

Fakultät Verkehrswissenschaften „FRIEDRICH LIST“  
Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge

# Triebfahrzeugtechnik

## Antriebskonfigurationen

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan / Manuskript: Dr.-Ing. Martin Kache // Sommersemester 2022



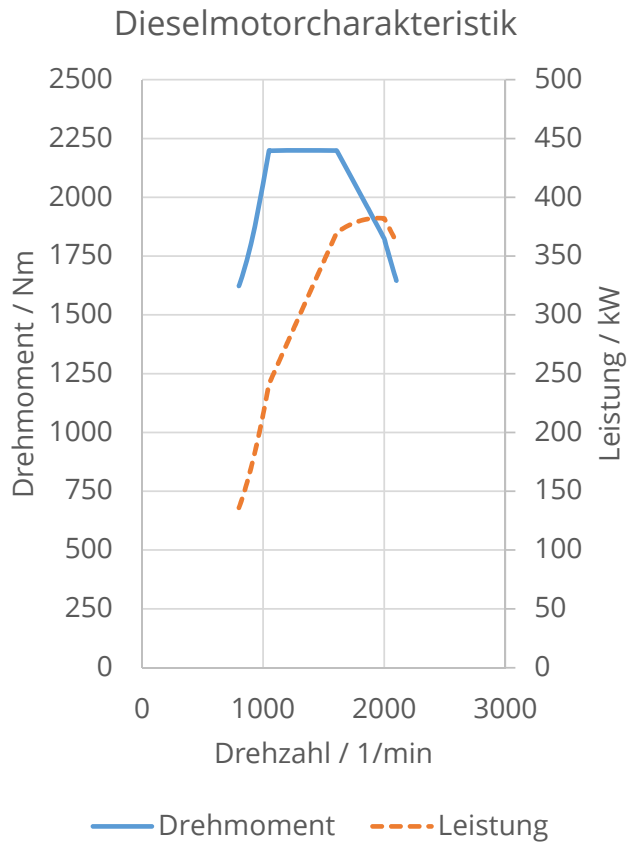
# Inhalte

## Vorlesung Triebfahrzeugtechnik (Antriebskonfigurationen)

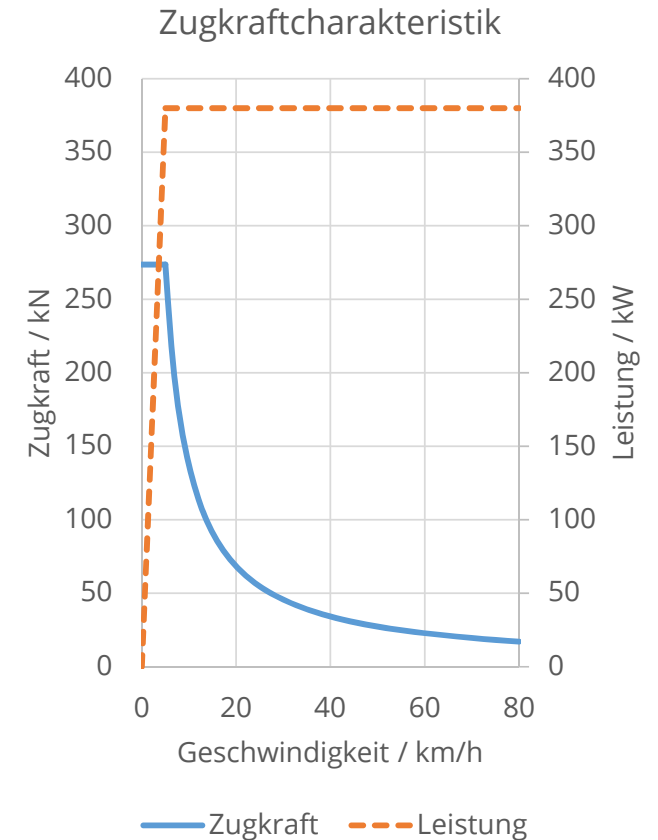
7. Leistungsauslegung von Triebfahrzeugen
8. Dieselmotor und andere Verbrennungskraftmaschinen
- 9. Leistungsübertragungsanlagen**
10. Hilfs- und Nebenbetriebe
11. Leittechnik (Überblick)
12. Fallstudien unkonventionelle Triebfahrzeuge

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.0.1 Aufgaben der Leistungsübertragung (Wiederholung)

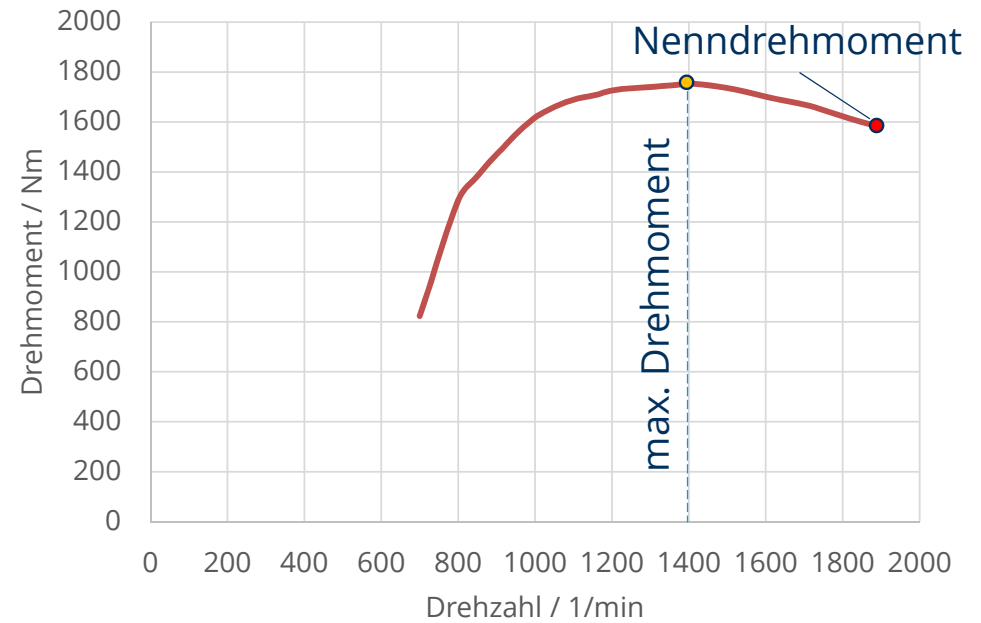
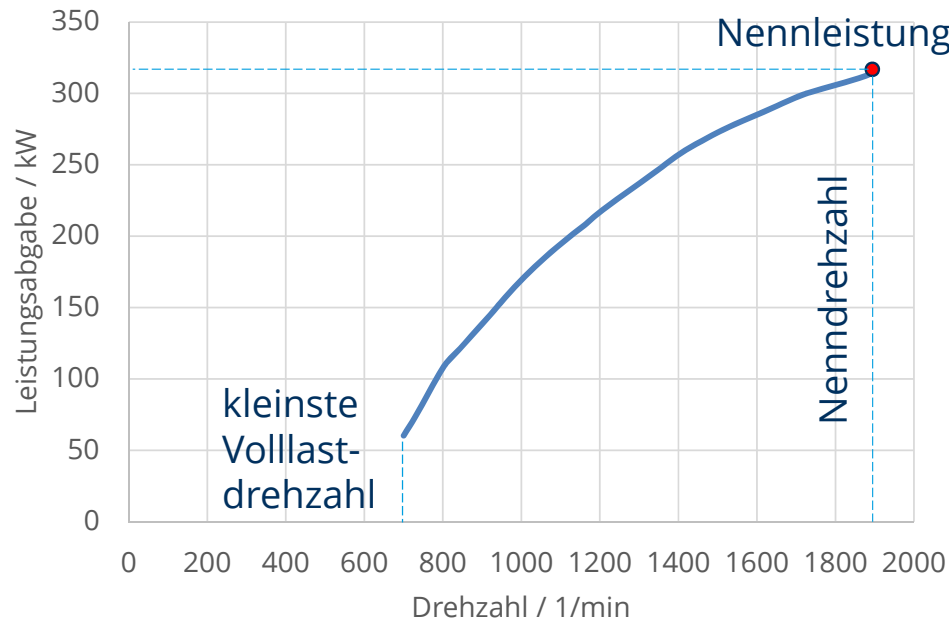


- Überbrückung der Drehzahllücke
- Wandlung des Drehmomentes
- Anpassung des Drehzahlbereichs
- Gewährleistung der Drehrichtungsumkehr bzw. Fahrtrichtungsumkehr
- Ausnutzung günstiger DM-Betriebspunkte
- Realisierung einer Leistungskonstanz an den Treibrädern



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.0.2 Leistungsverhalten Dieselmotor



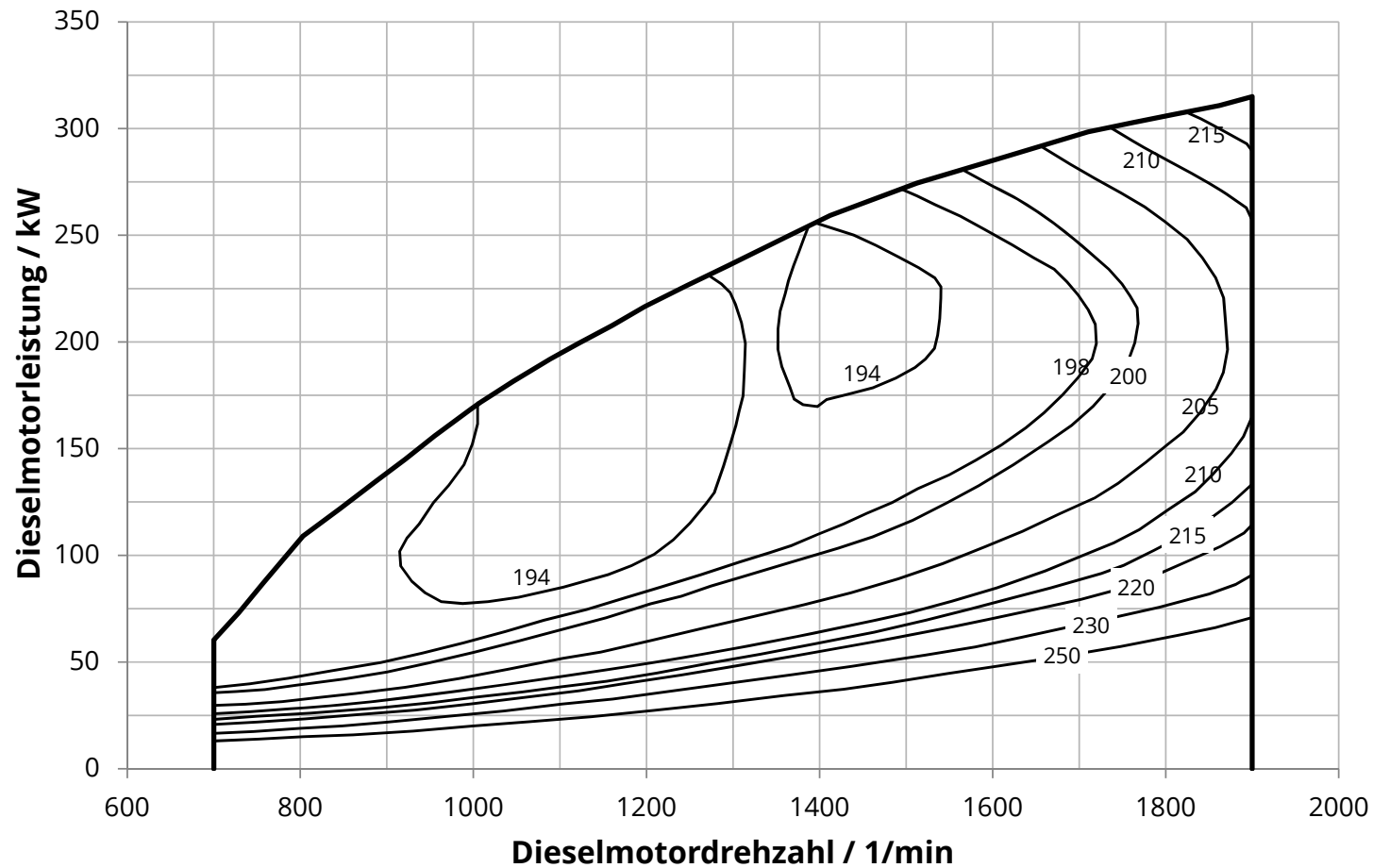
„Leistungsbereich“

$$P_{DM} = M_{DM} \omega_{DM} = M_{DM} \cdot 2\pi \cdot n_{DM}$$

„Drehmomentbereich“

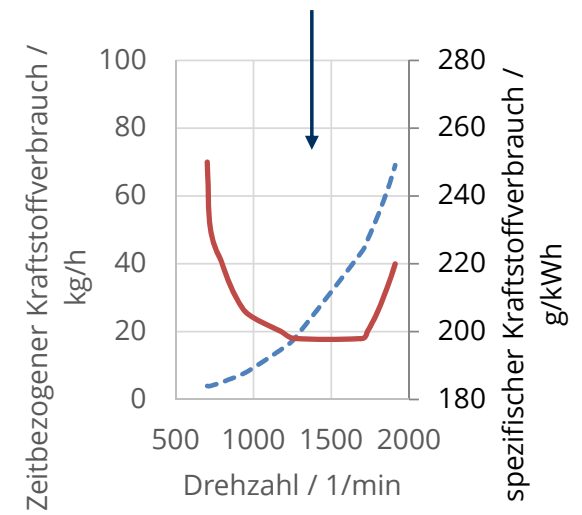
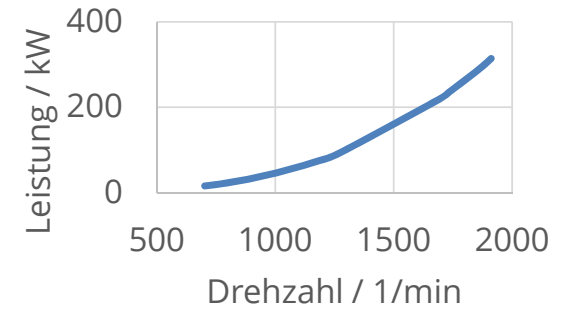
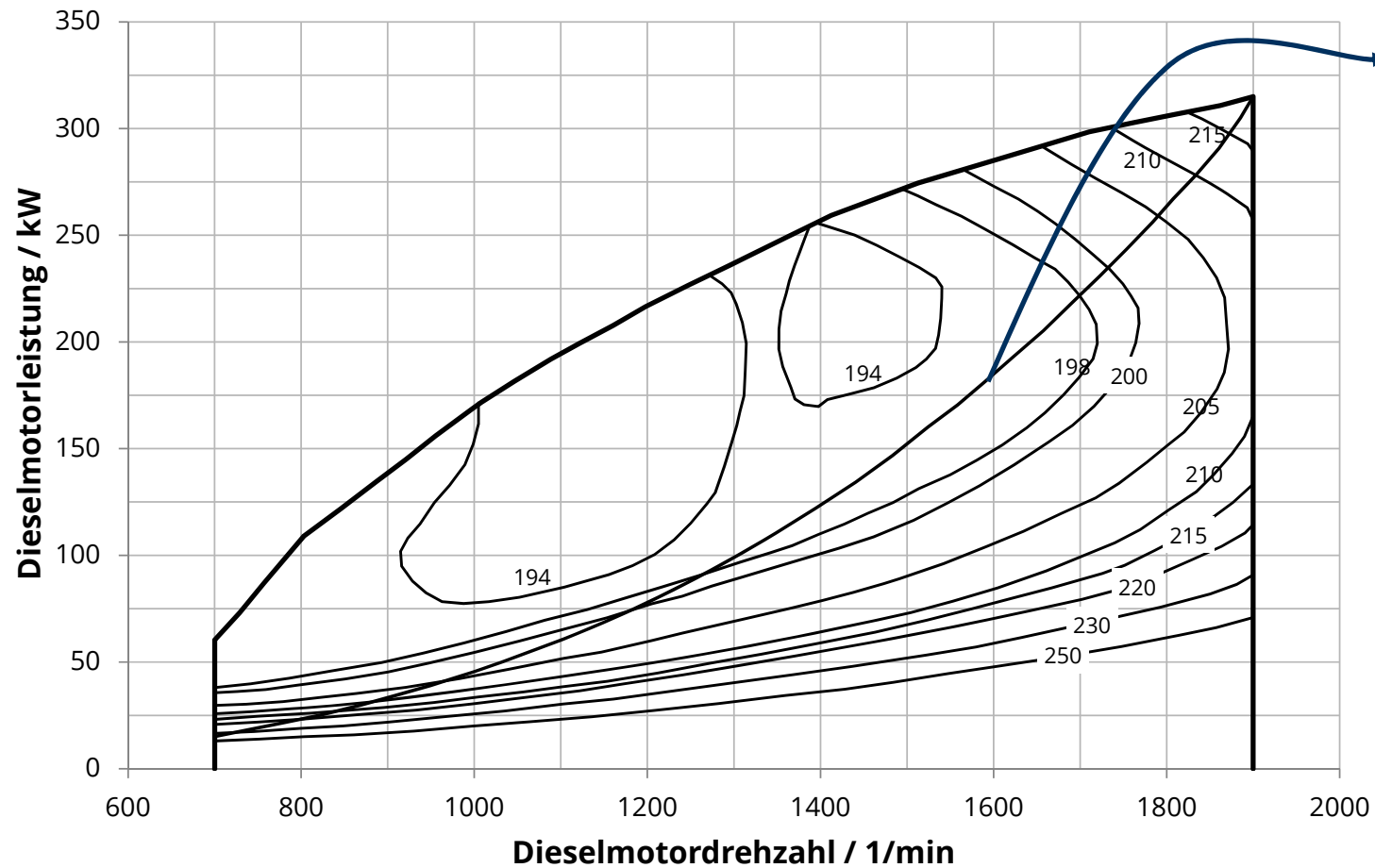
# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.0.2 Leistungsverhalten Dieselmotor (Wiederholung)



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.0.2 Leistungsverhalten Dieselmotor (Wiederholung)



--- zeitbezogener Verbrauch  
 — spezifischer Verbrauch

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.0.3 Bauarten der Leistungsübertragung von Dieseltriebfahrzeugen

mechanisch



hydrodynamisch



hydromechanisch



elektrisch (AC-DC)



hydrostatisch



Fotos: Martin Kache

elektrisch (AC-AC)

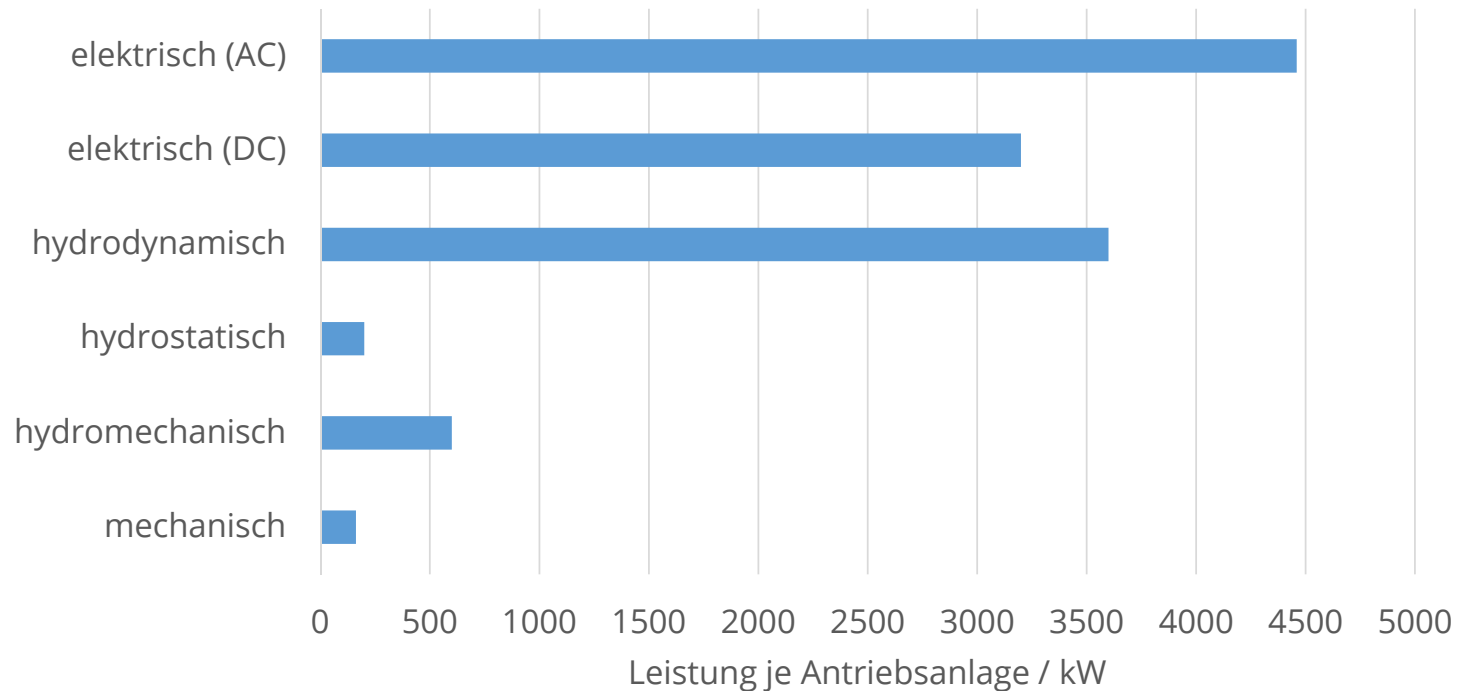


Fotos: Martin Kache

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.0.3 Bauarten der Leistungsübertragung von Dieseltriebfahrzeugen

Leistungsgrenzen verschiedener Leistungsübertragungsarten  
(Richtwerte)



# Inhalte

## Vorlesung Triebfahrzeugtechnik (Antriebskonfigurationen)

7. Leistungsauslegung von Triebfahrzeugen
8. Dieselmotor und andere Verbrennungskraftmaschinen
9. Leistungsübertragungsanlagen

### **9.1 Mechanische Leistungsübertragung**

10. Hilfs- und Nebenbetriebe
11. Leittechnik (Überblick)
12. Fallstudien unkonventionelle Triebfahrzeuge

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.1 Elemente mechanischer Leistungsübertragungsanlagen

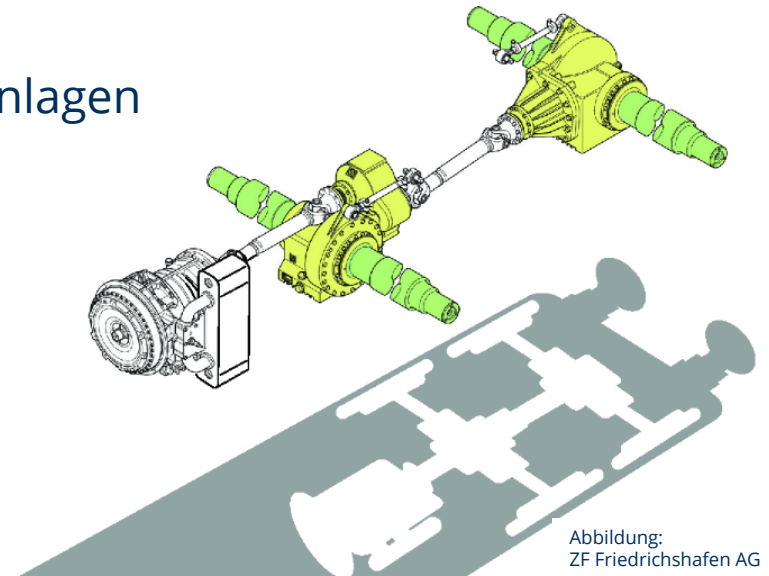
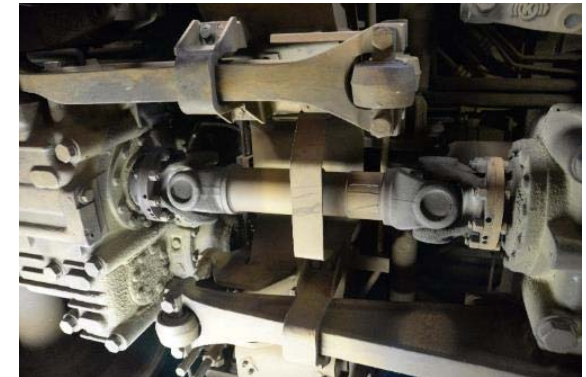
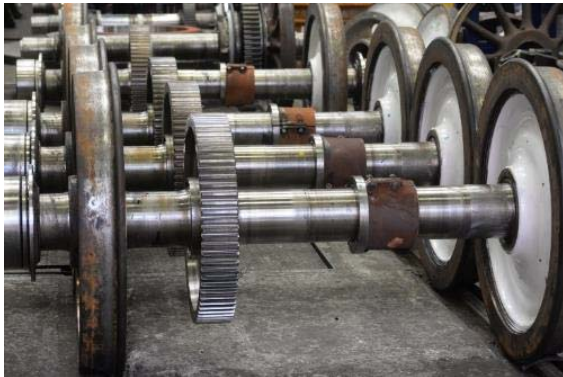
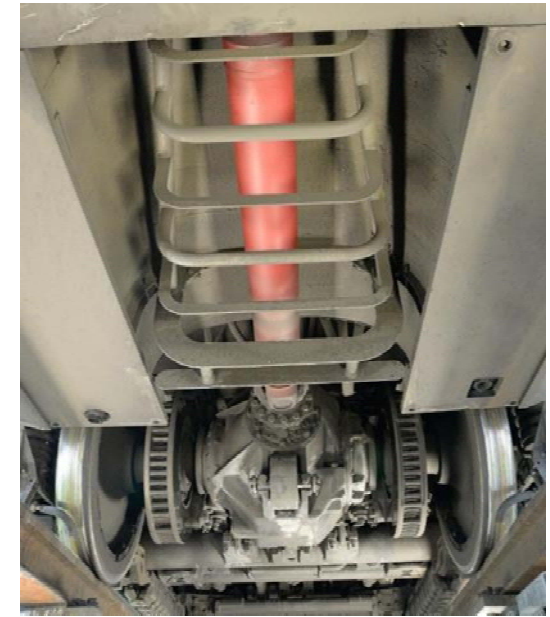


Abbildung:  
ZF Friedrichshafen AG

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1 Mechanische Leistungsübertragung

Elemente mechanischer Leistungsübertragungseinrichtungen



Fotos: Martin Kache

## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.2 Allgemeine Anforderungen an Schienenfahrzeugantriebe

- niedrige Masse
- geringer Bauraum
- hoher Übertragungswirkungsgrad
- kraftstoffsparend / energiesparend
- niedrige Geräuschentwicklung
- Gewährleistung einer Relativbewegung der Treibradsätze bezüglich des Fahrzeuges/Fahrwerkes
- „Bahnfestigkeit“ (Stöße, Beschleunigungen)
- thermisch und mechanisch robust
- hohe Verfügbarkeit
- Wartungsarmut
  - hohe Dichtheit (Ölverlust < 10%/100.000 km)
  - lange Revisionsintervalle (> 2 Mio. km)
- niedrige Anschaffungs- und Lebenszykluskosten
- Langlebigkeit (langfristige Ersatzteilversorgung)

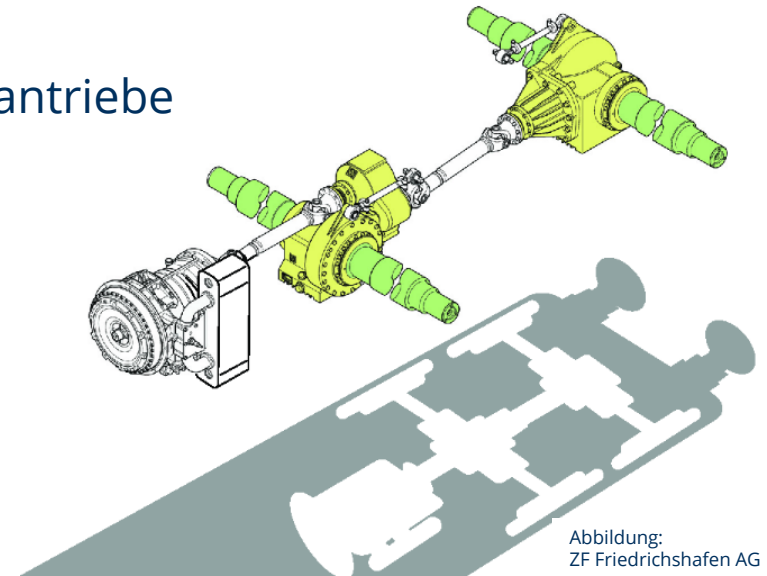


Abbildung:  
ZF Friedrichshafen AG

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.3 Struktur Mechanischer Leistungsübertragungen

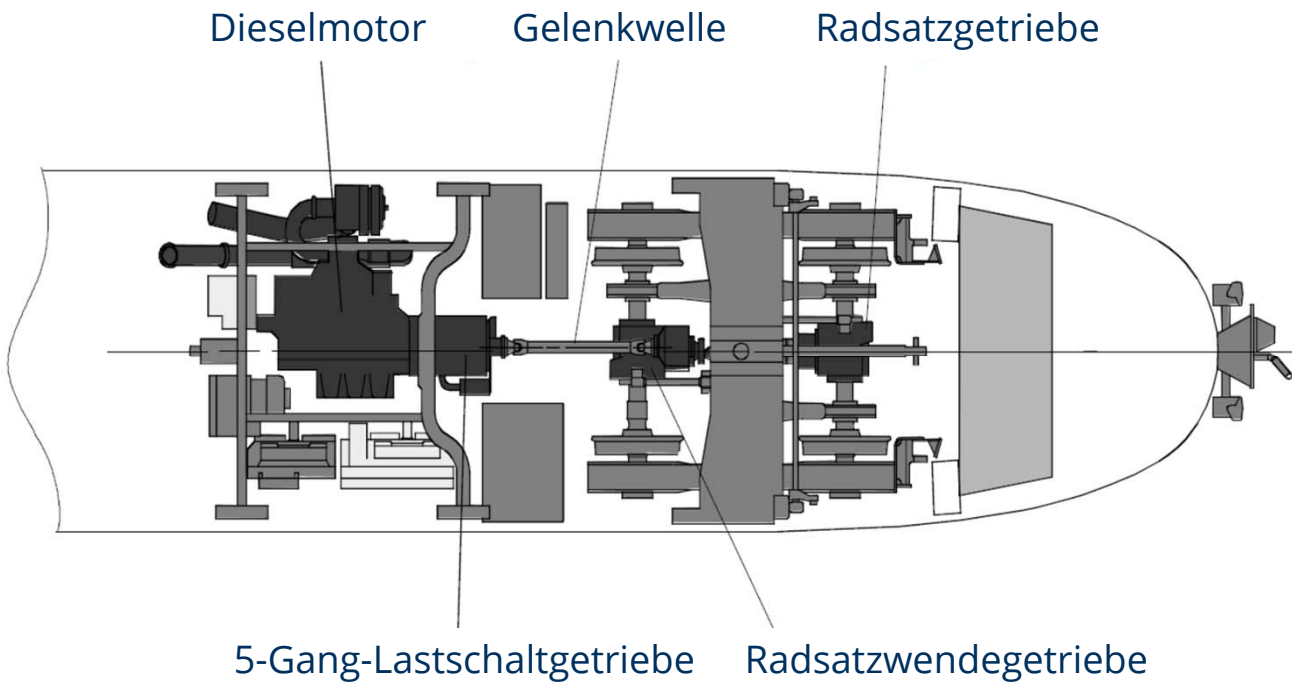


Foto: Martin Kache

Abbildung: Deutsche Bahn / Siemens

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.3 Struktur Mechanischer Leistungsübertragungen

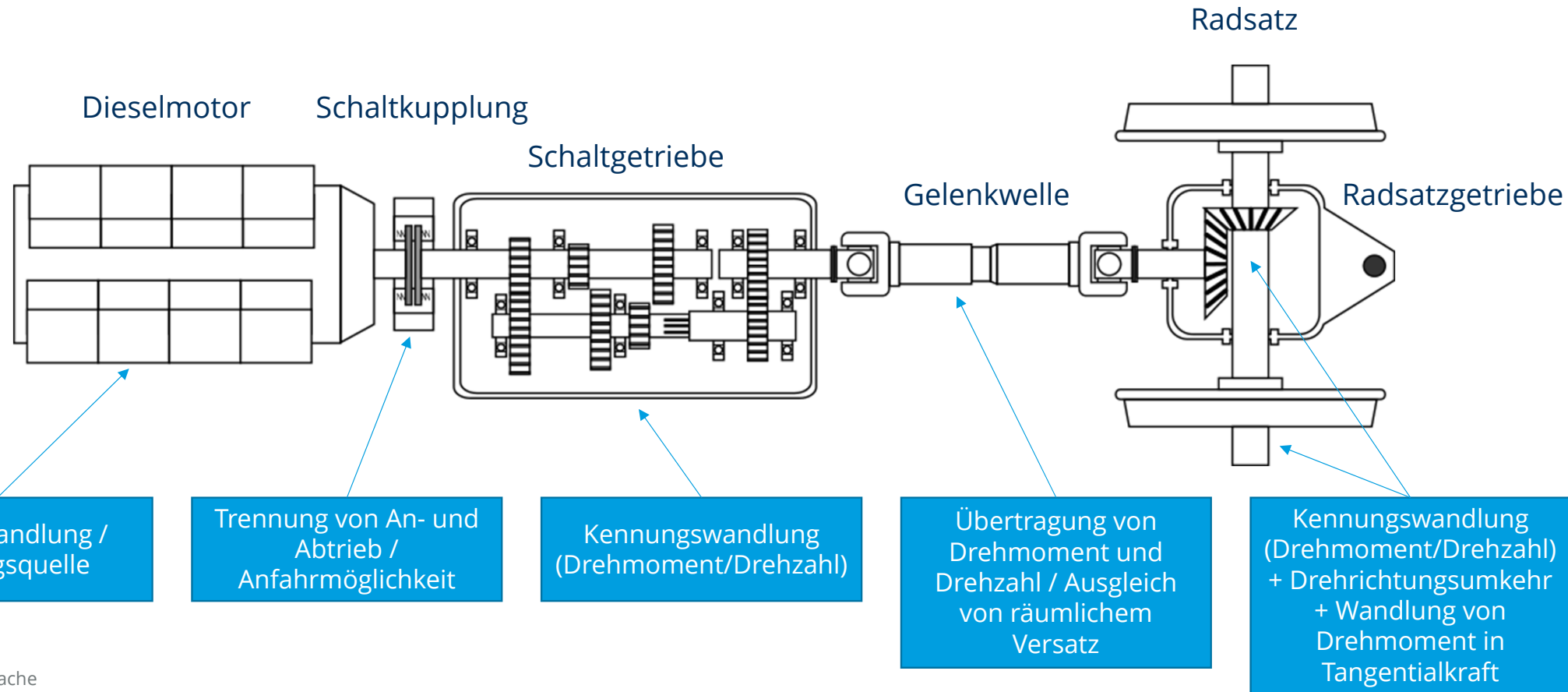
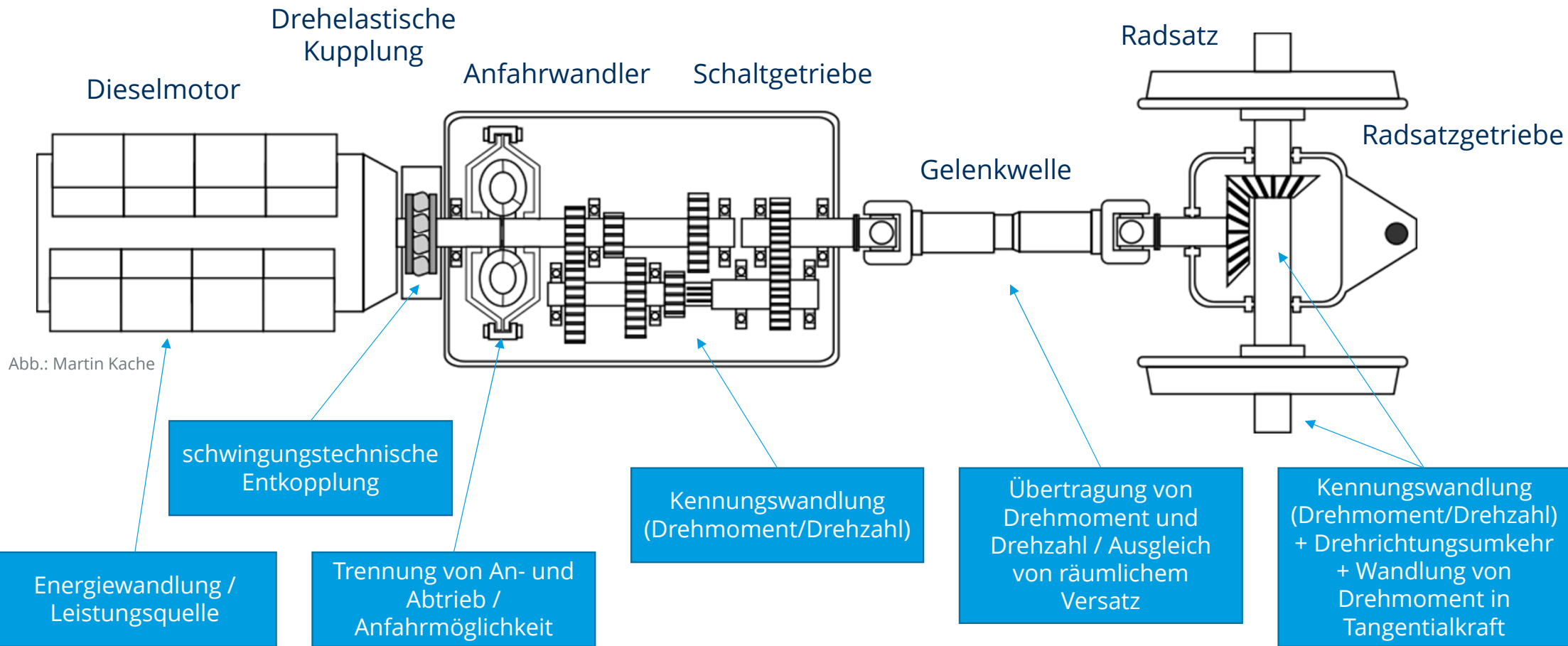


Abb.: Martin Kache

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.3 Struktur Hydromechanischer Leistungsübertragungen



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.4 Hydromechanische Leistungsübertragung – Systemverhalten

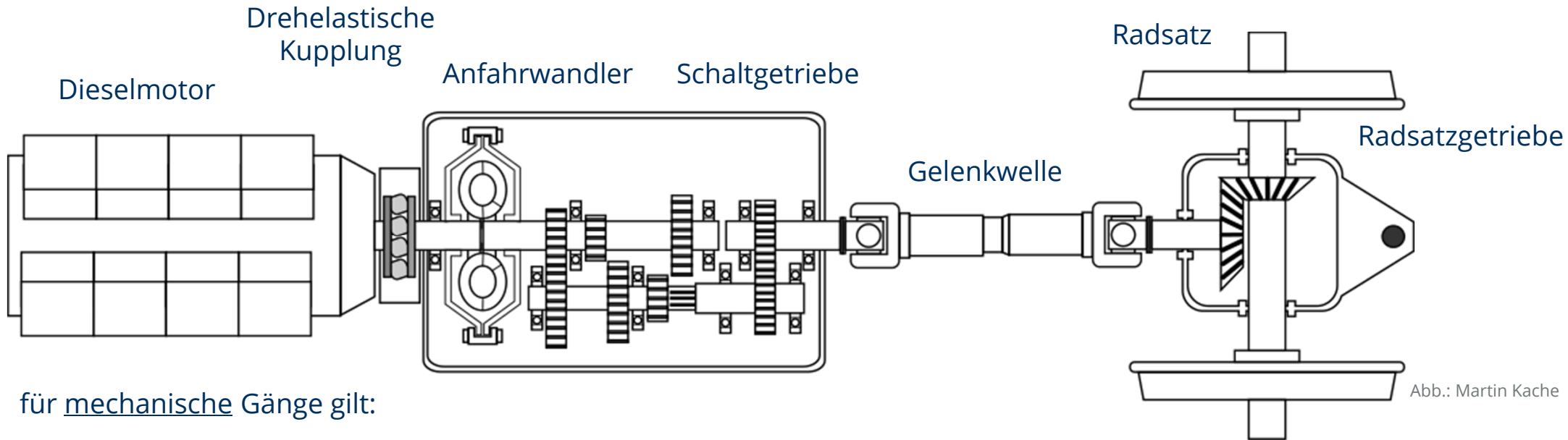


Abb.: Martin Kache

für mechanische Gänge gilt:

$$M_{DM,T} = \frac{P_{DM,T}}{2\pi \cdot n_{DM}}$$

$$n_{DM} = \frac{P_{DM,T}}{2\pi \cdot M_{DM,T}}$$

$$n_{SG,ab} = \frac{n_{DM}}{i_{SG,j}}$$

$$M_{SG,ab} = M_{DM,T} \cdot i_{SG,j} \cdot \eta_{SG}$$

$$n_{GW,ab} = n_{GW,an} = n_{SG,ab}$$

$$M_{GW,ab} = M_{SG,ab} \cdot \eta_{GW}$$

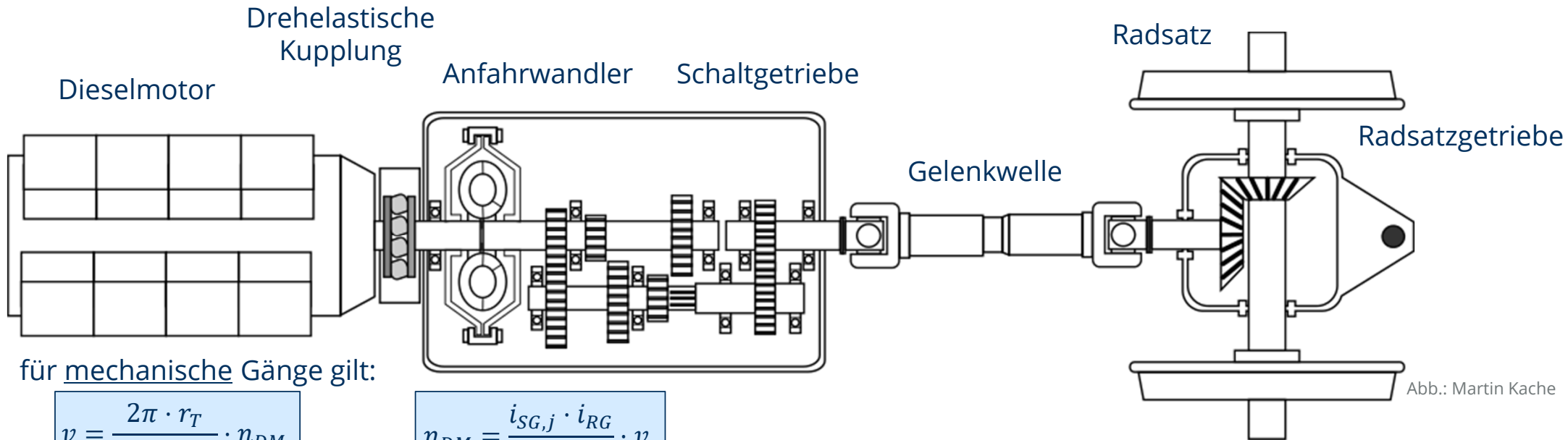
$$n_{RS} = \frac{n_{GW,ab}}{i_{RG}}$$

$$M_{RS} = M_{GW,ab} \cdot i_{RG} \cdot \eta_{RG}$$

$$v = 2\pi \cdot n_{RS} \cdot r_T \quad F_T = \frac{M_{RS}}{r_T}$$

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.4 Hydromechanische Leistungsübertragung – Systemverhalten



für mechanische Gänge gilt:

$$v = \frac{2\pi \cdot r_T}{i_{SG,j} \cdot i_{RG}} \cdot n_{DM}$$

v in m/s,  $r_T$  in m,  $n_{DM}$  in 1/s

$$n_{DM} = \frac{i_{SG,j} \cdot i_{RG}}{2\pi \cdot r_T} \cdot v$$

$$v = \frac{3\pi \cdot r_T}{25 \cdot i_{SG,j} \cdot i_{RG}} \cdot n_{DM}$$

v in km/h,  $r_T$  in m,  $n_{DM}$  in 1/min

$$n_{DM} = \frac{25 \cdot i_{SG,j} \cdot i_{RG}}{3\pi \cdot r_T} \cdot v$$

$$F_T = \frac{1}{r_T} \cdot \eta_{SG} \eta_{RG} \cdot i_{SG} i_{RG} \cdot M_{DM} \cdot (1 - \psi)$$

$$M_{DM} = \frac{F_T \cdot r_T}{\eta_{SG} \eta_{RG} \cdot i_{SG} i_{RG} \cdot (1 - \psi)}$$

Abb.: Martin Kache

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.4 Hydromechanische Leistungsübertragung – typische Drehzahlen

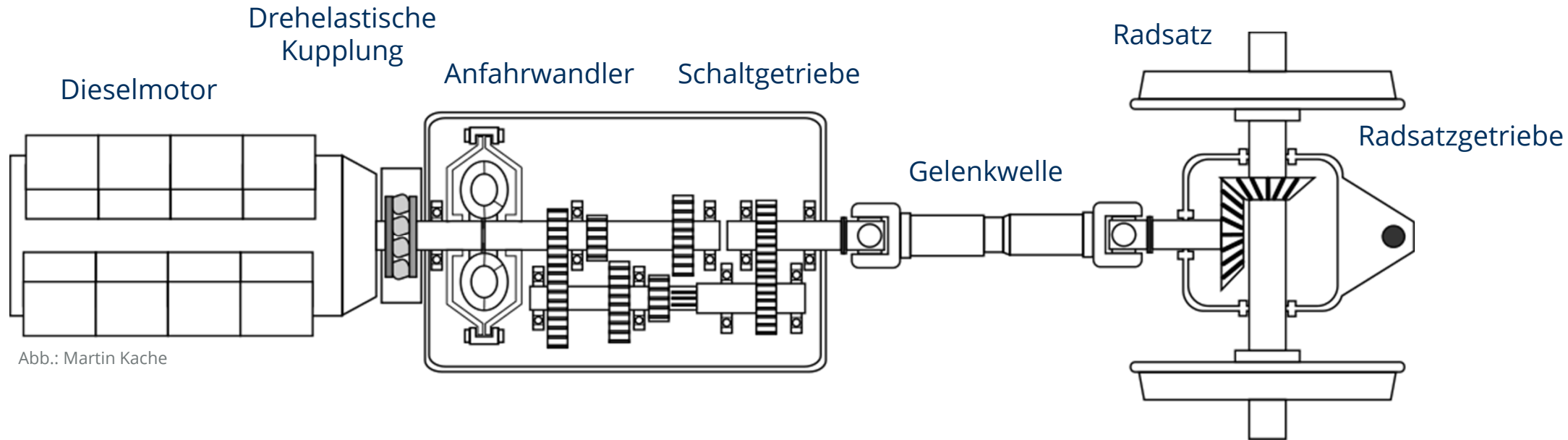


Abb.: Martin Kache

$$i_{SG} = 0,6 \dots 3,4$$

$$i_{RG} = 2,2 \dots 3,3$$

$$n_{DM} = 1100 \dots 2000 \text{ 1/min}$$

$$n_{an} = 1100 \dots 2000 \text{ 1/min}$$

$$n_{GW} = 0 \dots 3300 \text{ 1/min}$$

$$n_{an} = 0 \dots 3300 \text{ 1/min}$$

$$n_{ab} = 0 \dots 3300 \text{ 1/min}$$

$$n_{ab} = 0 \dots 1200 \text{ 1/min}$$

## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.5 Radsatzwendegetriebe (ausgeführte Beispiele)



Siemens Desiro classic  
BR 642

$$i_{RG} = 2,230$$



Stadler Regioshuttle  
BR 651

$$i_{RG} = 3,30$$



Integral S5D95

$$i_{RG} = 2,714$$



Alstom LinT 54/81  
BR 620/622

$$i_{RG} = 2,365$$

Fotos: Martin Kache

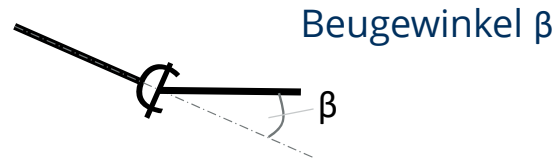
# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.6 Gelenkwellen



Foto: Martin Kache

Räumliche Anordnung beachten!



Beugewinkel in xy- und xz-Ebene zu resultierendem Beugewinkel zusammenfassen:

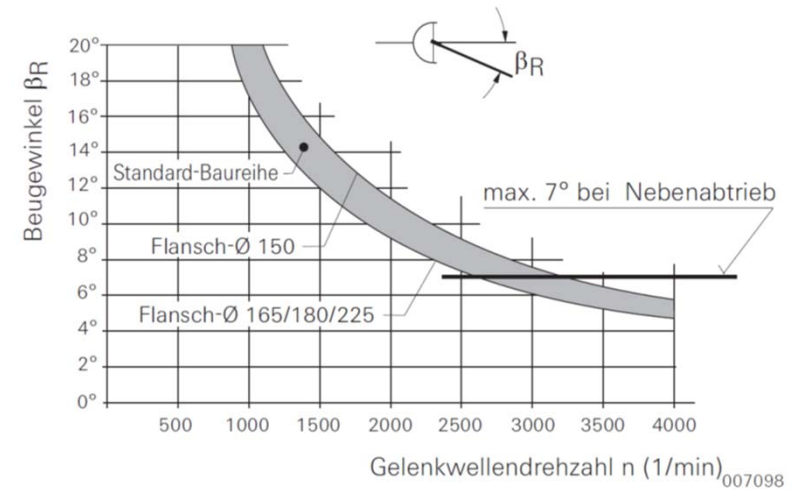
$$\tan \beta_R = \sqrt{\tan^2 \beta_{xy} + \tan^2 \beta_{xz}}$$

Verkettung von Gelenkwellen:

Ersatzbeugewinkel bestimmen

$$\beta_E = \sqrt{|\pm \beta_{R1}^2 \pm \beta_{R2}^2 \pm \dots \pm \beta_{Rn}^2|}$$

zulässige resultierende Beugewinkel:



Quelle: ZF Friedrichshafen AG

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.6 Gelenkwellen



Foto: Martin Kache

Quelle: ZF Friedrichshafen AG

Räumliche Anordnung beachten!

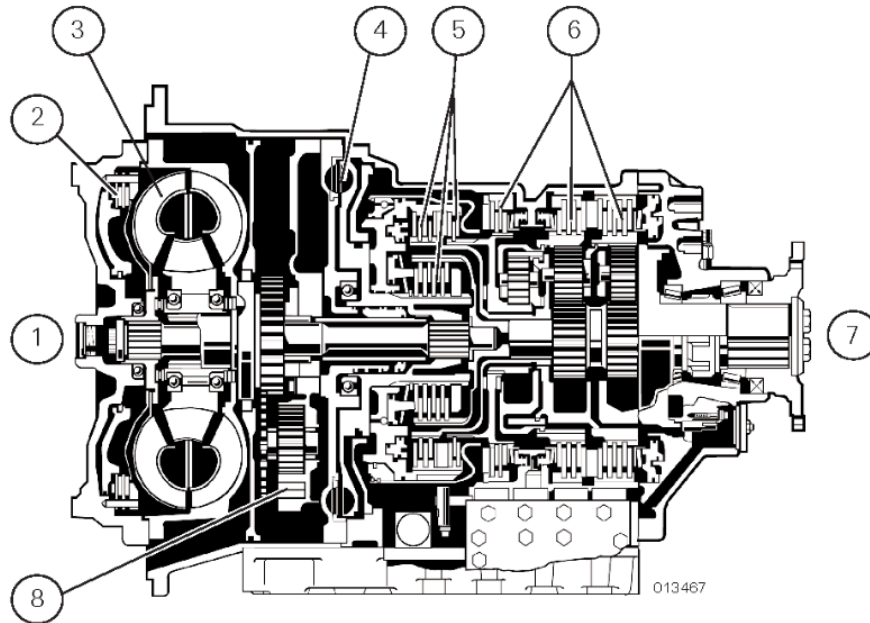
	Z-Anordnung	W-Anordnung	Winkelfehler $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$	Ersatzbeugewinkel $\beta_E = \sqrt{ \beta_1^2 + \beta_2^2 }$
<b>Beispiel 1</b> (exakte Z- bzw. W-Anordnung)			0°	0°
<b>Beispiel 2</b> (kleine Beugewinkel mit Winkelfehler)			1°	3°
<b>Beispiel 3</b> (große Beugewinkel mit Winkelfehler)			1°	5,4° Grenzwert: $\beta_E < 3^\circ$

021848

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

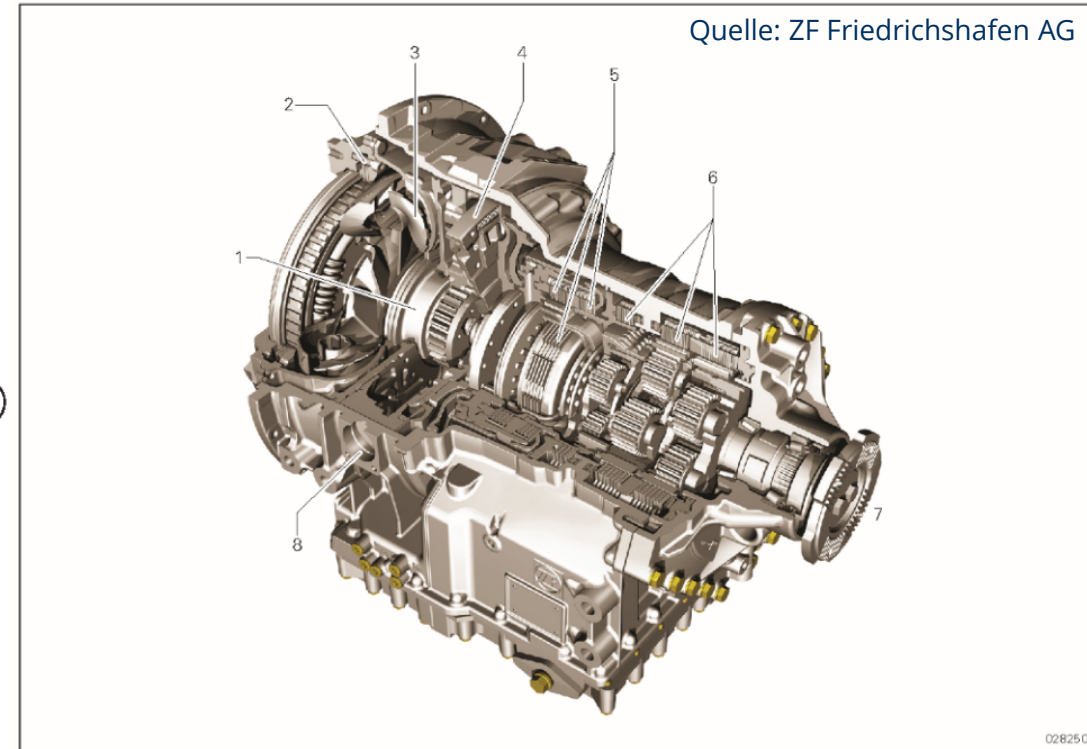
## 9.1.7 Hydromechanische Getriebe

ZF-Automatgetriebe ZF-Ecomat



- |                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| 1 Antrieb                            | 5 Kupplungen (A, B, C) |
| 2 Wandler-Überbrückungskupplung (ÜK) | 6 Bremsen (D, E, F)    |
| 3 Drehmomentwandler                  | 7 Abtrieb              |
| 4 Retarder                           | 8 Ölpumpe              |

Quelle: ZF Friedrichshafen AG



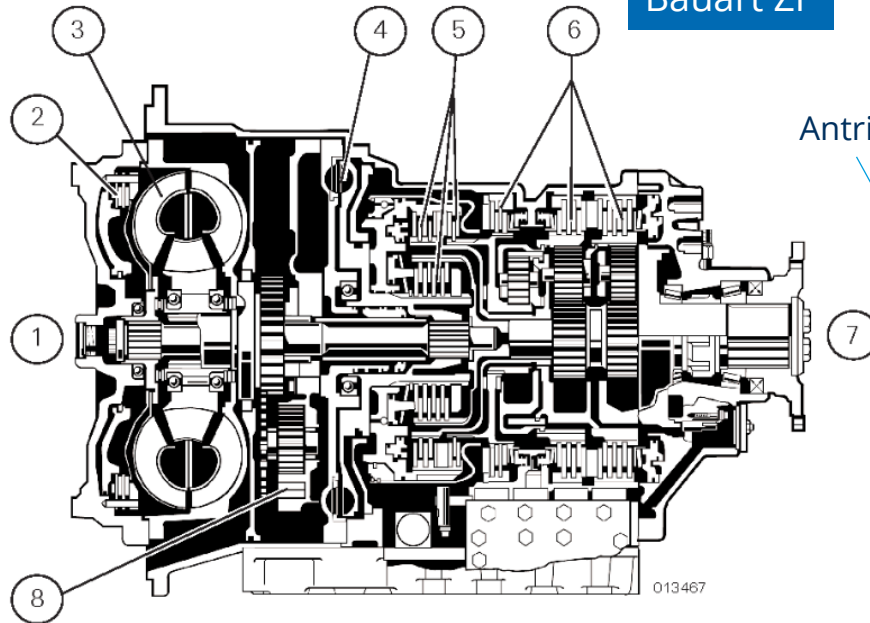
**Zeichnungserklärung**

- |                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| 1 Antrieb              | 5 Kupplungen (A, B, C) |
| 2 Torsionsdämpfer (TD) | 6 Bremsen (D, E, F)    |
| 3 Wandler              | 7 Abtrieb              |
| 4 Retarder             | 8 Ölpumpe              |

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.7 Hydromechanische Getriebe

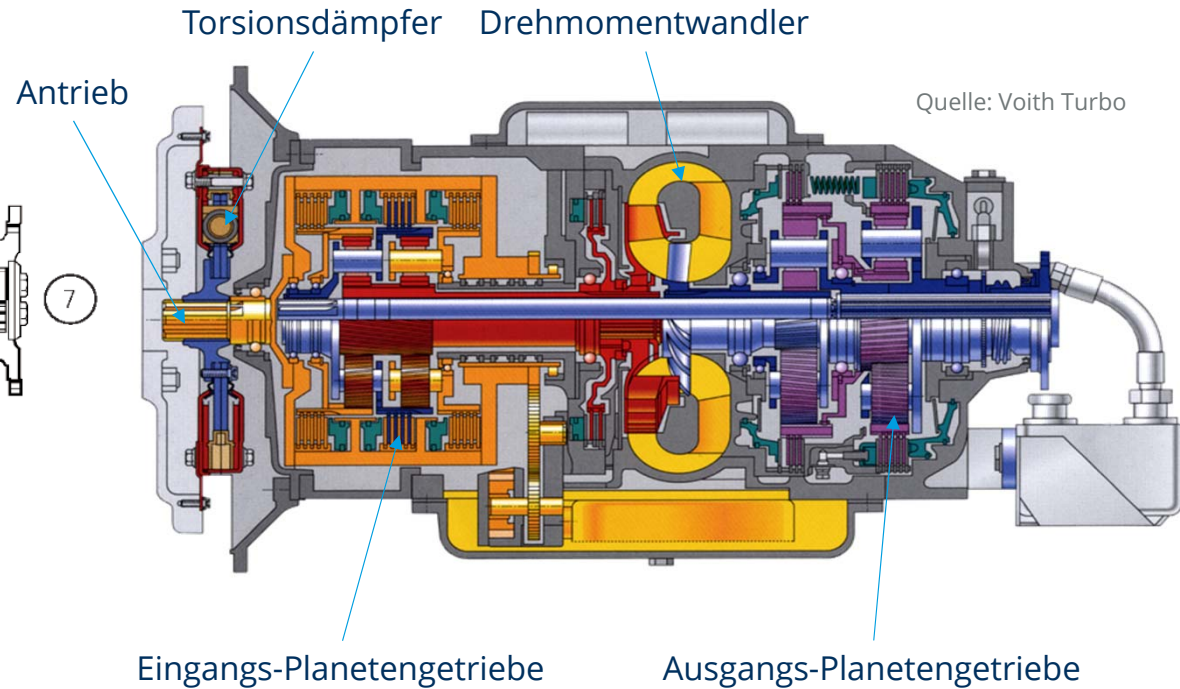
Bauart ZF



- |                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| 1 Antrieb                            | 5 Kupplungen (A, B, C) |
| 2 Wandler-Überbrückungskupplung (ÜK) | 6 Bremsen (D, E, F)    |
| 3 Drehmomentwandler                  | 7 Abtrieb              |
| 4 Retarder                           | 8 Ölpumpe              |

Quelle: ZF Friedrichshafen AG

Bauart Voith DIWA



Eingangs-Planetengetriebe

Ausgangs-Planetengetriebe

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.8 Grundlagen der mechanischen Leistungsübertragung

ausnutzbares Drehzahlgefälle:

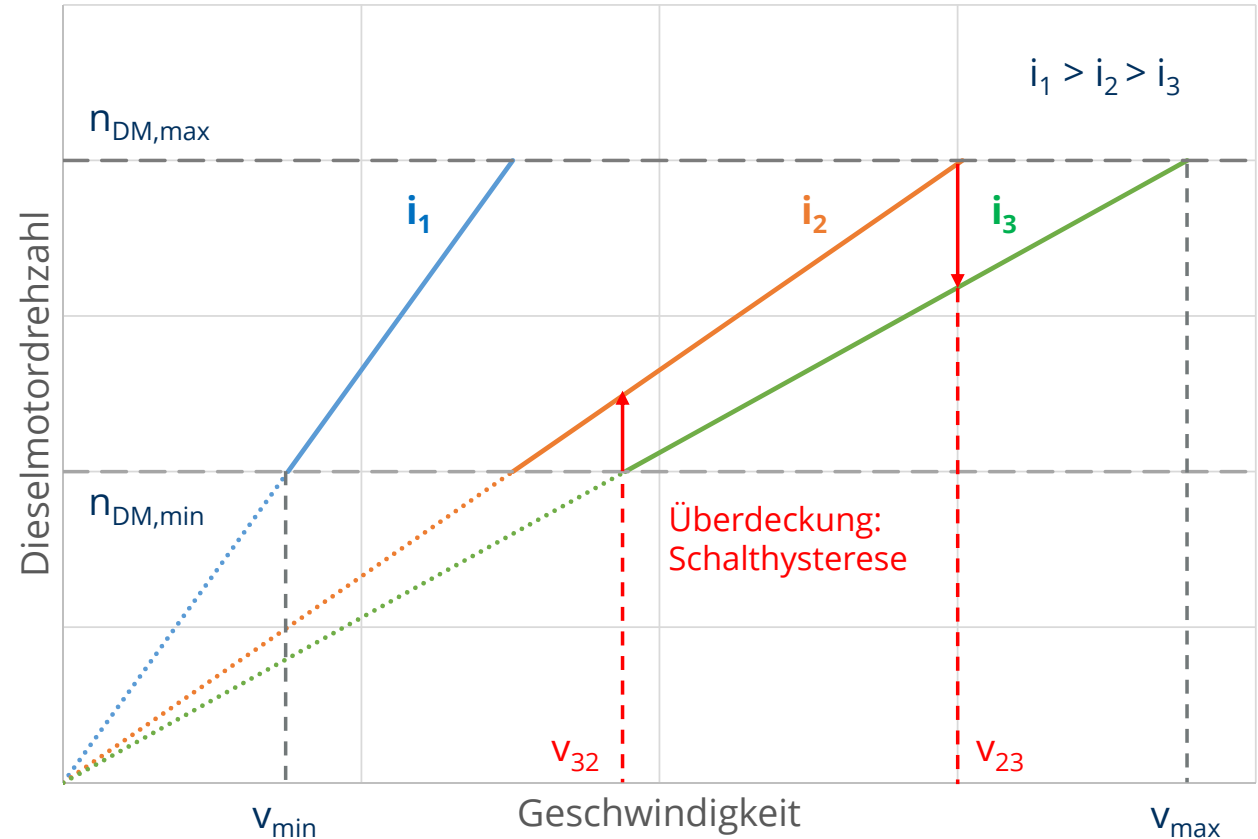
$$n_{DM,max} - n_{DM,min}$$

Getriebekonstante:

$$c_G = \left( \frac{r_T^* \cdot v_{min}}{r_T \cdot v_{max}} \right)^{\frac{1}{z_G}}$$

mit:

- $z_G$  Anzahl der Gangstufen
- $r_T$  Treibradradius (neu)
- $r_T^*$  Treibradradius (verschlissen)
- $v_{min}$  Mindestgeschwindigkeit
- $v_{max}$  Höchstgeschwindigkeit



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.8 Grundlagen der mech. Leistungsübertragung

Wahl des Übersetzungsverhältnisses im höchsten Gang:

- abhängig von vorgesehener Höchstgeschwindigkeit
- Höchstgeschwindigkeit = betriebliche  $v_{max} + 10\%$
- Abnutzung der Radreifen beachten!

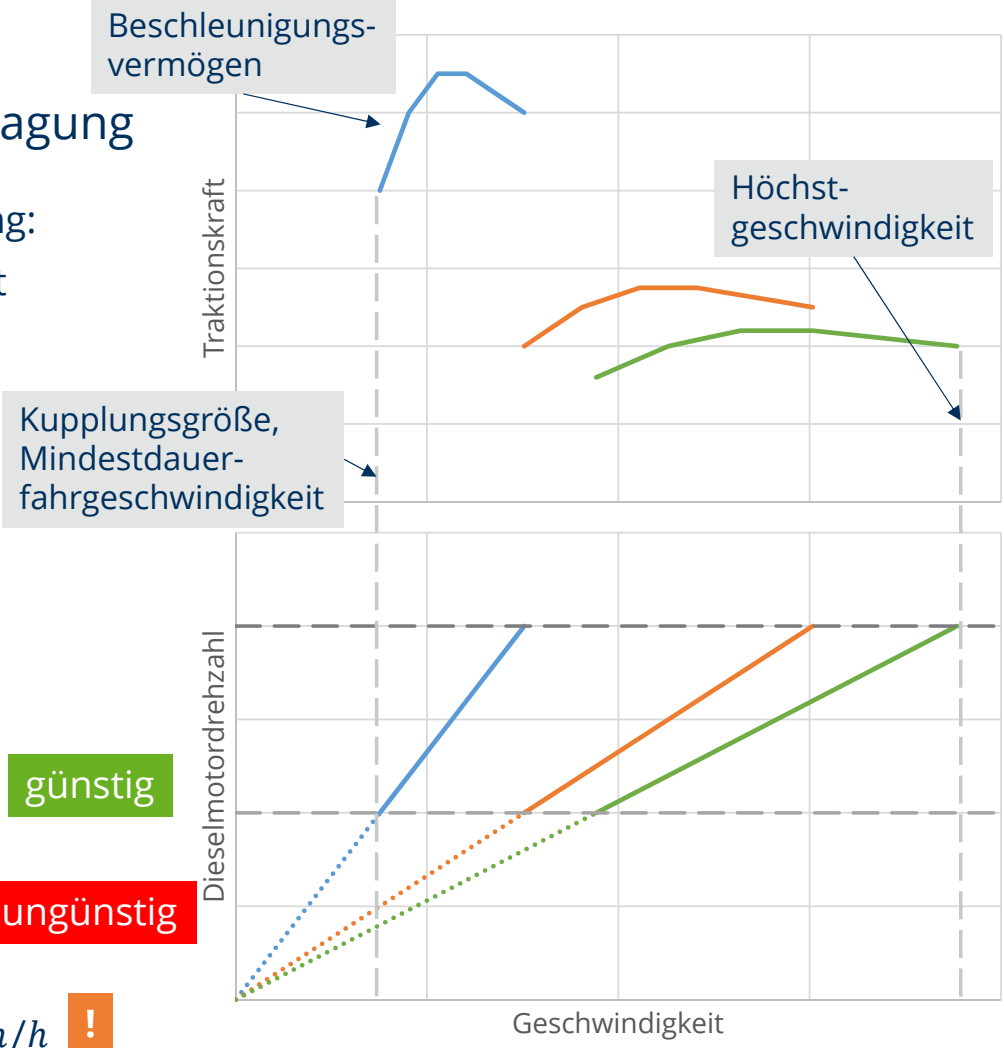
### Beispiel:

$v_{max}$	120 km/h
$n_{DM,max}$	2000 1/min
$r_T$ (neu)	0,415 m
$r_T$ (abgefahren)	0,385 m

$$i_{ges,erf} = \frac{3\pi r_T}{25 v_{max}} n_{DM,max} = \frac{3\pi \cdot 0,385}{25 \cdot 132} \cdot 2000 = 2,199$$

$$i_{ges,erf} = \frac{3\pi r_T}{25 v_{max}} n_{DM,max} = \frac{3\pi \cdot 0,415}{25 \cdot 132} \cdot 2000 = 2,370$$

$$v_{max}(i = 2,37, r_T = 0,385) = \frac{3\pi \cdot 0,385}{25 \cdot 2,37} \cdot 2000 = 122,5 \text{ km/h} \quad \text{!}$$



## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.8 Grundlagen der mechanischen Leistungsübertragung

#### Überlegungen zur Mindestgeschwindigkeit

1. schlupffreie Kupplung / Anfahrvorgang abgeschlossen
2. mindestens während des Kupplungsvorganges zu übertragene Energie:  $\frac{1}{2} \xi m v_{min}^2$
3. Beachtung „typischer“ Eisenbahngeschwindigkeiten (25 km/h (PZB), 40 km/h)
4. Beschränkung der Anfahrzeit auf erforderliches Minimum
5. Beachtung der max. übertragbaren Drehmomente und Kräfte! ( $v_{min} \Rightarrow 0, M_{max} \Rightarrow \infty$ )

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.8 Grundlagen der mechanischen Leistungsübertragung

Getriebespreizung:

$$\varphi_s = \frac{i_{max}}{i_{min}}$$

ZF Ecomat:	3,52
ZF EcoLife:	5,47

Stufensprung:

$$\varphi_j = \frac{i_j}{i_{j+1}}$$

ZF EcoLife:	$\varphi_1 = \frac{3,364}{1,909} = 1,762$
	$\varphi_2 = \frac{1,909}{1,421} = 1,343$
	$\varphi_3 = \frac{1,421}{1,000} = 1,421$
	$\varphi_4 = \frac{1,000}{0,720} = 1,389$
	$\varphi_5 = \frac{0,720}{0,615} = 1,171$

## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.8 Grundlagen der mechanischen Leistungsübertragung

Auslegung nach **geometrischer Reihe**:  $\varphi_j = const.$

„konstante Stufensprünge“

$$i_j = \frac{i_{min}}{c_G^{z_G - j}}$$

Auslegung mit **konstanter Progression**:

Progressionsfaktor  $\longrightarrow \psi = \frac{\varphi_j}{\varphi_{j+1}} = const.$

„konstantes Verhältnis benachbarter Stufensprünge“

$$\varphi_j = \frac{z_G^{-1} \varphi_s}{\sqrt{\psi^{0,5 \cdot [j(j-1) - (z_G - j)(z_G - j - 1)]}}}$$

## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.9 Mechanische Leistungsübertragung (Auslegung)

Auslegung nach geometrischer Reihe :  $\varphi_j = \mathbf{const.}$  „konstante Stufensprünge“

$$i_j = \frac{i_n}{c_G^{n-j}}$$

#### Beispiel Auslegung nach geometrischer Reihe:

$n_{DM,min}$	= 1000 1/min
$n_{DM,max}$	= 2000 1/min
$r_T^*$	= 0,40 m
$r_T$	= 0,37 m
$v_{min}$	= 15 km/h
$v_{max}$	= 120 km/h (+10%)
$i_{RG}$	= 3,2
Anzahl Gänge	= 6

$$c_G = \left( \frac{r_T^* \cdot v_{min}}{r_T \cdot v_{max}} \right)^{\frac{1}{Z_G}} = \left( \frac{0,37 \cdot 15}{0,40 \cdot 120} \right)^{\frac{1}{6}} = 0,697978$$

$$i_6 = \frac{3\pi r_T}{25 \cdot i_{RG} \cdot v_{max}} n_{DM,max} = \frac{3\pi \cdot 0,37}{25 \cdot 3,2 \cdot 132} \cdot 2000 = \mathbf{0,660}$$

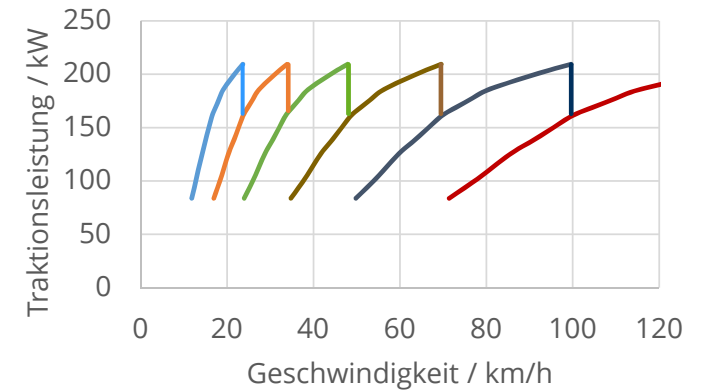
$$i_5 = \frac{i_6}{c_G^{6-5}} = \frac{0,66}{0,697978} = \mathbf{0,946} \quad i_4 = \frac{i_6}{c_G^{6-4}} = \frac{0,66}{0,697978^2} = \mathbf{1,355}$$

$$i_3 = \frac{i_6}{c_G^{6-3}} = \frac{0,66}{0,697978^3} = \mathbf{1,966} \quad i_2 = \frac{i_6}{c_G^{6-2}} = \frac{0,66}{0,697978^4} = \mathbf{2,781}$$

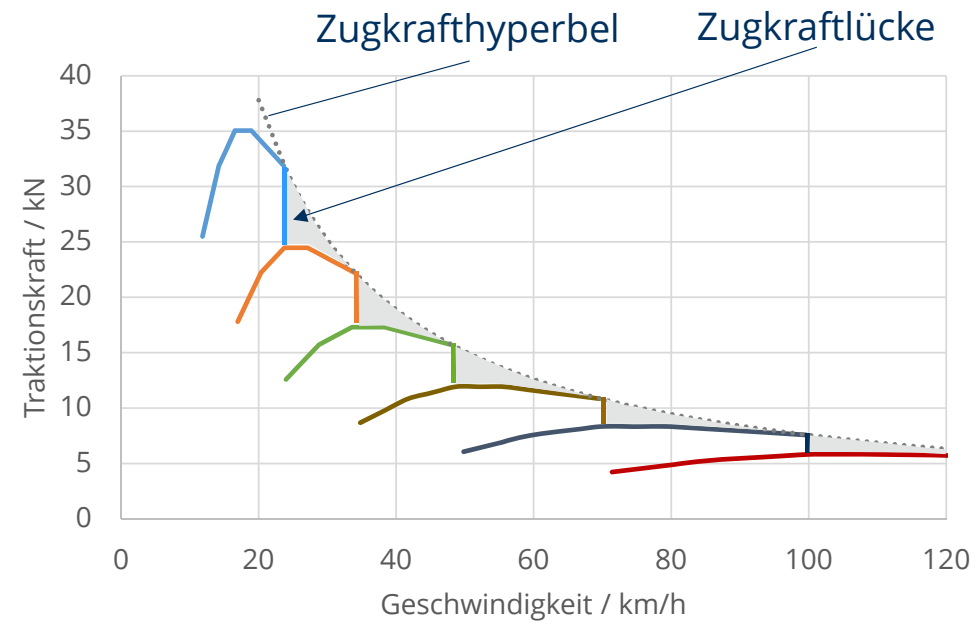
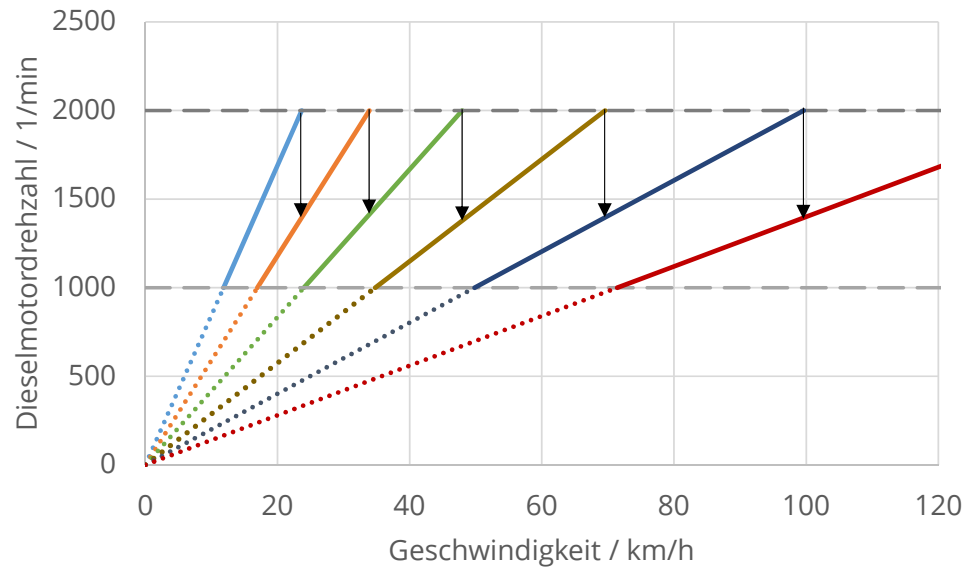
$$i_1 = \frac{i_6}{c_G^{6-1}} = \frac{0,66}{0,697978^5} = \mathbf{3,984}$$

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.9 Mechanische Leistungsübertragung (Auslegung)



Beispiel Auslegung nach geometrischer Reihe:



## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.9 Mechanische Leistungsübertragung (Auslegung)

Auslegung mit konstanter Progression:

$$\varphi_j = \sqrt[z_G - 1]{\frac{\varphi_s}{\psi^{0,5 \cdot [j(j-1) - (z_G - j)(z_G - j - 1)]}}}$$

#### Beispiel Auslegung mit konstanter Progression:

$n_{DM,min}$	= 1000 1/min
$n_{DM,max}$	= 2000 1/min
$r_T$	= 0,40 m
$r_T^*$	= 0,37 m
$v_{min}$	= 15 km/h
$v_{max}$	= 120 km/h (+10%)
$i_{RG}$	= 3,2
$z_G$ (Anz. Gänge)	= 6
$i_6$	= 0,66

$$\psi = 1,1$$

$$\varphi_s = \frac{3,984}{0,66} = 6,03636$$

$$\varphi_j = \sqrt[z_G - 1]{\frac{\varphi_s}{\psi^{0,5 \cdot [j(j-1) - (z_G - j)(z_G - j - 1)]}}} = \sqrt[5]{\frac{6,03636}{1,1^{0,5 \cdot [j(j-1) - (6-j)(5-j)]}}}$$

$$\varphi_1 = \sqrt[5]{\frac{6,03636}{1,1^{0,5 \cdot [1(1-1) - (6-1)(5-1)]}}} = \sqrt[5]{\frac{6,03636}{1,1^{-10}}} = 1,7336$$

$$\varphi_2 = \sqrt[5]{\frac{6,03636}{1,1^{-5}}} = 1,5760 \quad \varphi_3 = \sqrt[5]{\frac{6,03636}{1,1^0}} = 1,4327$$

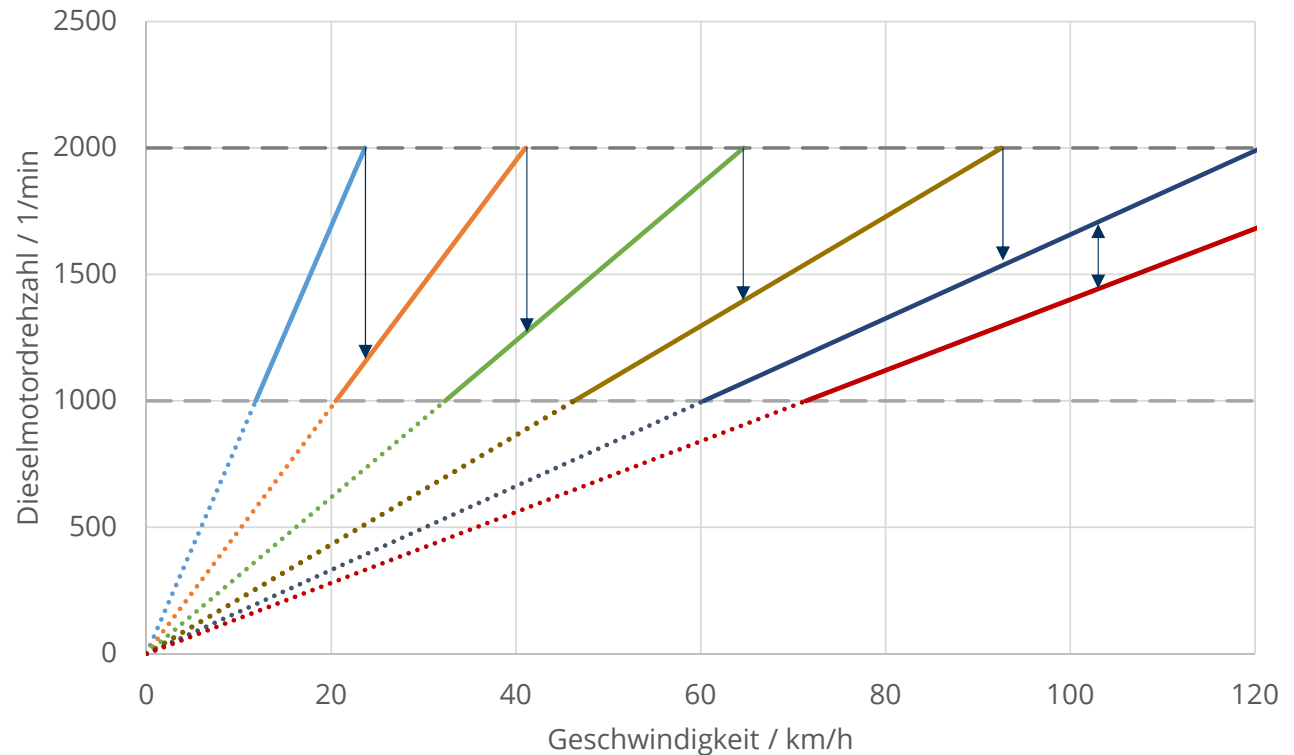
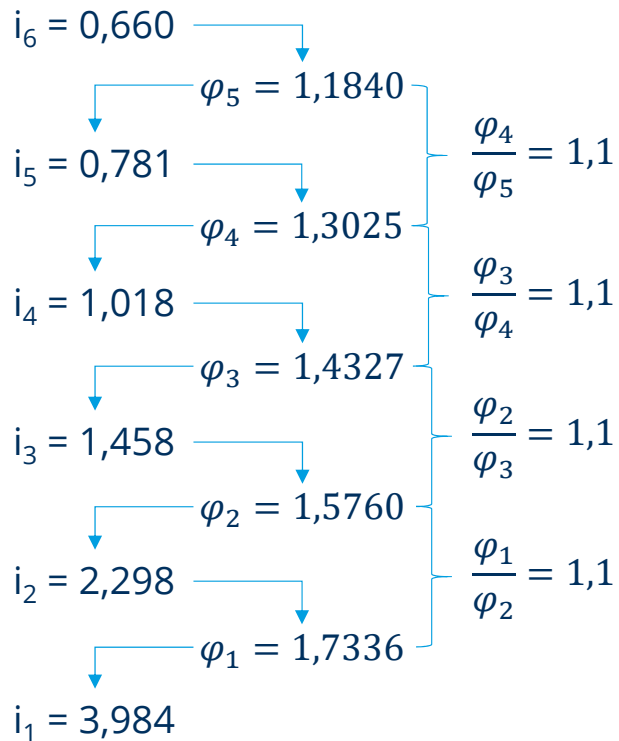
$$\varphi_4 = \sqrt[5]{\frac{6,03636}{1,1^5}} = 1,3025 \quad \varphi_5 = \sqrt[5]{\frac{6,03636}{1,1^{10}}} = 1,1840$$

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.9 Mechanische Leistungsübertragung (Auslegung)

Beispiel Auslegung mit konstanter Progression:

$$i_j = \varphi_j \cdot i_{j+1}$$

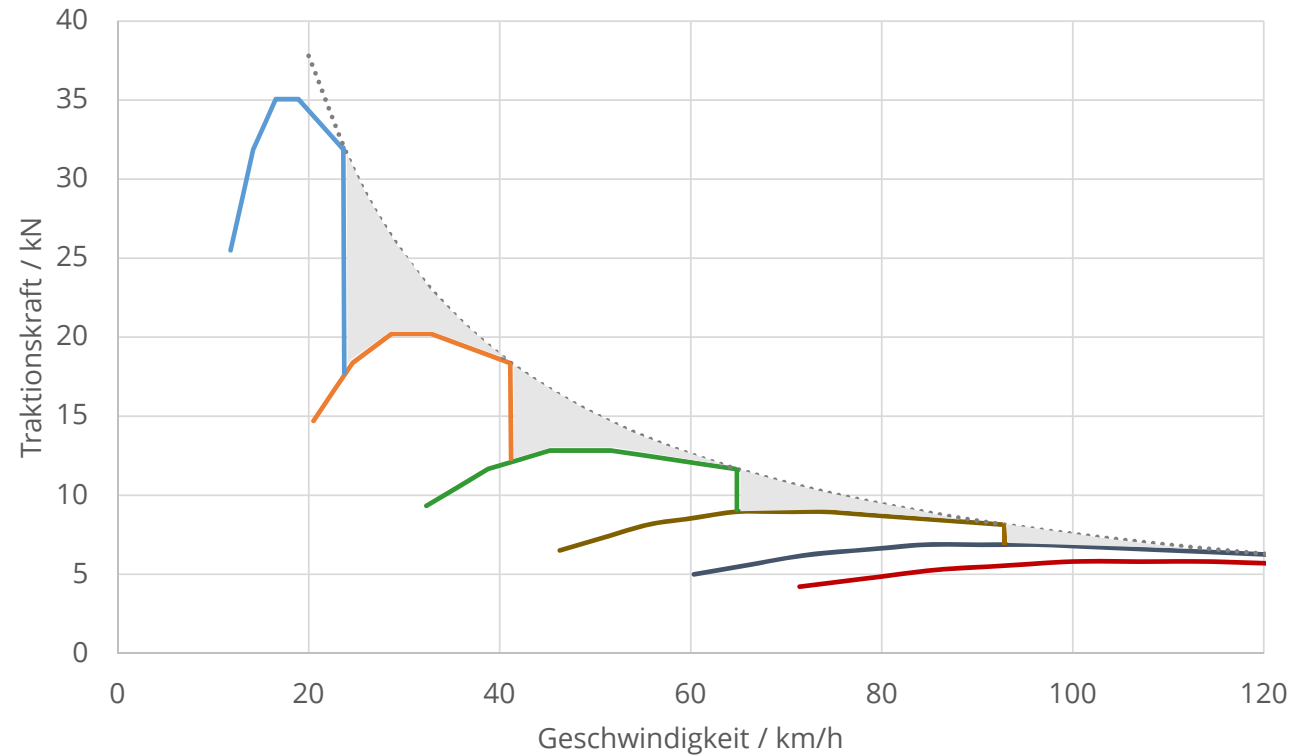
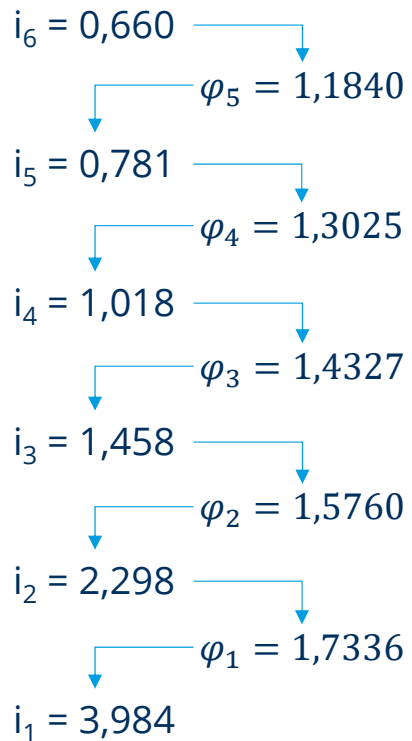


# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.9 Mechanische Leistungsübertragung (Auslegung)

Beispiel Auslegung mit konstanter Progression:

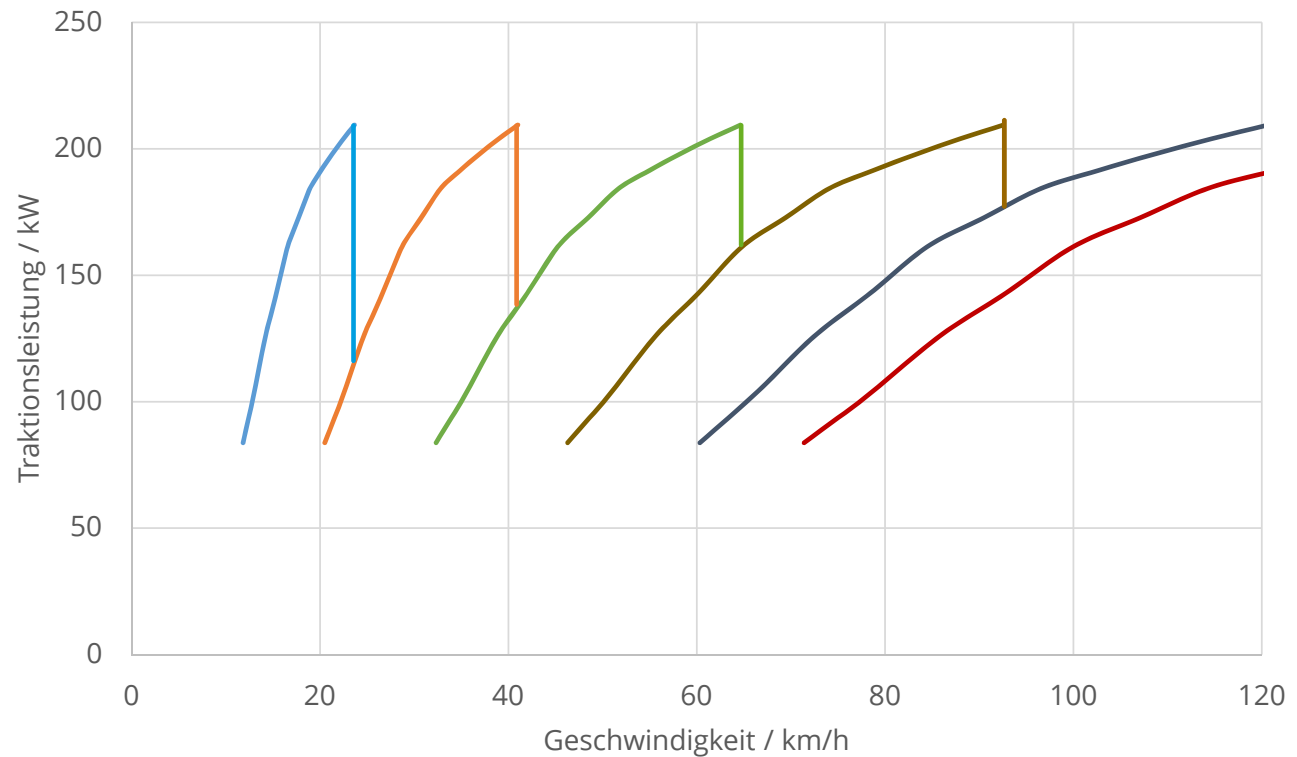
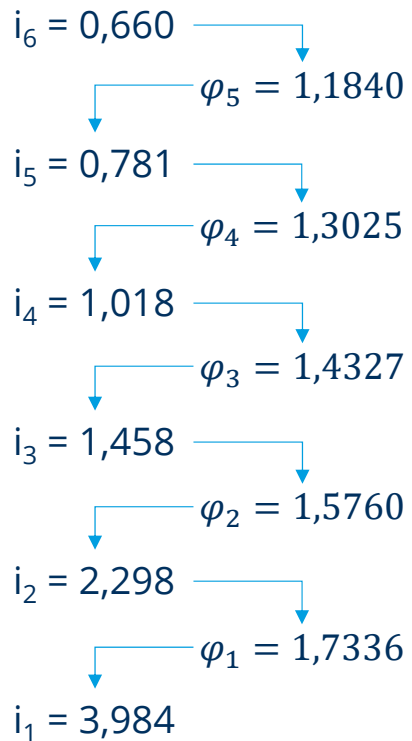
$$i_j = \varphi_j \cdot i_{j+1}$$



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.9 Mechanische Leistungsübertragung (Auslegung)

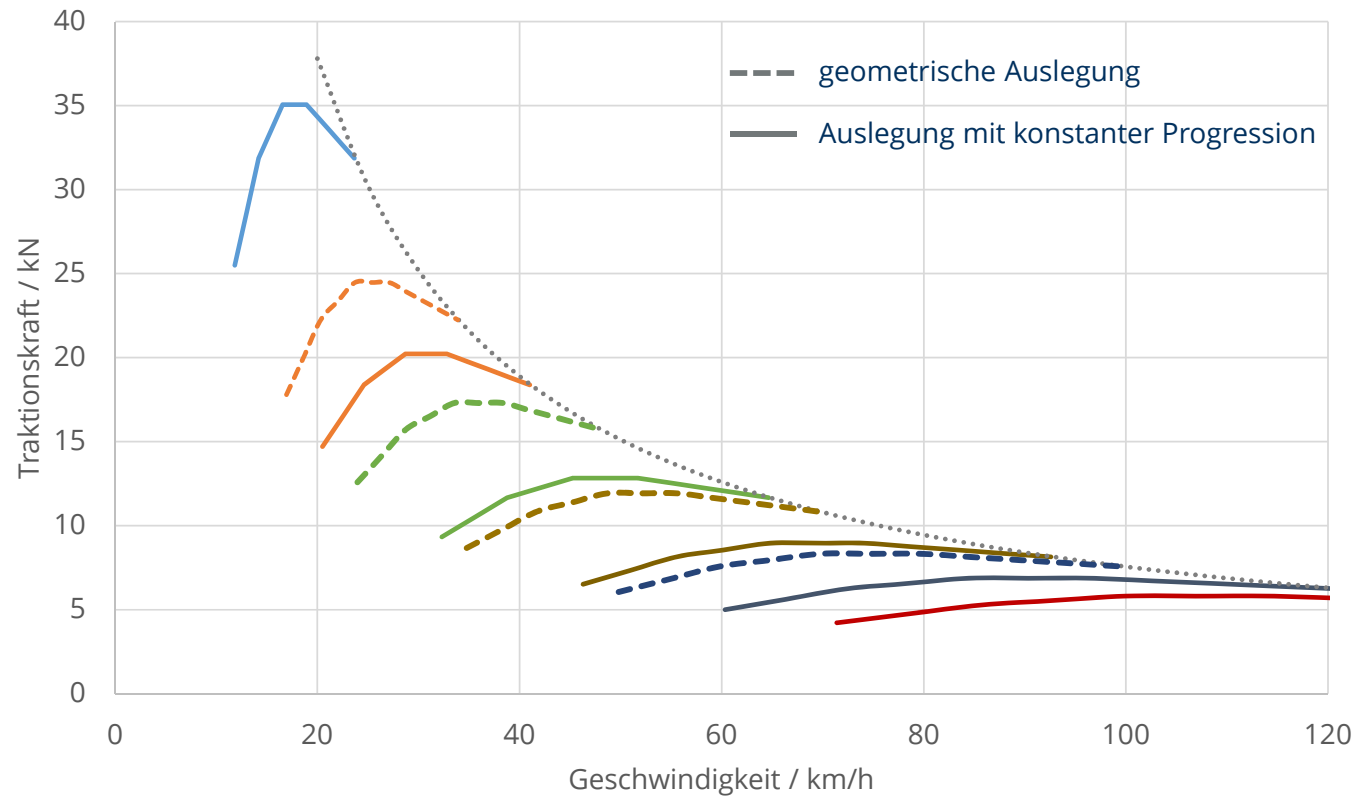
Beispiel Auslegung mit konstanter Progression:  $i_j = \varphi_j \cdot i_{j+1}$



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.9 Mechanische Leistungsübertragung (Auslegung)

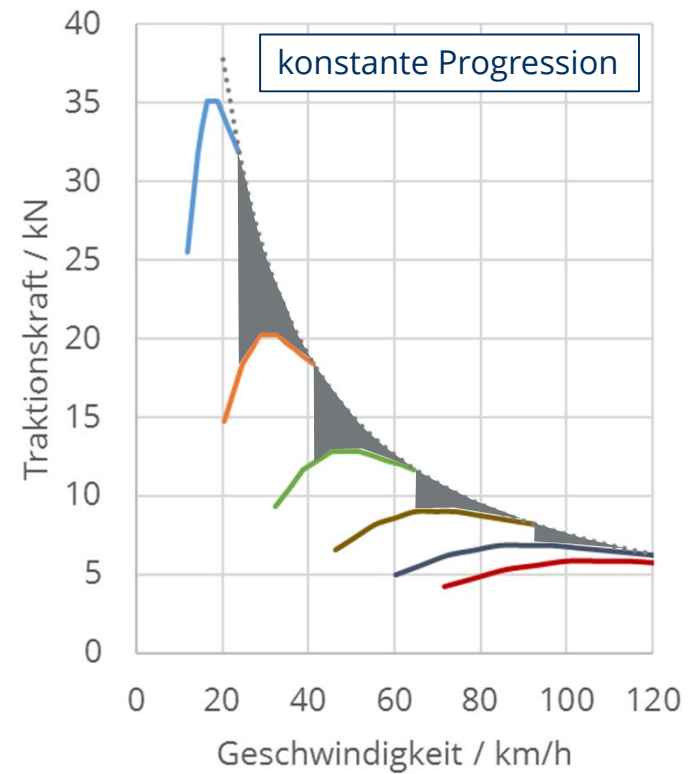
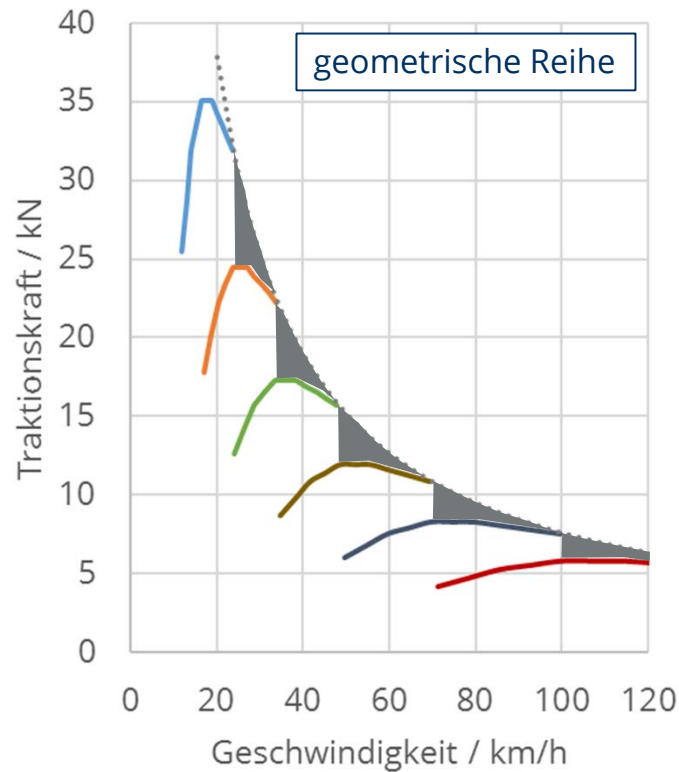
### Vergleich der Auslegungsstrategien



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.9 Mechanische Leistungsübertragung (Auslegung)

### Vergleich der Auslegungsstrategien



## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.10 Beispiele ausgeführter (hydro-)mechanischer Getriebe

Bezeichnung	1. Gang	2. Gang	3. Gang	4. Gang	5. Gang	6. Gang
ZF-EcoLife Rail	3,364	1,909	1,421	1,000	0,720	0,615
ZF-Ecomat Rail	2,810	1,840	1,360	1,00	0,800	-

Welche Spreizung weisen die Getriebe auf?

**EcoLife: 5,47**

**Ecomat: 3,51**

Liegt eine geometrische Getriebeauslegung vor?

**nein**

**nein**

Falls nein: Liegt eine Auslegung mit konstanter Progression vor?

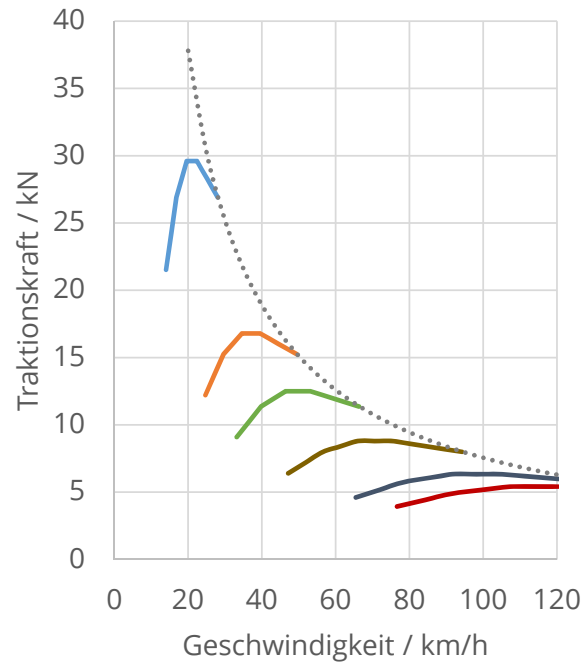
**nein**

**nein**

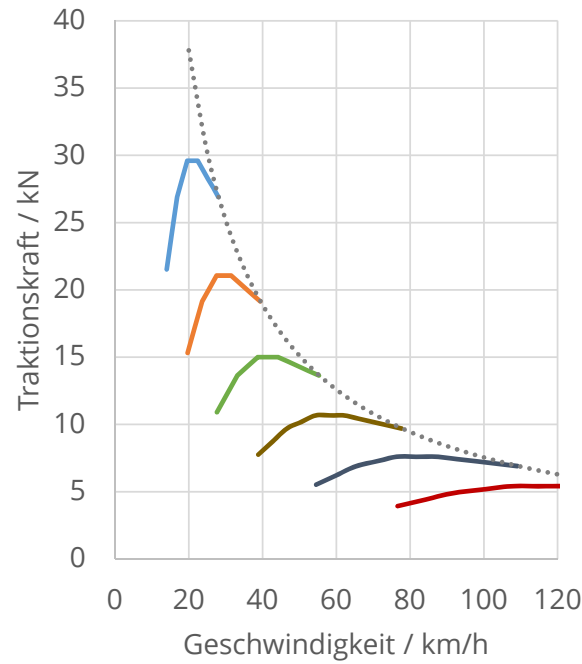
# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.10 Beispiele ausgeführter (hydro-)mechanischer Getriebe

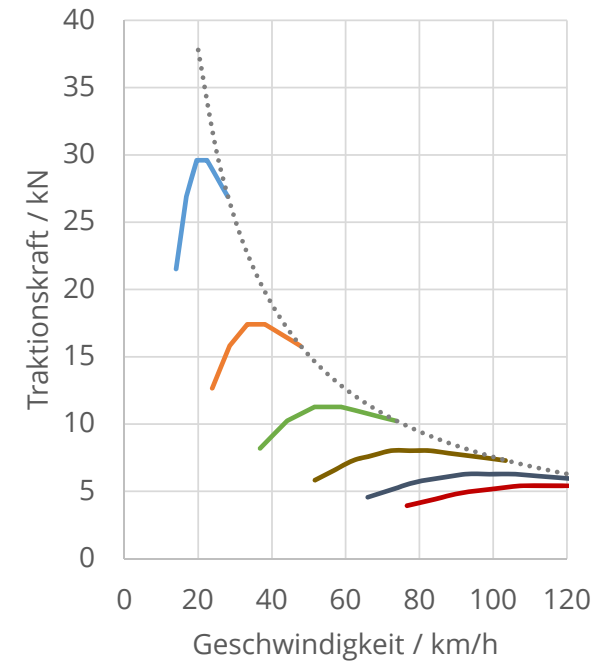
**theoretische Berechnungen**, basierend auf gleicher Spreizung



ZF EcoLife (real)



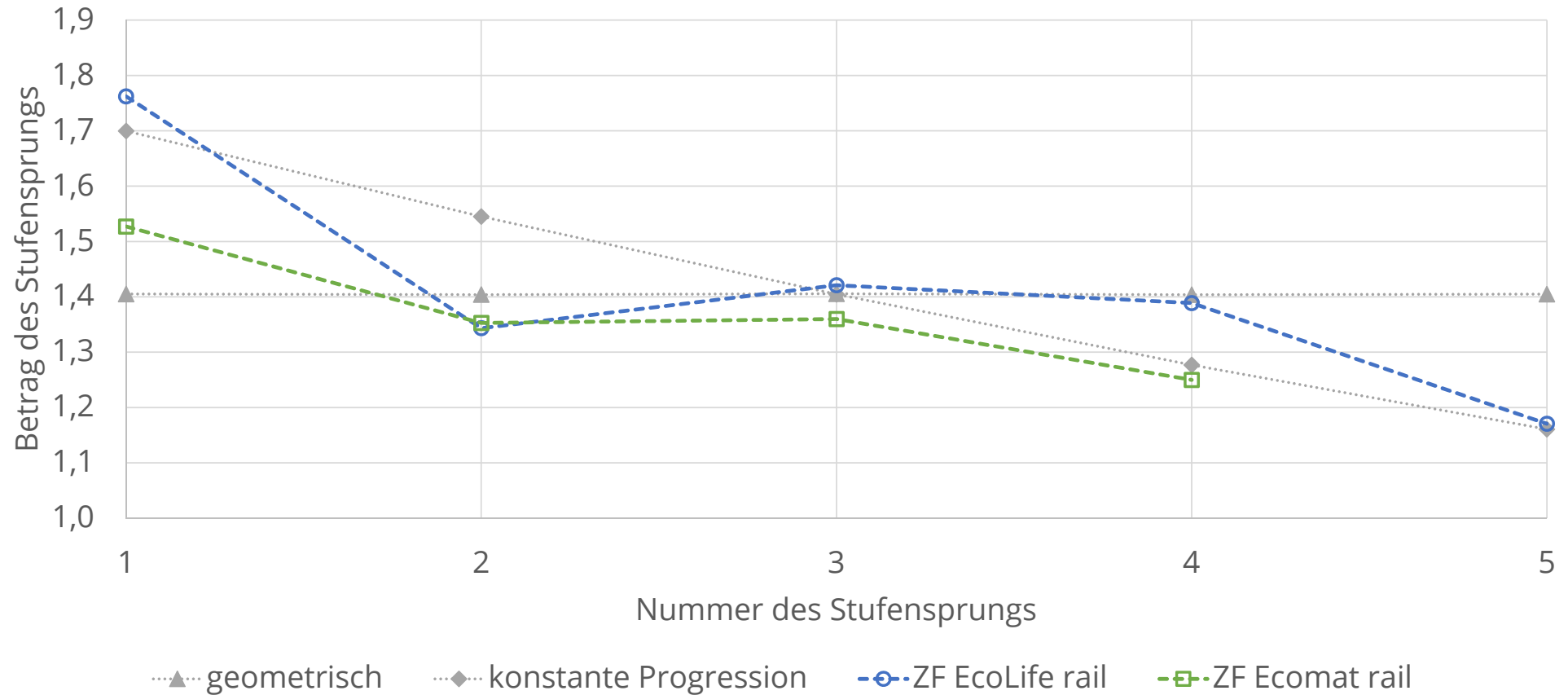
ZF EcoLife (geometrisch)



ZF EcoLife (konst. Progr.)

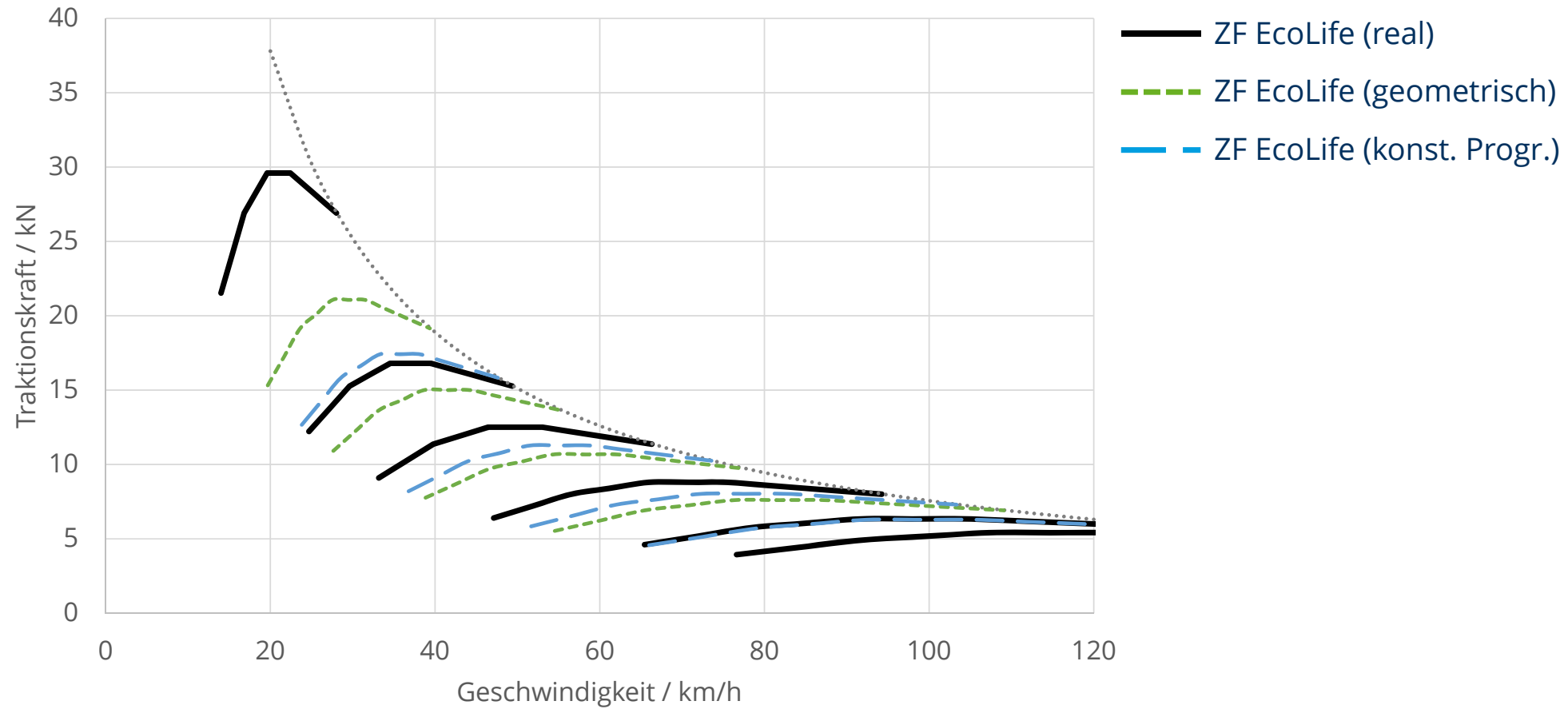
# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.10 Beispiele ausgeführter (hydro-)mechanischer Getriebe



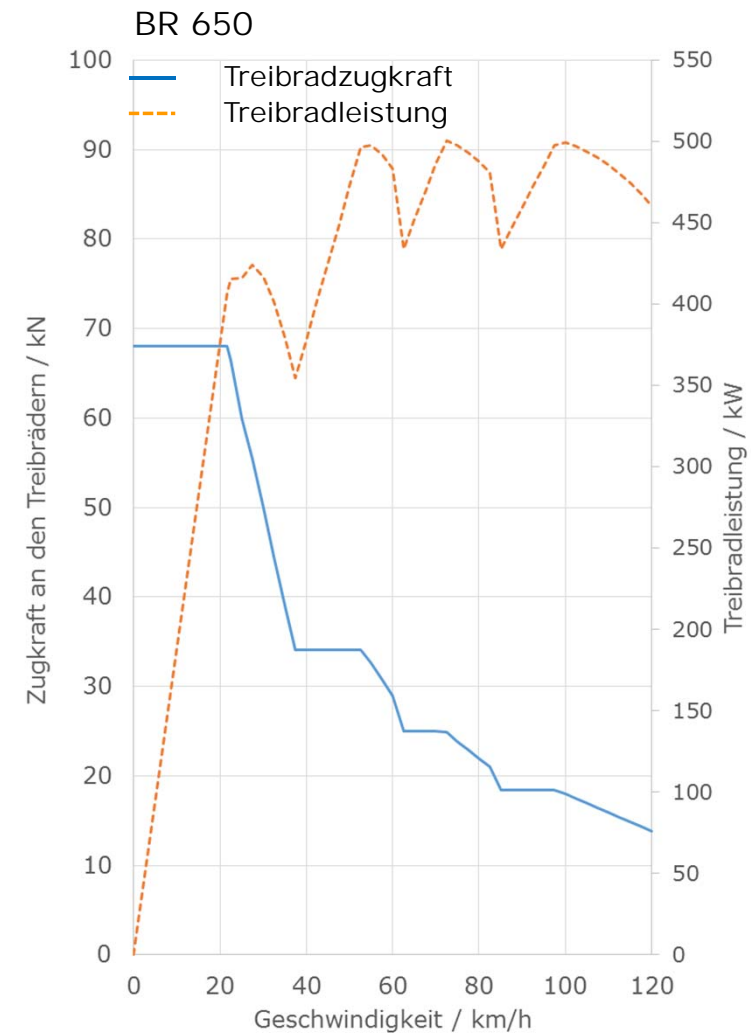
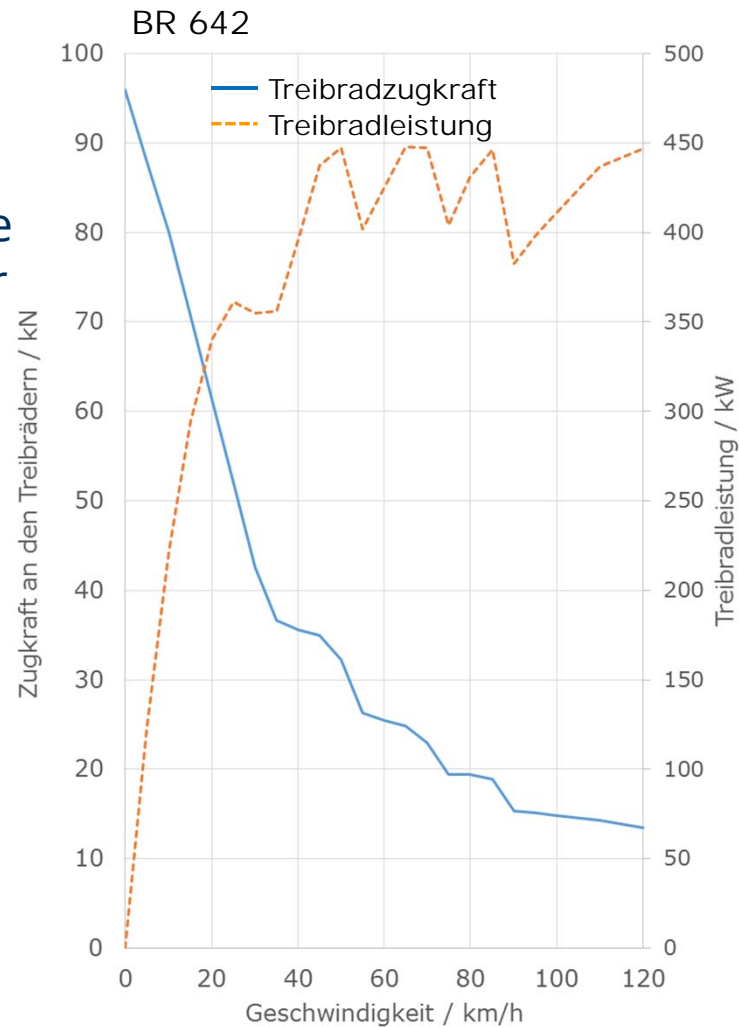
# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.10 Beispiele ausgeführter (hydro-)mechanischer Getriebe



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.11 Beispiele ausgeführter Fahrzeuge mit hydromechanischer Leistungsübertragung



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.11 Beispiele ausgeführter Fahrzeuge mit hydromechanischer Leistungsübertragung

### ALSTOM Coradia Lint 54

#### MTU 6H1800R85L

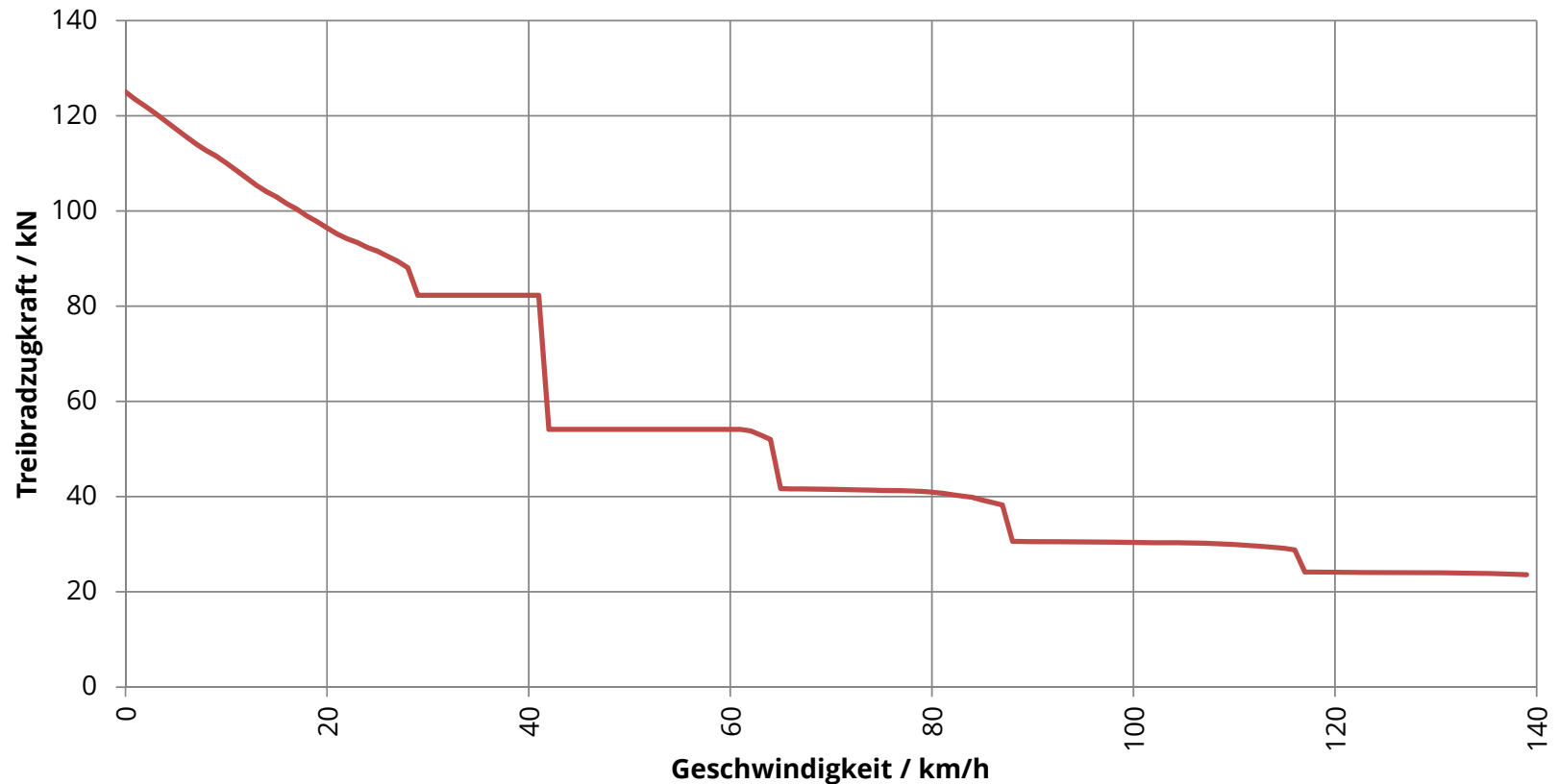
390 kW @ 1800 1/min  
2150 Nm @ 1300 1/min  
600...2000 1/min

#### ZF 5HP902

- 1. Gang:  $i = 2,81$
- 2. Gang:  $i = 1,84$
- 3. Gang:  $i = 1,36$
- 4. Gang:  $i = 1,00$
- 5. Gang:  $i = 0,80$

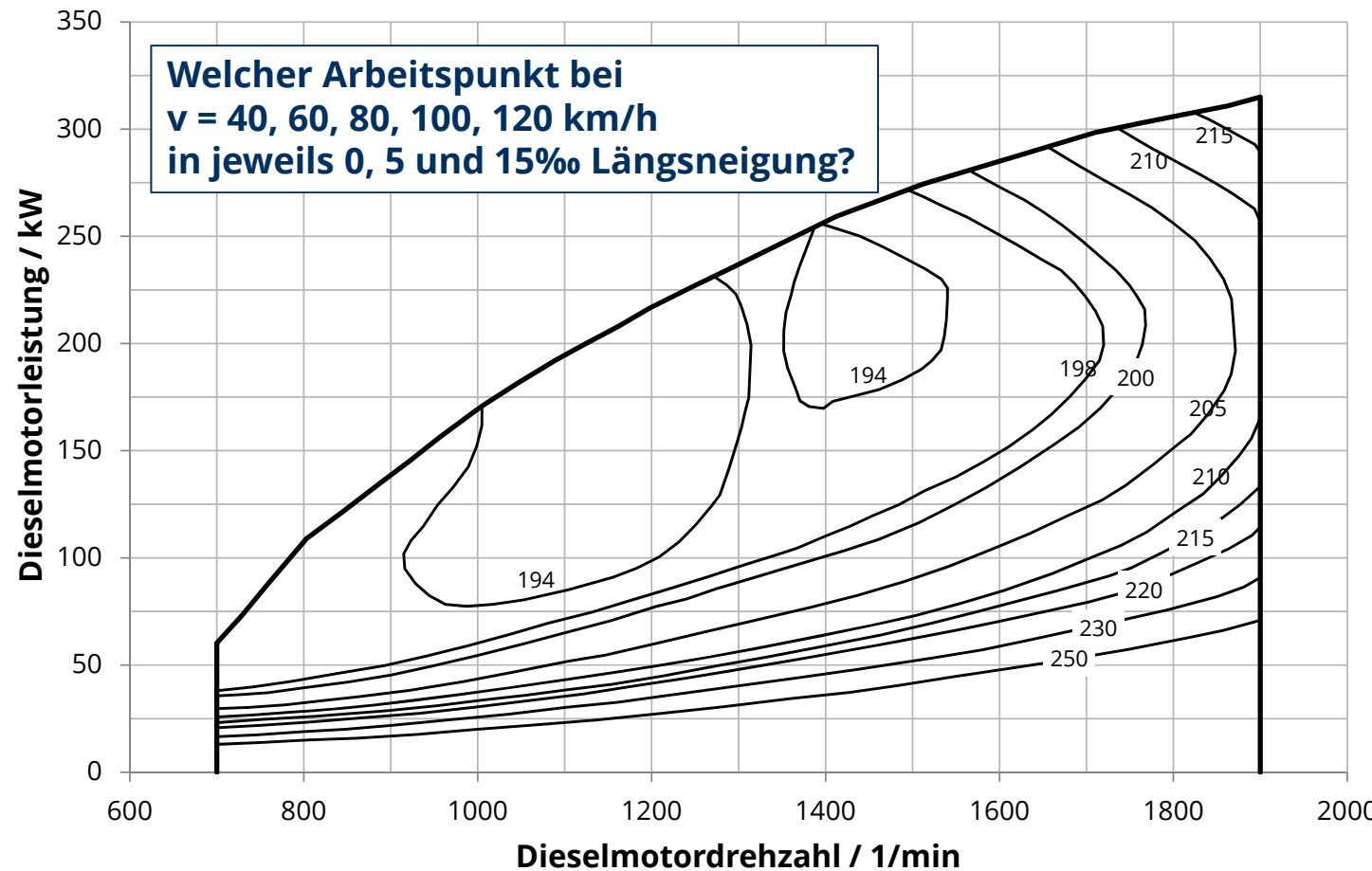
$\eta_{\text{mech}} = 0,89...0,95$

oberer Wert: Volllast  
unterer Wert: Teillast



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.12 Zusammenspiel von Dieselmotor und Mechanischer Leistungsübertragung



### Beispieltriebswagen

2 Antriebsanlagen

Masse = 80 t

Radsatzradius = 0,37 m

Übersetzung Radsatzgetriebe = 2,23

Übersetzung 1. Gang = 2,81

Übersetzung 2. Gang = 1,84

Übersetzung 3. Gang = 1,36

Übersetzung 4. Gang = 1,00

Übersetzung 5. Gang = 0,81

Gesamtwirkungsgrad: 0,89

Hilfsleistungsfaktor = 0,06

Komfortleistungsbedarf = 25 kW (Fzg.)

Fahrzeugwiderstandsgleichung:

$$F_{WFT} = 0,79 + 0,79 \cdot \frac{v}{100} + 2,9 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$$

## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.12 Zusammenspiel von Dieselmotor und Mechanischer Leistungsübertragung

#### Schritt 1 – Bestimmung der erforderlichen Treibradzugkraft

v / km/h	i / Promille	F <sub>WFT</sub> / kN	F <sub>WS</sub> / kN	F <sub>T,erf</sub> / kN
40	0	2,0	0,0	<b>2,0</b>
40	5	2,0	3,9	<b>5,9</b>
40	15	2,0	11,8	<b>13,8</b>
60	0	2,9	0,0	<b>2,9</b>
60	5	2,9	3,9	<b>6,8</b>
60	15	2,9	11,8	<b>14,7</b>
80	0	4,0	0,0	<b>4,0</b>
80	5	4,0	3,9	<b>8,0</b>
80	15	4,0	11,8	<b>15,8</b>
100	0	5,4	0,0	<b>5,4</b>
100	5	5,4	3,9	<b>9,3</b>
100	15	5,4	11,8	<b>17,2</b>
120	0	7,0	0,0	<b>7,0</b>
120	5	7,0	3,9	<b>10,9</b>
120	15	7,0	11,8	<b>18,8</b>

$$F_{T,erf} = F_{WFT} + F_{WS}$$

$$F_{T,erf} = 0,79 + 0,79 \frac{v}{100} + 2,9 \left( \frac{v + 15}{100} \right)^2 + mgi$$

v            in km/h  
m            in t  
i            in ‰  
F<sub>T</sub>        in kN

## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.12 Zusammenspiel von Dieselmotor und Mechanischer Leistungsübertragung

#### Schritt 2 – Bestimmung des erforderlichen Dieselmotor-Drehmomentes

v / km/h	i / Promille	F <sub>WFT</sub> / kN	F <sub>WS</sub> / kN	F <sub>T,erf</sub> / kN	M <sub>DM</sub> / Nm
40	0	2,0	0,0	2,0	<b>70</b>
40	5	2,0	3,9	5,9	<b>208</b>
40	15	2,0	11,8	13,8	<b>485</b>
60	0	2,9	0,0	2,9	<b>156</b>
60	5	2,9	3,9	6,8	<b>368</b>
60	15	2,9	11,8	14,7	<b>790</b>
80	0	4,0	0,0	4,0	<b>295</b>
80	5	4,0	3,9	8,0	<b>581</b>
80	15	4,0	11,8	15,8	<b>1153</b>
100	0	5,4	0,0	5,4	<b>537</b>
100	5	5,4	3,9	9,3	<b>926</b>
100	15	5,4	11,8	17,2	<b>1704</b>
120	0	7,0	0,0	7,0	<b>871</b>
120	5	7,0	3,9	10,9	<b>1357</b>
120	15	7,0	11,8	18,8	<b>2330</b>

$$M_{DM,erf} = \frac{F_{T,erf} \cdot r_T}{\eta_{ges} \cdot i_{SG} \cdot i_{RG} \cdot (1 - \Psi)}$$

Zuordnung v und i<sub>SG</sub>:

v = 40 km/h	i <sub>SG,1</sub> = 2,81
v = 60 km/h	i <sub>SG,2</sub> = 1,84
v = 80 km/h	i <sub>SG,3</sub> = 1,36
v = 100 km/h	i <sub>SG,4</sub> = 1,00
v = 120 km/h	i <sub>SG,5</sub> = 0,80

## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.12 Zusammenspiel von Dieselmotor und Mechanischer Leistungsübertragung

#### Schritt 3 – Bestimmung der zugeordneten Dieselmotor-Drehzahl

v / km/h	i / Promille	F <sub>WFT</sub> / kN	F <sub>WS</sub> / kN	F <sub>T,erf</sub> / kN	M <sub>DM</sub> / Nm	n <sub>DM</sub> / 1/min
40	0	2,0	0,0	2,0	70	<b>1797</b>
40	5	2,0	3,9	5,9	208	<b>1797</b>
40	15	2,0	11,8	13,8	485	<b>1797</b>
60	0	2,9	0,0	2,9	156	<b>1765</b>
60	5	2,9	3,9	6,8	368	<b>1765</b>
60	15	2,9	11,8	14,7	790	<b>1765</b>
80	0	4,0	0,0	4,0	295	<b>1739</b>
80	5	4,0	3,9	8,0	581	<b>1739</b>
80	15	4,0	11,8	15,8	1153	<b>1739</b>
100	0	5,4	0,0	5,4	537	<b>1599</b>
100	5	5,4	3,9	9,3	926	<b>1599</b>
100	15	5,4	11,8	17,2	1704	<b>1599</b>
120	0	7,0	0,0	7,0	871	<b>1535</b>
120	5	7,0	3,9	10,9	1357	<b>1535</b>
120	15	7,0	11,8	18,8	2330	<b>1535</b>

$$n_{DM} = \frac{25 \cdot i_{SG} \cdot i_{RG} \cdot v}{3\pi \cdot r_T}$$

Zuordnung v und i<sub>SG</sub> :

v = 40 km/h	i <sub>SG,1</sub> = 2,81
v = 60 km/h	i <sub>SG,2</sub> = 1,84
v = 80 km/h	i <sub>SG,3</sub> = 1,36
v = 100 km/h	i <sub>SG,4</sub> = 1,00
v = 120 km/h	i <sub>SG,5</sub> = 0,80

## 9. Leistungsübertragungsanlagen

### 9.1.12 Zusammenspiel von Dieselmotor und Mechanischer Leistungsübertragung

#### Schritt 4 – Bestimmung der erforderlichen Dieselmotorleistung

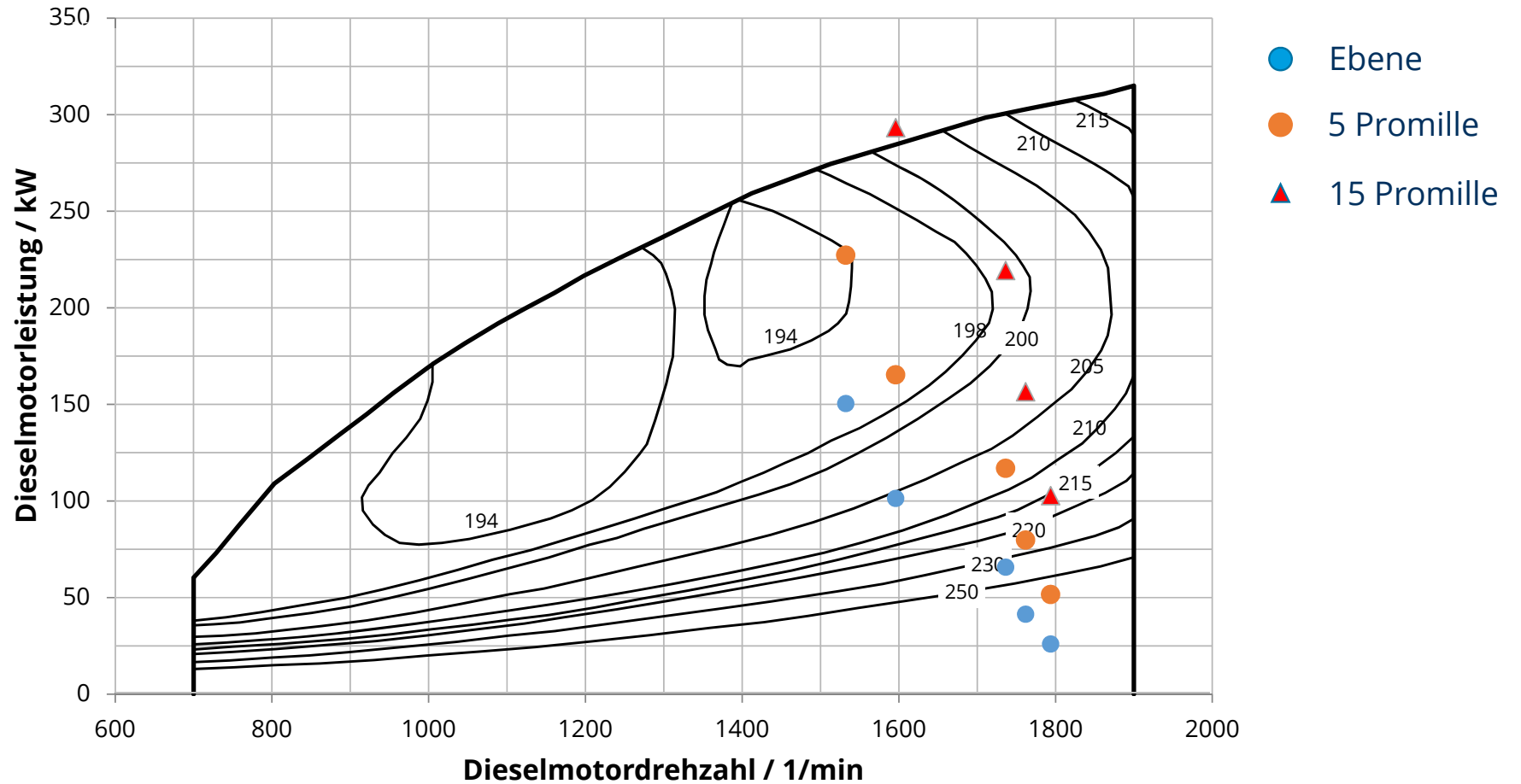
v / km/h	i / Promille	F <sub>WFT</sub> / kN	F <sub>WS</sub> / kN	F <sub>T,erf</sub> / kN	M <sub>DM</sub> / Nm	n <sub>DM</sub> / 1/min	P <sub>DM,erf</sub> / kW
40	0	2,0	0,0	2,0	70	<b>1797</b>	<b>25,7</b>
40	5	2,0	3,9	5,9	208	<b>1797</b>	<b>51,7</b>
40	15	2,0	11,8	13,8	485	<b>1797</b>	<b>103,8</b>
60	0	2,9	0,0	2,9	156	<b>1765</b>	<b>41,3</b>
60	5	2,9	3,9	6,8	368	<b>1765</b>	<b>80,4</b>
60	15	2,9	11,8	14,7	790	<b>1765</b>	<b>158,6</b>
80	0	4,0	0,0	4,0	295	<b>1739</b>	<b>66,1</b>
80	5	4,0	3,9	8,0	581	<b>1739</b>	<b>118,3</b>
80	15	4,0	11,8	15,8	1153	<b>1739</b>	<b>222,5</b>
100	0	5,4	0,0	5,4	537	<b>1599</b>	<b>102,4</b>
100	5	5,4	3,9	9,3	926	<b>1599</b>	<b>167,5</b>
100	15	5,4	11,8	17,2	1704	<b>1599</b>	<b>297,8</b>
120	0	7,0	0,0	7,0	871	<b>1535</b>	<b>152,4</b>
120	5	7,0	3,9	10,9	1357	<b>1535</b>	<b>230,6</b>
120	15	7,0	11,8	18,8	2330	<b>1535</b>	<b>386,9</b>

$$P_{DM,erf} = M_{DM} \cdot 2\pi n_{DM} + 0,5 \cdot P_{komf}$$

$$P_{DM,erf} = M_{DM} \cdot 2\pi n_{DM} + 12,5 \text{ kW}$$

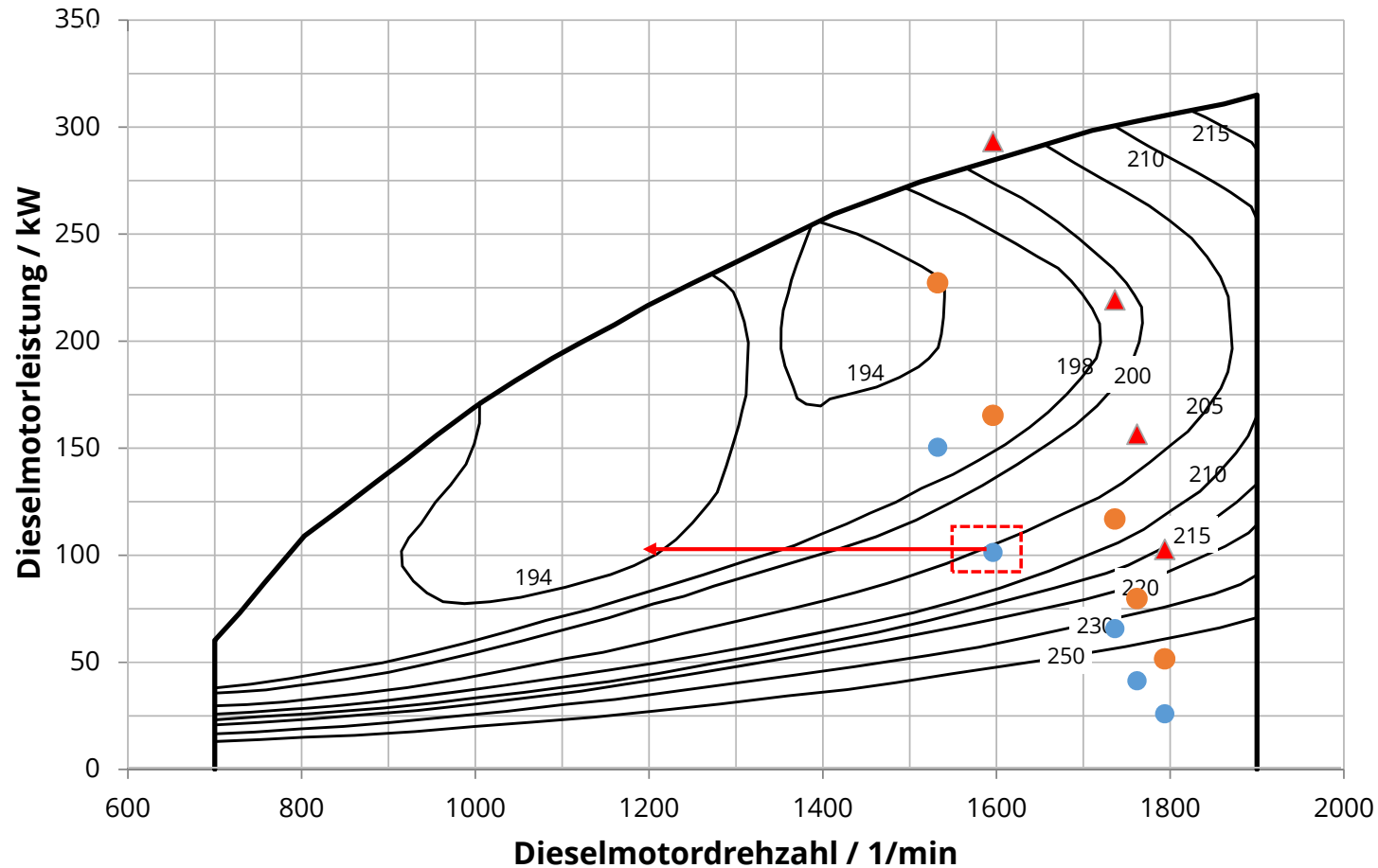
# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.12 Zusammenspiel von Dieselmotor und Mechanischer Leistungsübertragung



# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.12 Zusammenspiel von Dieselmotor und Mechanischer Leistungsübertragung



**100 km/h in der Ebene:**

$$b_{DK} \approx 205 \text{ g/kWh}$$

$$P_{DM} \approx 102 \text{ kW}$$

$$b_{DK,t} \approx 2 \cdot 20,91 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 41,82 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$b_{DK,s} \approx 0,418 \text{ kg/km}$$

theoretisch optimaler  
Betriebspunkt  
(Anpassung der Übersetzung):

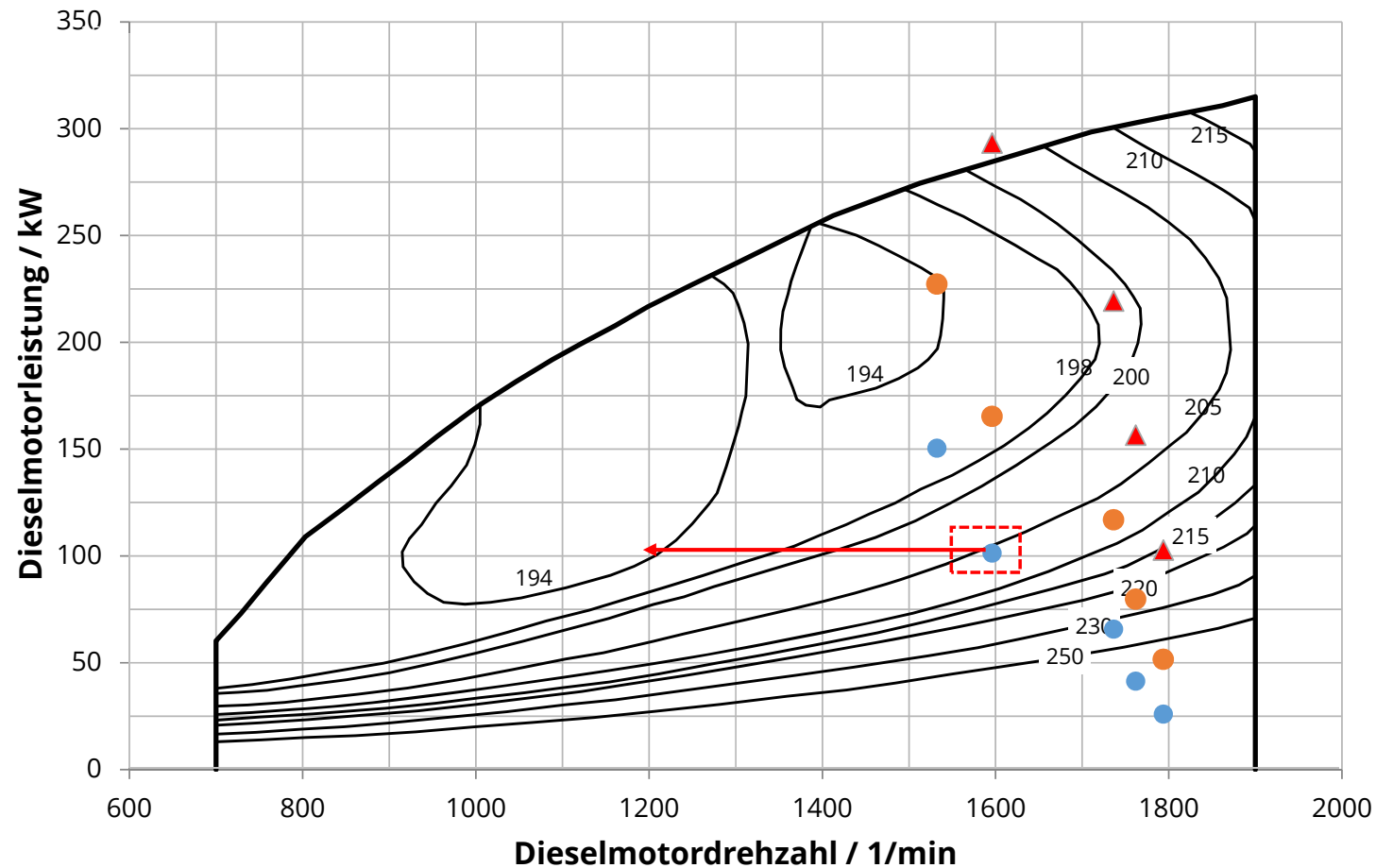
$$b_{DK,opt} \approx 194 \text{ g/kWh}$$

$$b_{DK,s,opt} \approx 0,396 \text{ kg/km}$$

Einsparung: ca. 5,3%

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.12 Zusammenspiel von Dieselmotor und Mechanischer Leistungsübertragung



**Fahrzustand: 100 km/h @  $i=0\%$**   
 **$F_{T,erf} = 5400 \text{ N}$**

### bestehendes Getriebe:

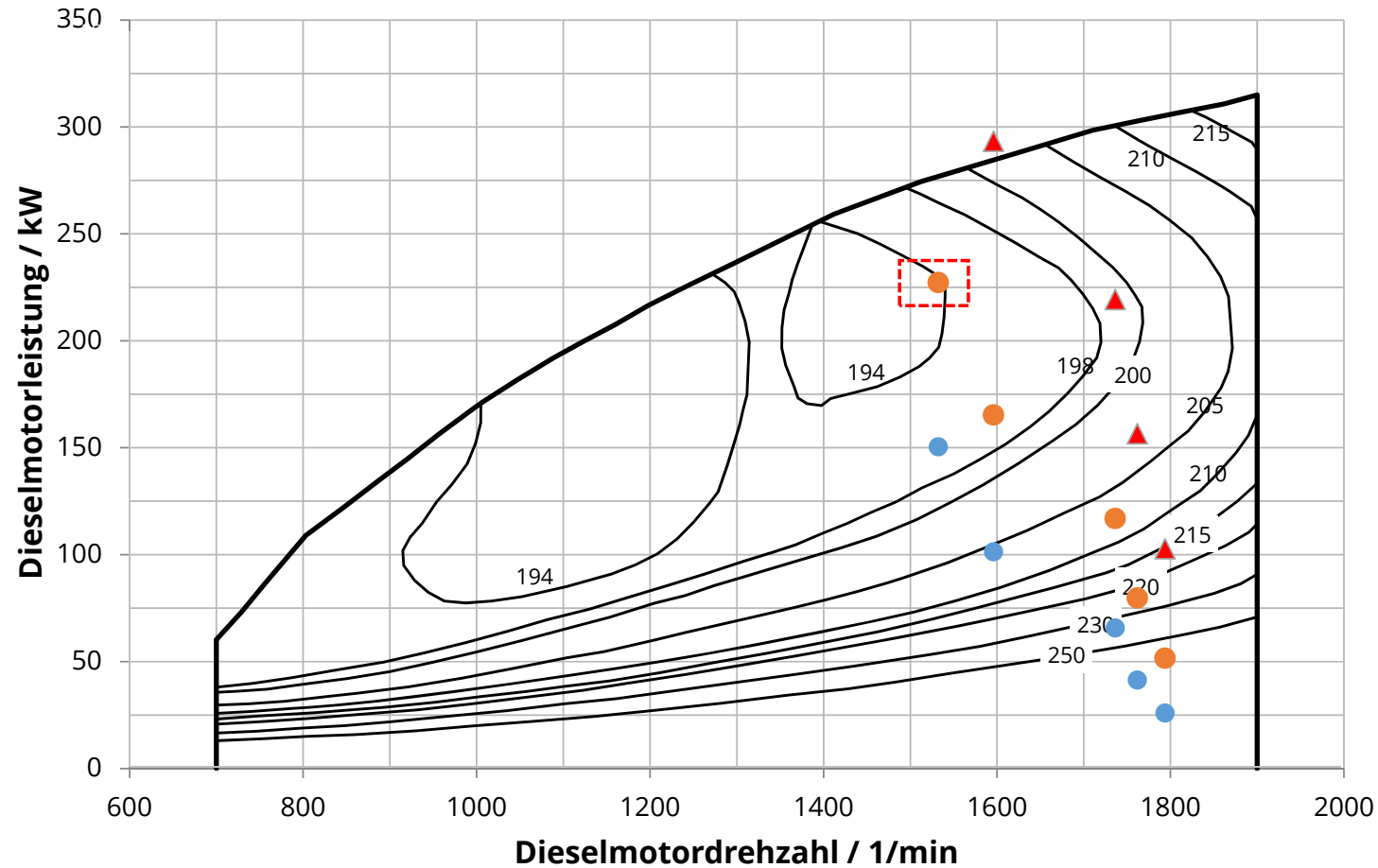
$i_{SG,4} = 1,00$   
 $n_{DM}(100\text{km/h}) = 1599 \text{ U/min}$   
 $M_{DM,erf} = 537 \text{ Nm}$   
 $P_{DM, erf} = 102 \text{ kW}$

### optimiertes Getriebe:

$i_{SG,opt} = 0,7506$   
 $n_{DM}(100 \text{ km/h}) = 1200 \text{ U/min}$   
 $M_{DM,erf} = 713 \text{ Nm}$   
 $P_{DM,erf} = 102 \text{ kW}$

# 9. Leistungsübertragungsanlagen

## 9.1.12 Zusammenspiel von Dieselmotor und Mechanischer Leistungsübertragung



**120 km/h in 5 Promille:**

$$b_{DK} \approx 194 \text{ g/kWh}$$

$$P_{DM} \approx 231 \text{ kW}$$

$$b_{DK,t} \approx 2 \cdot 44,91 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 89,62 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$b_{DK,s} \approx 0,749 \text{ kg/km}$$