

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla  
Professur für Elektrische Bahnen

# Fahrdynamik Bahnfahrzeuge

## VL 04: Fahrdynamische Charakteristiken

Sommersemester 2023

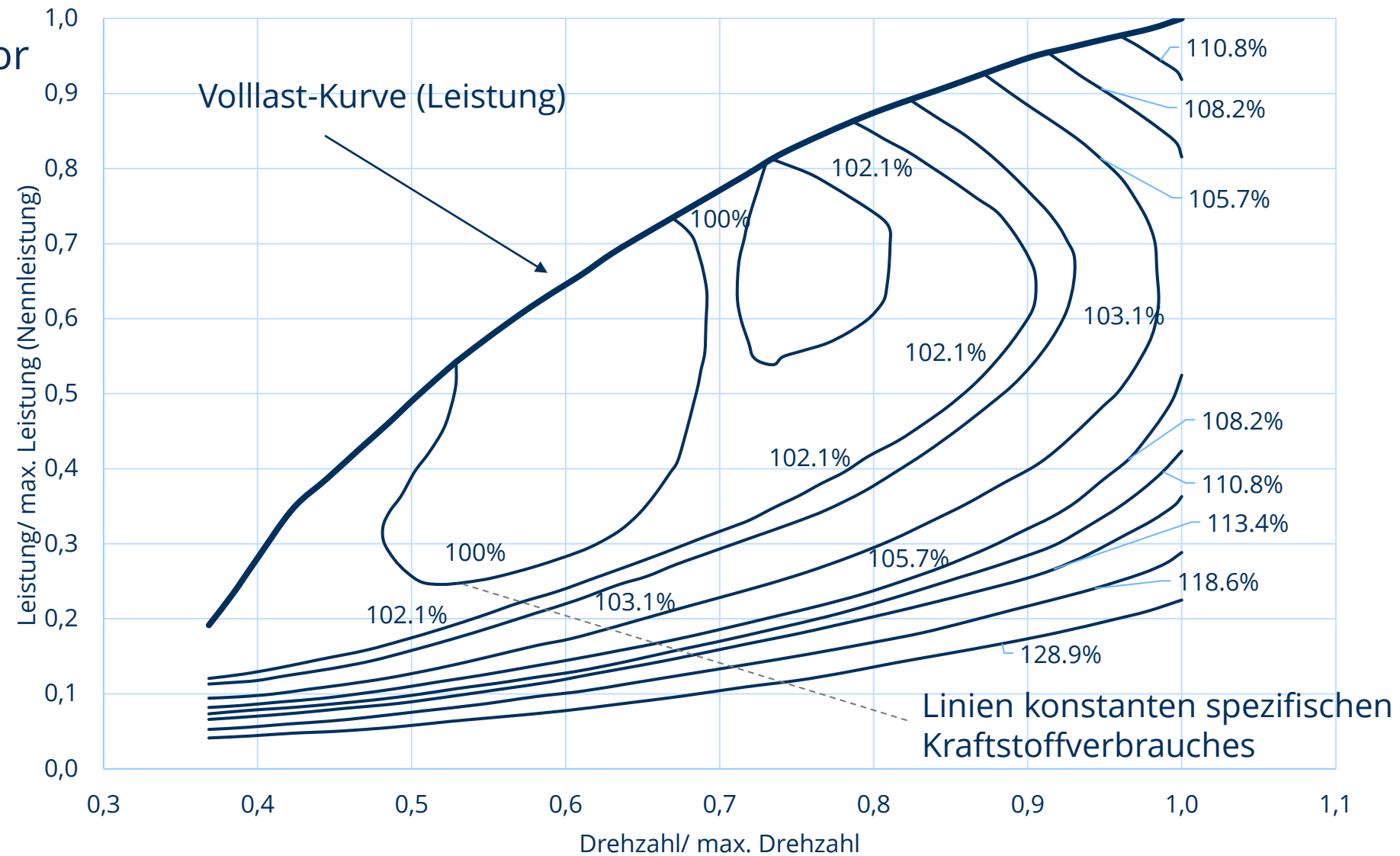


## Zugkraftherzeugung bei Dieseltriebfahrzeugen



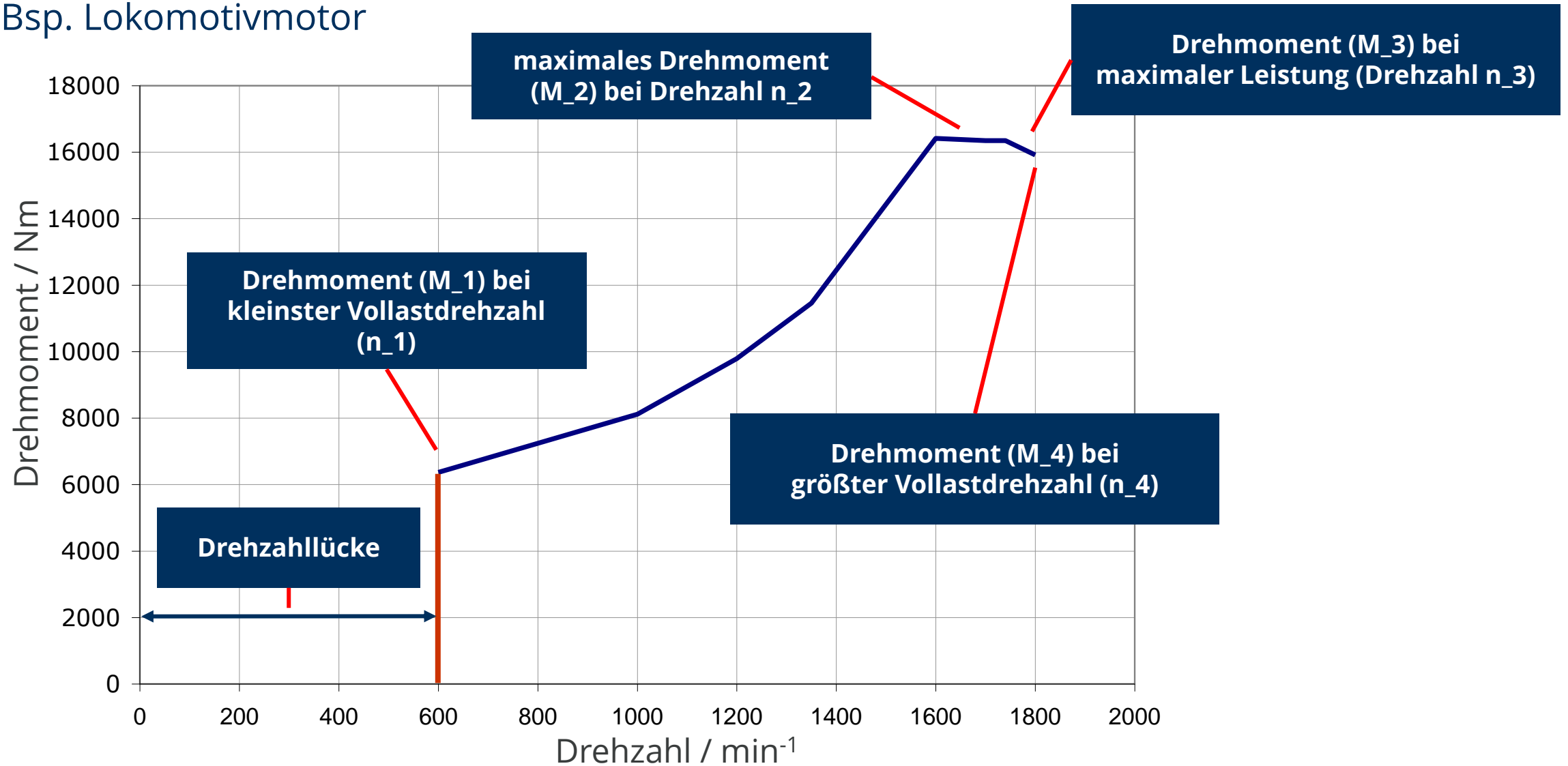
# Dieselmotor

Bsp. Triebwagenmotor



# Dieselmotor

Bsp. Lokomotivmotor



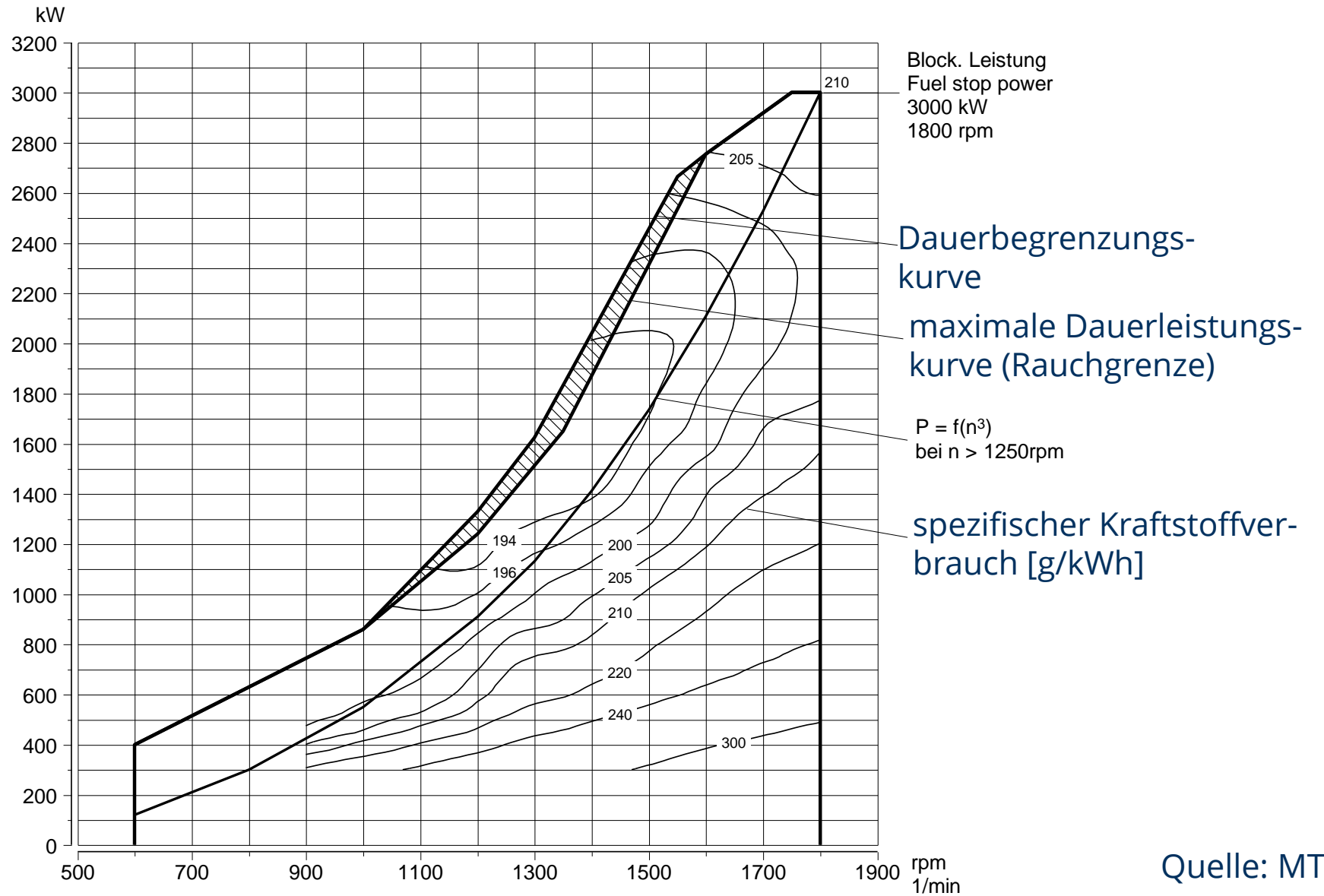
# Dieselmotor

## Bsp. Lokomotivmotor



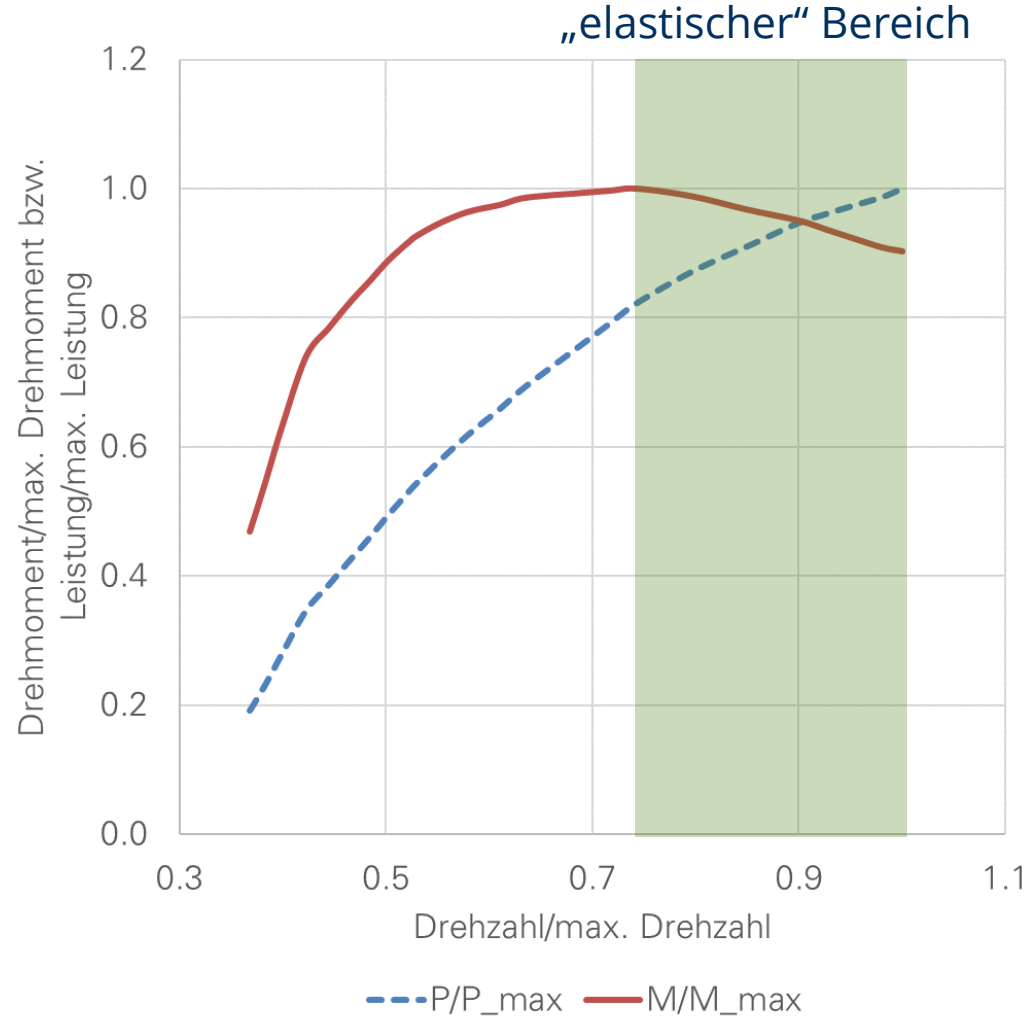
Voith Maxima 30CC  
(MTU 20V 4000 R43L)

Hubraum: 95,4 l  
Masse: 10,5 t  
Zylinderzahl: 20

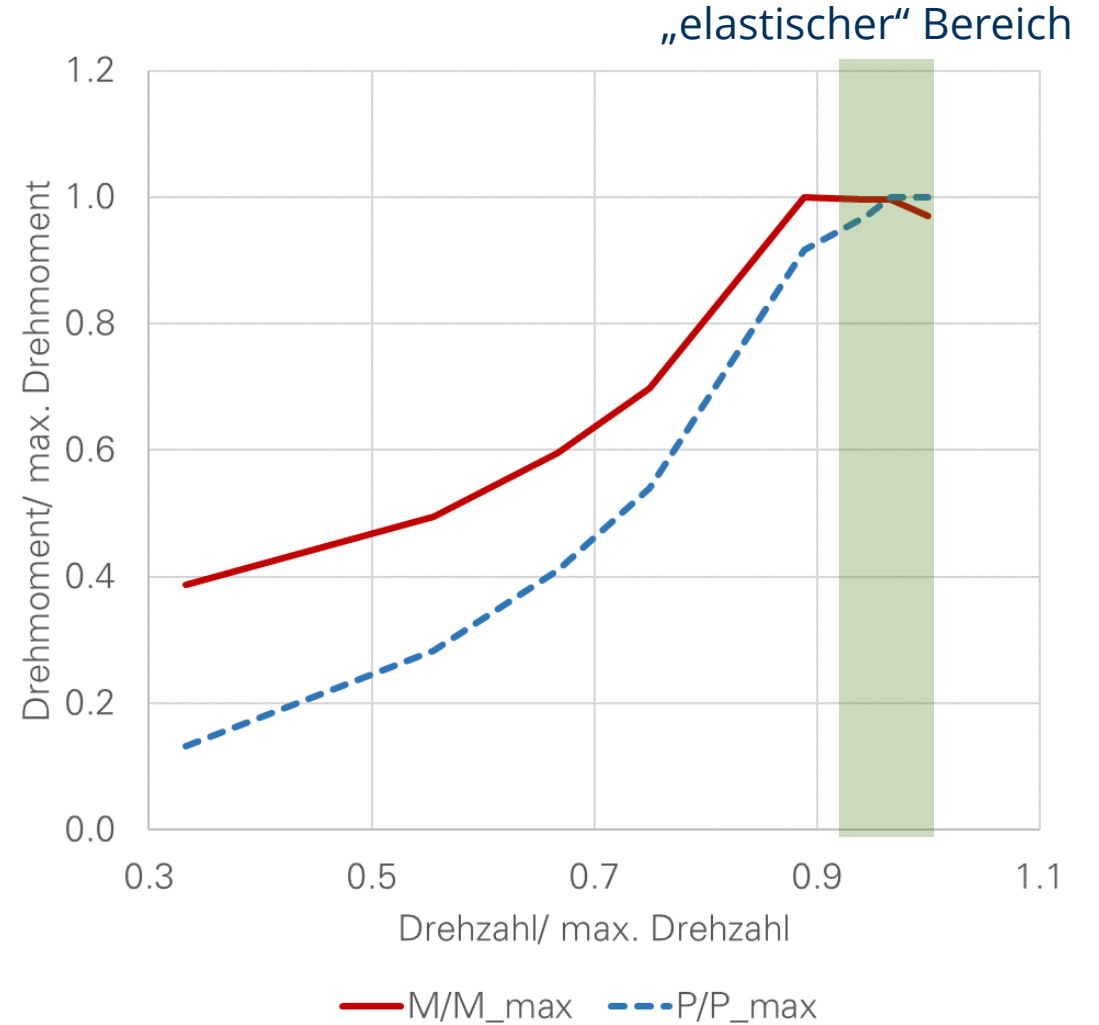


Quelle: MTU

# Leistungs- und Drehmomentcharakteristik von Dieselmotoren



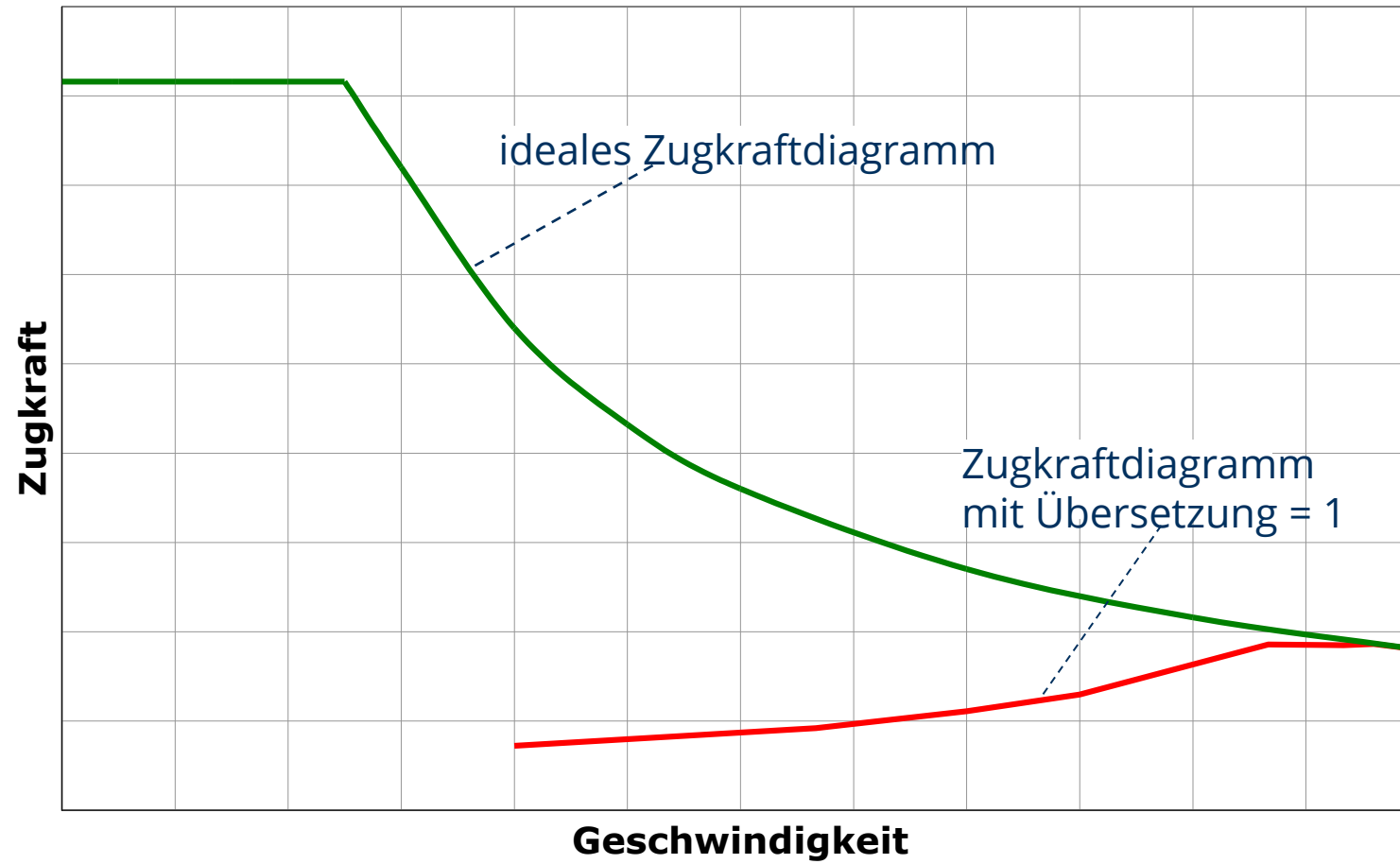
Triebwagenmotor



Lokmotor

# Leistungsübertragung

## Notwendigkeit



# Ideale Leistungsübertragung

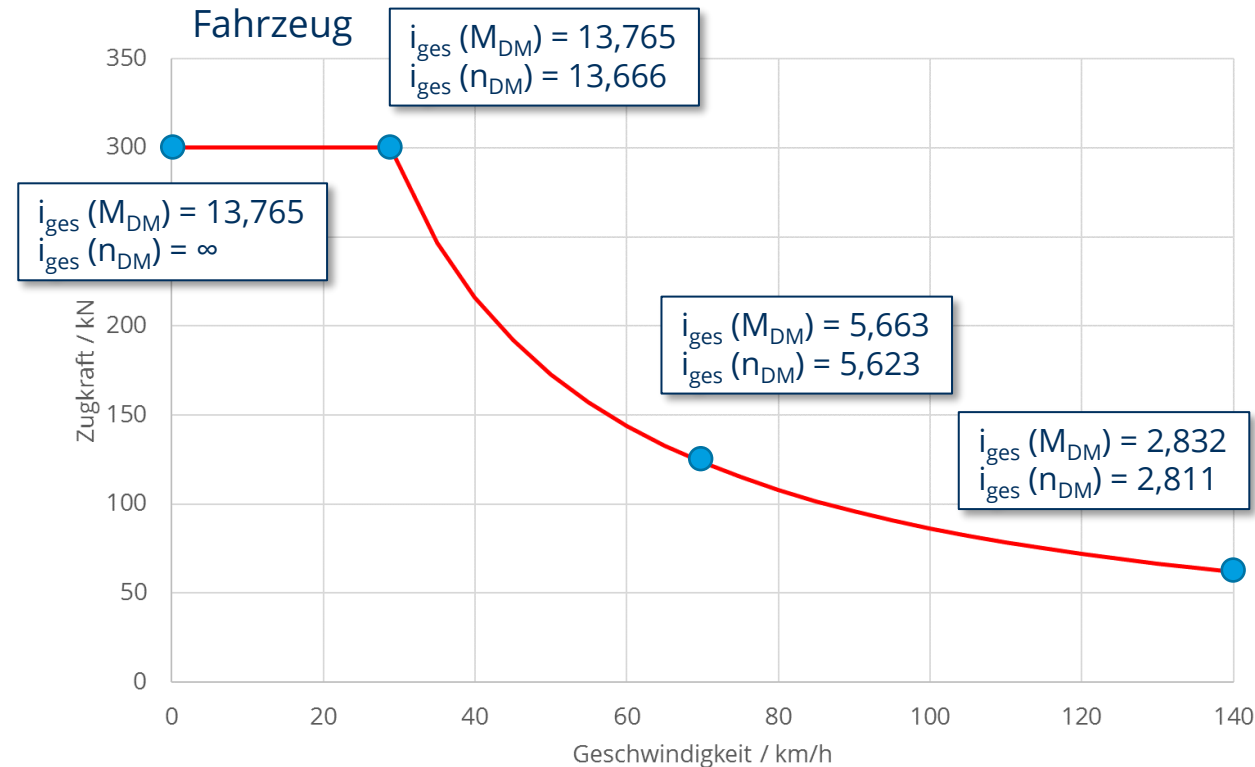
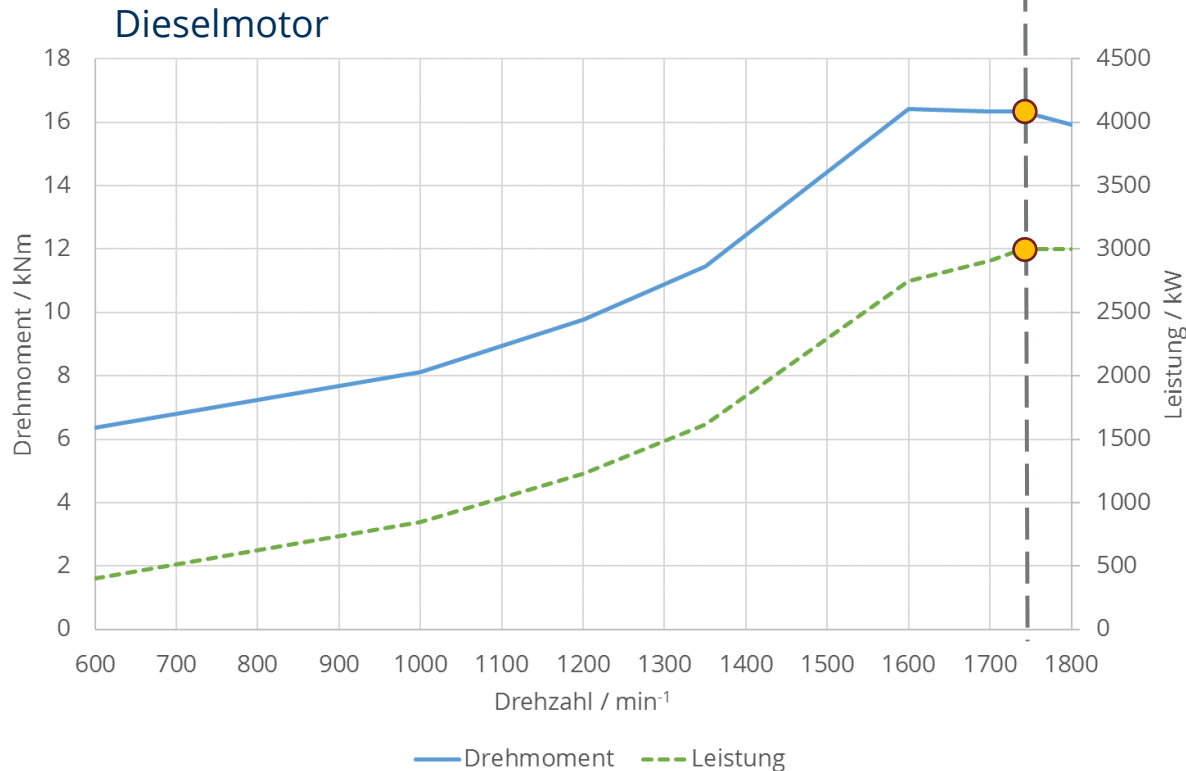
allgemein gilt:

$$i_{ges}(M_{DM}) = \frac{F_T \cdot r_T}{\eta_{ges} \cdot M_{DM}}$$

$$i_{ges}(n_{DM}) = \frac{2\pi \cdot r_T}{v} \cdot n_{DM}$$

16,35 kNm @ 1750 min<sup>-1</sup>

angestrebter Volllast-Betriebspunkt  
(max. Drehmoment bei max. Leistung)

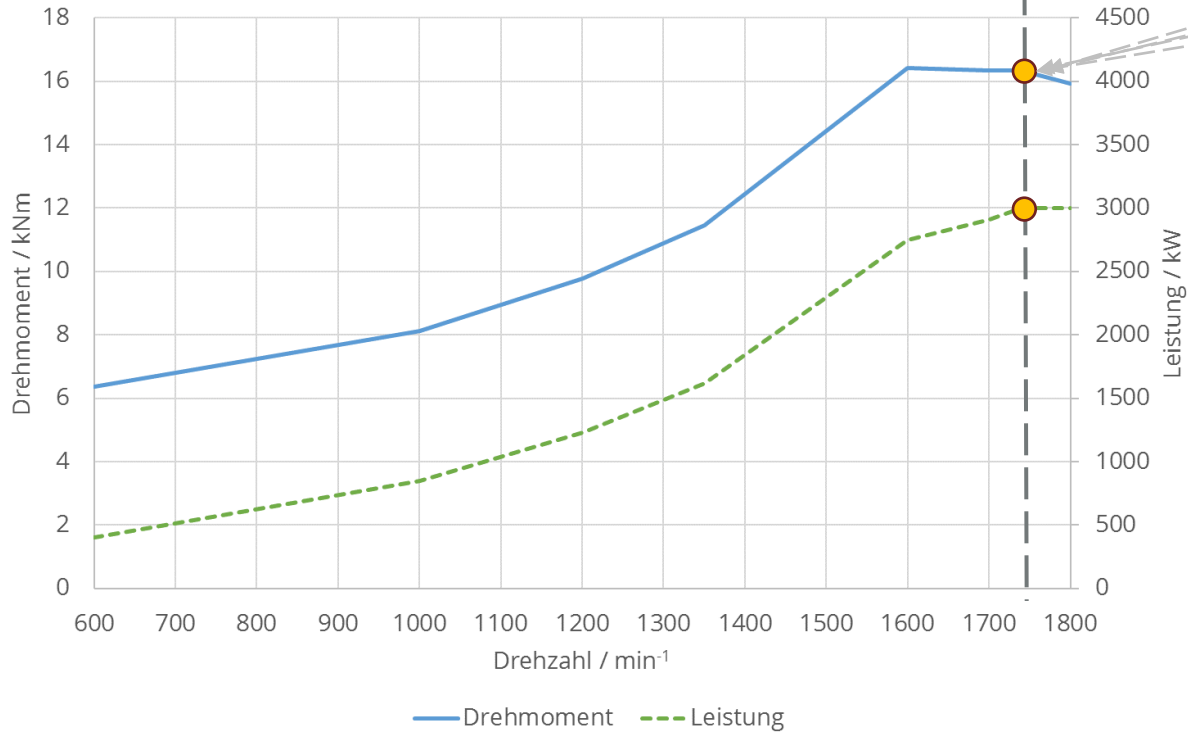


# Ideale Leistungsübertragung

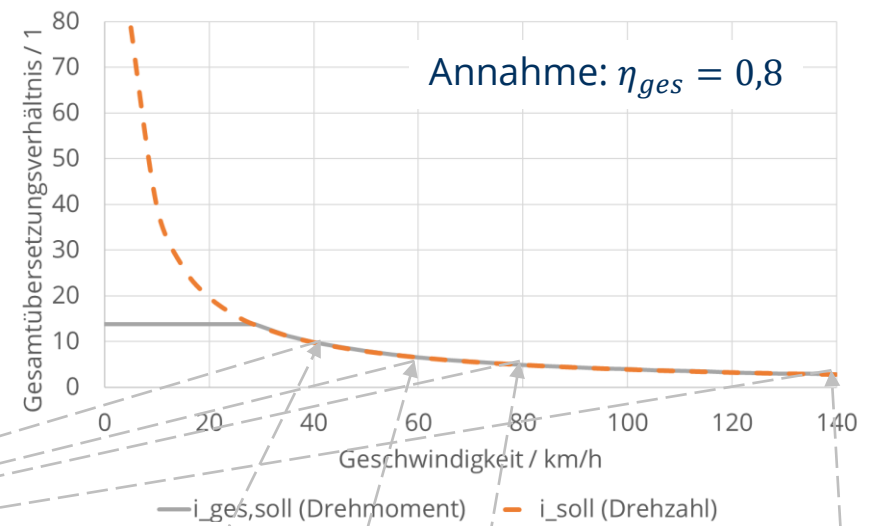
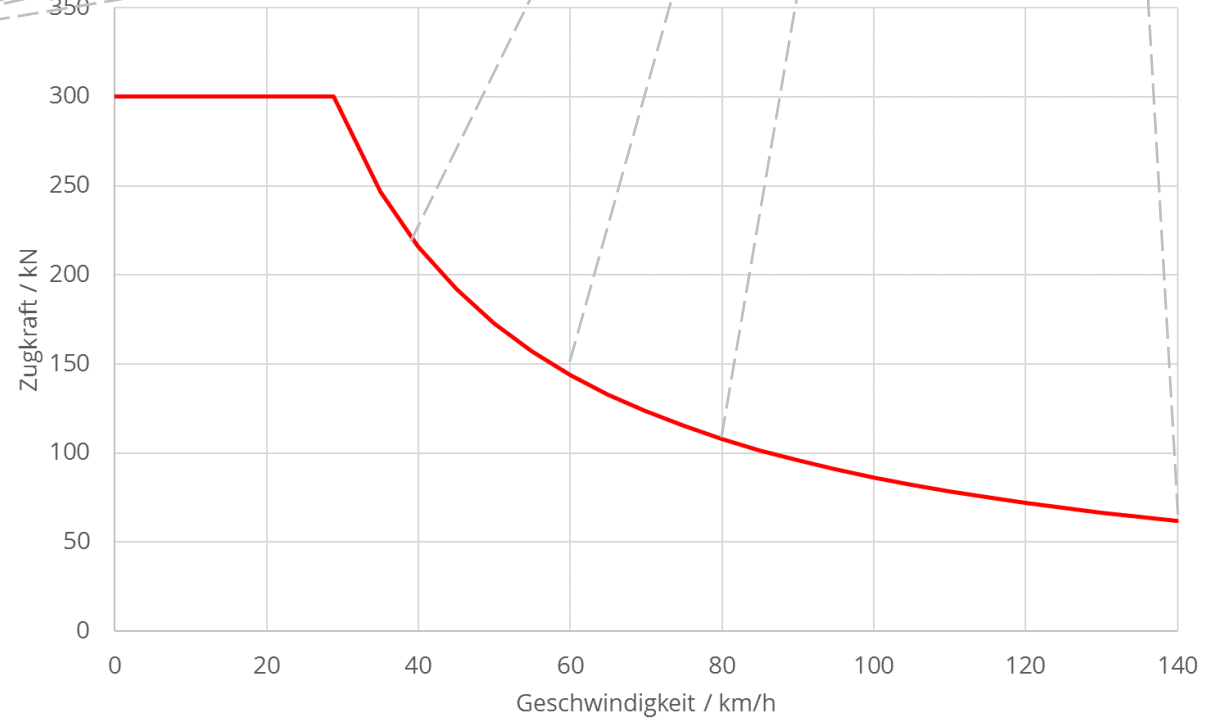
16,35 kNm @ 1750 min<sup>-1</sup>

angestrebter Volllast-Betriebspunkt  
(max. Drehmoment bei max. Leistung)

Dieselmotor



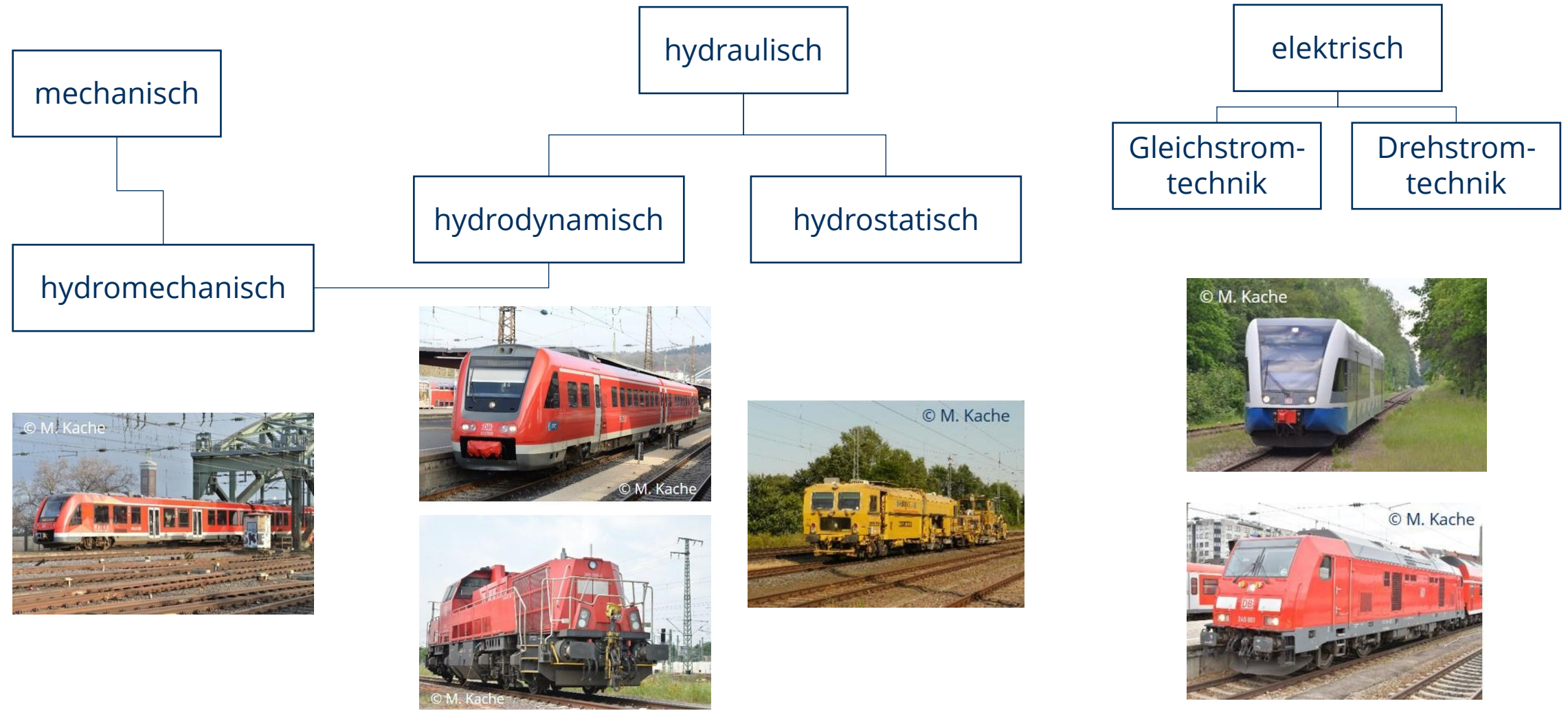
Fahrzeug



# Was wurde nicht alles versucht...

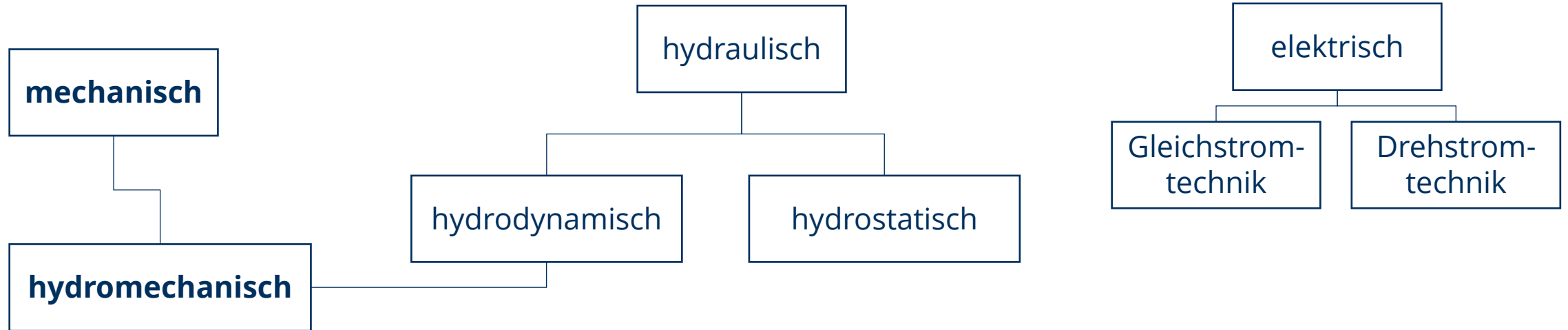


# Leistungsübertragungen Übersicht

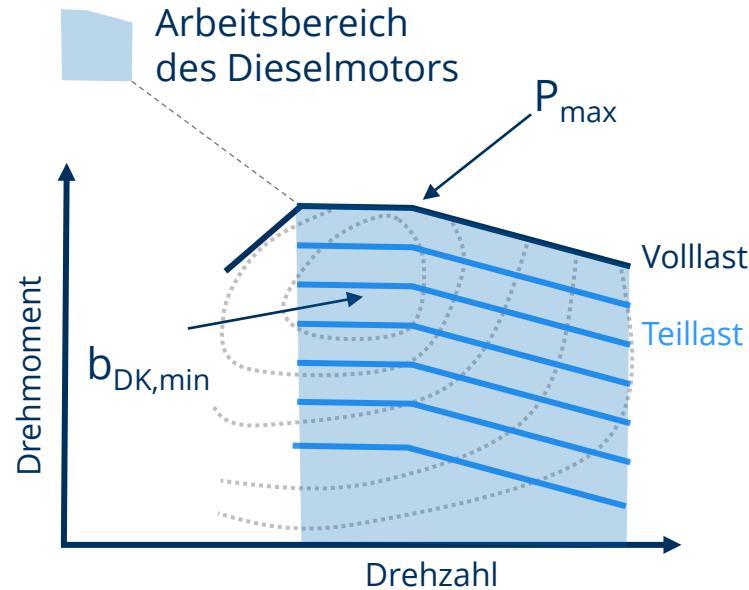
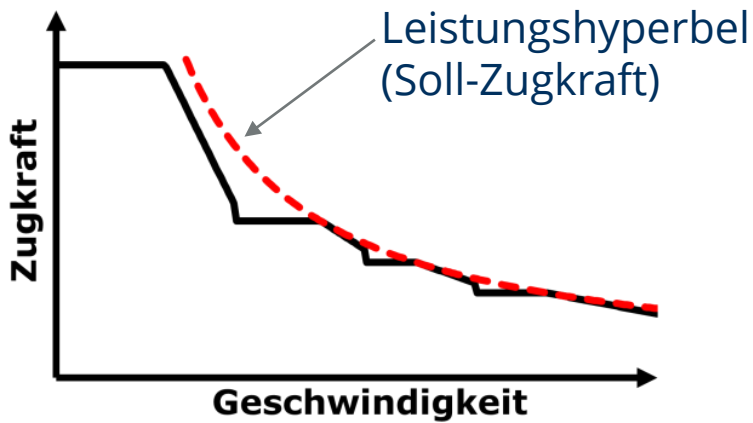
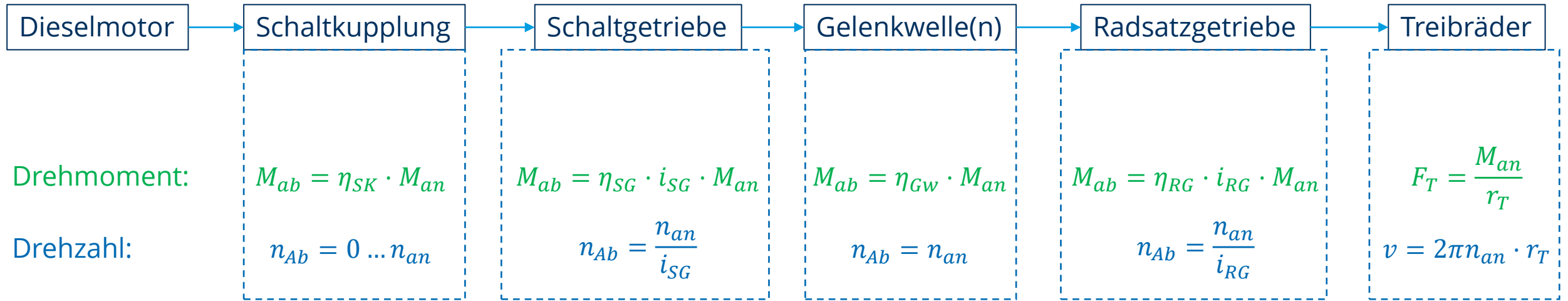


# Leistungsübertragungen

## Übersicht



# Mechanische Leistungsübertragung



$v \sim n_{DM}$   
 $F_T \sim M_{DM}$   
 $P_T \neq const.$   
 $P_{DM,max}$  punktuell



Bsp: Schienenbus

# Wahl geeigneter Getriebestufungen

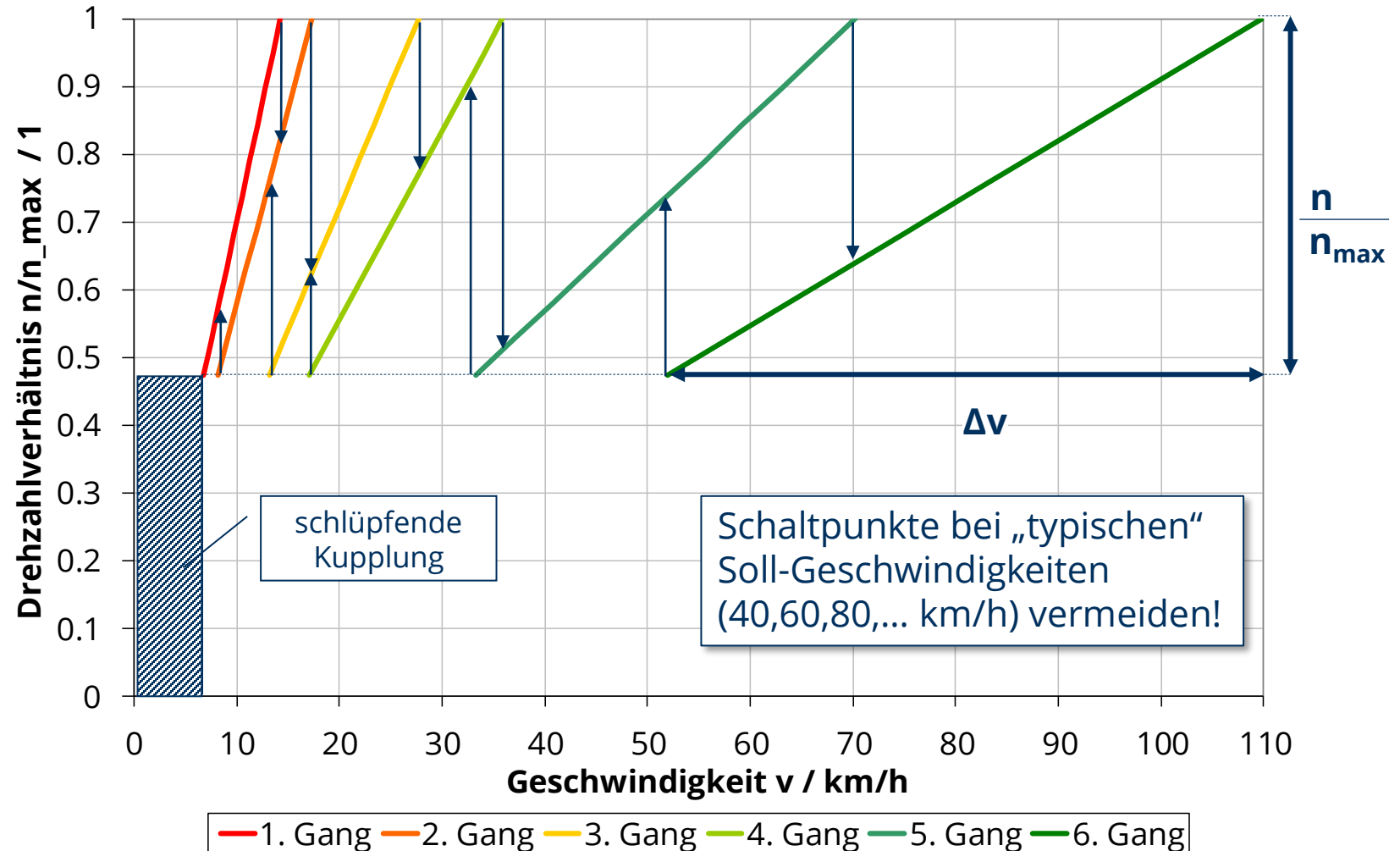
## Schaltdiagramm 6-Gang-Getriebe

Radius der Treibräder

$$v = \frac{2\pi r_T}{i_{ges}} n_{DM}$$

Übersetzung von Schalt- und Radsatzgetriebe

Dieselmotor-drehzahl



# Mechanische Leistungsübertragung

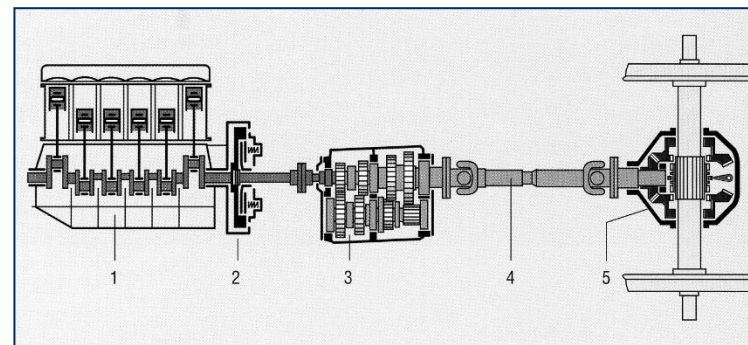
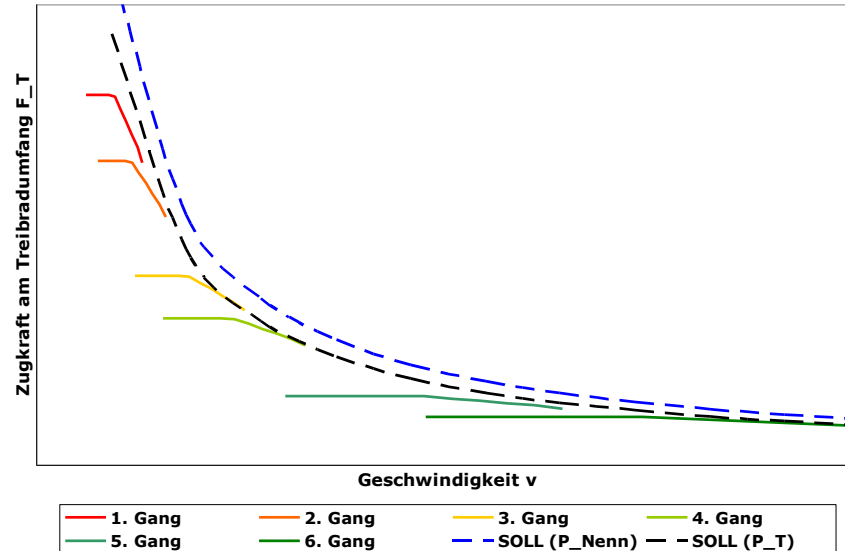
## Vorteile:

- + hoher Übertragungswirkungsgrad
- + preiswert
- + einfacher Aufbau

## Nachteile:

- hoher Kupplungsverschleiß
- nur für kleine Leistungen geeignet
- stufenartiger Zugkraftverlauf
- schlechter Ausnutzungsgrad der Motorleistung

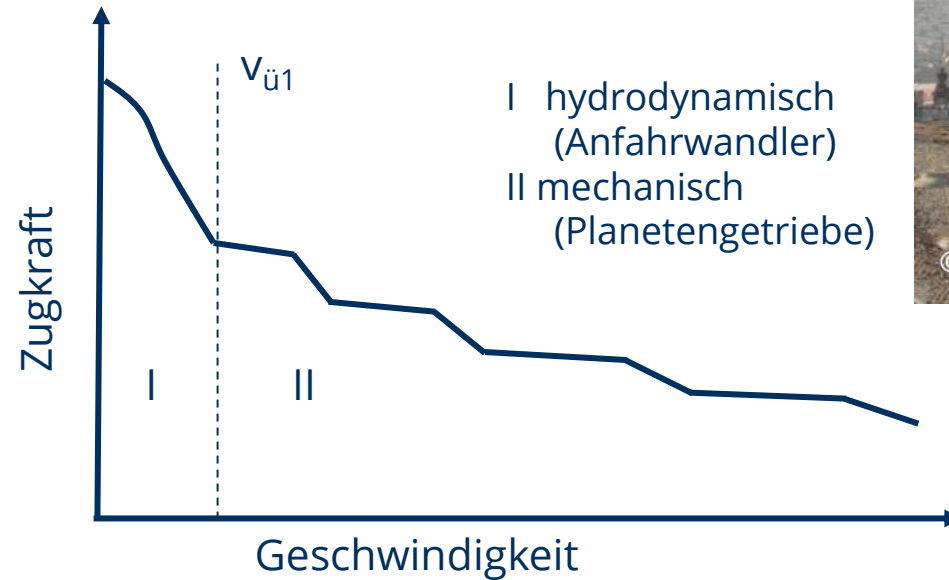
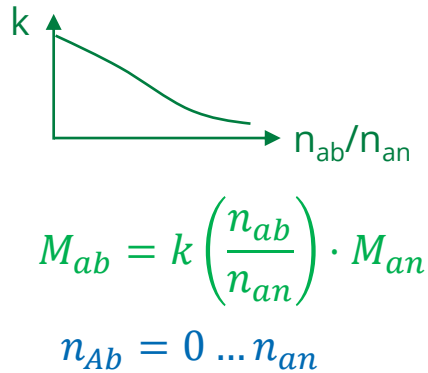
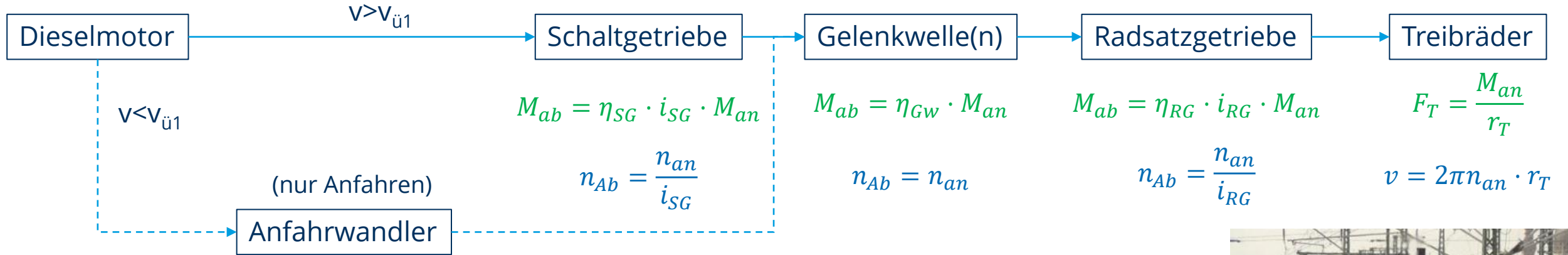
Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm 6-Gang-Getriebe



- 1 Dieselmotor
- 2 Kupplung
- 3 Schaltgetriebe
- 4 Gelenkwelle
- 5 Radsatzwendegetriebe

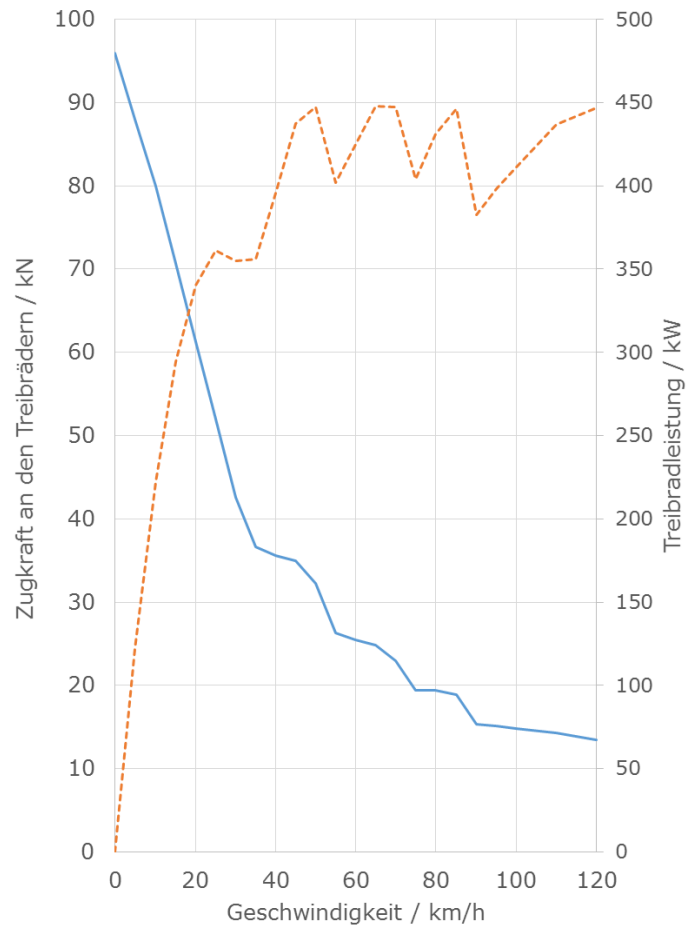
Schema: Voith Turbo

# Hydromechanische Leistungsübertragung



# Diesel-hydrmechanische Fahrzeuge

## Zugkraftdiagramme

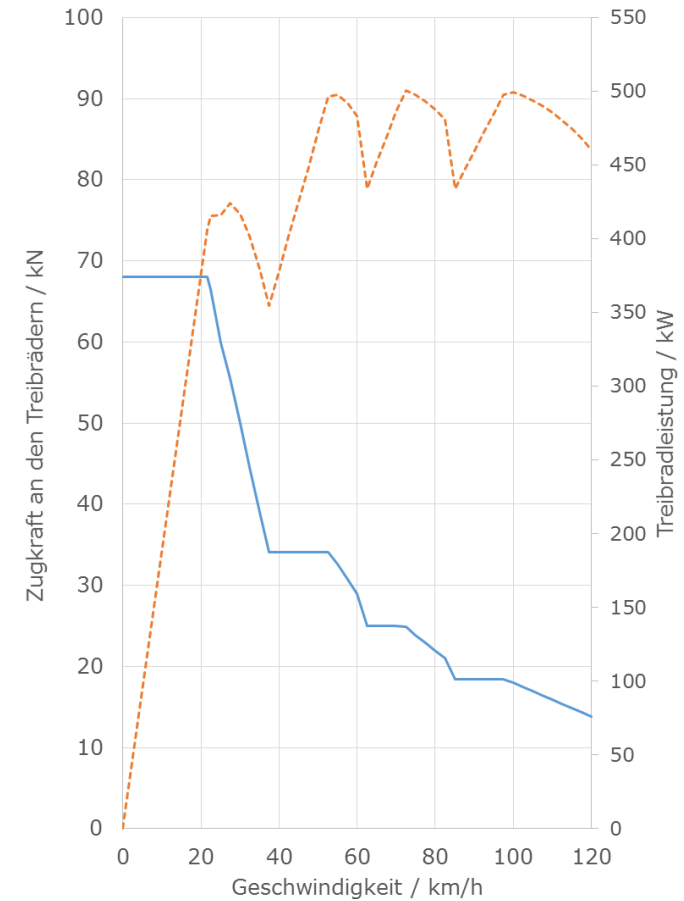


BR 642

— Treibradzugkraft  
 - - - Treibradleistung



BR 650



# Hydromechanische Leistungsübertragung

## Vorteile:

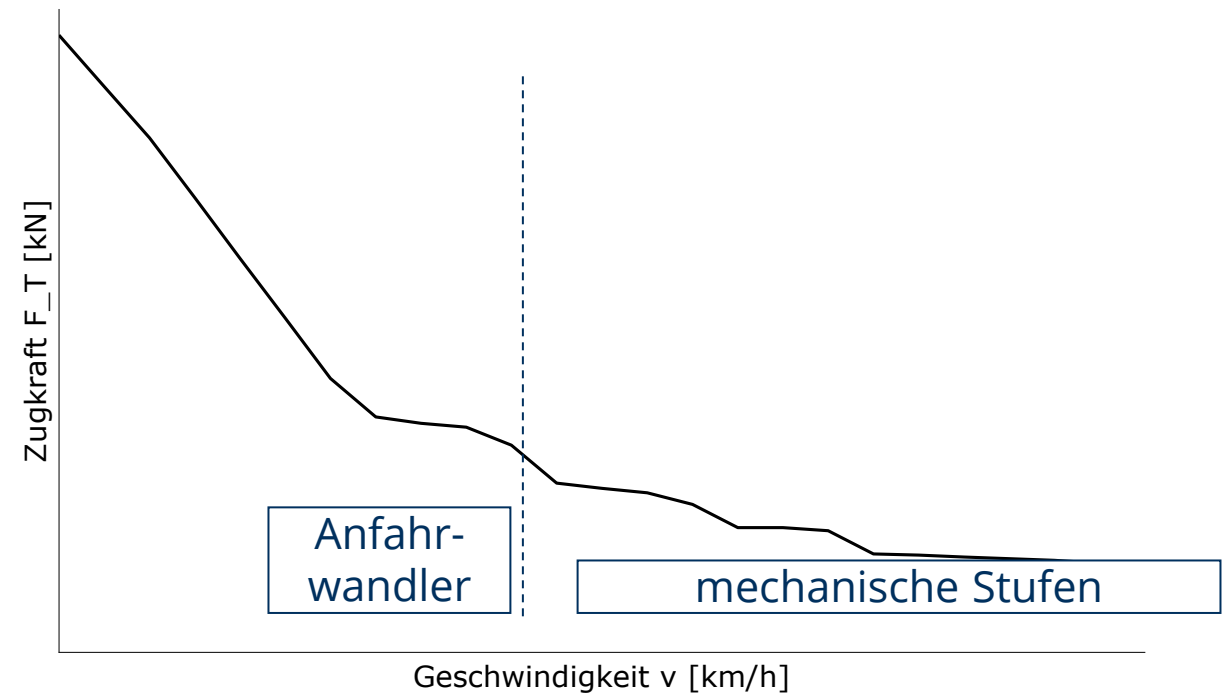
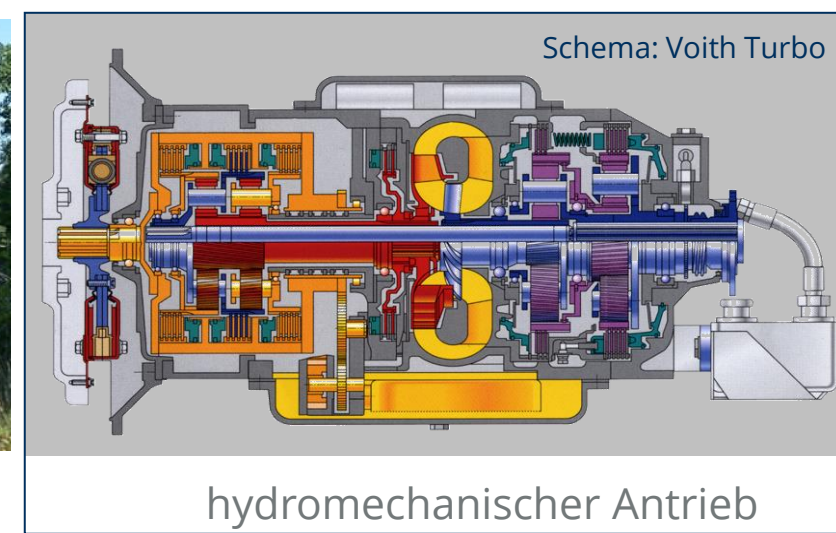
- + hoher Übertragungswirkungsgrad in höheren Gängen
- + verschleißfreies Anfahren
- + modifizierte Straßenfahrzeugtechnik (Kosten)

## Nachteile:

- nur für kleine Leistungen geeignet
- stufenartiger Zugkraftverlauf
- schlechter Ausnutzungsgrad der Motorleistung
- Schaltrucke



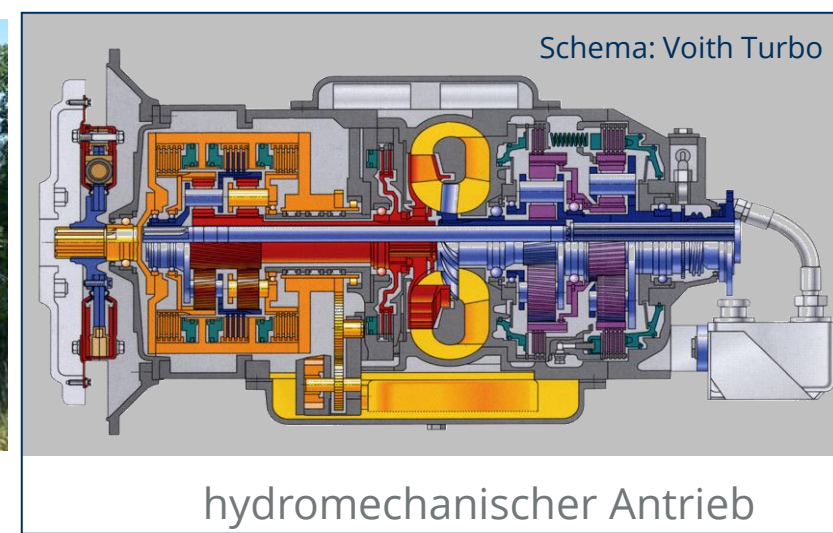
Beispiel: BR 642 (Desiro)



# Hydromechanische Leistungsübertragung

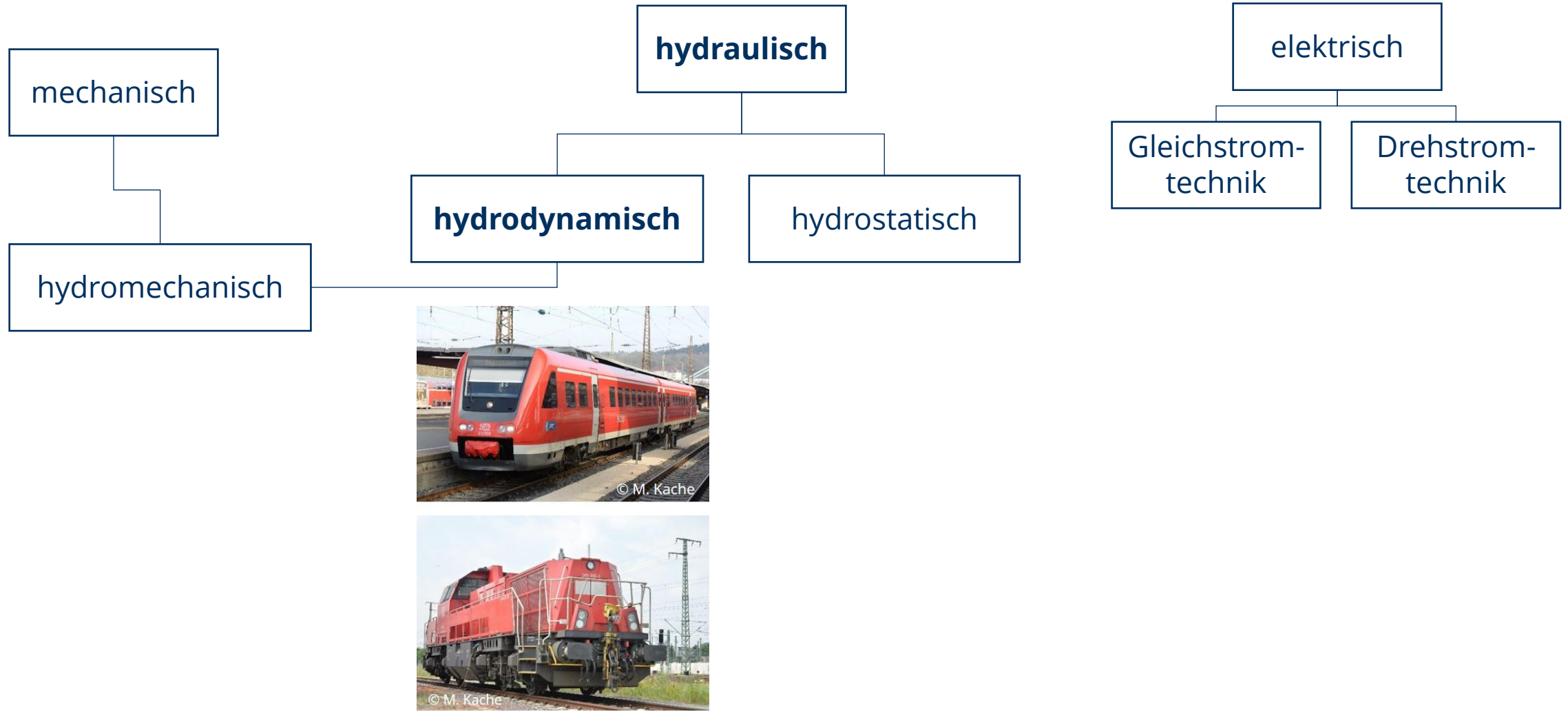


Beispiel: BR 642 (Desiro)



- ✓ 1. Verschleißfreie Anfahrmöglichkeit
- ✓ 2. Generierung hoher Zugkräfte (mindestens: bei kleinen Geschwindigkeiten)
- x 3. Zugkraftentwicklung entlang der Leistungshyperbel und ohne Unstetigkeiten
- x 4. dauerhafte Ausnutzung der Dieselmotorleistung ( $v \neq n_{DM}$ )
- ✓ 5. stufenlose Zugkraftregelung
- x 6. Ermöglichung einer selektiven Radsatzschlupfregelung
- x 7. Ermöglichung eines energetisch günstigen Betriebs des Dieselmotors (Primärkennlinie)
- ✓ 8. hoher Übertragungswirkungsgrad über weiten Drehzahl- und Drehmomentbereich
- x 9. thermische Robustheit bei Vollast und kleinen Geschwindigkeiten
- ✓ 10. Umkehr des Leistungsflusses bei Bremsvorgängen ermöglichen (dynamische Bremse)

# Leistungsübertragungen Übersicht



# Hydrodynamische Leistungsübertragung

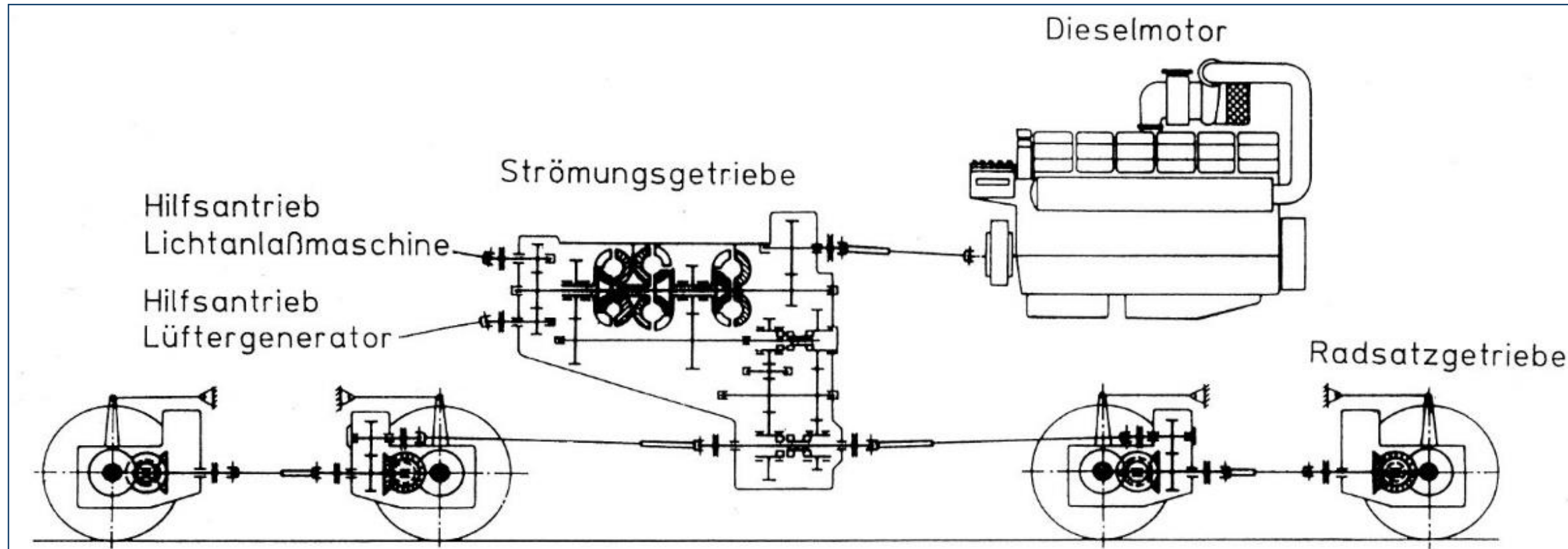
Bsp. 1:

Vossloh  
G 1206

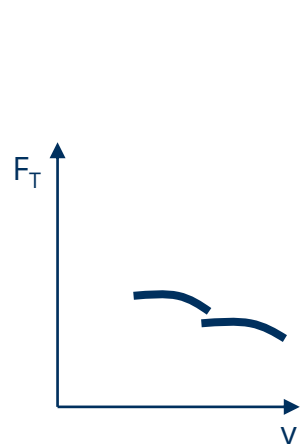


Bsp. 2:

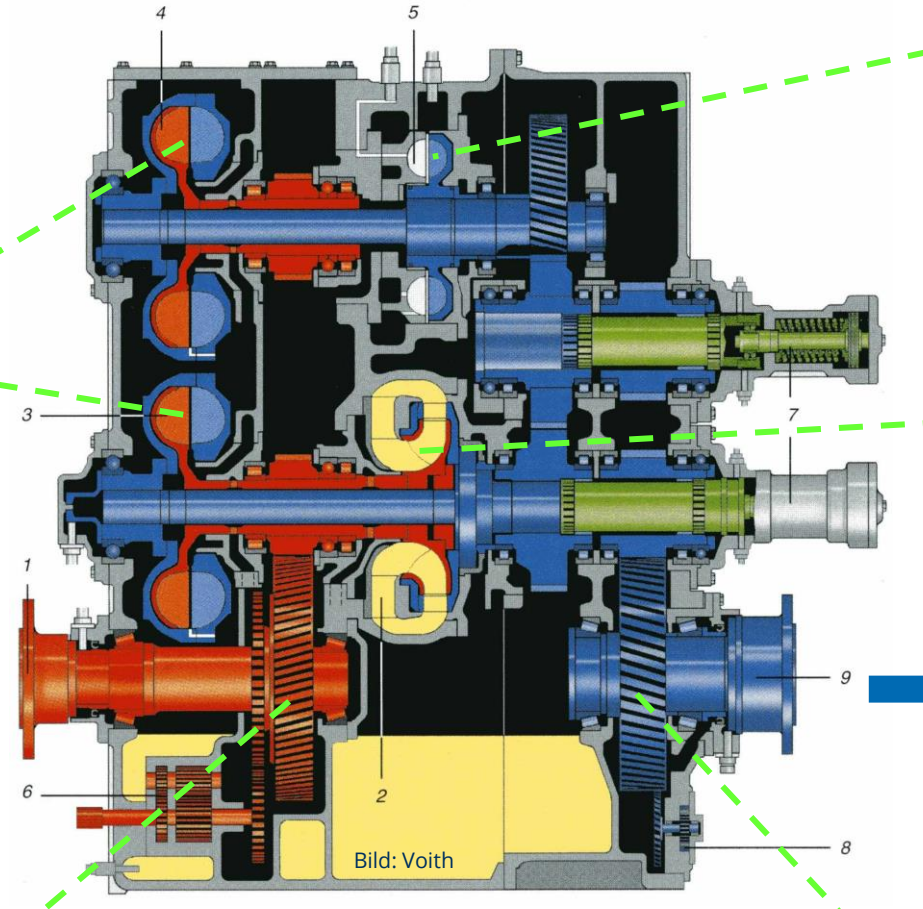
BR 612



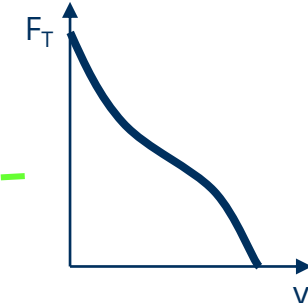
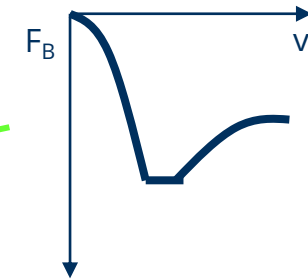
# Strömungsgetriebe Voith T312br



Strömungskupplung



Retarder (Strömungsbremse)



Strömungswandler

vom Dieselmotor  $n_{DM} \approx \text{const.}$



zu den Radsätzen  $n_{ab} \sim v$

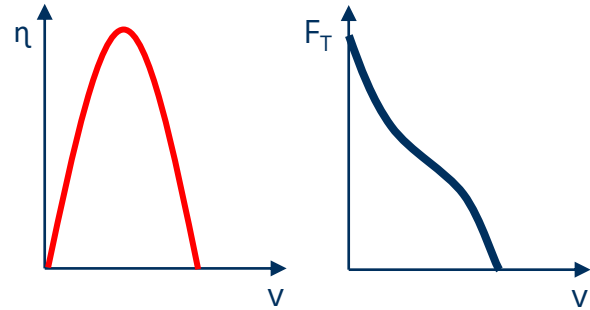
Eingangsübersetzung (Hochtrieb)

Abtriebsübersetzung

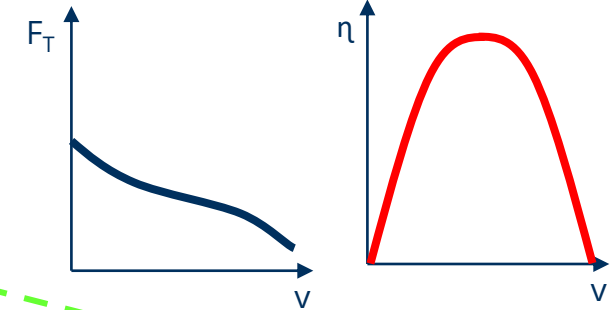
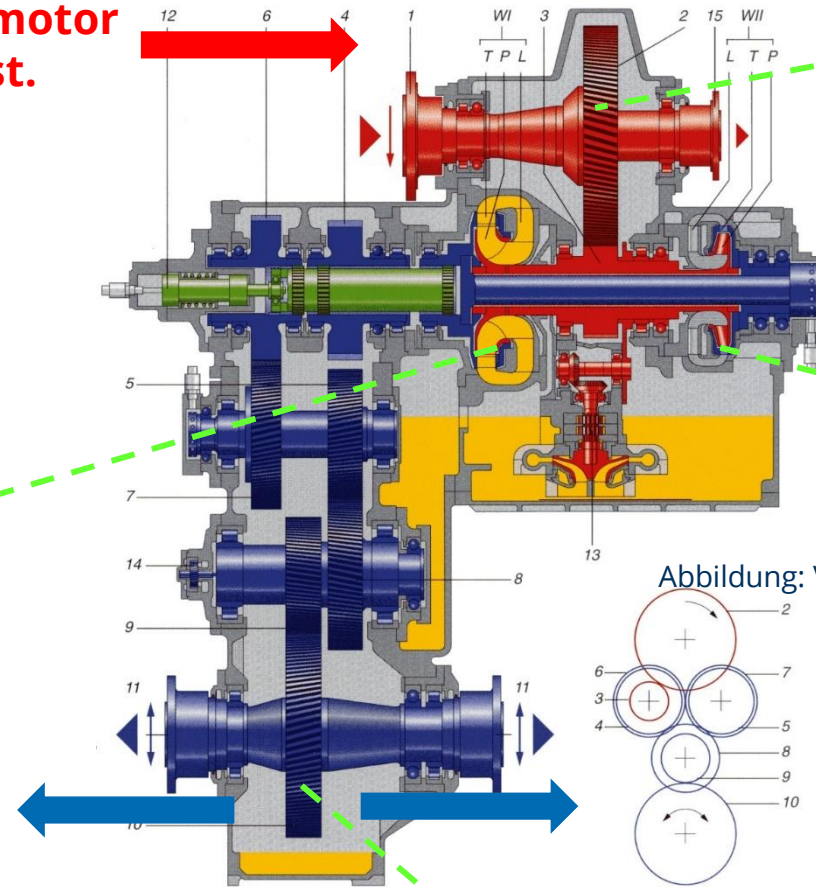
# Strömungsgetriebe Voith L 620 re

vom Dieselmotor  
 $n \approx \text{const.}$

Eingangsübersetzung  
(Hochtrieb)



Anfahrwandler (AW)

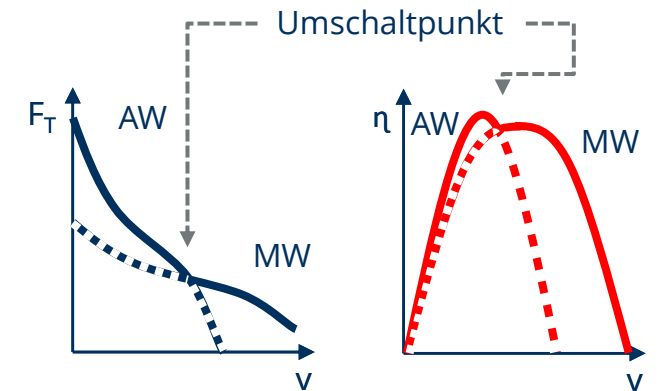


Marschwandler (MW)

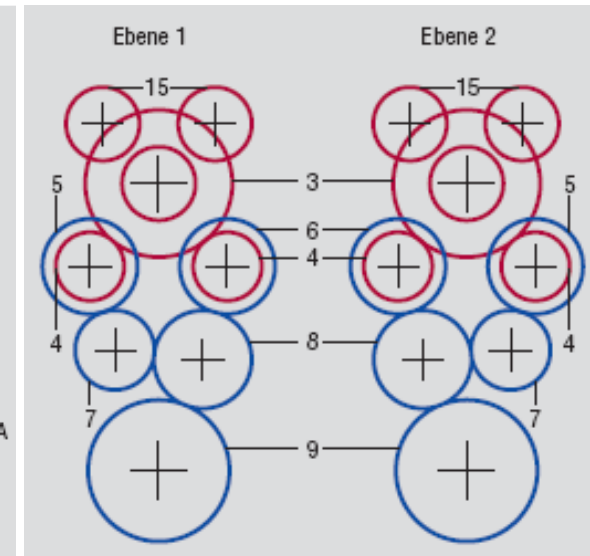
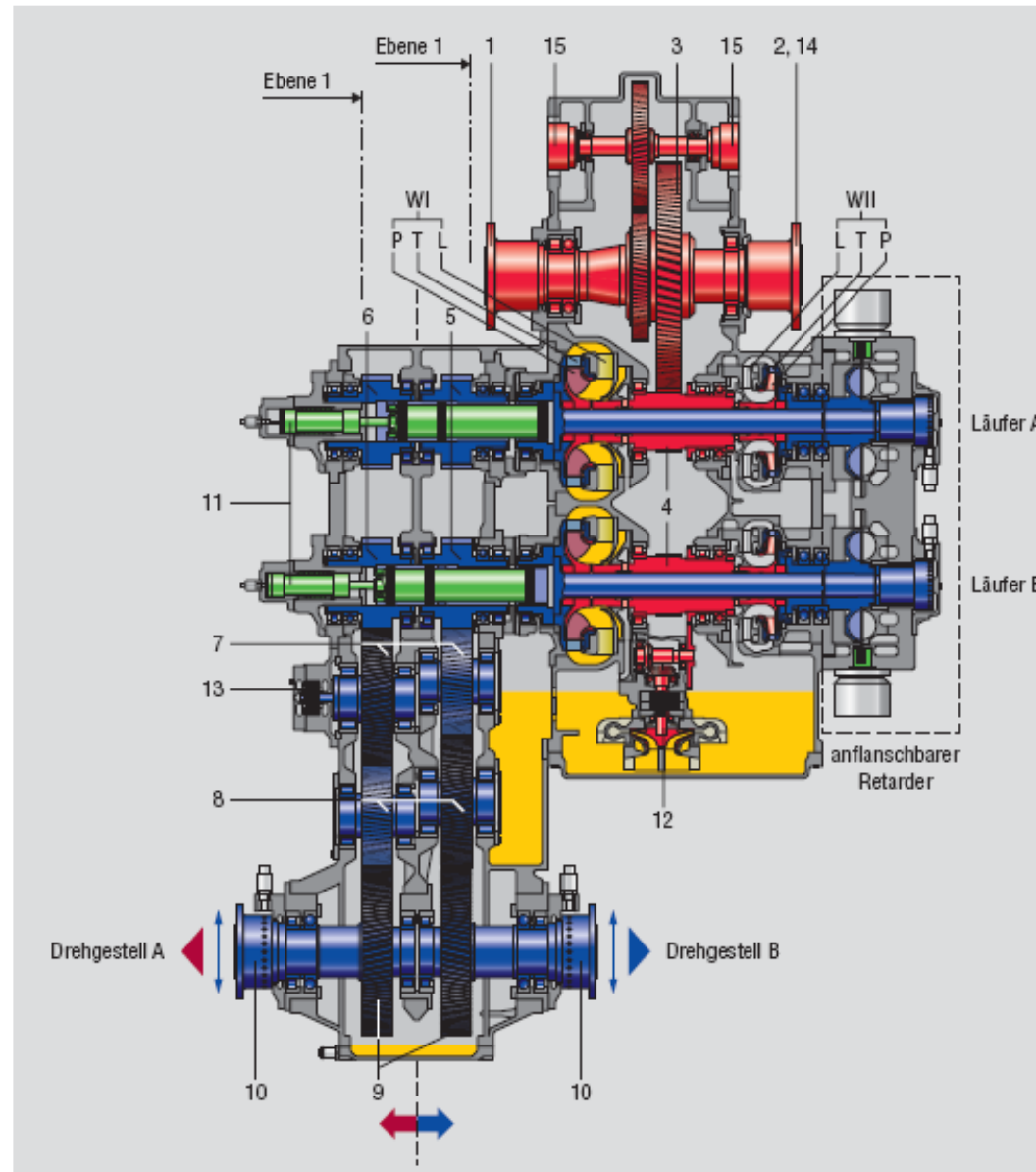
zu den Radsätzen  
 $n_{ab} \sim v$

Abtriebsübersetzung

Zusammenspiel der Wandler



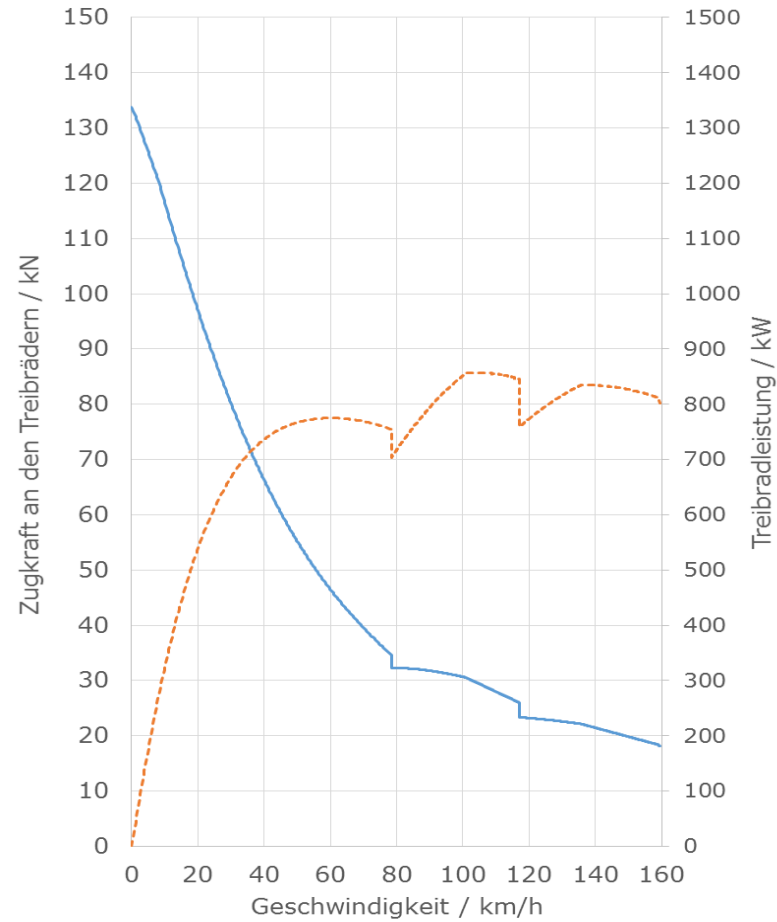
# Beispiel: Strömungstriebwerke Voith LS 640 reU2



alle Abbildungen: Voith Turbo

# Diesel-hydrodynamische Fahrzeuge

## Zugkraftdiagramme

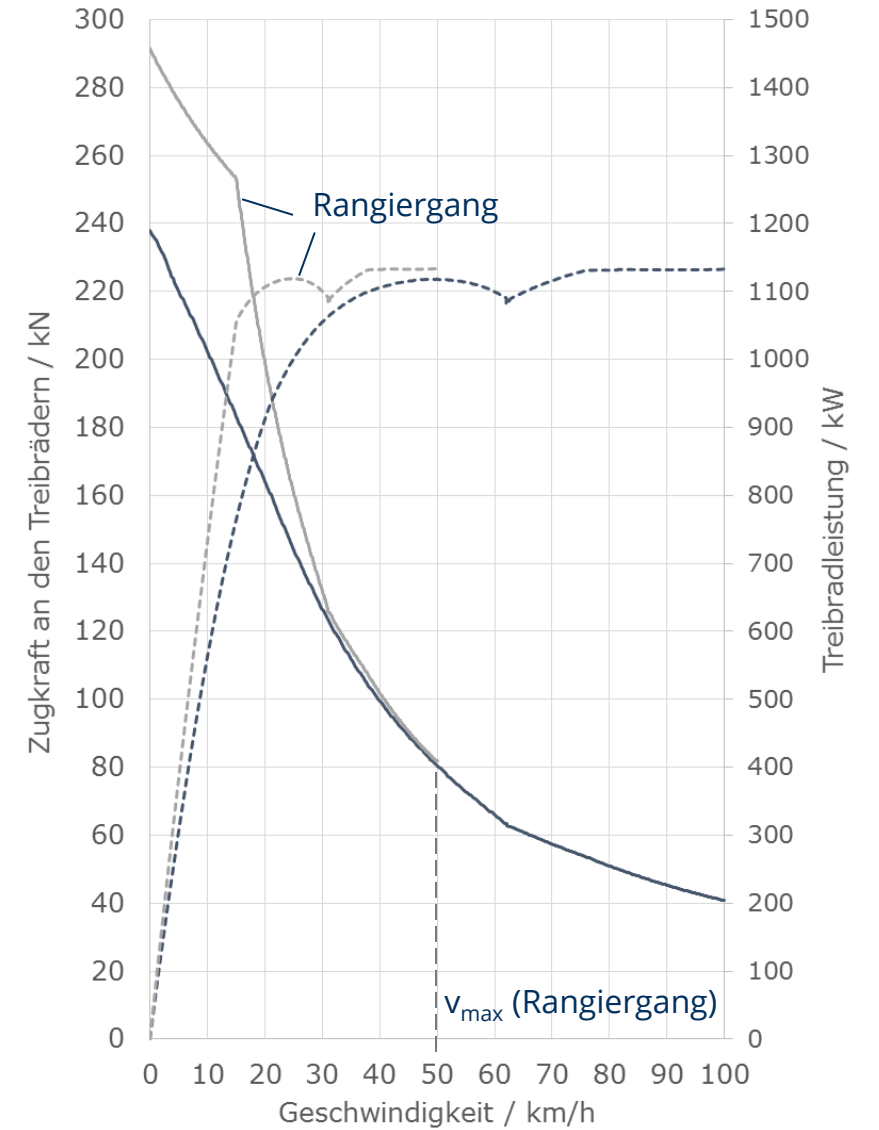


BR 612

- Treibradzugkraft
- - - Treibradleistung

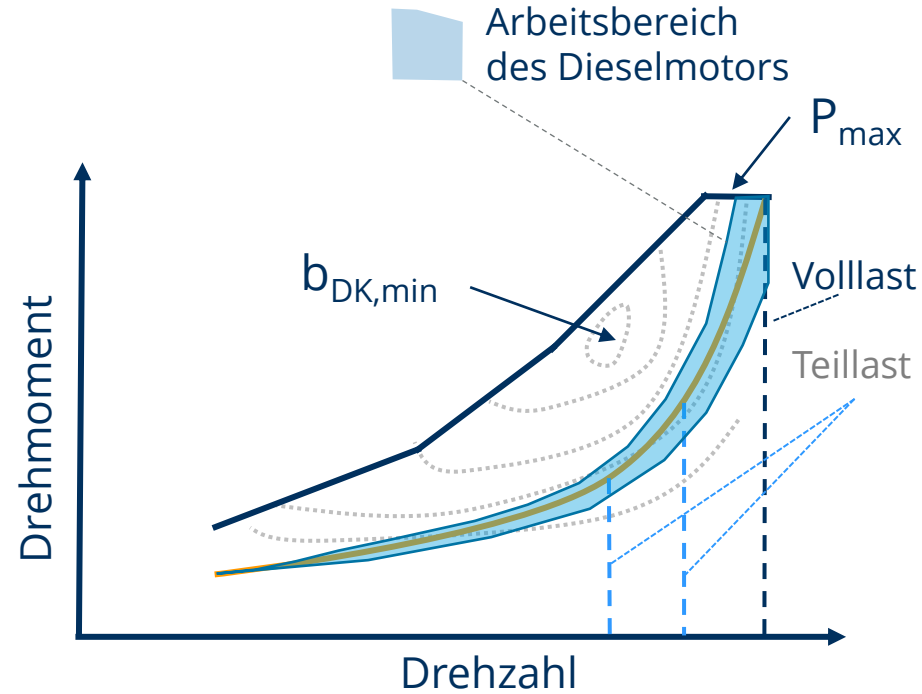
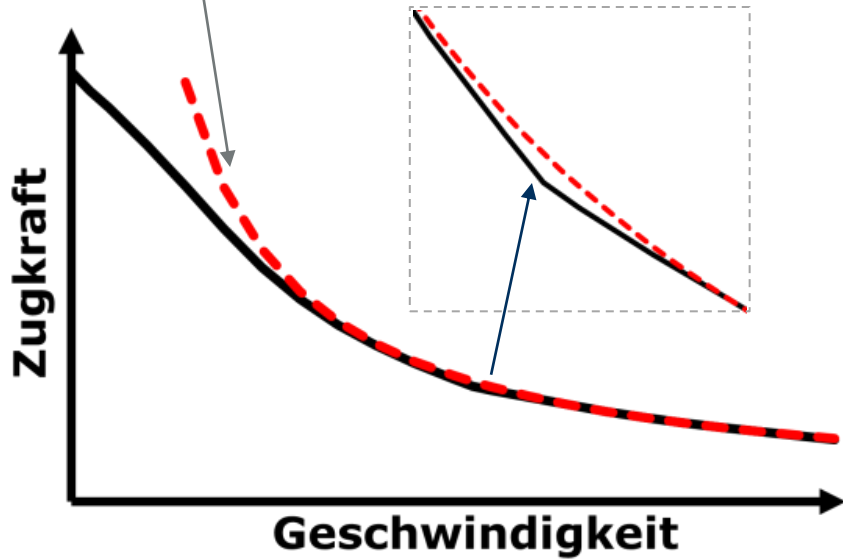


Vossloh G1206



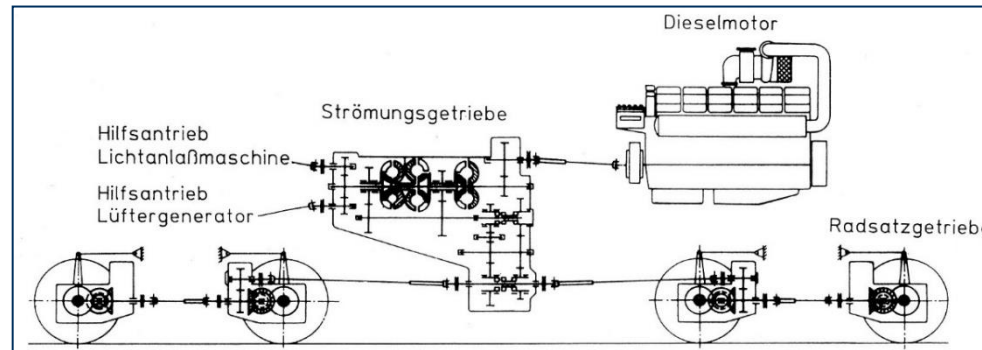
# Charakterisierung der hydrodynamischen Leistungsübertragung

Leistungshyperbel  
(Soll-Zugkraft)



- $v \neq n_{DM}$
- $F_T \neq M_{DM}$
- $P_T \neq \text{const.}$
- $P_{DM,max}$  dauerhaft

# Hydrodynamische Leistungsübertragung



Bsp.:  
BR 612

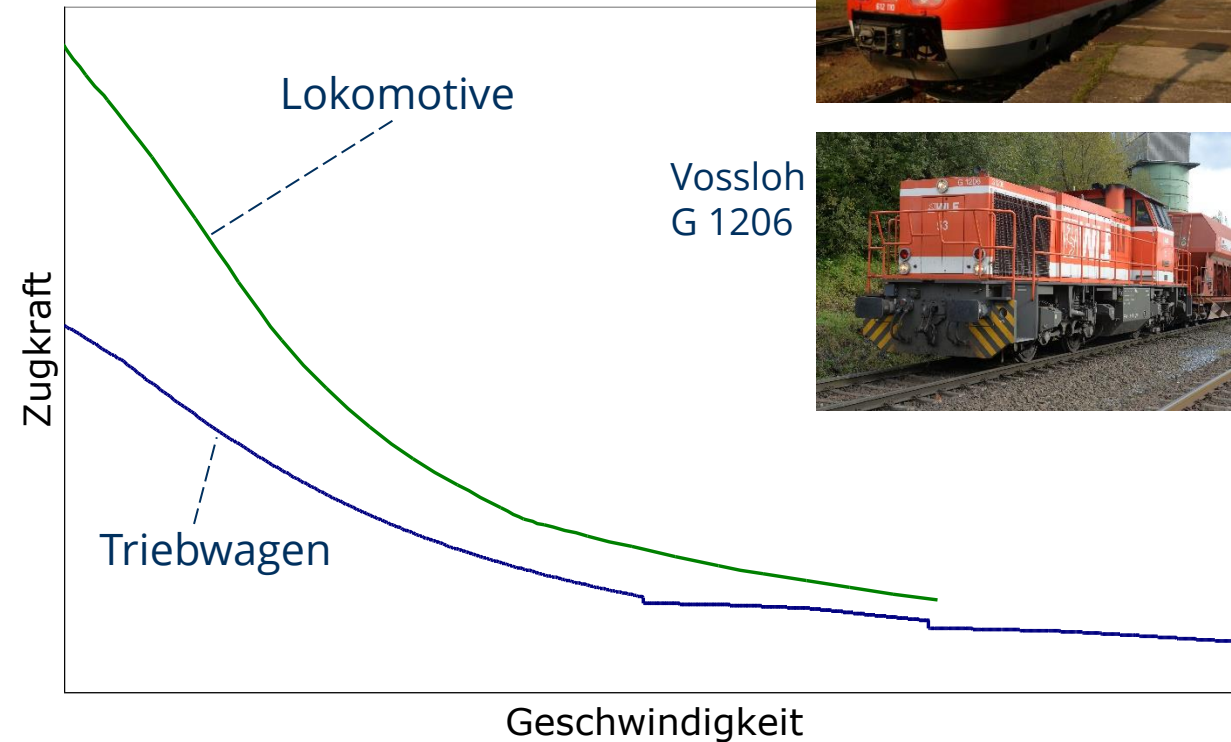


## Vorteile:

- + geringe Fahrtrichtungswechselzeiten (Wendegetriebe)
- + geringerer Raumbedarf
- + u.U. geringe Obsoleszenz
- + mechanisch robust

## Nachteile:

- kein Einzelradsatzantrieb möglich
- Gesamtwirkungsgrad suboptimal
- thermische Begrenzung bei Anfahrt
- Zugkraftsprünge (Strömungskupplungen)
- nicht sinnvoll mit Energiespeichern erweiterbar



# Hydrodynamische Leistungsübertragung



Beispiel 1: Vossloh G 1206

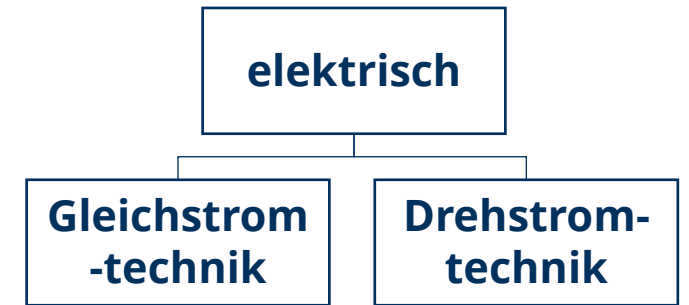
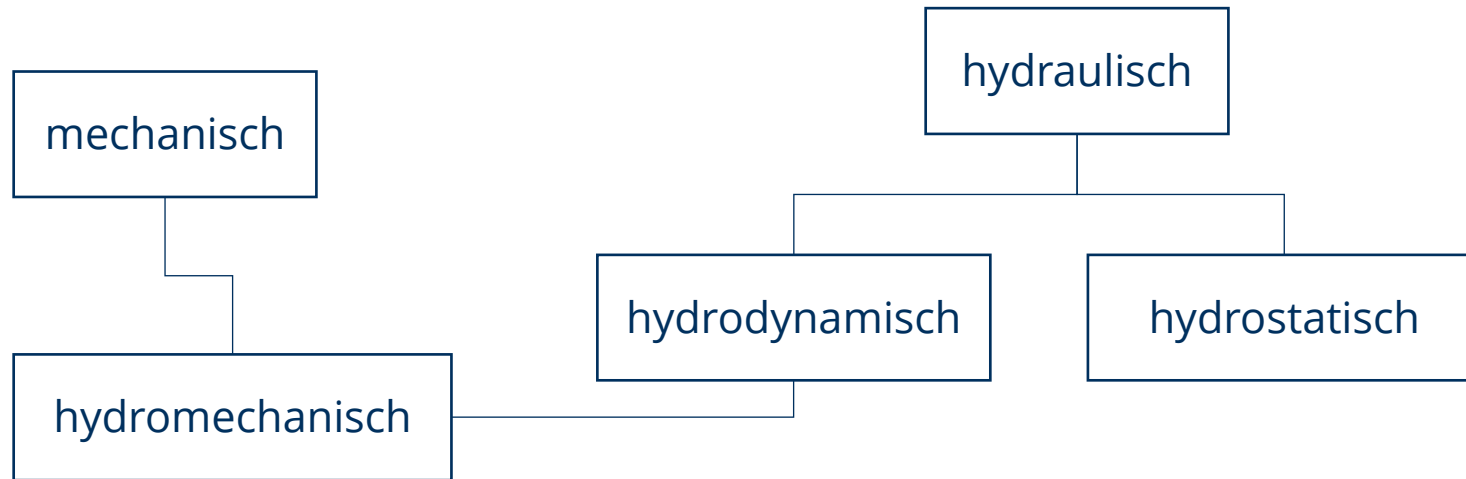


Beispiel2: BR 612

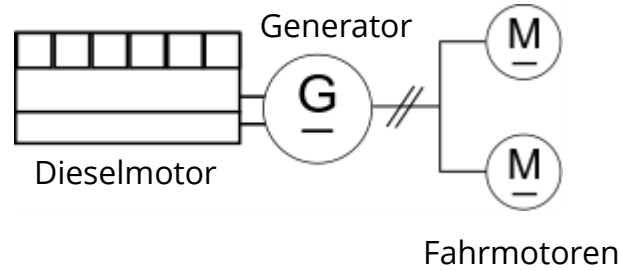
- ✓ 1. Verschleißfreie Anfahrmöglichkeit
- ✓ 2. Generierung hoher Zugkräfte (mindestens: bei kleinen Geschwindigkeiten)
- ✗ 3. Zugkraftentwicklung entlang der Leistungshyperbel und ohne Unstetigkeiten
- ✓ 4. dauerhafte Ausnutzung der Dieselmotorleistung (nur bei Verwendung von Wandlern)
- ✓ 5. stufenlose Zugkraftregelung
- ✓ 6. Ermöglichung einer selektiven Radsatzschlupfregelung
- ✓ 7. Ermöglichung eines energetisch günstigen Betriebs des Dieselmotors (Primärkennlinie)
- ✓ 8. hoher Übertragungswirkungsgrad über weiten Drehzahl- und Drehmomentbereich
- ✗ 9. thermische Robustheit bei Vollast und kleinen Geschwindigkeiten
- ✓ 10. Umkehr des Leistungsflusses bei Bremsvorgängen ermöglichen (dynamische Bremse)

# Leistungsübertragungen

## Übersicht



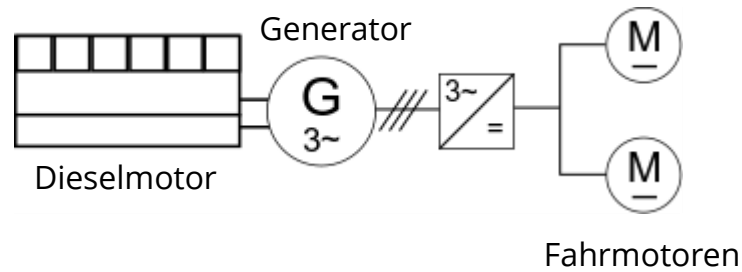
# Elektrische Leistungsübertragung



DC-DC



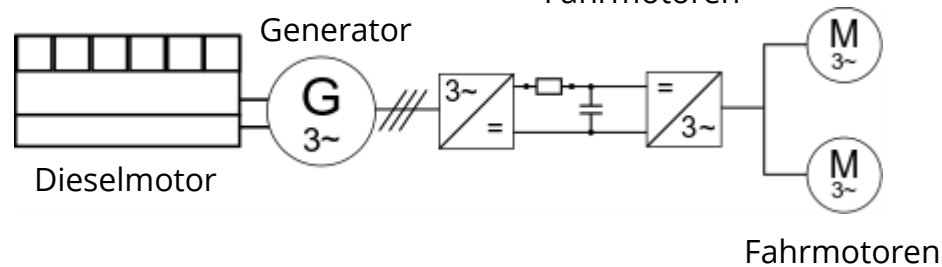
Heute in der westlichen Welt fast verschwunden.



AC-DC



Bei älteren Bestandsfahrzeugen sowie in Amerika von Bedeutung.



AC-AC



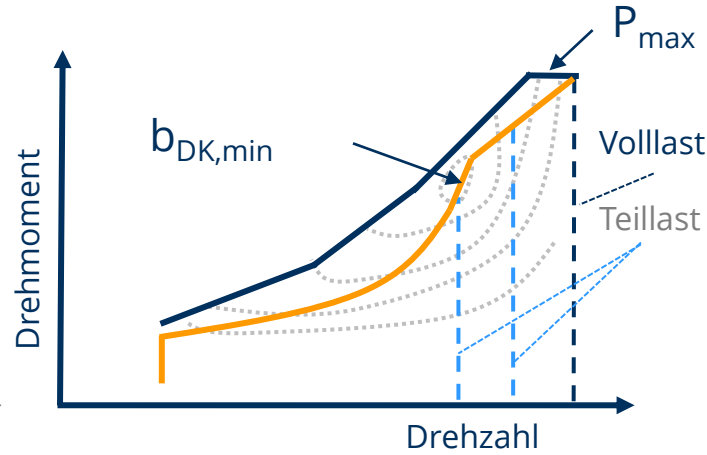
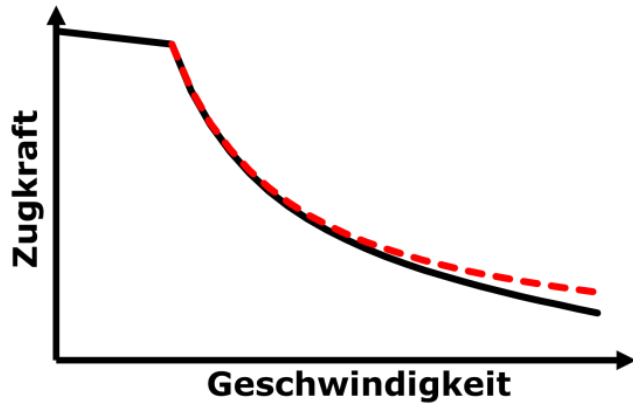
Stand der Technik

Die heute im Schienenfahrzeugbau am weitesten verbreiteten Fahrmotoren sind

**Gleichstrom-Reihenschlussmotor** und **Drehstromasynchronmotor**

# Charakterisierung der elektrischen Leistungsübertragung

## elektrische Lü (AC-DC)



$$v \neq n_{DM}$$

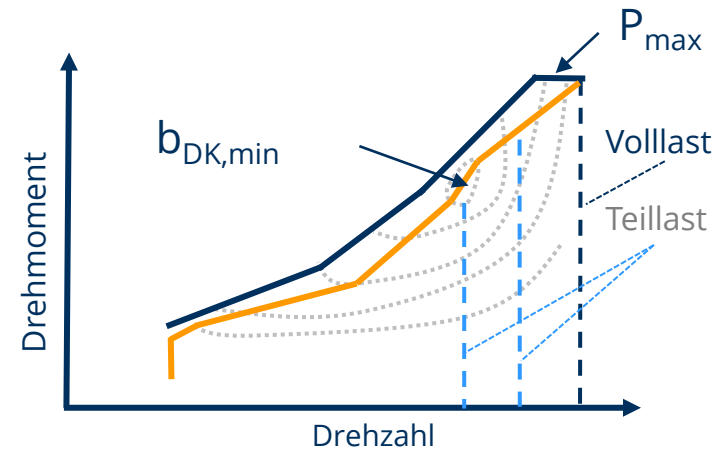
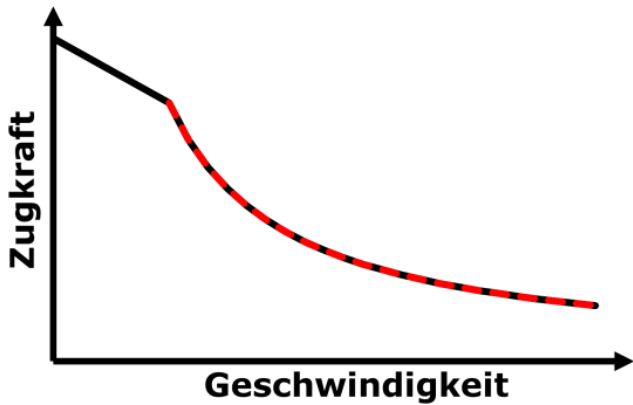
$$F_T \neq M_{DM}$$

$$P_T \neq \text{const.}$$

$$P_{DM,max} \text{ dauerhaft}$$



## elektrische Lü (AC-AC)



$$v \neq n_{DM}$$

$$F_T \neq M_{DM}$$

$$P_T = \text{const. (} v > v_{\ddot{u}} \text{)}$$

$$P_{DM,max} \text{ dauerhaft}$$



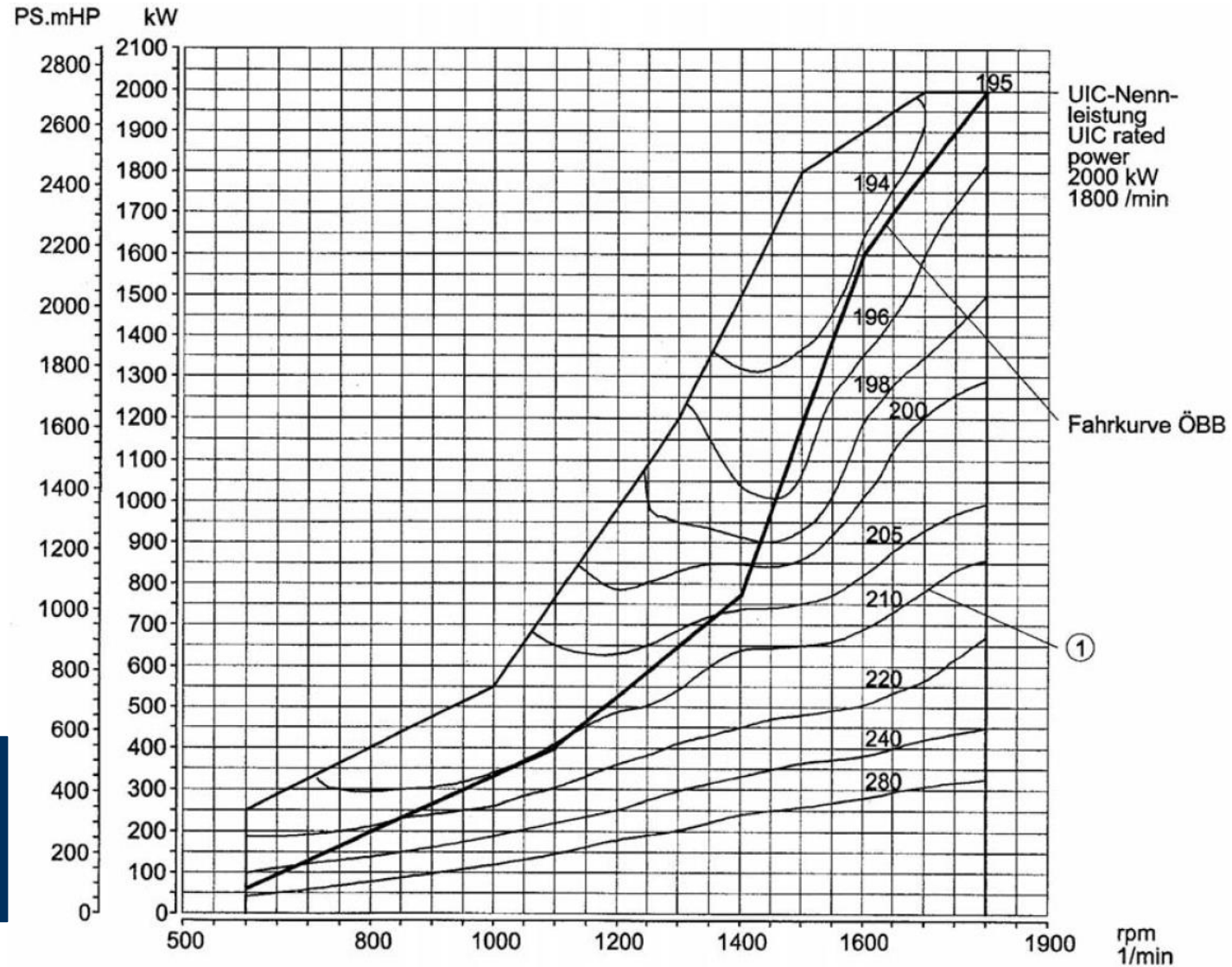
# Dieselektrische Leistungsübertragung

## Zusammenspiel Motor/Generator

Beispiel: Siemens ER 20



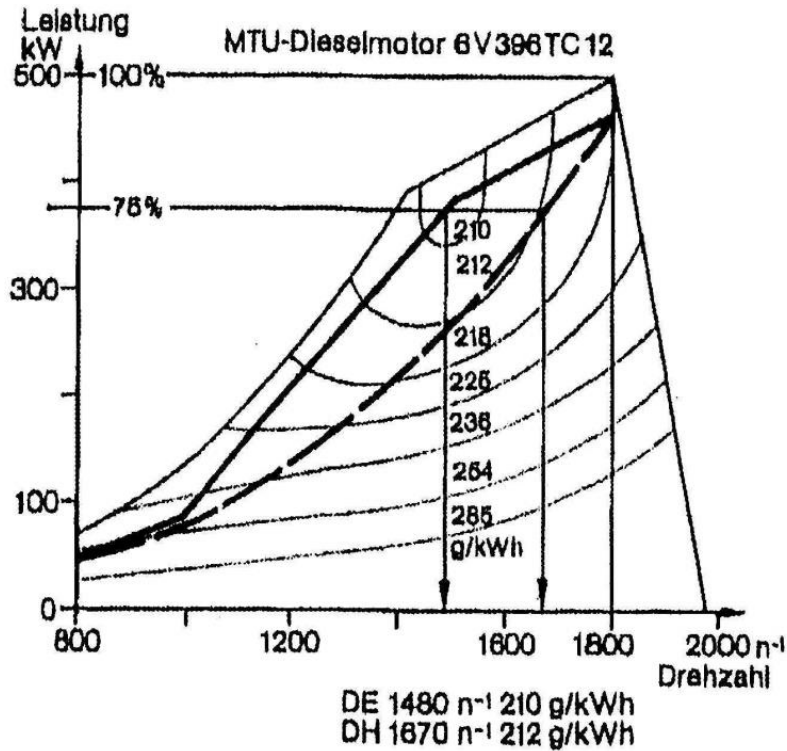
Durch geschickte Steuerung der Generatorerregung kann (energetisch) optimale Fahrkurve in das Dieselmotorkennfeld gelegt werden.



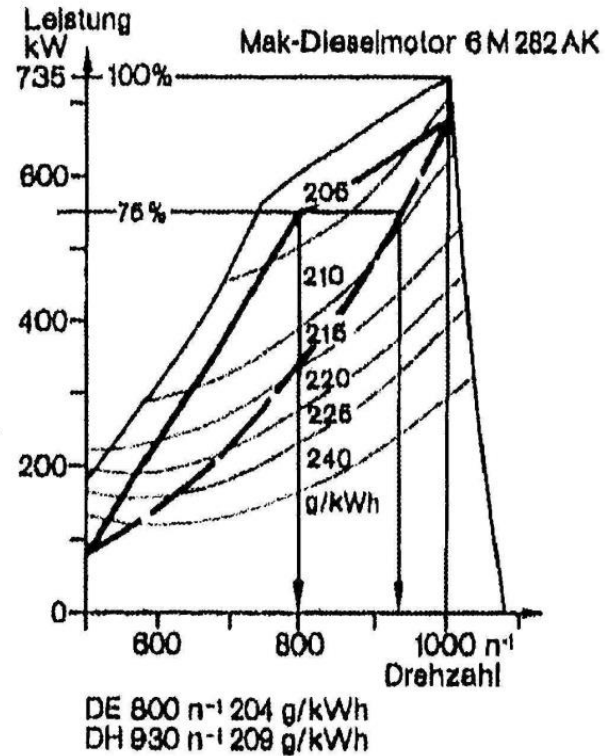
# Dieselelektrische vs. hydrodynamische Leistungsübertragung

## Zusammenspiel Motor/Generator

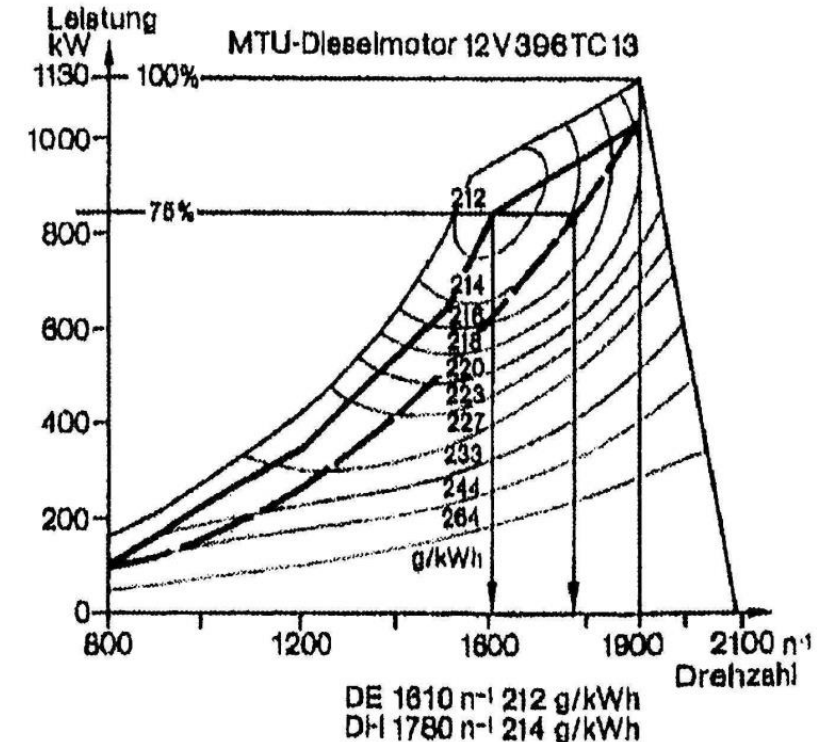
Vergleich der Primärkennungen von dieselhydraulischer und dieselelektrischer Lü



Ersparnis: 2 g/kWh = 0,75 kg/h  
relativ:  $b_{DK,DE} = 0,99 b_{DK,DH}$



Ersparnis: 5 g/kWh = 2,76 kg/h  
relativ:  $b_{DK,DE} = 0,98 b_{DK,DH}$

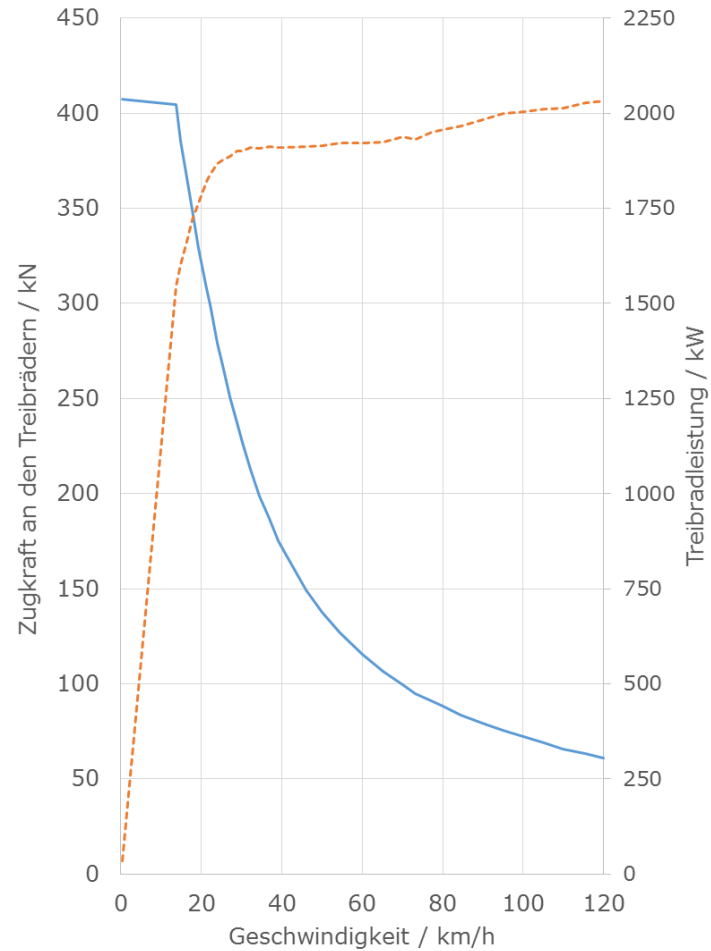


Ersparnis: 2 g/kWh = 1,7 kg/h  
relativ:  $b_{DK,DE} = 0,99 b_{DK,DH}$

Quelle: Teich in eb - Elektrische Bahnen 4/1983, S. 127

# Zugkraftdiagramme

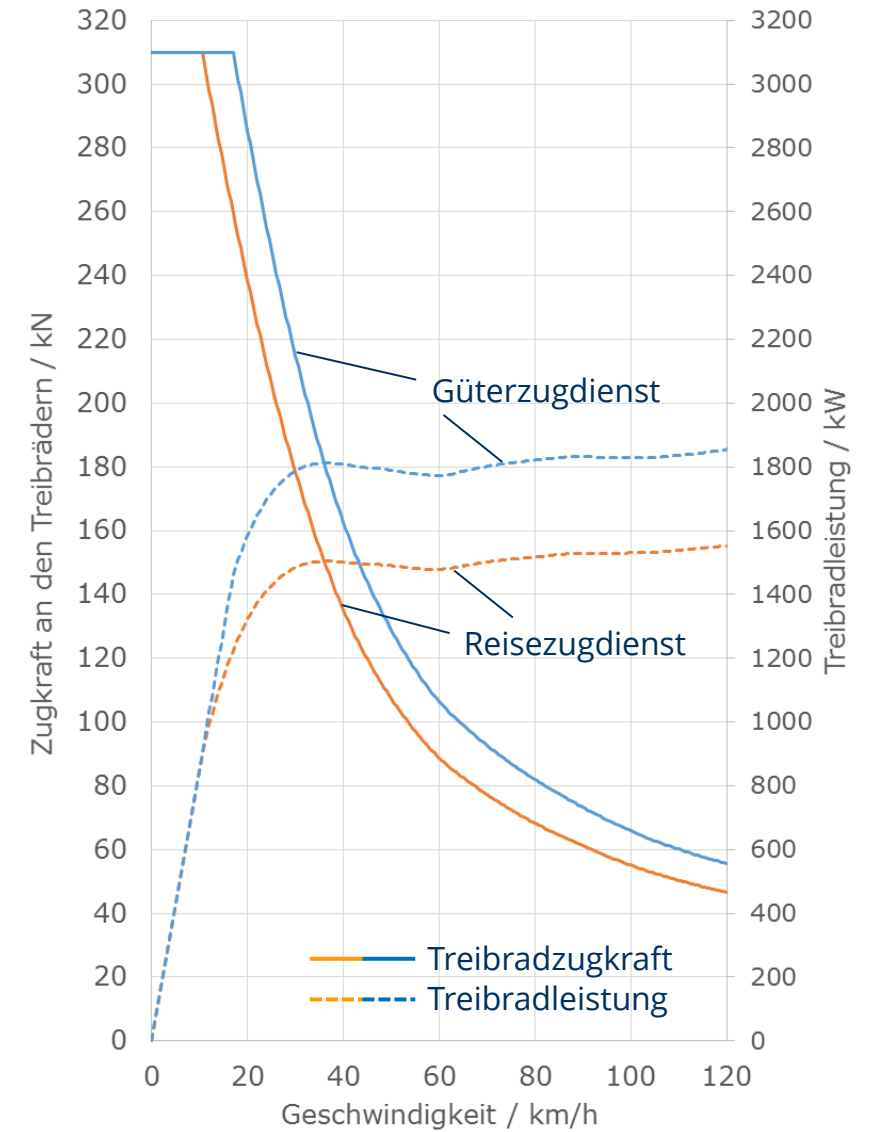
## Dieselelektrische Fahrzeuge



BR 247 (class 66)

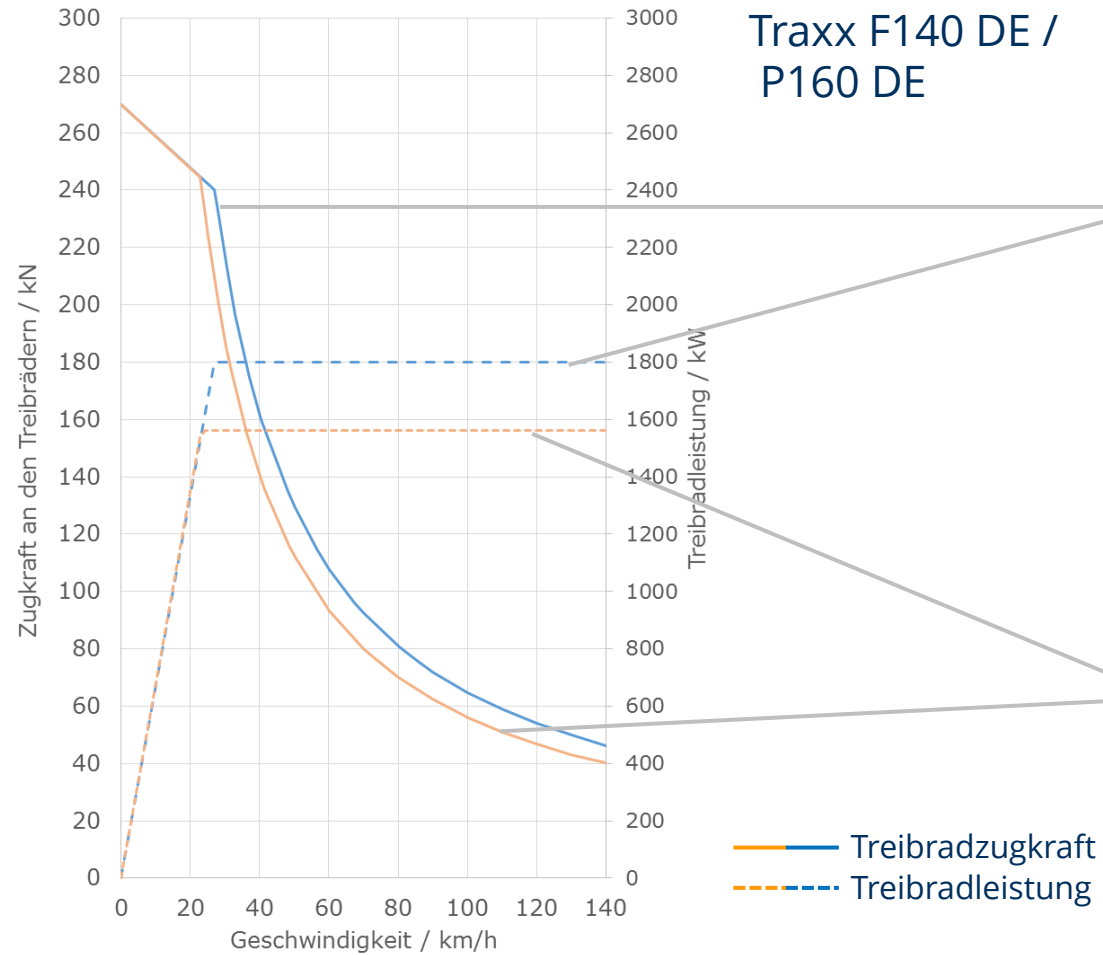


BR 232



# Zugkraftdiagramme

## Dieselelektrische Fahrzeuge (DAT)



Güterzugbetrieb



Reisezugbetrieb

# Elektrische Leistungsübertragung

## Vorteile:

- + bestmögliche Ausnutzung des Dieselmotors
- + stetige Zugkraftkurve
- + konstante Leistung an Treibrädern (AC-AC)
- + sehr flexible Anordnung der Aggregate
- + Erweiterbarkeit um Energiespeicher

## Nachteile:

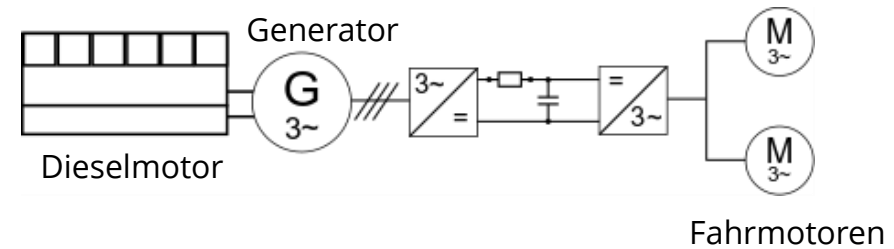
- zweifache Energiewandlung (Wirkungsgrad)
- hoher Regelungsaufwand
- Obsoleszenz (insbes. Leistungselektronik)



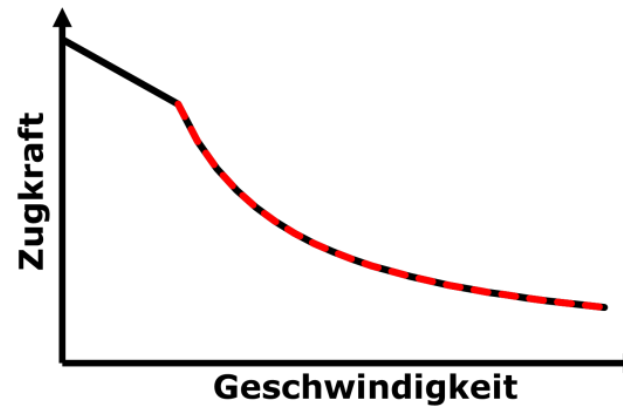
Bsp.: BR 247



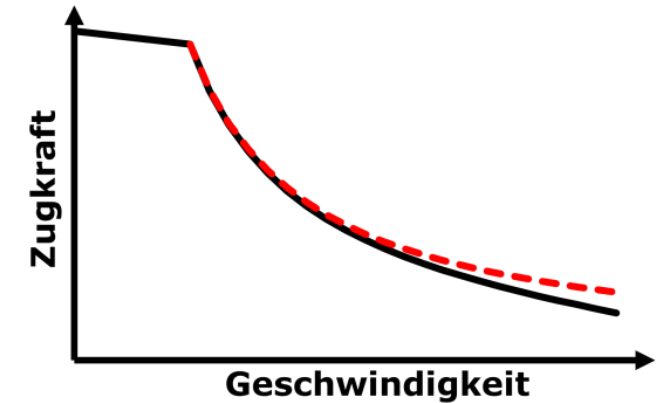
BR 245



## elektrische Lü (AC-AC)



## elektrische Lü (AC-DC)



# Elektrische Leistungsübertragung



Beispiel 1: Traxx DE



Beispiel 2: class 66

- ✓ 1. Verschleißfreie Anfahrmöglichkeit
- ✓ 2. Generierung hoher Zugkräfte (mindestens: bei kleinen Geschwindigkeiten)
- ✓ 3. Zugkraftentwicklung entlang der Leistungshyperbel (**nur DAT<sup>1</sup>**) und ohne Unstetigkeiten
- ✓ 4. dauerhafte Ausnutzung der Dieselmotorleistung (nur bei Verwendung von Wandlern)
- ✓ 5. stufenlose Zugkraftregelung
- ✓ 6. Ermöglichung einer selektiven Radsatzschlupfregelung
- ✓ 7. Ermöglichung eines energetisch günstigen Betriebs des Dieselmotors (Primärkennlinie)
- ✓ 8. hoher Übertragungswirkungsgrad über weiten Drehzahl- und Drehmomentbereich
- ✓ 9. thermische Robustheit bei Vollast und kleinen Geschwindigkeiten (**nur DAT<sup>1</sup>**)
- ✓ 10. Umkehr des Leistungsflusses bei Bremsvorgängen ermöglichen (dynamische Bremse)

<sup>1</sup> DAT: **D**rehstrom**A**ntriebs**T**echnik



# Zugkraftherzeugung bei elektrischen Triebfahrzeugen



# Fahrdynamische Charakterisierung der Elektrotraktion

## „Altbau“-Fahrzeuge

Gleichstrom-  
Reihenschluss-Motoren



Mischstrom-Motor



Wechselstrom-  
Reihenschluss-Motor



- Produktionsjahre: 1960 - 1994
- ggf. gestufte Zugkraftregelung
- Kurzzeit- vs. Dauerleistung
- nicht rückspeisefähig
- $F_{T,max}$  : ca. 50...75 kN / Radsatz
- Leistung: 0,9...1,3 MW/Radsatz
- keine Leistungskonstanz

vs.

## „Neubau“-Fahrzeuge

Drehstrom-  
Asynchron-Motor



Drehstrom-  
Synchron-Motor



- Produktionsjahre: 1980 - heute
- stufenlose Zugkraftregelung
- Kurzzeit-  $\approx$  Dauerleistung
- rückspeisefähig
- hohe Kraftschlussausnutzung
- $F_{T,max}$  : ca. 70...80 kN / Radsatz
- Leistung: 1,0...1,6 MW/Radsatz
- Leistungskonstanz erreichbar

höherer Wirkungsgrad  
höherer Leistungsfaktor

# Zugkraftdiagramm „Altbau“-Fahrzeug

Konventionelle Antriebstechnik, Beispiel BR 143

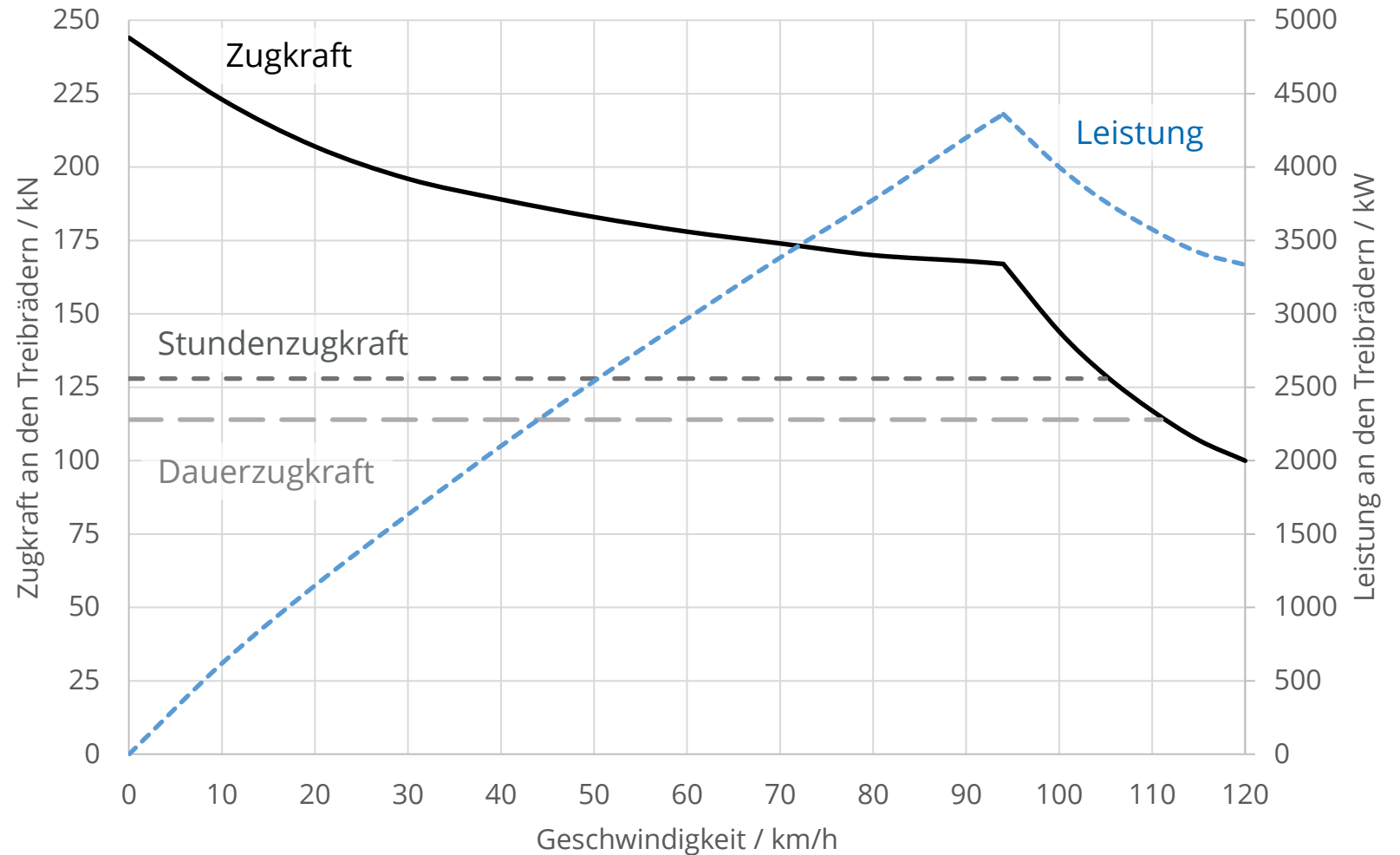


Baujahre: 1982 - 1991

stufenlose Zugrafteinstellung  
durch Thyristor-Anschnitt-  
Steuerung

maximale Kraftschlussausnutzung  
 $\tau = 0,33$

Nennleistung: 4220 kW  
Stundenleistung: 3720 kW  
Dauerleistung: 3540 kW



# Zugkraftdiagramm „Altbau“-Fahrzeug

Konventionelle Antriebstechnik, Beispiel BR 111



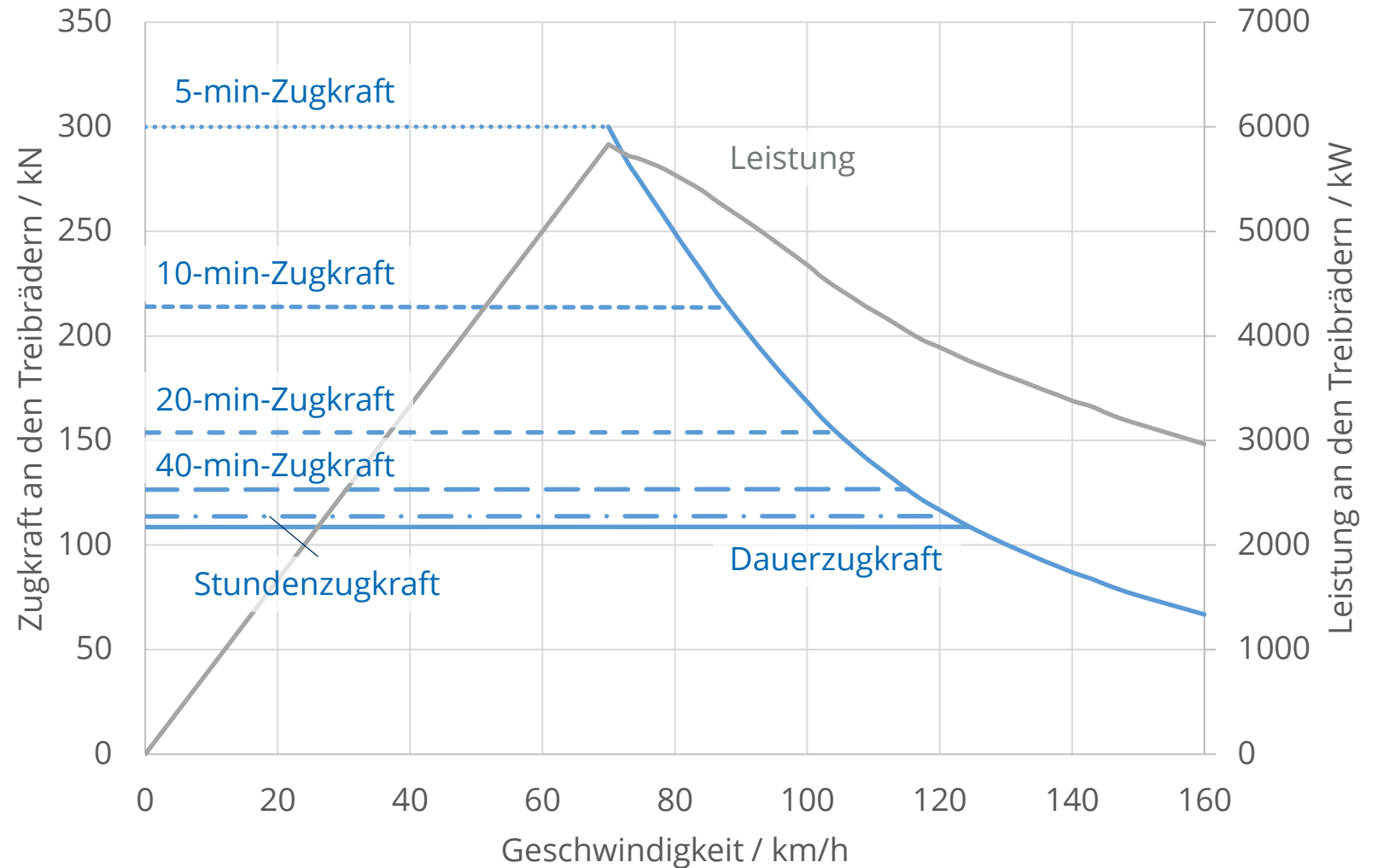
Baujahre: 1974 - 1984

28 Fahrstufen (Schaltwerk)

maximale Kraftschlussausnutzung  
 $\tau = 0,33$

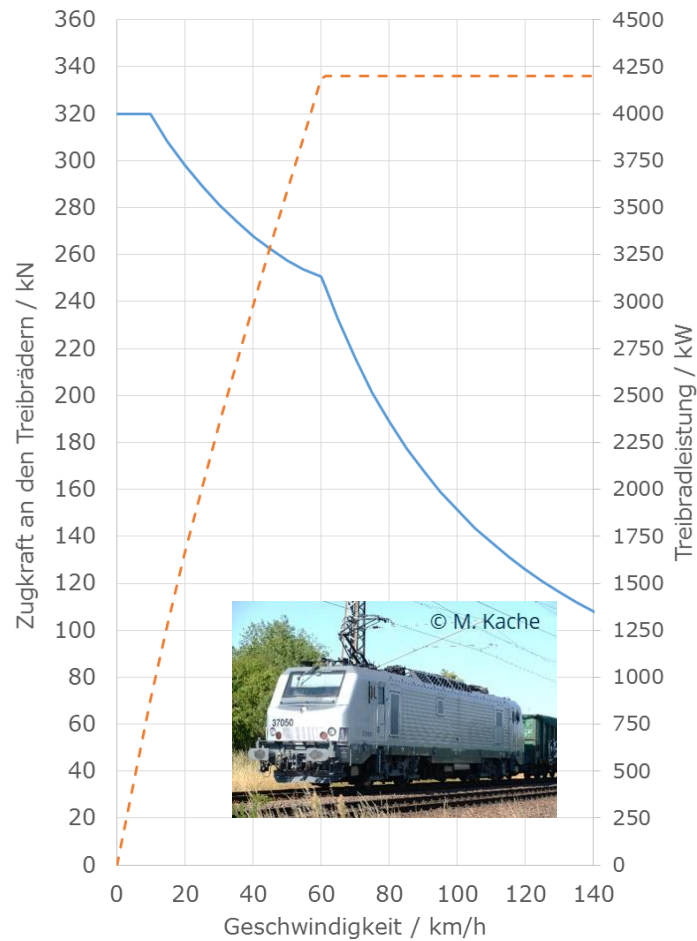
Stundenleistung: 3700 kW

Dauerleistung: 3620 kW

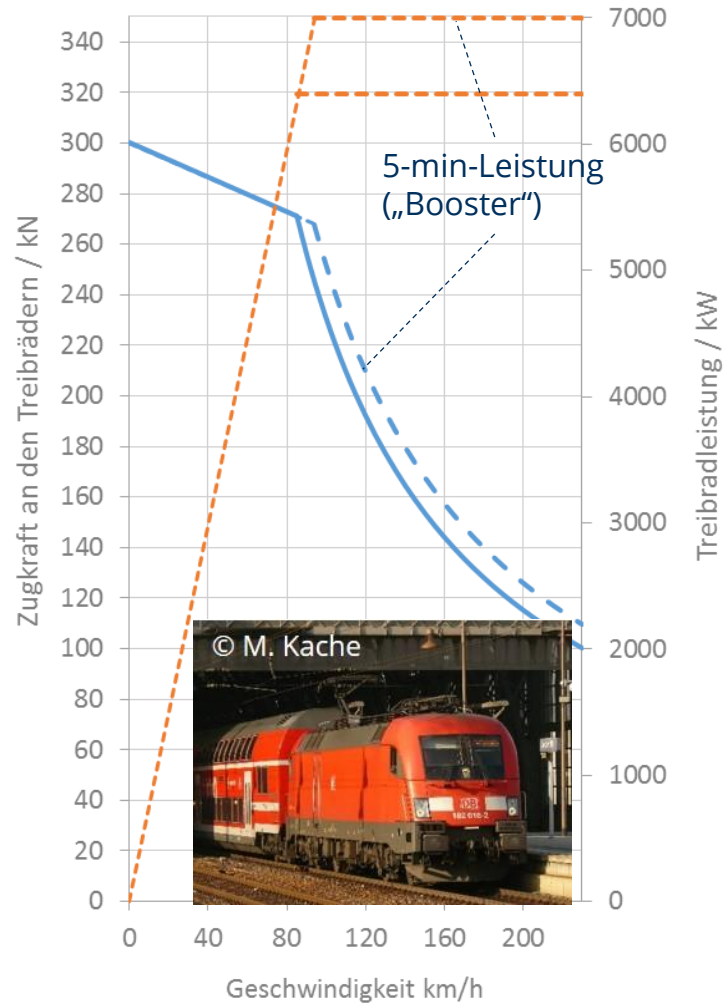


# Zugkraftdiagramme Drehstromtriebfahrzeuge

BB 37000 (SNCF)



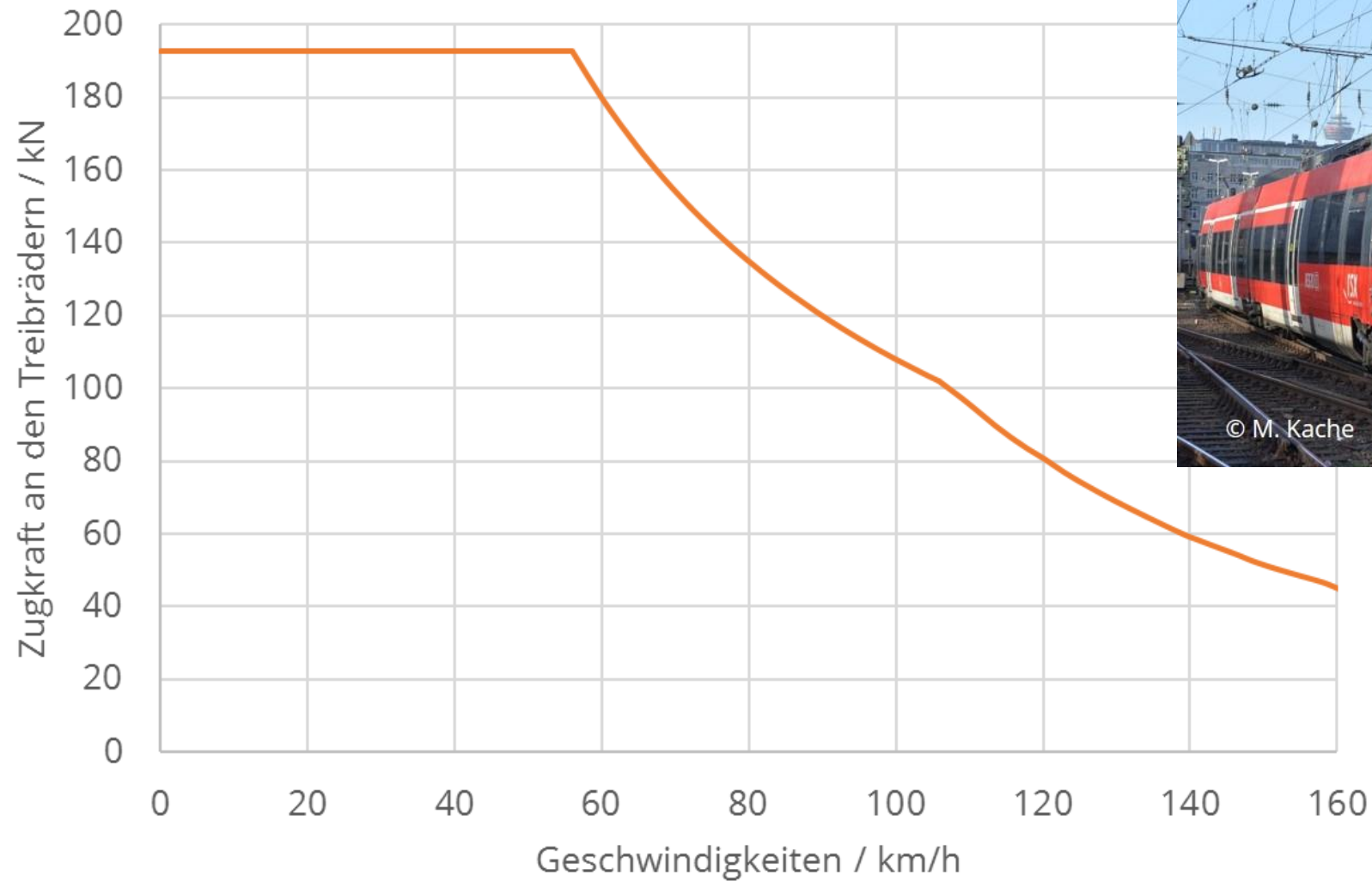
BR 182 (DB AG)



BR 193 (Siemens Vectron)



# Zugkraftdiagramme Drehstromtriebfahrzeuge

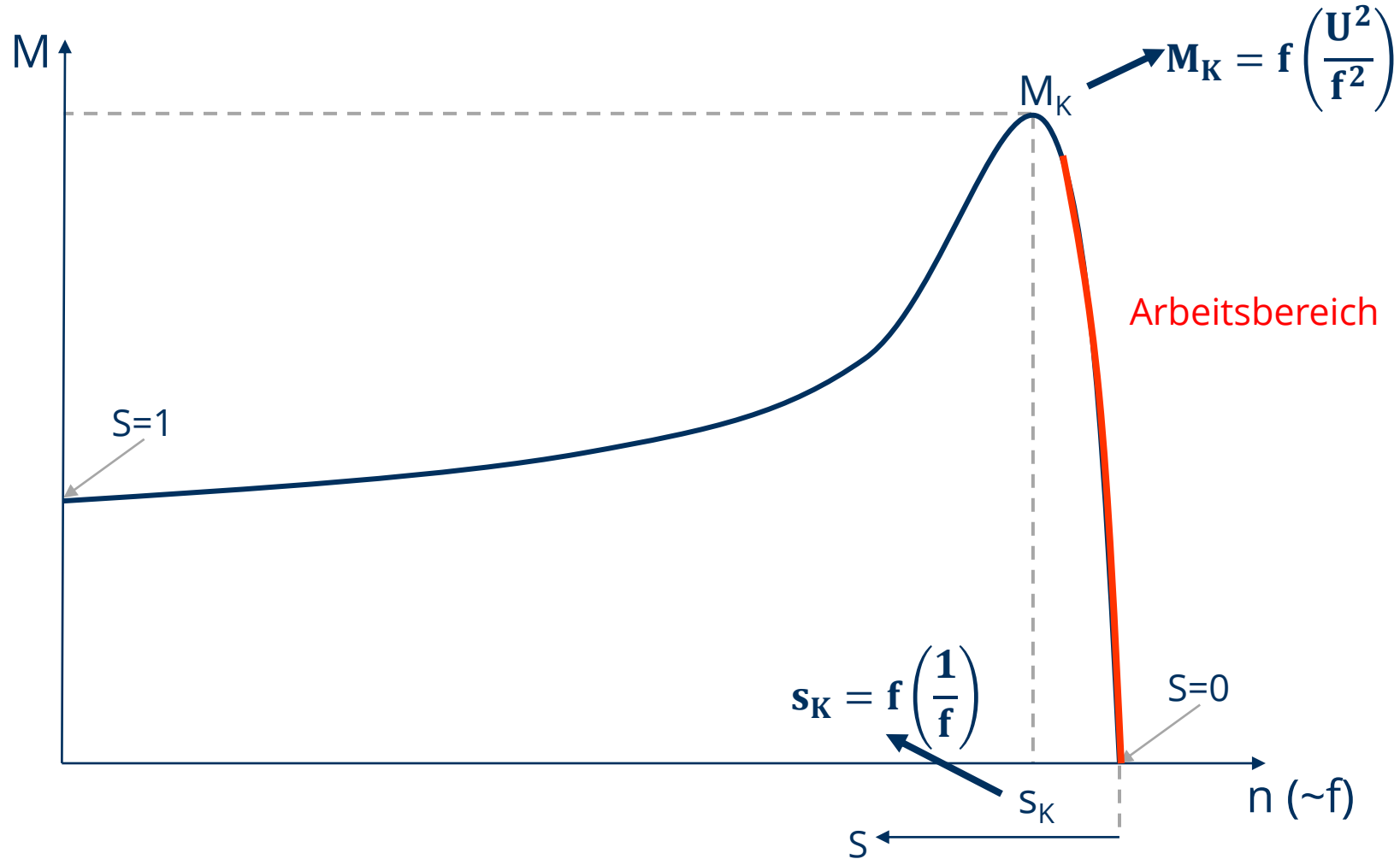


BR 442.2 (Talent 2, 4teilig.)

Woher kommt die zweite Unstetigkeit im Zugkraft-Verlauf?

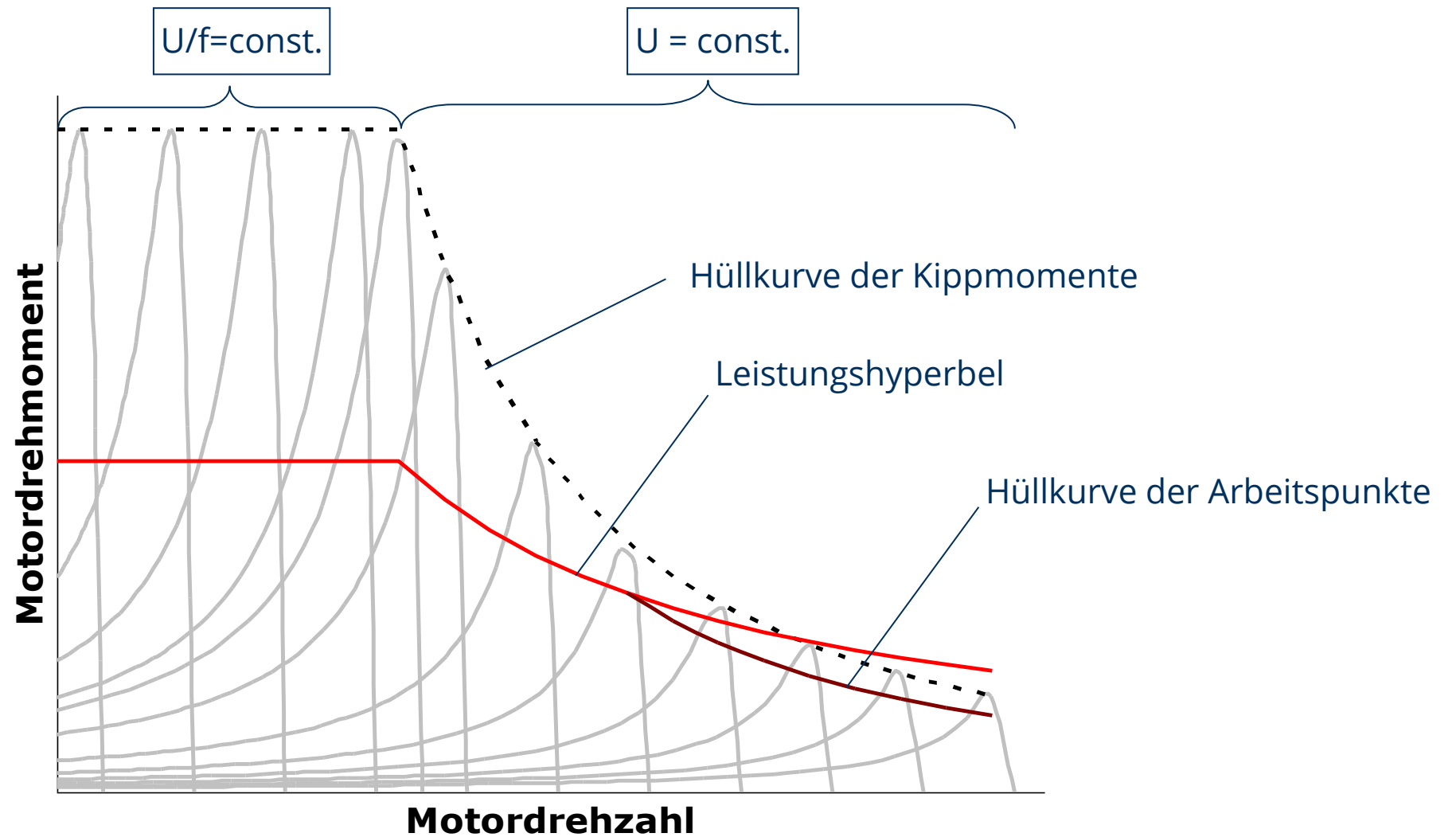
# Drehstromasynchronmaschine

## Betriebsverhalten



# Drehstromasynchronmaschine

## Betriebsverhalten



# Zugkraftentwicklung von Mehrsystemtriebfahrzeugen

Dreisystem-Zug TGV POS der SNCF    Mehrsystem-Ellok BB 22200 der SNCF



**25 kV, 50 Hz:**

**9,28 MW**

**15 kV, 16,7 Hz:**

**6,68 MW**

**1,5 kV DC:**

**3,58 MW**



**25 kV, 50 Hz:**

**4,4 MW**

**1,5 kV DC:**

**4,4 MW**

Mehrsystem-Ellok BR 189



**25 kV, 50 Hz:**

**6,4 MW**

**15 kV, 16,7 Hz:**

**6,4 MW**

**3 kV DC:**

**6,0 MW**

**1,5 kV DC:**

**4,5 MW**

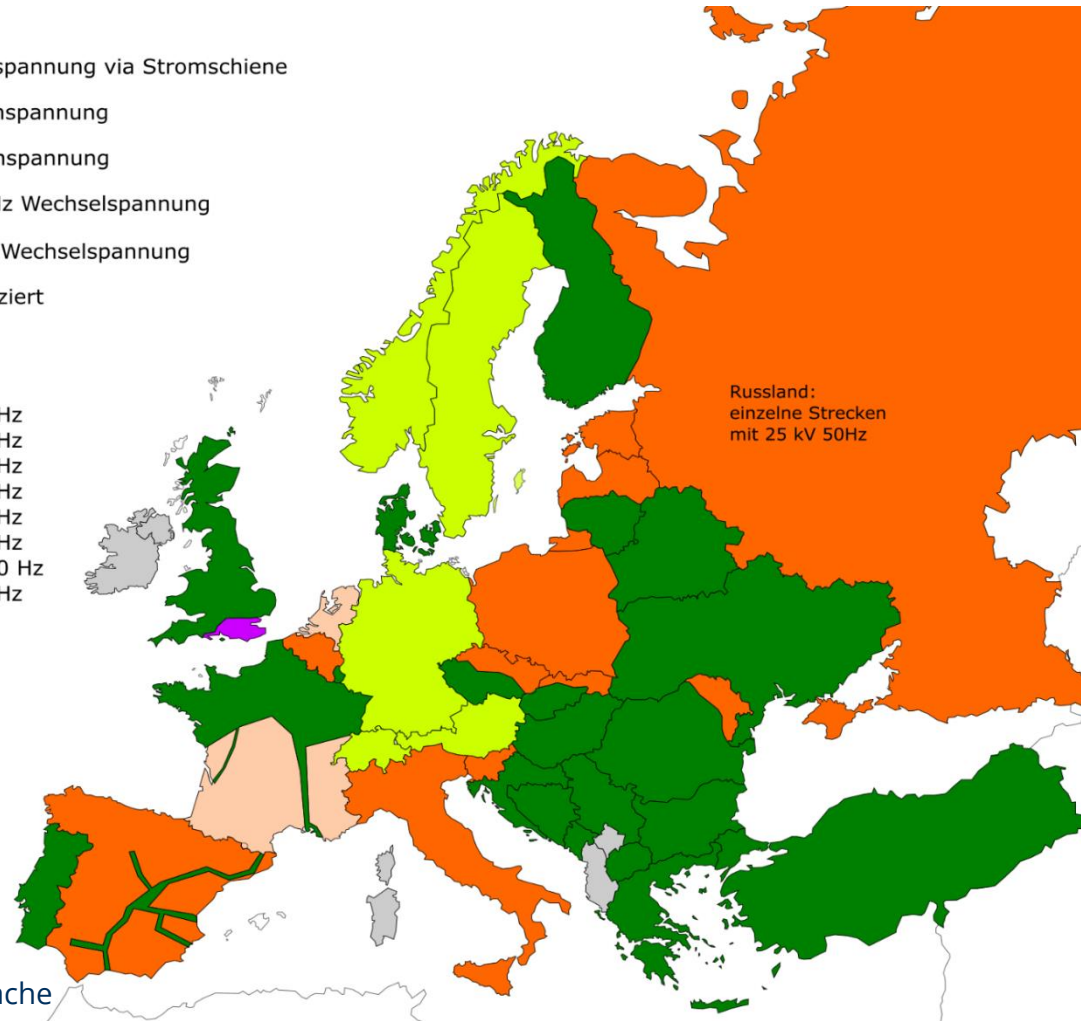
# Stromsysteme in Europa

## Legende:

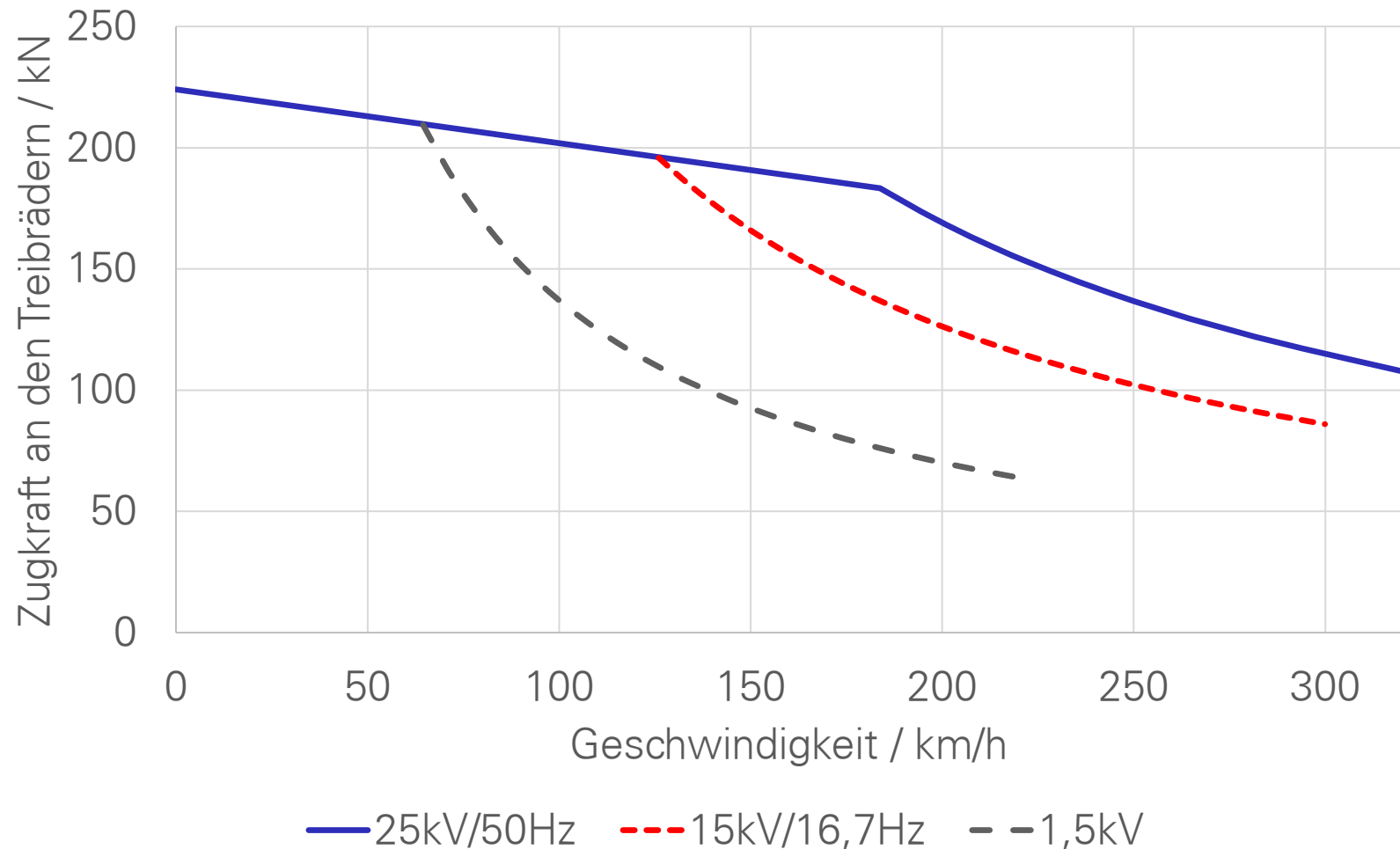
- 750 V Gleichspannung via Stromschiene
- 1500 V Gleichspannung
- 3000 V Gleichspannung
- 15 kV, 16,7 Hz Wechselfspannung
- 25 kV, 50 Hz Wechselfspannung
- nicht elektrifiziert

## weitere Netze:

- China: 25 kV 50 Hz
- Indien: 25 kV 50 Hz
- Japan: 20 kV 50 Hz  
20 kV 60 Hz  
25 kV 50 Hz
- USA: 11 kV 25 Hz  
12,5 kV 60 Hz  
25 kV 60 Hz



# Zugkraftentwicklung von Mehrsystemtriebfahrzeugen



TGV POS



# Zusatz: Zugkraftherzeugung bei unkonventionellen Triebfahrzeugen



# Zugkraftdiagramm Zweikraftfahrzeug

Bsp.: BR 187 (Bombardier Traxx 3 Lastmile)

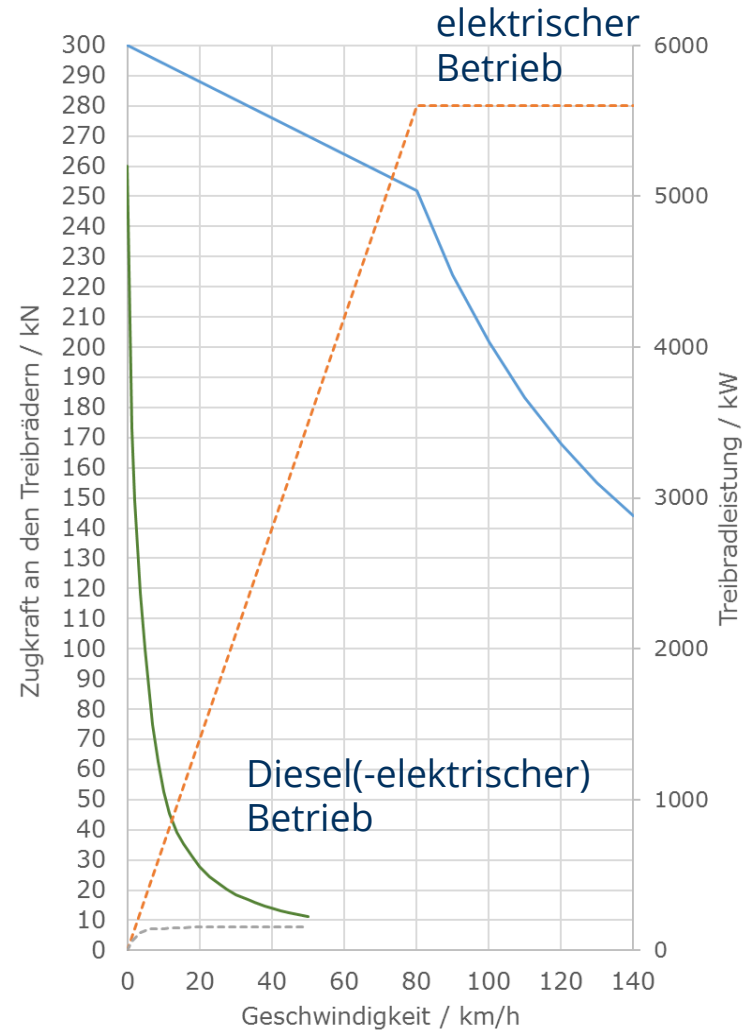


## Zweikrafttriebfahrzeug:

Umschaltung zwischen zwei Antriebsmodi möglich

Varianten:

Diesel / Elektrisch  
 Akku-Elektrisch / Elektrisch



## weitere Beispiele:

### B 81500 und B82500 (SNCF)



$P_{\text{elektrisch}} = 1,9 \text{ MW}$   
 $P_{\text{Diesel}} = 1,3 \text{ MW}$

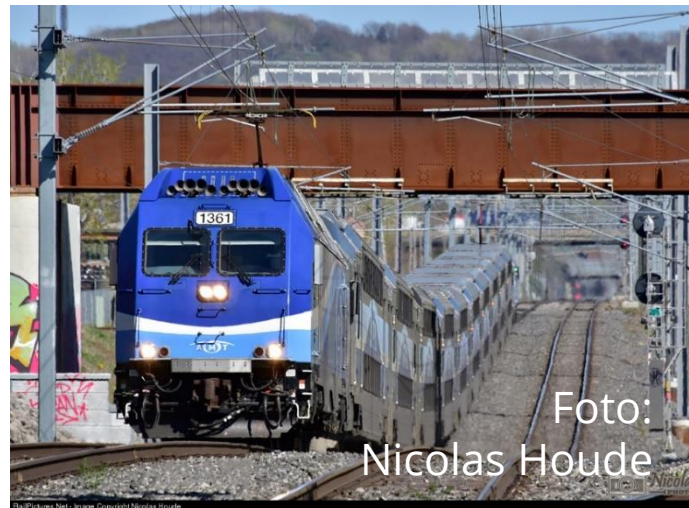
### B 83500, B 84500 + B 85900 (SNCF)



$P_{\text{elektrisch}} = 1,70 \dots 2,6 \text{ MW}$   
 $P_{\text{Diesel}} = 0,85 \dots 1,3 \text{ MW}$

# Zugkraftdiagramm Zweikraftfahrzeug

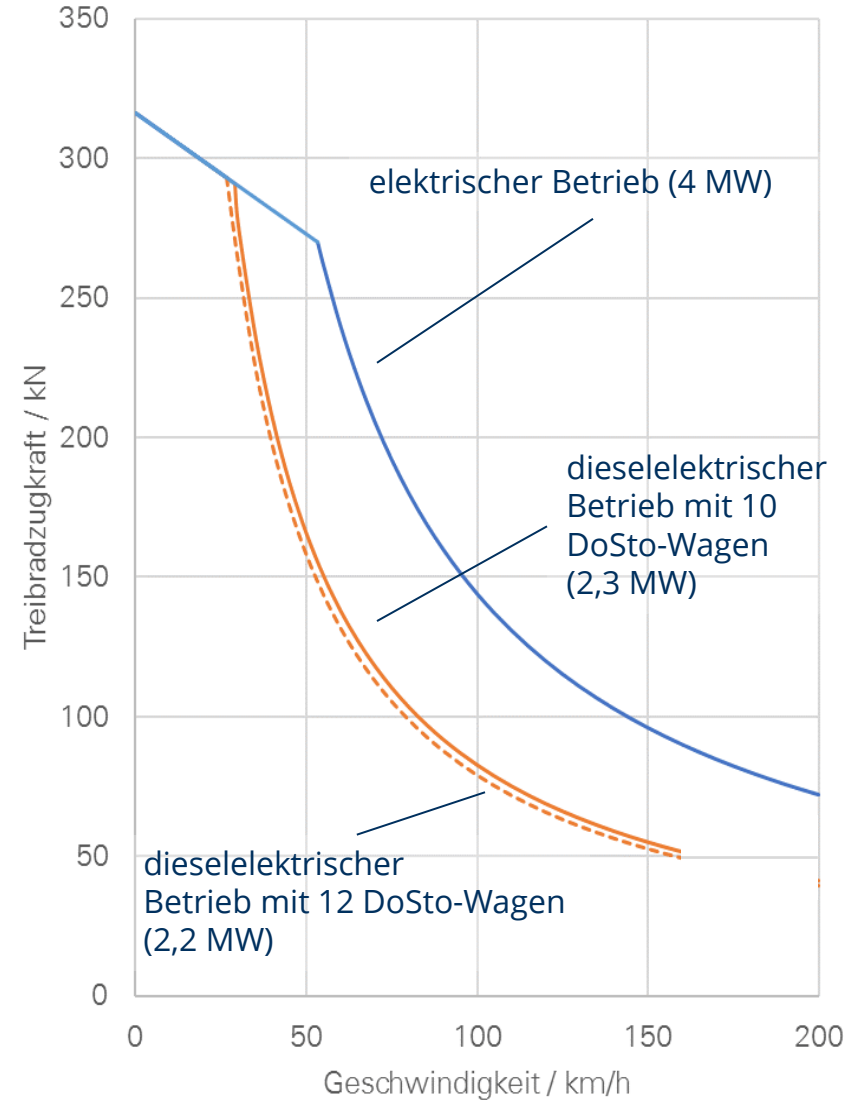
Bsp.: Bombardier ALP-45DP



# Zugkraftdiagramm Zweikraftfahrzeug

Bsp.: Bombardier ALP-45DP

Betreiber:	New Jersey Transit Agence Métropolitaine de Transport (Montréal)
Radsatzanordnung:	Bo' Bo'
Höchstgeschwindigkeit:	200 km/h (elektrisch), 160 km/h (diesel-elektrisch)
Treibradleistung (elektrisch):	4400 kW
Dieselmotorleistung:	2 x 1567 kW = 3134 kW
Gesamtmasse:	128 t
Radsatzfahrmasse:	32 t
Anfahrzugkraft:	316 kN
elektrische Bremskraft:	150 kN
Leistung Bremswiderstand:	1300 kW
Netzspannung:	25 kV/ 60 Hz und 12 kV/ 25 Hz

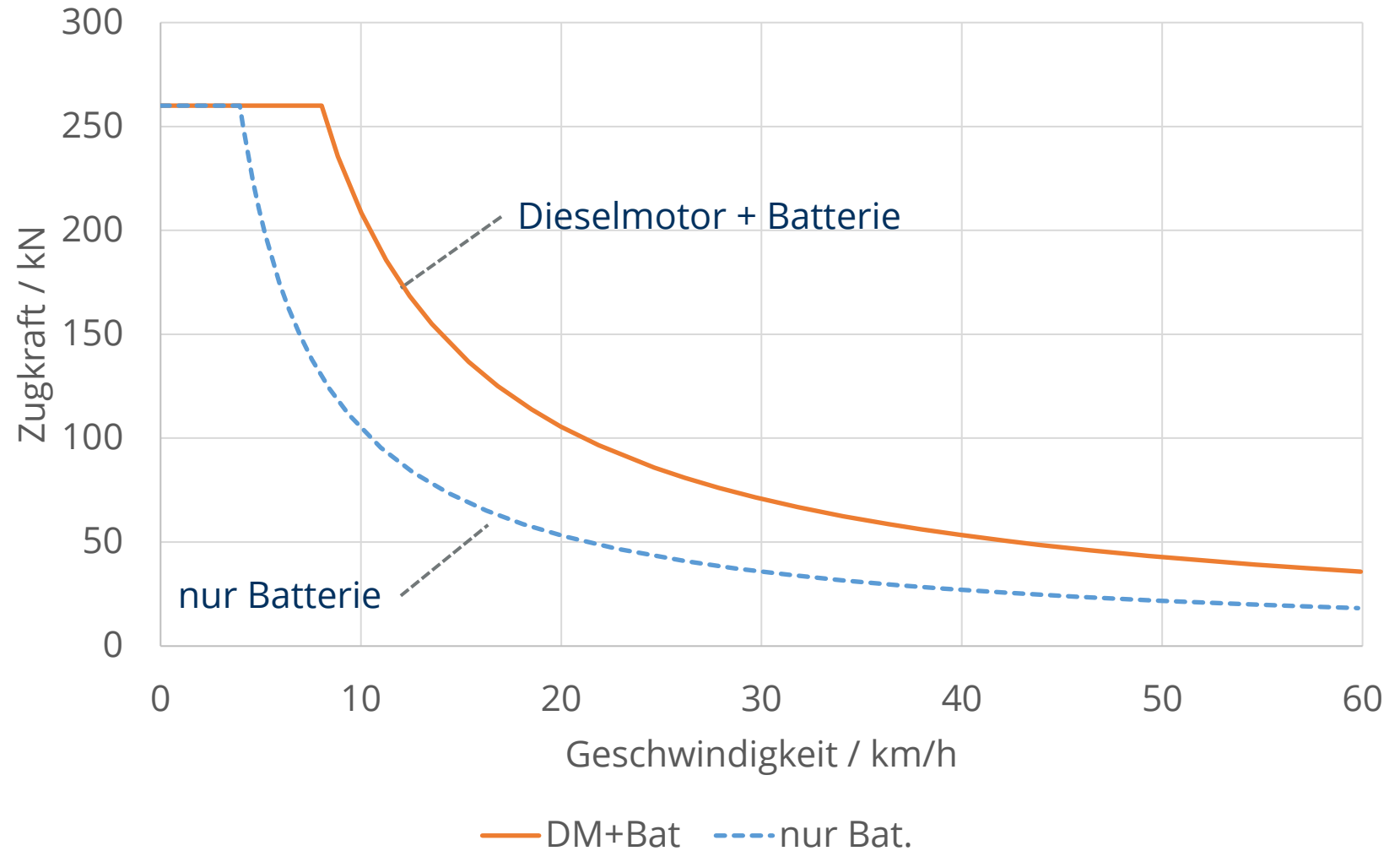


# Hybridlok

Beispiel: Gmeinder DE 75 BB Hybrid



$P_{DM}$  = 354 kW  
 $P_{T,max}$  = 600 kW  
 $P_{T,Bat}$  = 300 kW



# Antriebstechnologien

## Hochleistungsbahnen sind elektrisch



+



=



### Warum elektrisch gefahren wird

- Leistungsfähigkeit
- Leistungsdichte (Mehr Leistung bei gleicher Masse)
- Effizienz (Wirkungsgrad 80 % und Rückspeisung)
- Direkte Energienutzung (Oberleitung = kontinuierlich)
- Vor Ort sauber (U-Bahnen, Straßenbahnen)

### Wo wird daher elektrisch gefahren?

- U-Bahnen, Güterzüge, Hochgeschwindigkeitsverkehr, u.v.m.

# Antriebstechnologien

## Warum nicht immer elektrisch?



ODER



### Warum nicht überall elektrisch gefahren wird:

- Elektrifizierung nur teilweise oder gar nicht vorhanden (61 % Elektrifizierung 2020)
- Hoher zeitlicher Planungsaufwand (Teilweise 20 Jahre und mehr)
- Hohe Errichtungskosten (1,4 bis 3,6 Mio. €/eingleisiger km lt. DB Netz AG)
- Elektrifizierungswürdigkeit nicht überall gegeben → Wirtschaftlichkeit nicht geben
- **Dieselantriebe weiterhin verbreitet (mit 10 % der Verkehrsleistung)**
- **Elektromobilität auf der Schiene ist ein wichtiger Bestandteil des Schienenverkehrs**

# Status Quo in Deutschland

## Elektrifizierungssituation

Die oberleitungsgebundene elektrische Traktion ist die effizienteste Antriebsart – Seit 140 Jahren

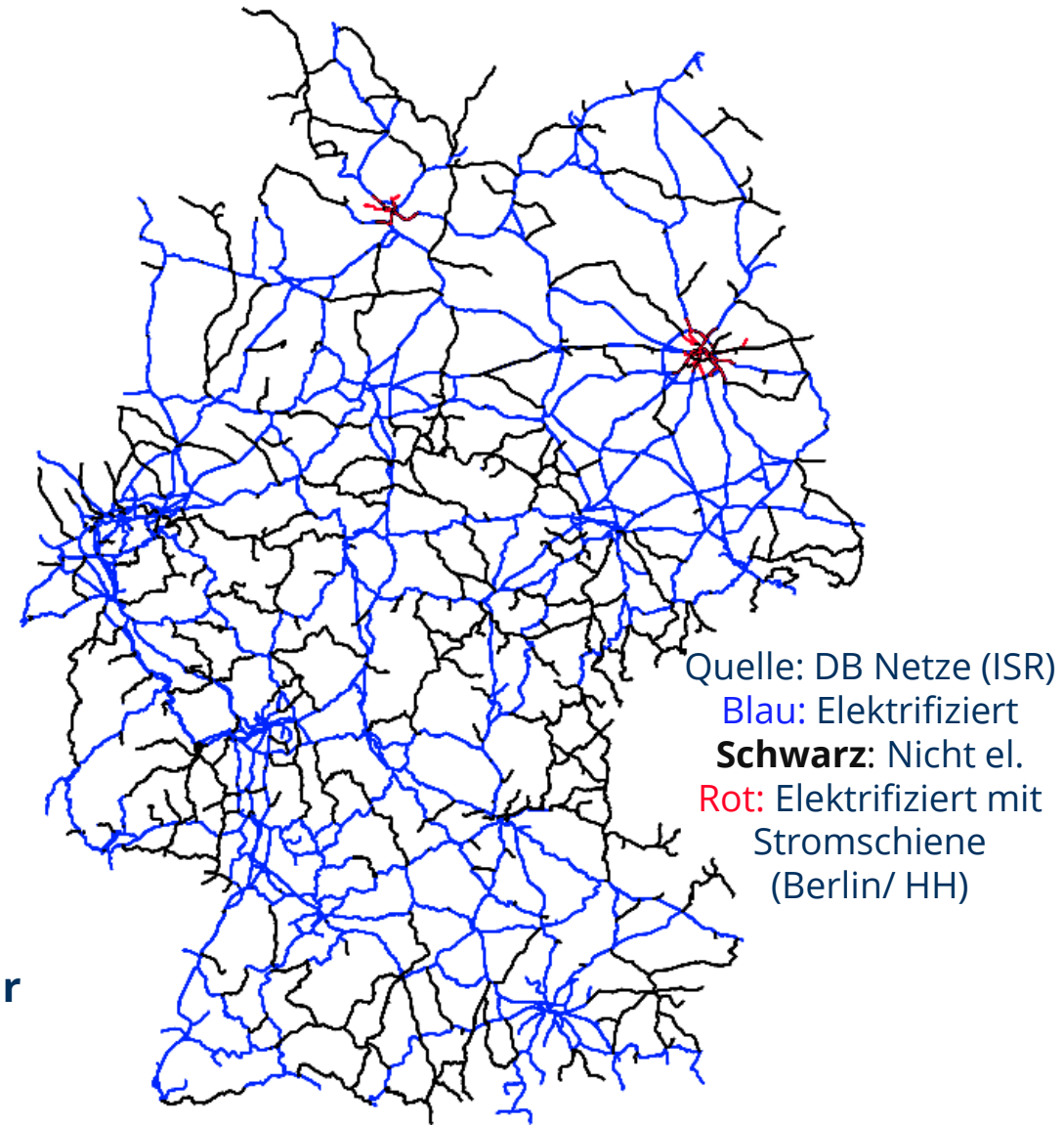
### Vorteile (Damals wie heute)

- Hohe Leistungen möglich
- Kein Energieträger auf dem Fahrzeug
- Geringere Geräuschemissionen
- Keine energiebezogenen Emissionen am Ort der Bewegung

### Nachteile

- Infrastruktur erforderlich

**Elektrische Antriebe sind immer eine Frage der Infrastruktur**



# Antriebstechnologien

## Motivation alternative Antriebe



Und  
das..



und



...oder vollständig



**Problem:** Fehlende Oberleitung = Diesel = Emissionen

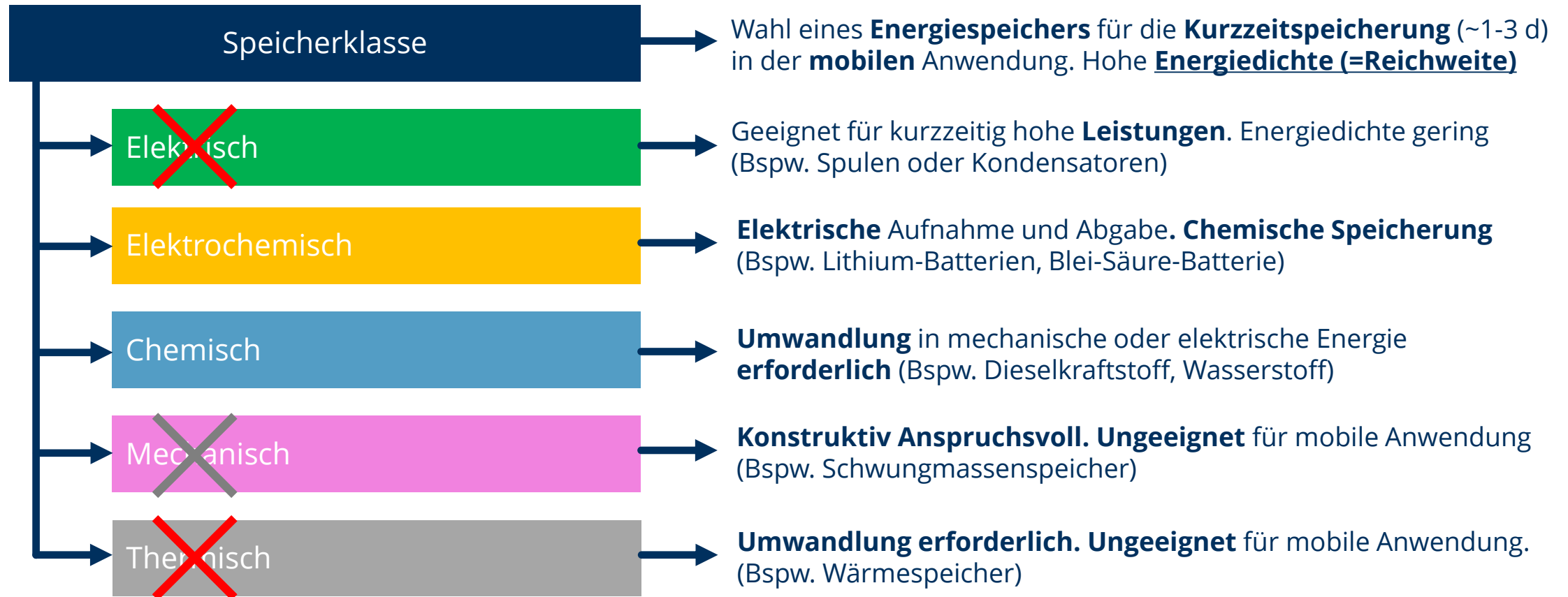
**Ziel:** Elektrische Antriebe auch ohne Oberleitung.

**Weiteres Ziel:** Wirtschaftlich, effizient und emissionsarm!

Den elektrischen Antrieb dorthin bringen, wo keine  
Fahrleitung vorhanden ist: Energiespeicher

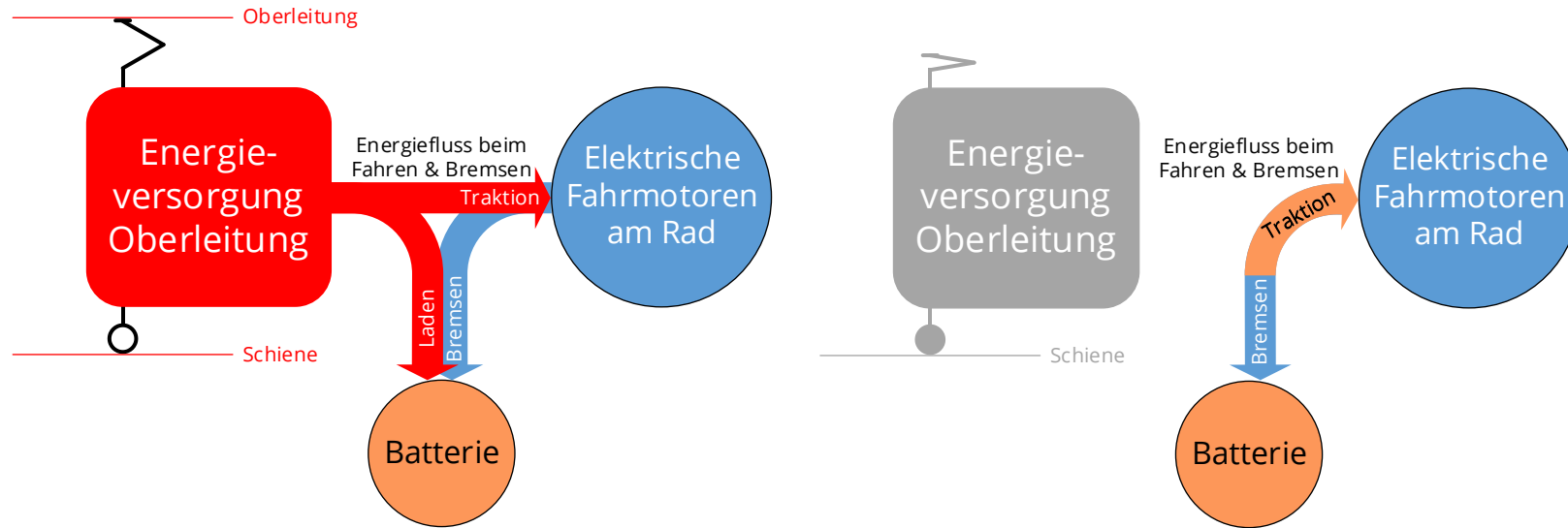
# Energiespeicher für Schienenfahrzeuge

## Klassifizierung und Anforderungen



# Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeuge BEMU

**Emissionsrelevanz:**  
lokal emissionsfrei



Grafik: Professur EB, N. Wittemann



Stadler Flirt Akku  
Quelle: Stadler



Bombardier/Alstom Talent 3 BEMU  
Quelle: Bombardier/ Alstom

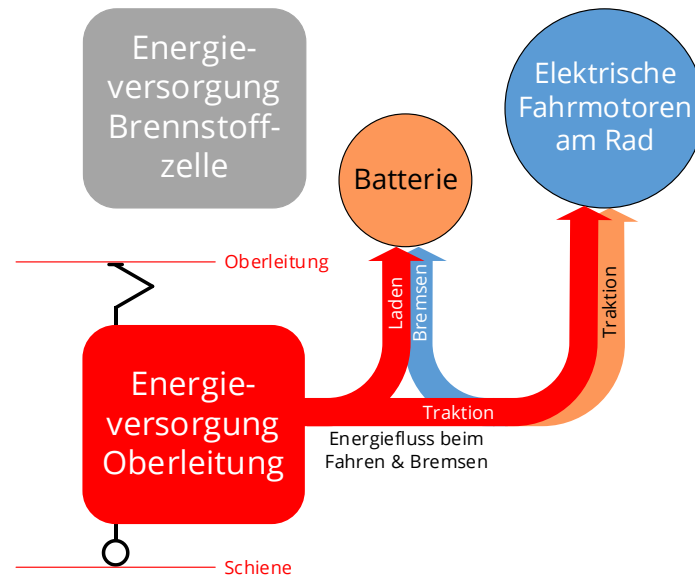
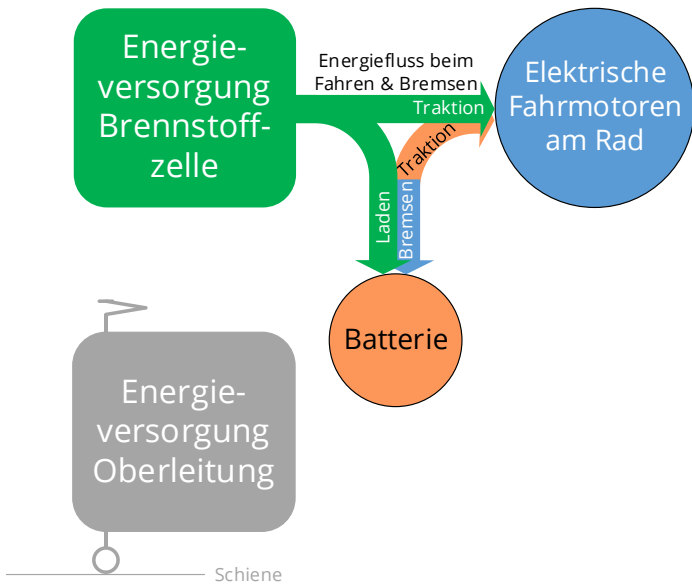


Siemens Mireo Plus B  
Rendering: Siemens



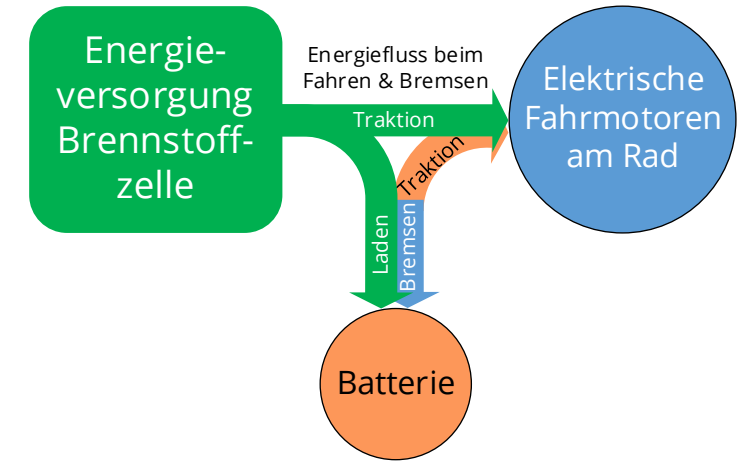
CAF Civity BEMU  
Rendering: CAF

# (Oberleitungs-/)Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge FCEMU/FCMU/HEMU



oder

**Emissionsrelevanz:**  
lokal emissionsfrei



Grafik: Professur EB, N. Wittemann



Beispiel: Siemens Mireo Plus H

Quelle: Siemens



Beispiel: Alstom iLint

Quelle: Alstom