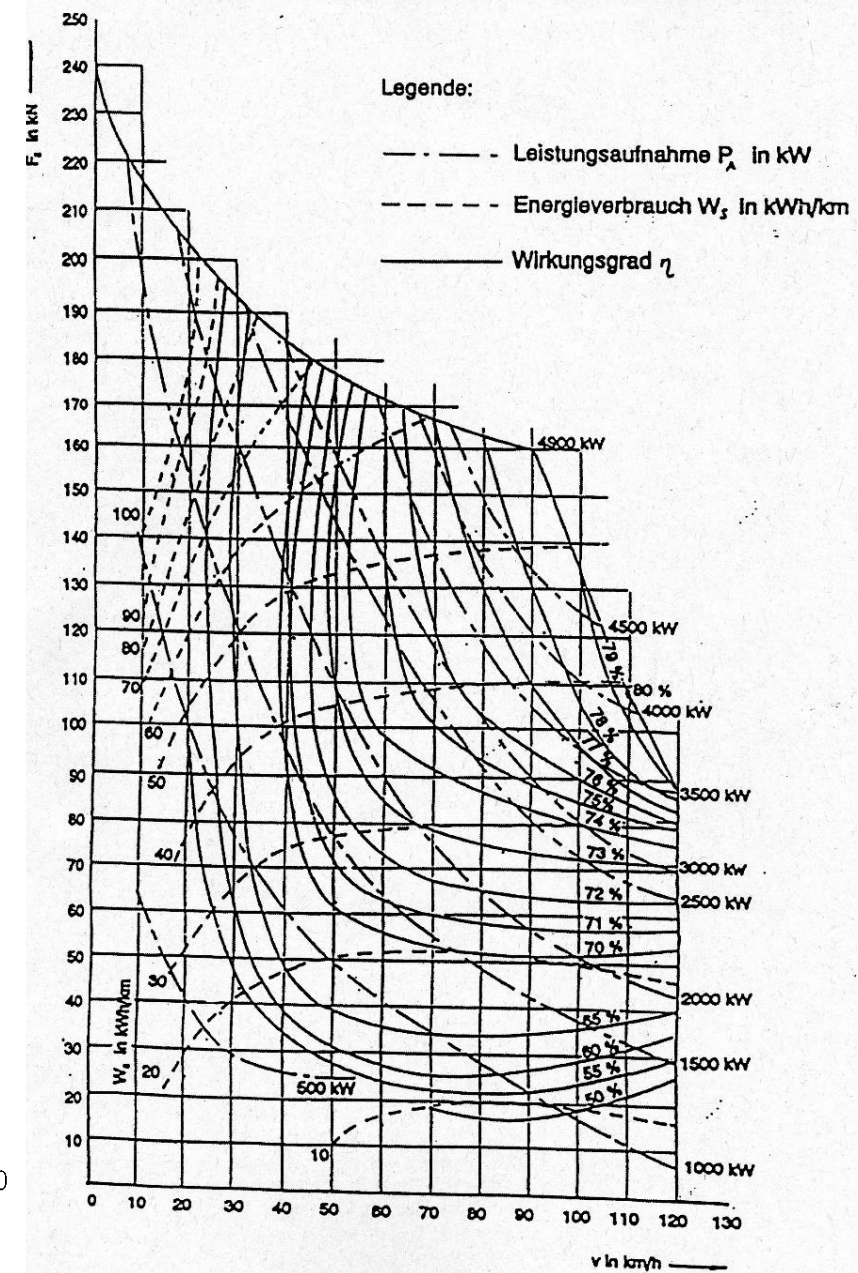
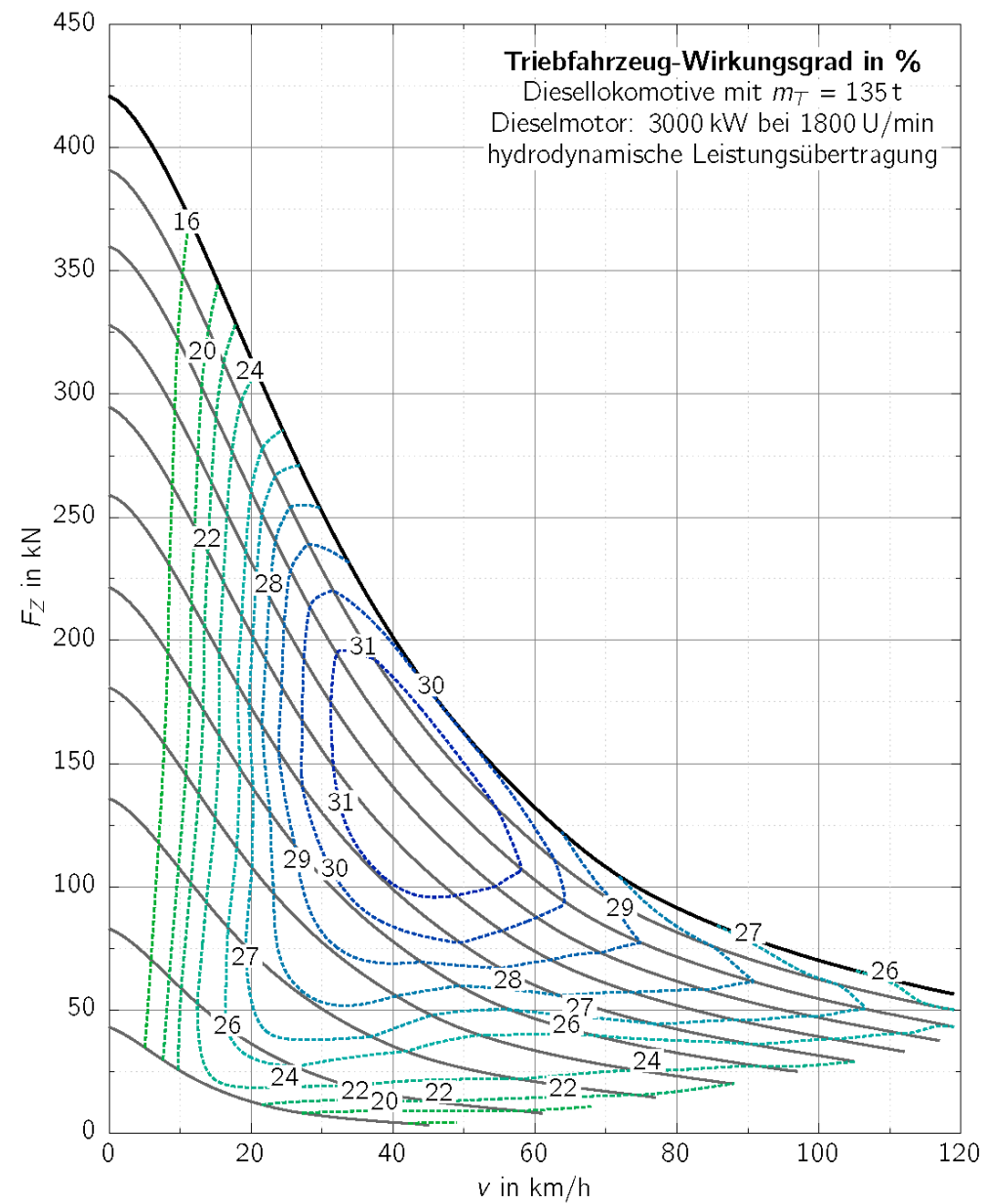
$v = 300$ / km/h
 $W_{WFT} = 250,0$ kWh
 (36,1% W_T)
 $E_{kin} = 442,0$ kWh
 (63,9% W_T)

$v = 250$ 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)

Kennlinienfelder



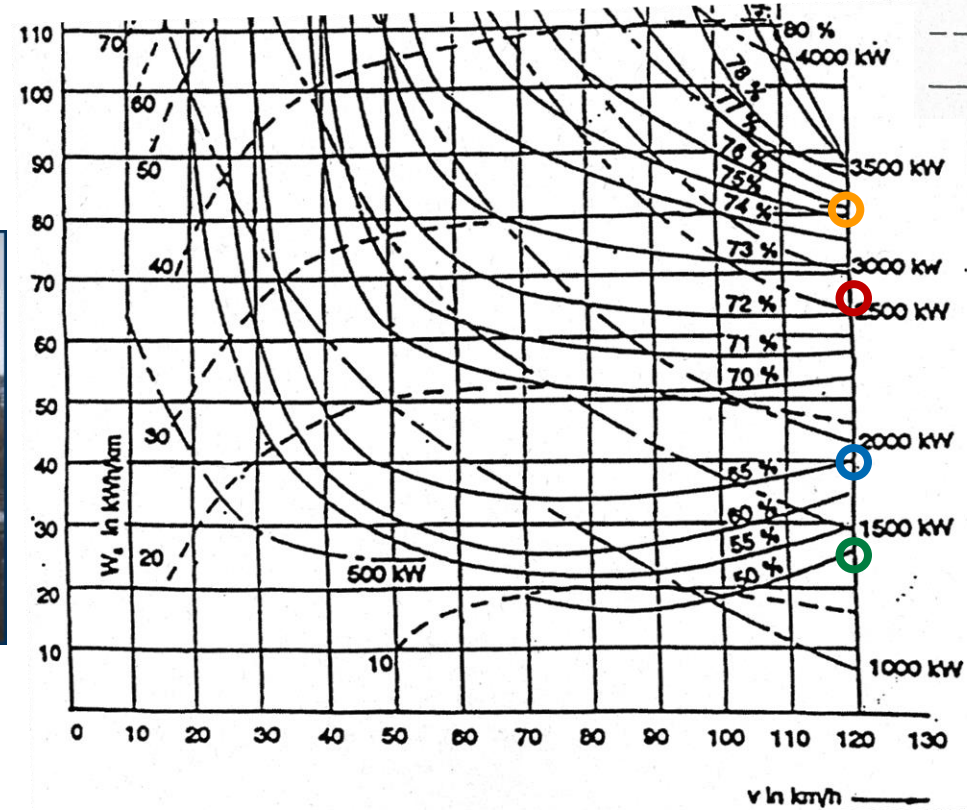
Kennlinienfeld

Beispiel :

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



© M. Kache



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)

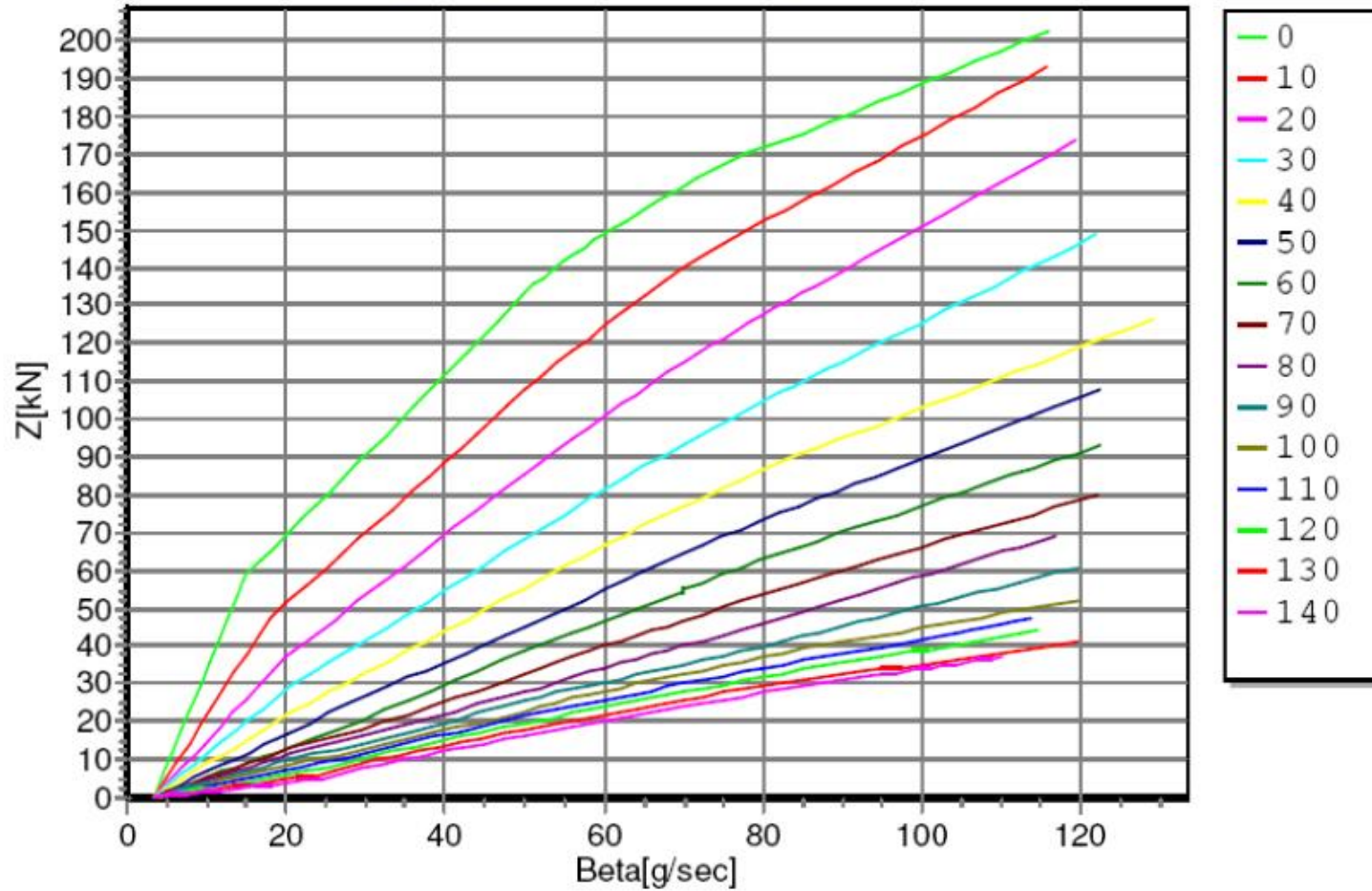


$W_s = 29,7 \text{ kWh/km}$ (Zughaken: 22,6 kWh/km)

Triebfahrzeug-Leistungs- und Verbrauchs-Tafel

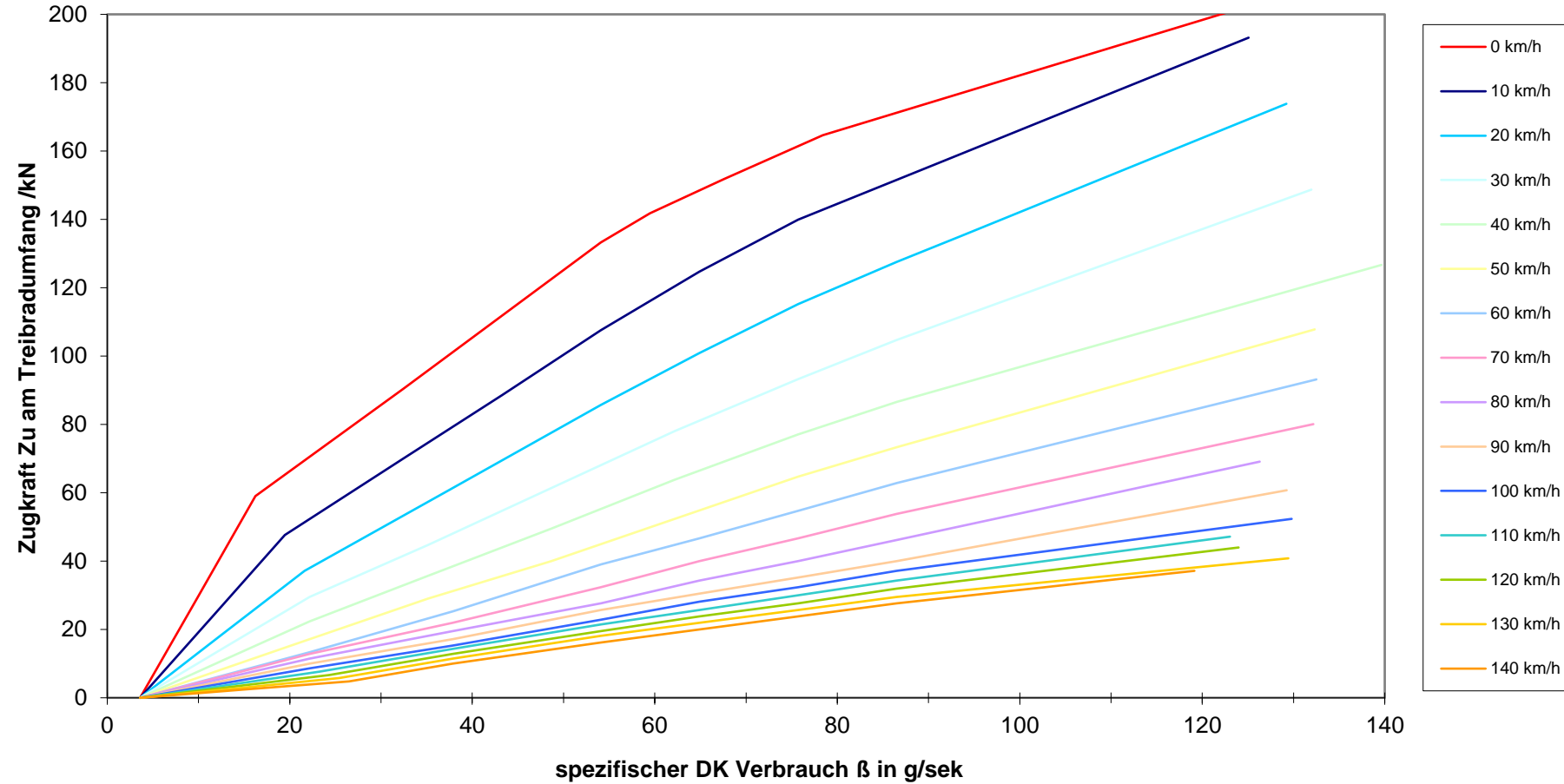
TLV-Tafel BR 215 (DK-Bezug)

BR 215/218 Sg β -v (n u r bis v=140 km/h) - FzV 215001



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

Beispiel
Dieselkraftstoff Verbrauchs-Kennlinienfeld



Quelle: DB Netz

TLV-Tafel - Beispiel



© M. Kache

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

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

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

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

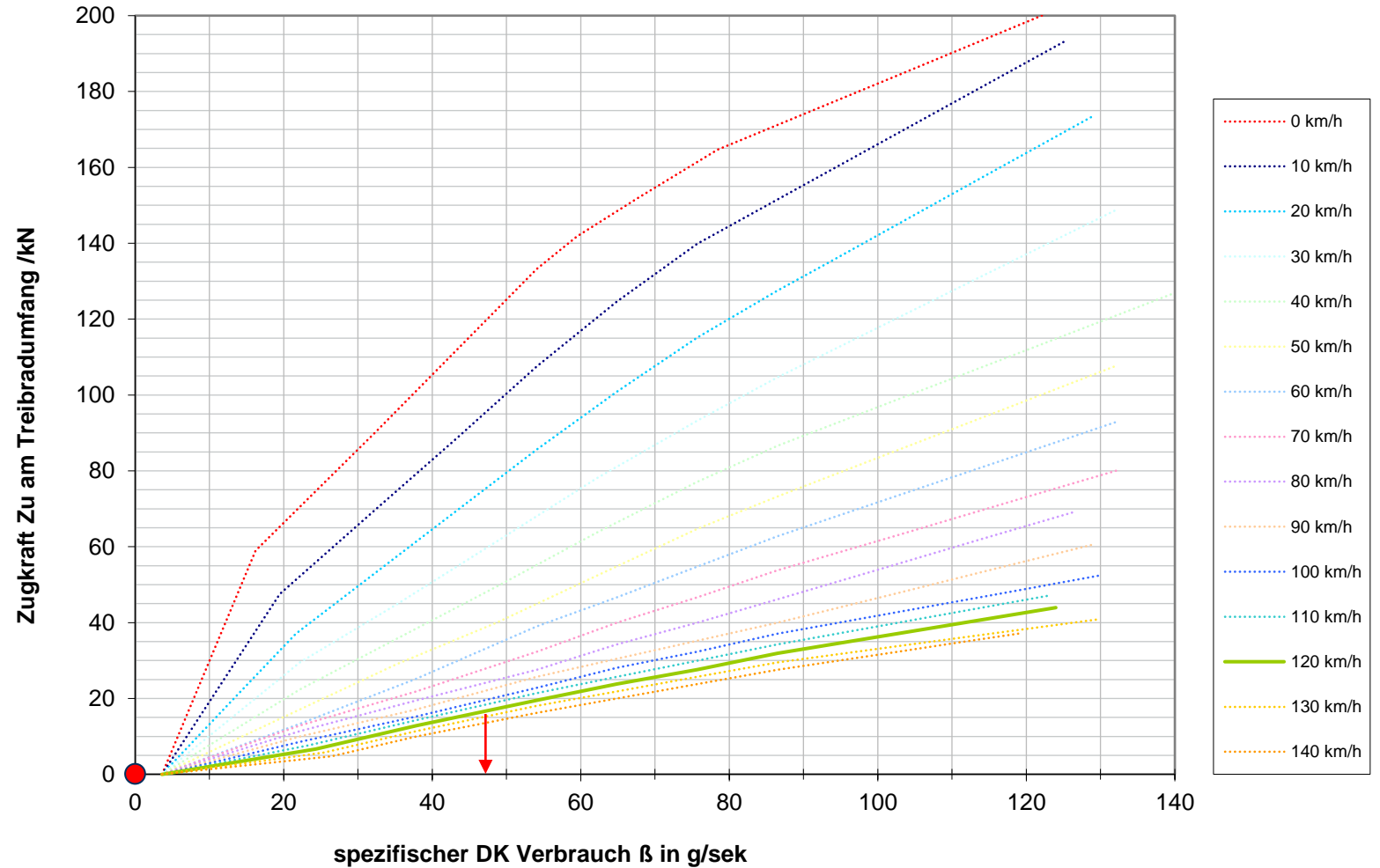
$$B_{DK} = 336 \text{ l/100 km}$$

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

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

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

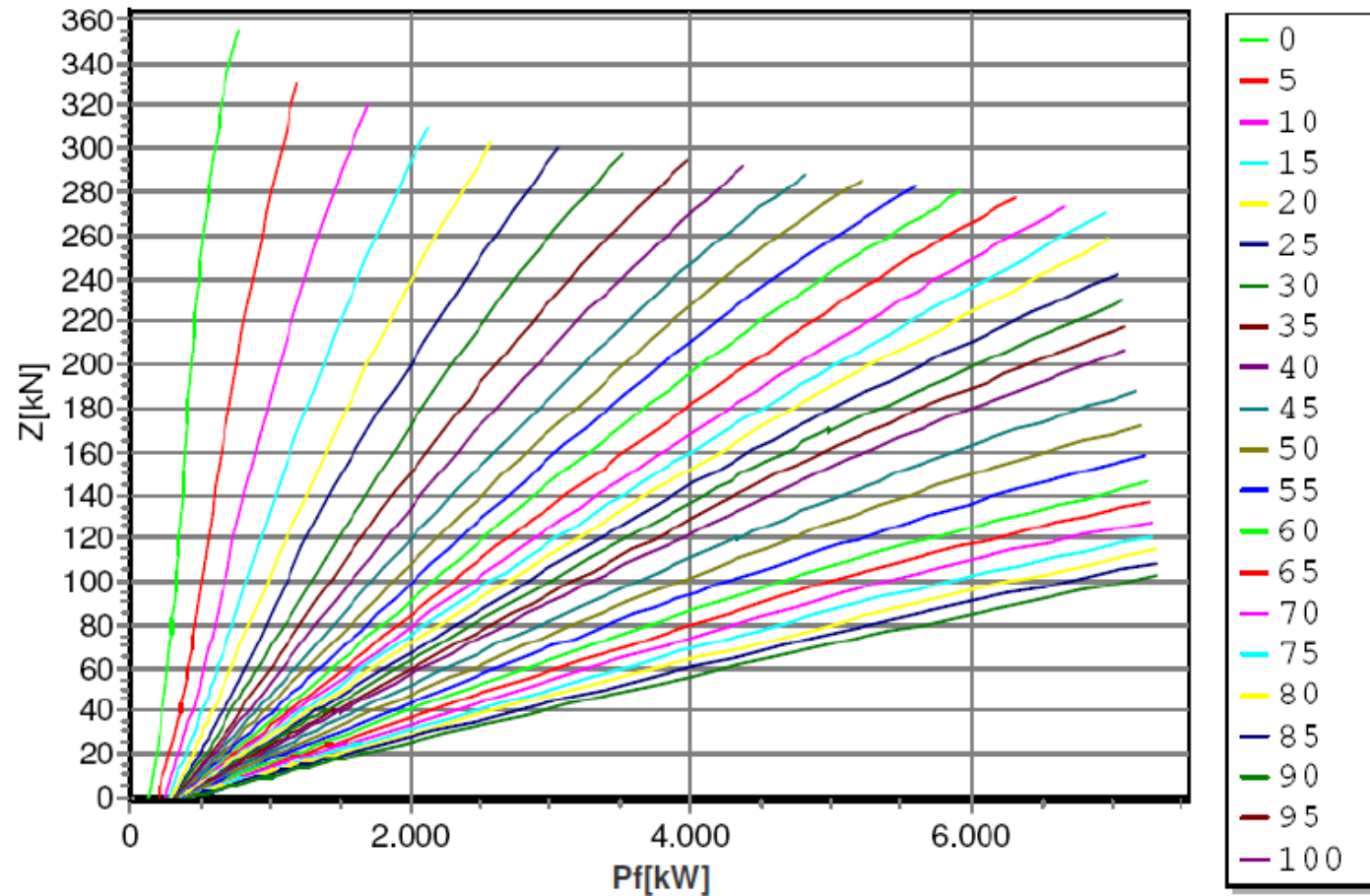
Beispiel Dieselkraftstoff Verbrauchs-Kennlinienfeld



TLV-Tafel (Elektrische Lok)

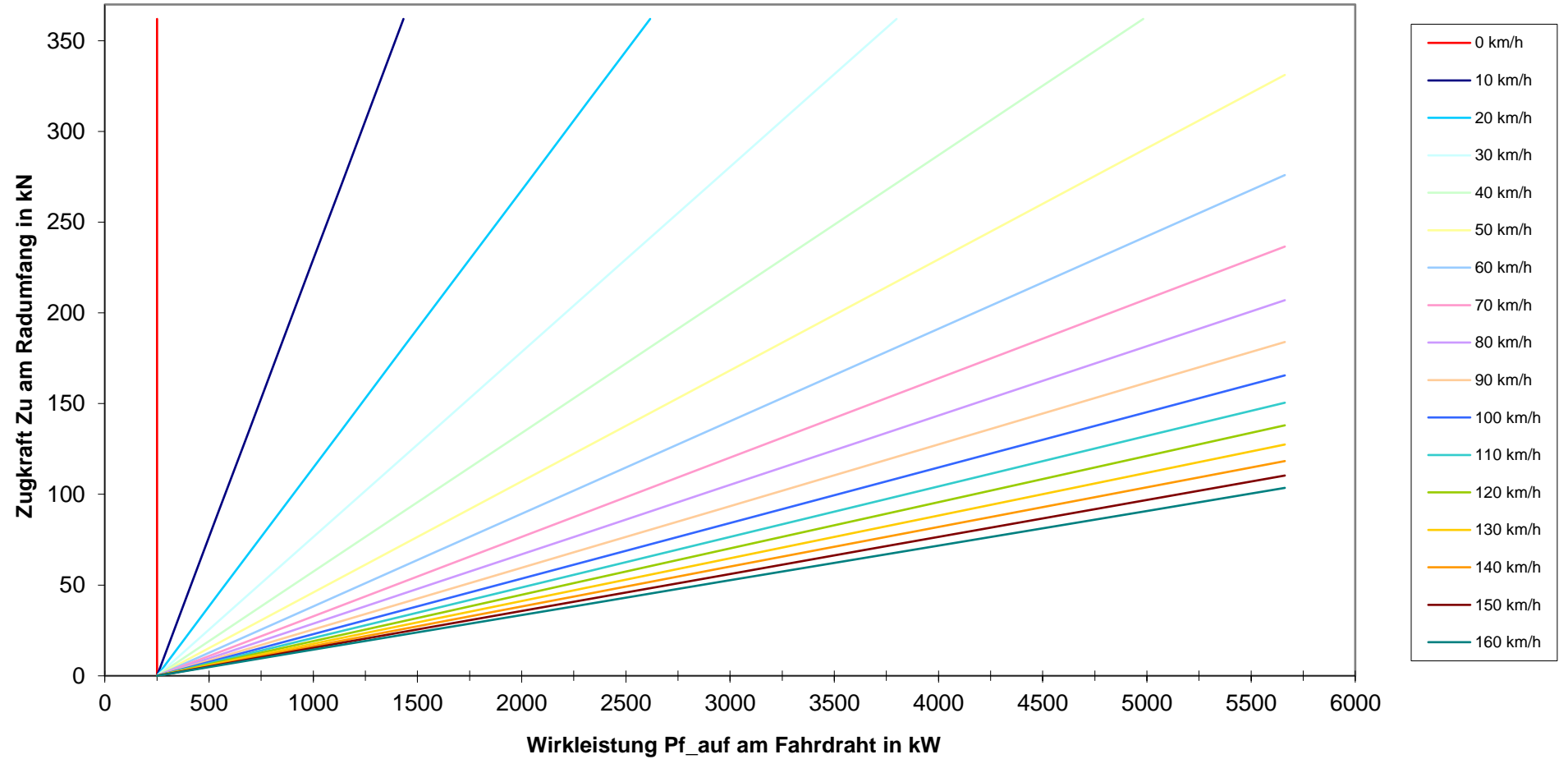
TLV-Tafel BR 120 (Energiebezug)

-8Fle120.0.01.905.003- v.20.03.87, Ka 3,- FzV 120001



TLV-Tafel (fiktives elektrisches Tfz)

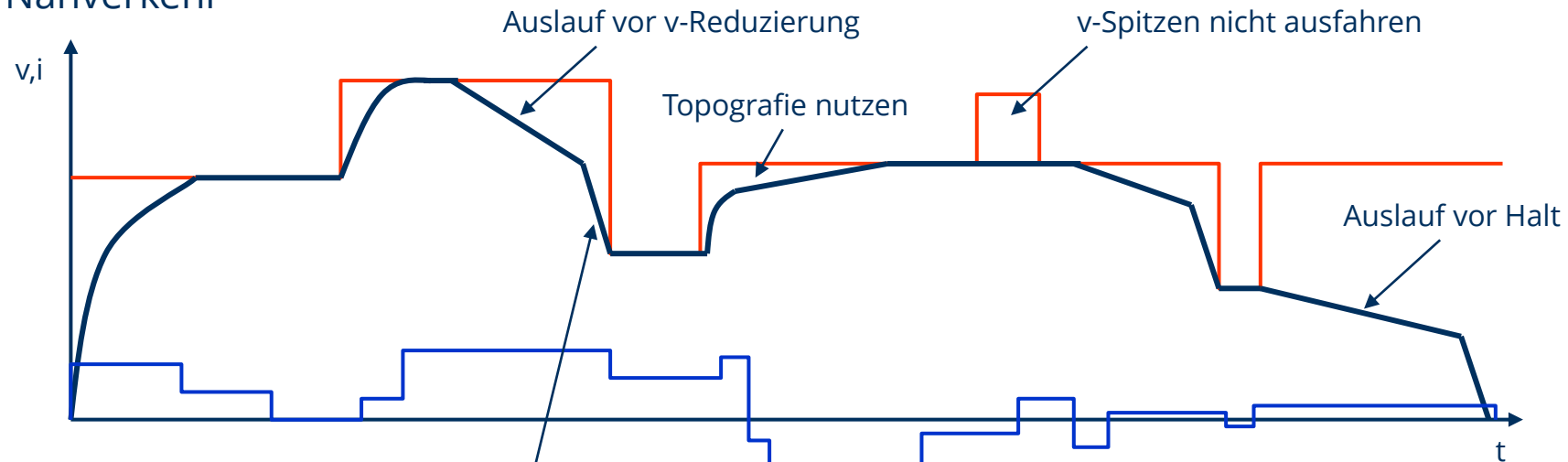
fiktive TLV BR 4xx 4,6 MW
- Bezug -
Wirkleistung am Fahrdrabt



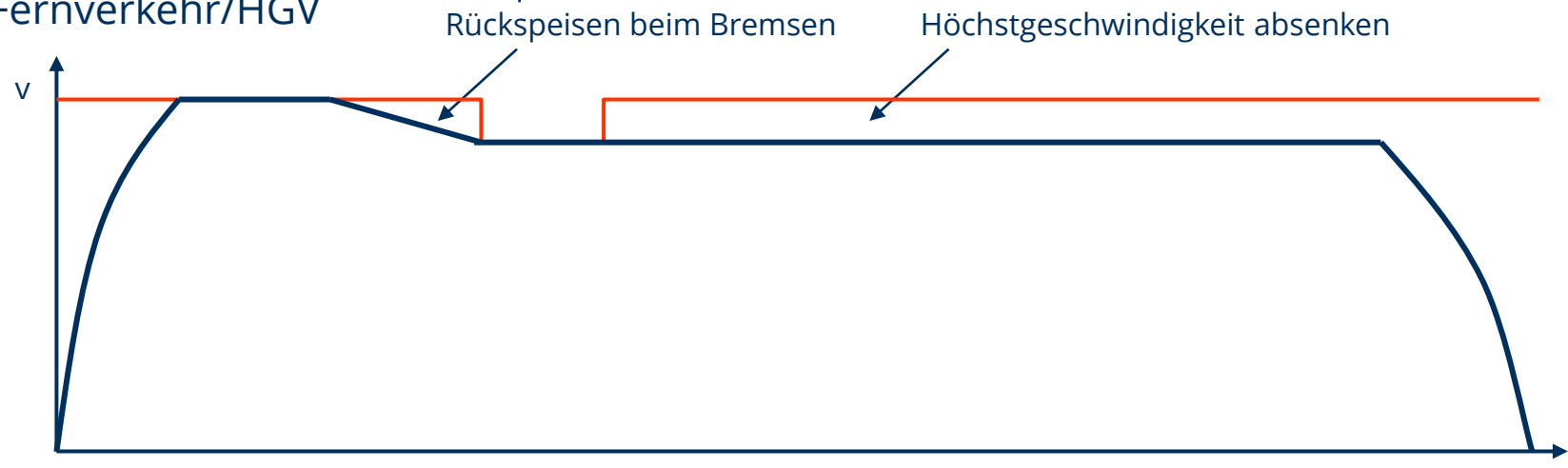
Quelle: DB Netz

Energiesparendes Fahren – betriebliche Eingriffsmöglichkeiten

Nahverkehr

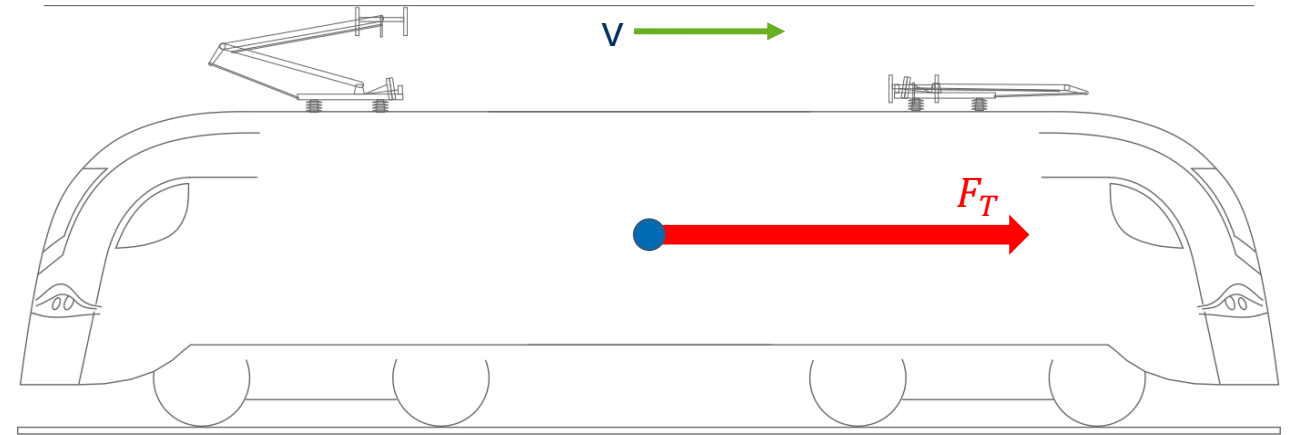


Fernverkehr/HGV



Vorlesungsinhalte (Schwerpunkt: Schienenverkehr)

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



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:

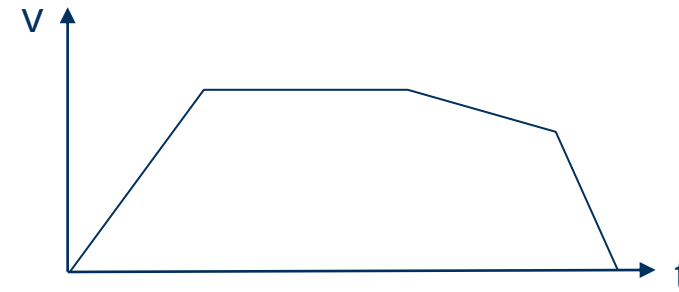
Integration der Bewegungsgleichung:

$$a = f(v)$$

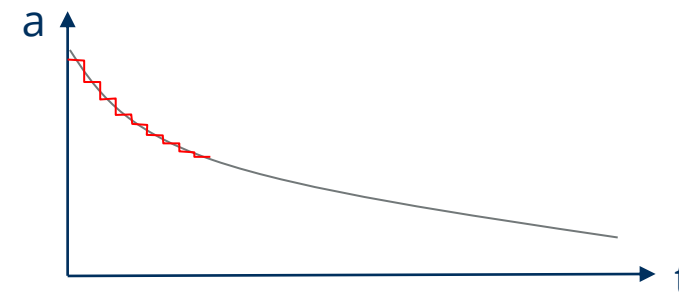
$$t = \int \frac{1}{a(v)} dv$$

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

Lösungsansatz 1: Linearisierung



Lösungsansatz 2: Diskretisierung

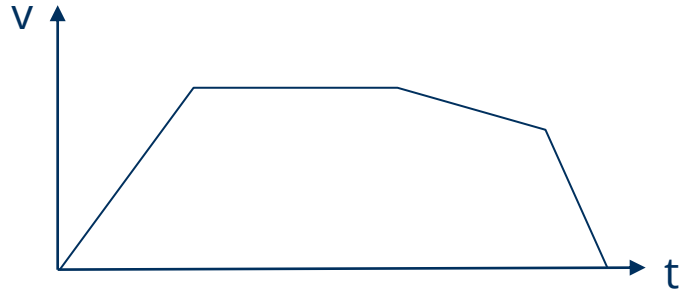


Lösungsansatz 3: Integrationsverfahren



Fahrzeitermittlung mittels Linearisierung

Lösungsansatz 1: Linearisierung



Grundidee: Rechnen mit konstanten, mittleren Beschleunigungen/Verzögerungen

Vorteile

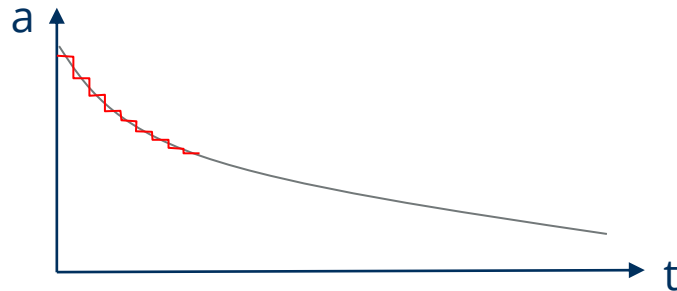
- + Reduktion auf einfache mathematische Zusammenhänge
- + „Handrechnung“ möglich

Nachteile

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

Fahrzeitermittlung mittels Diskretisierung

Lösungsansatz 2: Diskretisierung



„Schrittverfahren“:

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

Grundidee:

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

Vorteile

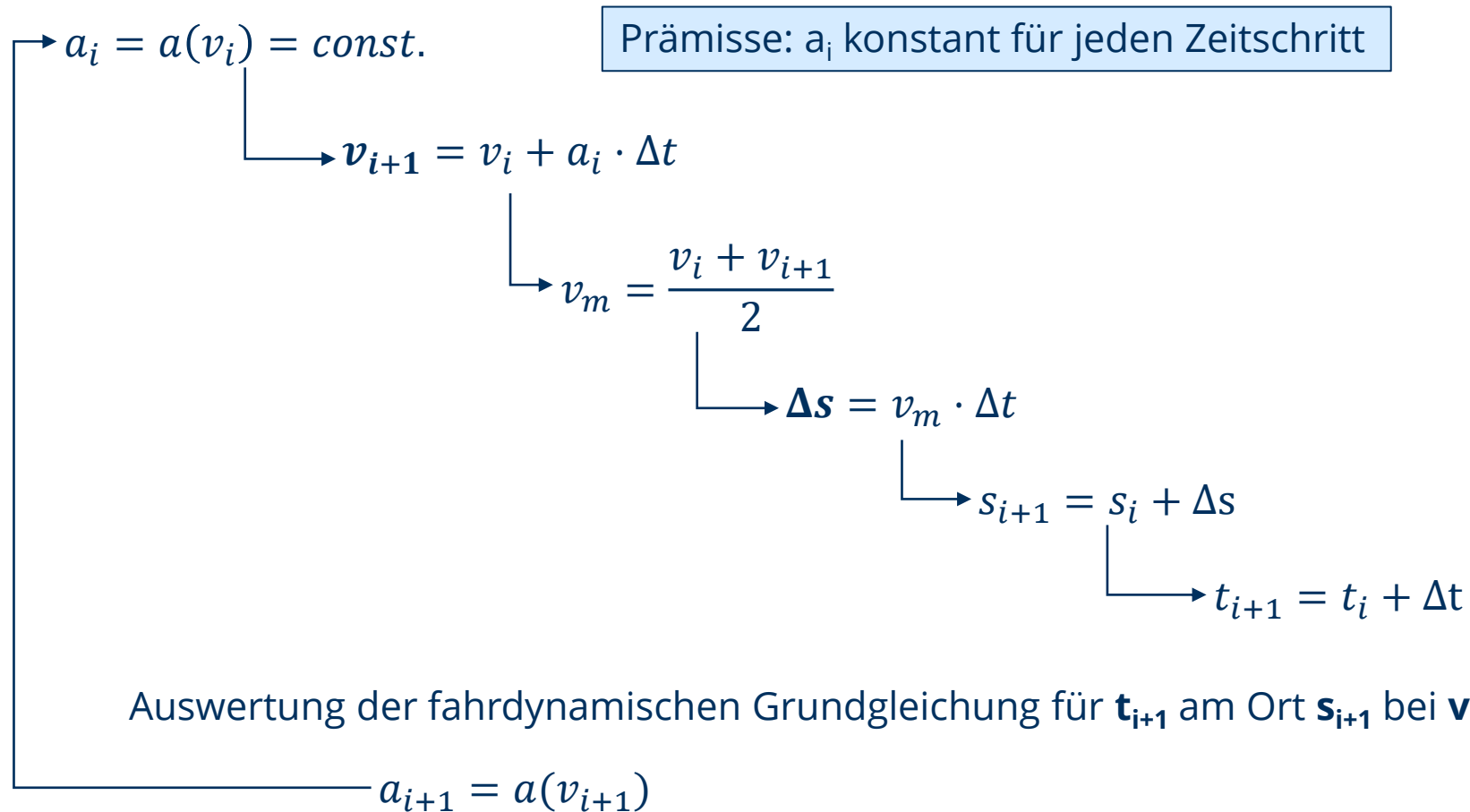
- + Reduktion auf einfache mathematische Zusammenhänge
- + Berechnung mit MS-Excel möglich
- + hinreichend genau bei sinnvoll gewählten Intervallen
- + detaillierte Darstellung des Fahrtverlaufes möglich

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 mittels Integrationsverfahren

Lösungsansatz 3: Integrationsverfahren



- Nutzung von Integraltabellen
- Nutzung numerischer Integratoren

Grundidee:

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

Vorteile

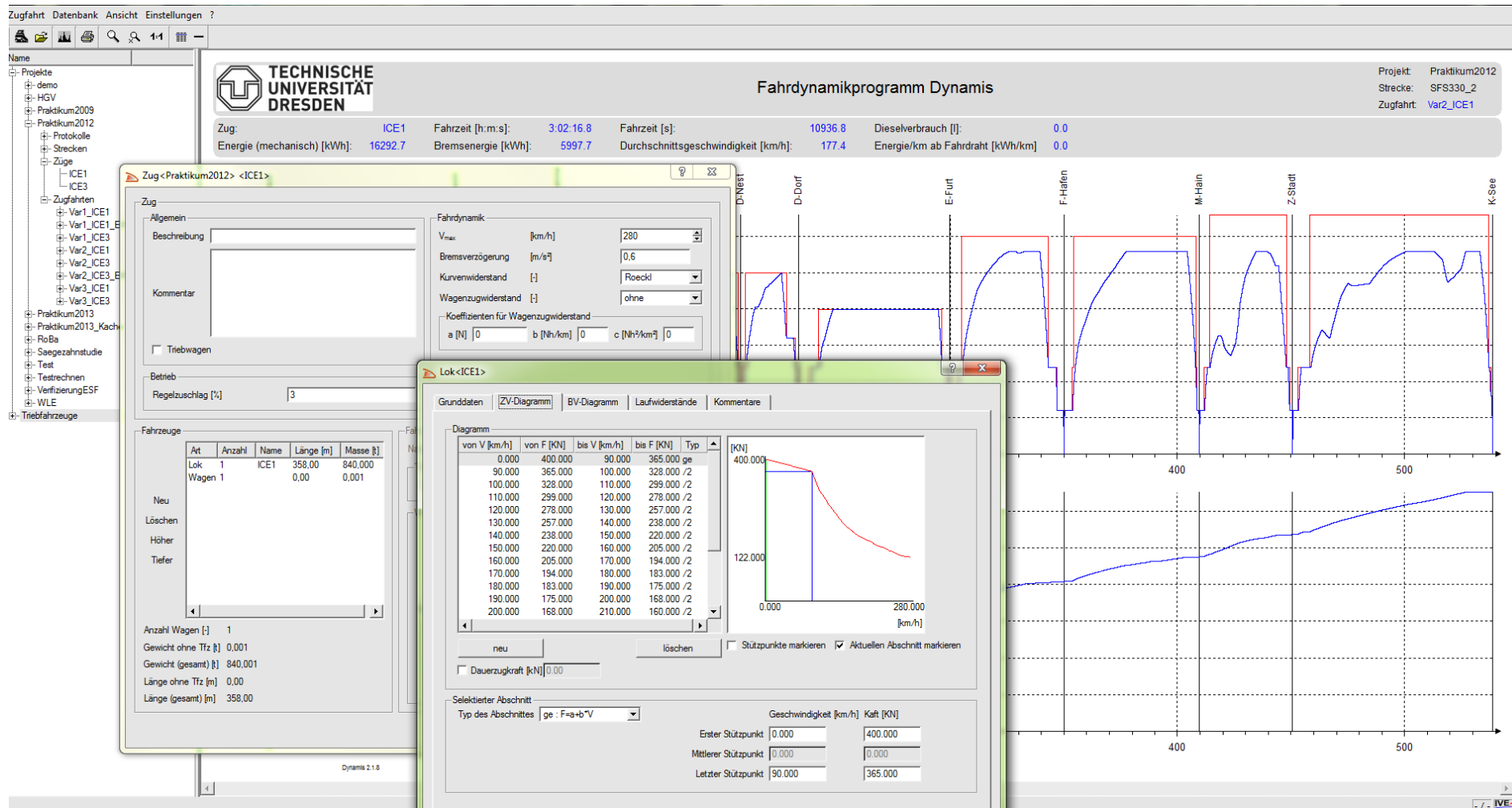
- + sehr hohe Genauigkeit möglich
- + detaillierte Darstellung des Fahrtverlaufes möglich (nicht bei allen Verfahren)

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 Fahrdrabt [kWh/km]	0.0	0.0	0.0

