

Fakultät Verkehrswissenschaften „FRIEDRICH LIST“
Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge /
Professur für Elektrische Bahnen

Triebfahrzeugtechnik

Antriebskonfigurationen

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan / Dipl.-Ing. Holger Fricke / Manuskript: Dr.-Ing. Martin Kache // Sommersemester 2025



Inhalte

Vorlesung Triebfahrzeugtechnik (Antriebskonfigurationen)

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

Dieselantriebstechnik im Schienenverkehr

Ist das noch relevant?

Deutschland:

ca. 37 % der Strecken
nicht elektrifiziert



Anteil der E-Traktion
an Verkehrsleistung:
90 %

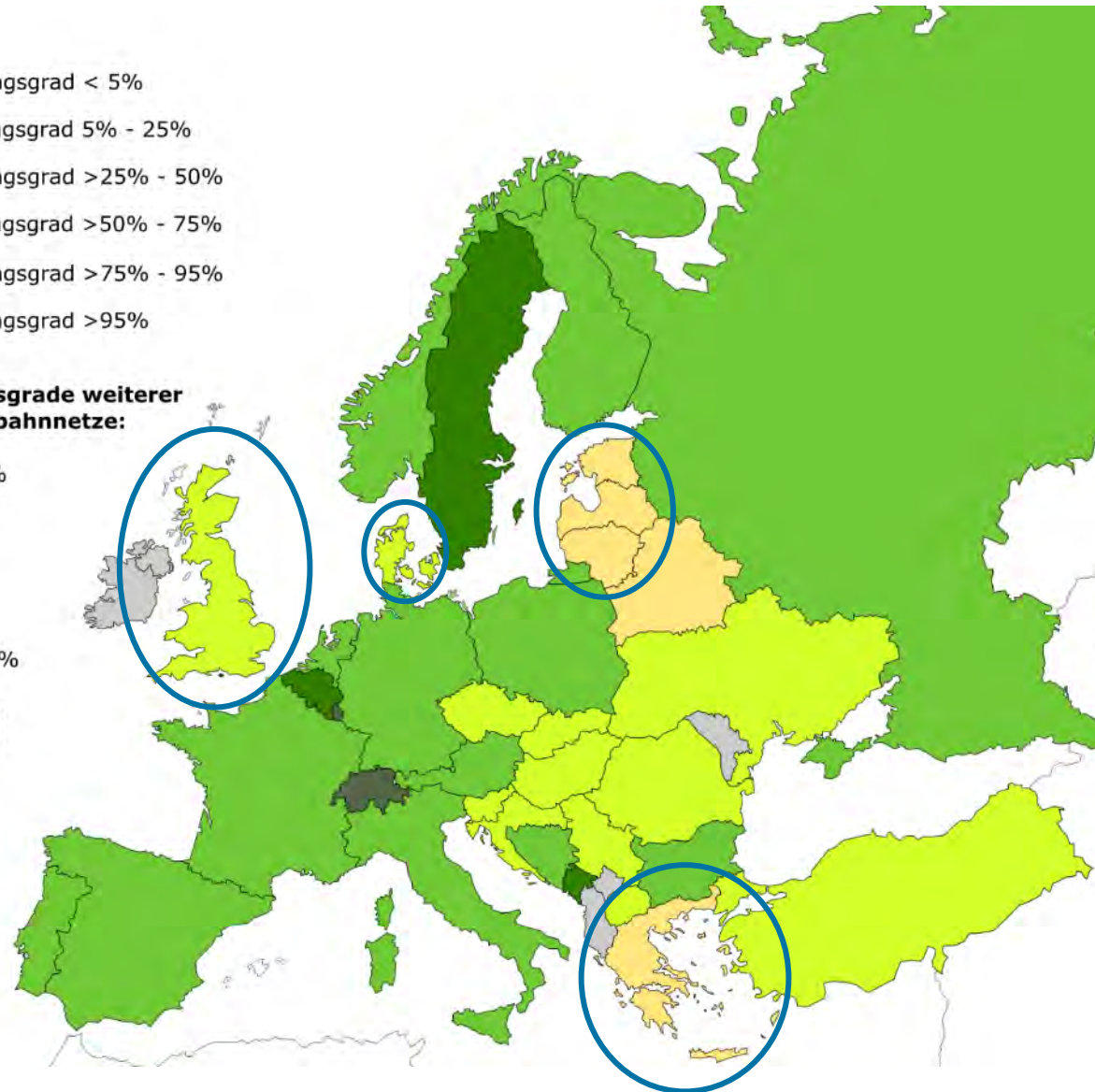


Legende:

- Elektrifizierungsgrad < 5%
- Elektrifizierungsgrad 5% - 25%
- Elektrifizierungsgrad >25% - 50%
- Elektrifizierungsgrad >50% - 75%
- Elektrifizierungsgrad >75% - 95%
- Elektrifizierungsgrad >95%

Elektrifizierungsgrade weiterer wichtiger Eisenbahnnetze:

Argentinien: 2,2%
Australien: 8,4%
Brasilien: 1,7%
Canada: 0,5%
China: 60,5%
Indien: 33,7%
Japan: 60,1%
Kasachstan: 28,3%
Pakistan: 3,2%
Südafrika: 48,4%
Südkorea: 70,9%
USA: 3,4%



europäische Länder mit
größeren Dieselnetzen:



Großbritannien



Dänemark

Estland

Lettland

Litauen

Griechenland

Fotos : Martin Kache

Dieselantriebstechnik im Schienenverkehr

Ist das noch relevant?

Einsatzfelder der Dieseltraktion in Europa



Personennahverkehr*



Personenfernverkehr



Verteilerverkehr



Grenzverkehr



Rangierverkehr



Notfallhilfe



Werksverkehr



Bauzugverkehr



Güterfernverkehr

***fett gedruckt:**
auch mittelfristiger Einsatz

Fotos : Martin Kache

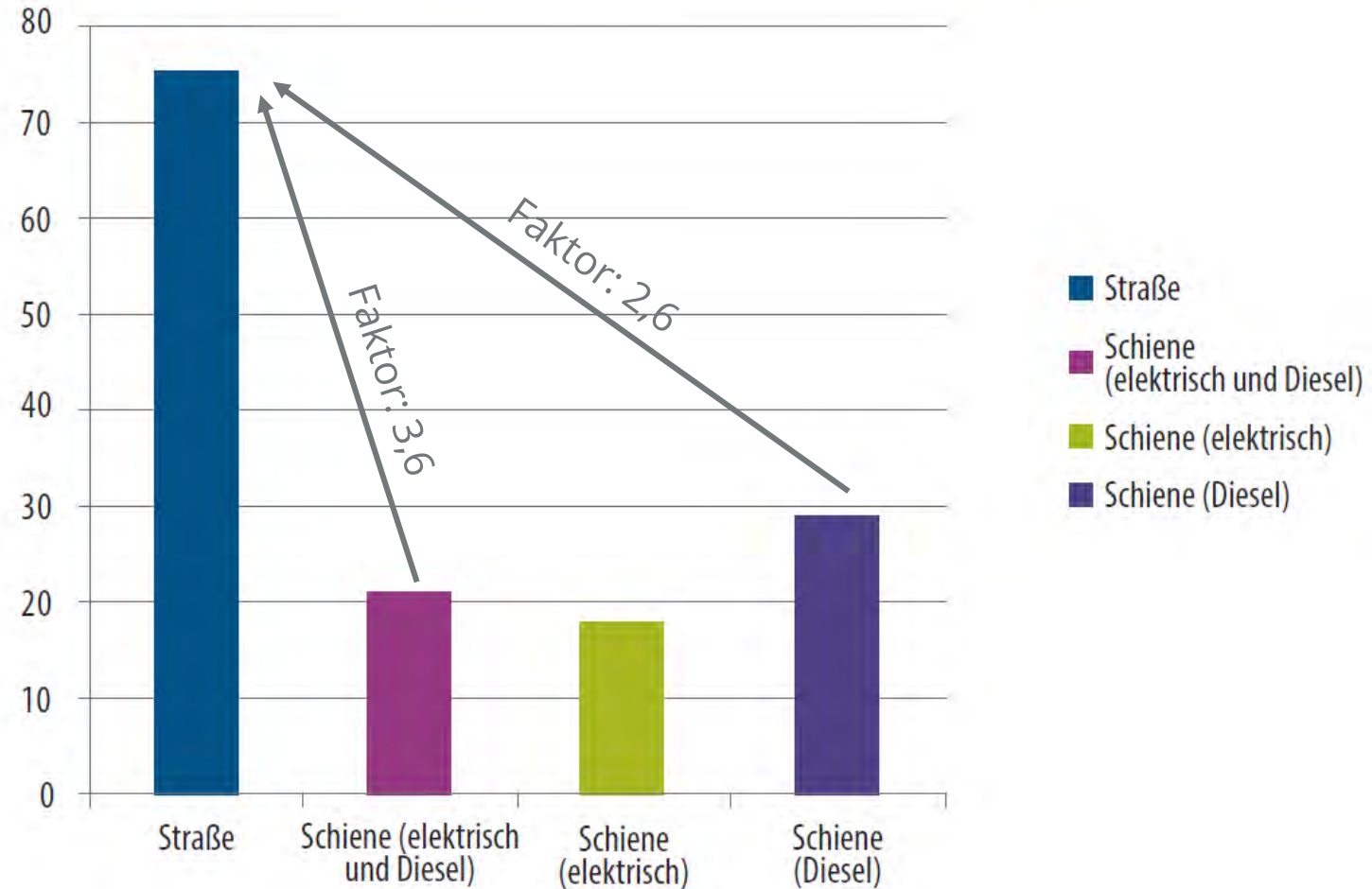
Dieselantriebstechnik im Schienenverkehr

Ist das nicht umweltschädlich?



Fotos : Martin Kache

CO₂-Emissionen pro Tonnenkilometer in der EU im Jahr 2012

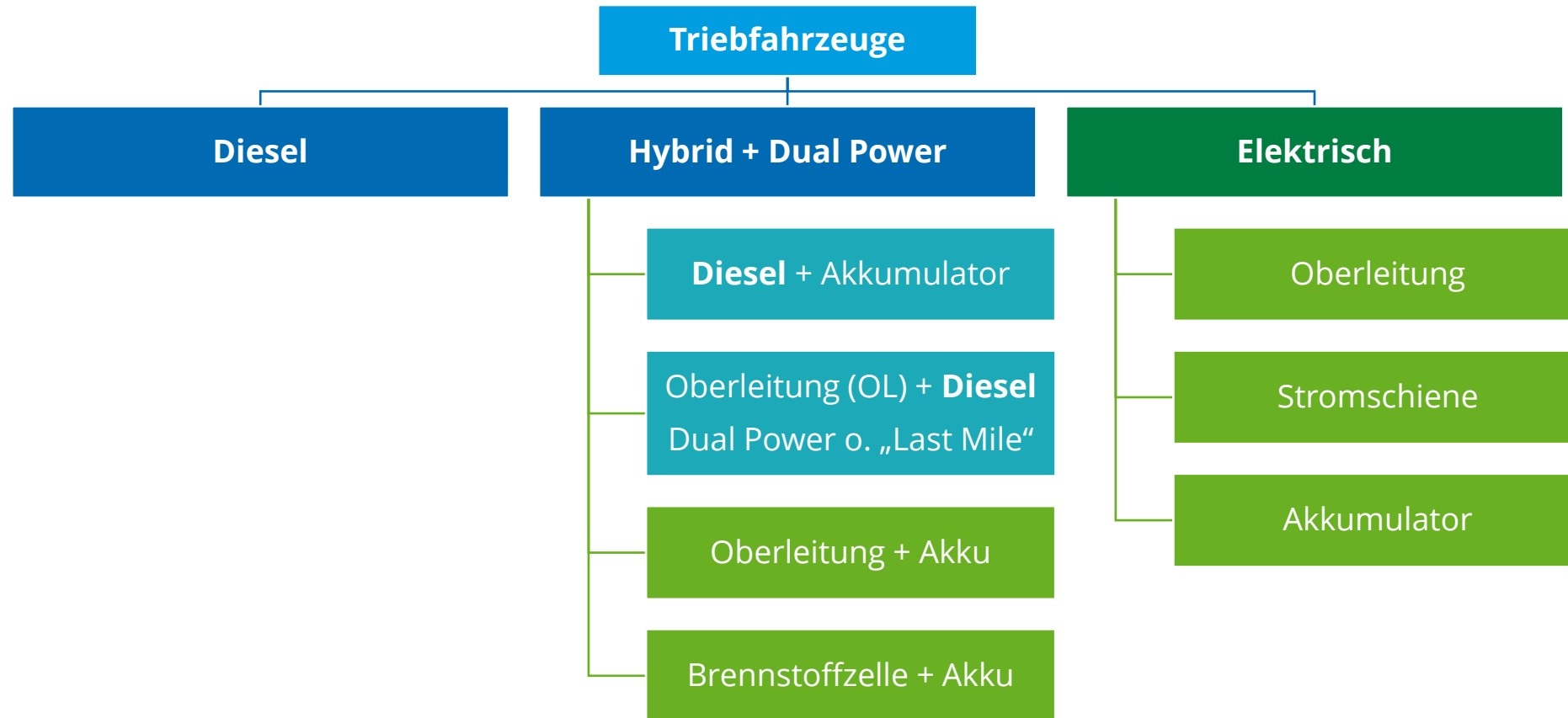


Quelle: Europäischer Rechnungshof auf der Grundlage von Daten der Europäischen Umweltagentur.

Dieselantriebstechnik im Schienenverkehr

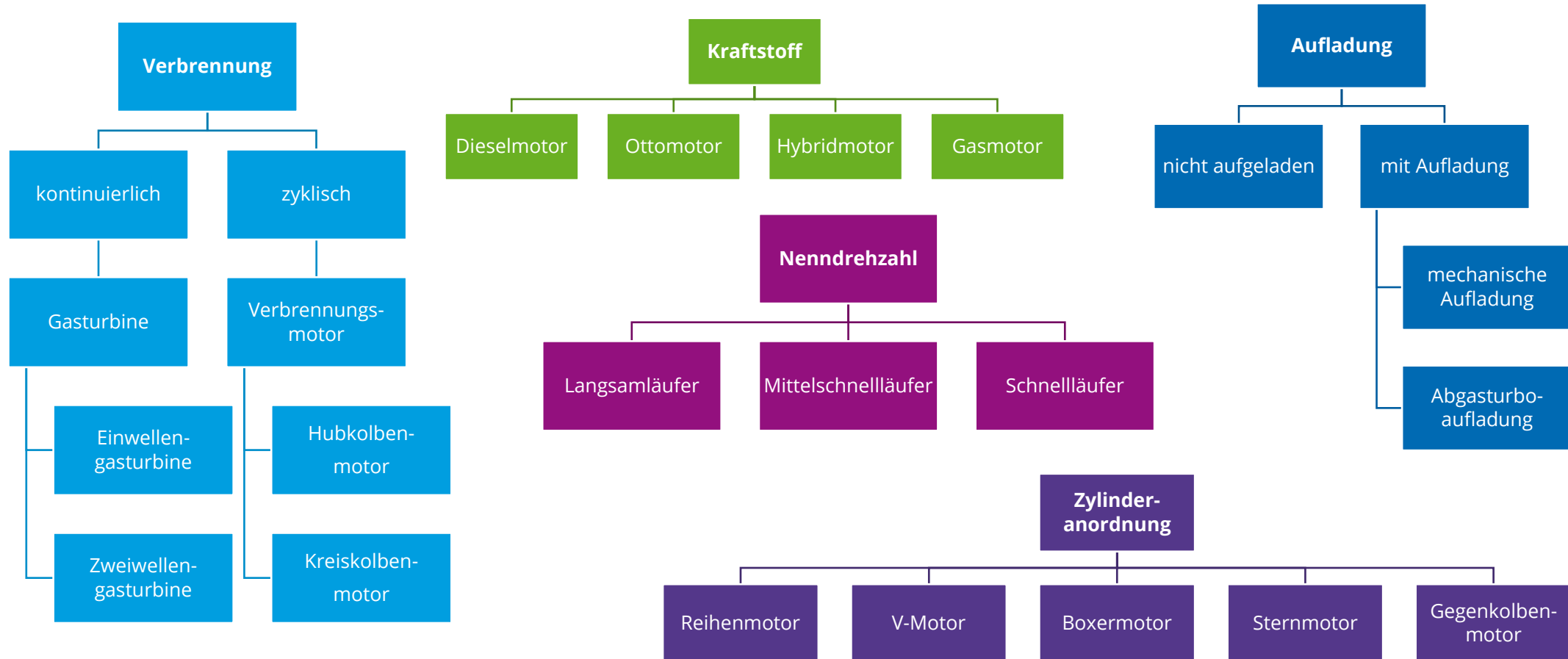
Wo steckt sie drin?

Einteilung von Triebfahrzeugen nach **Art der Primärenergieversorgung am Fahrzeug**



8.1 Einteilung von Verbrennungskraftmaschinen

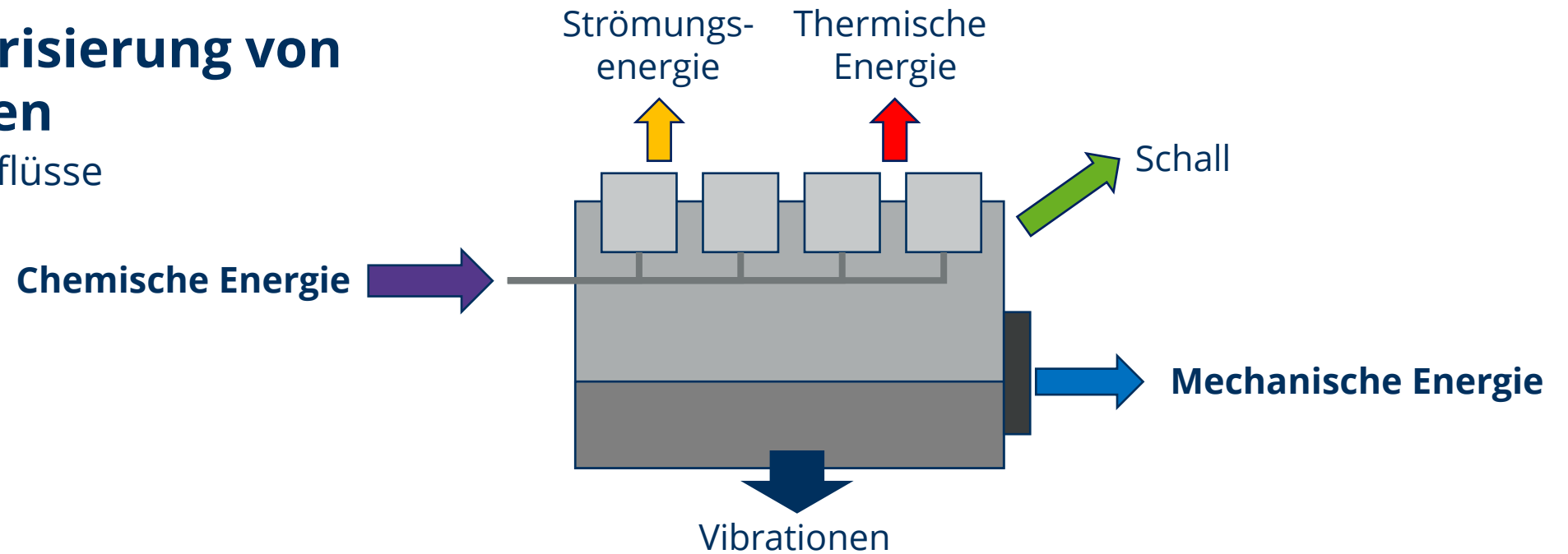
Unterscheidungsmerkmale von Verbrennungskraftmaschinen



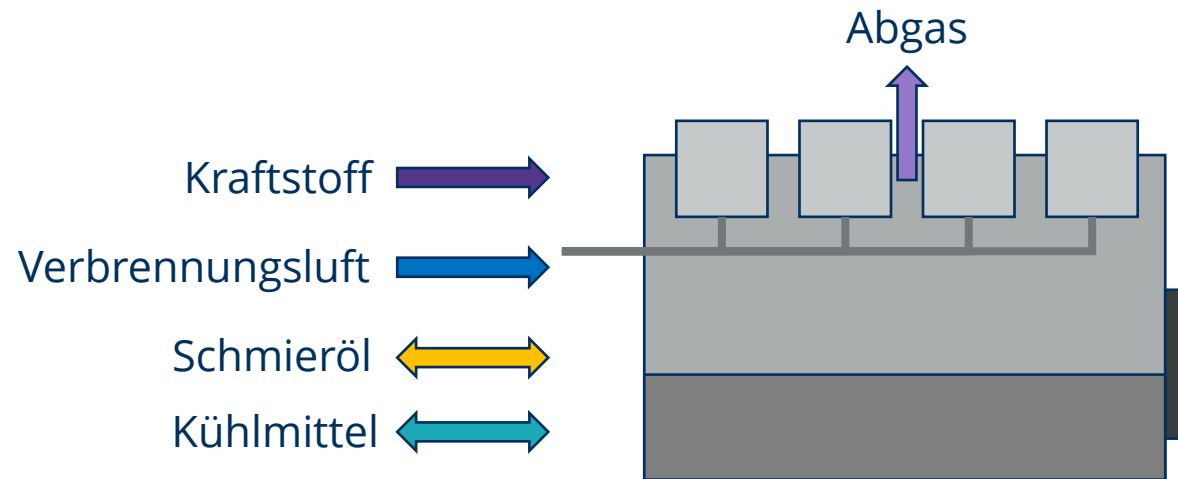
8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

Energie- und Stoffflüsse

ENERGIE



STOFF

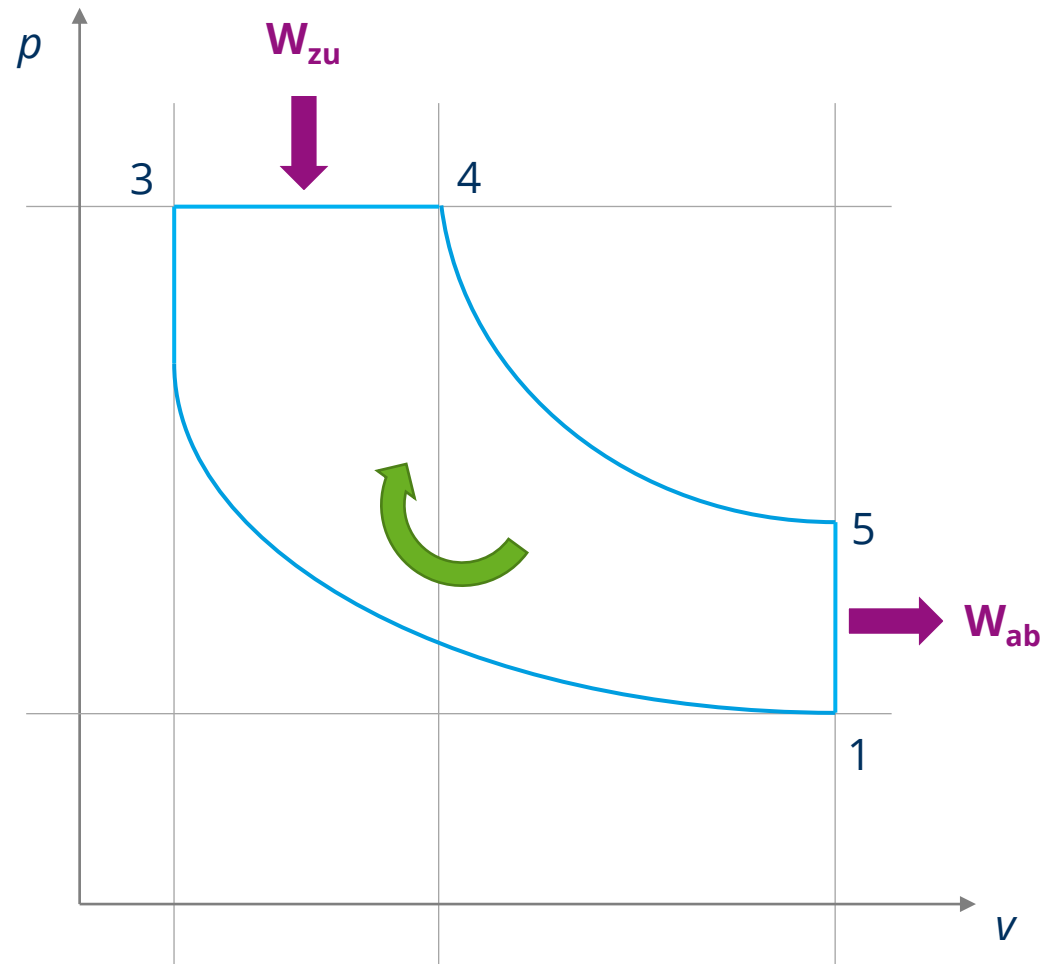


8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

Diesel-Kreisprozess

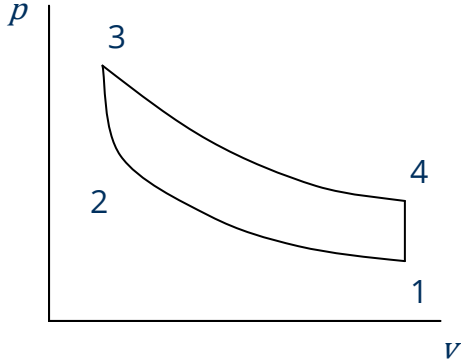
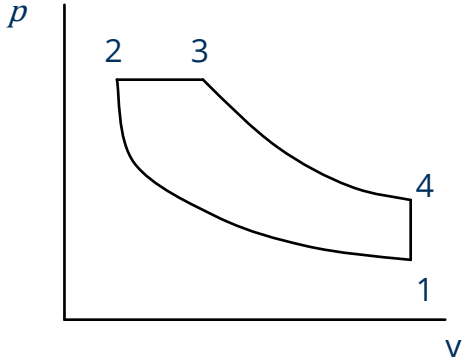
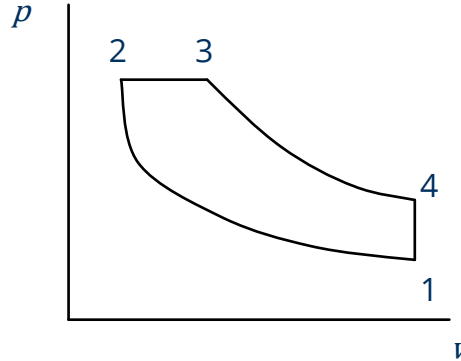
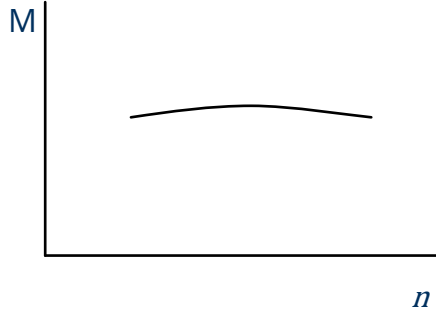
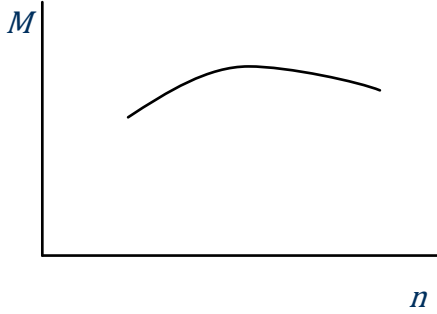
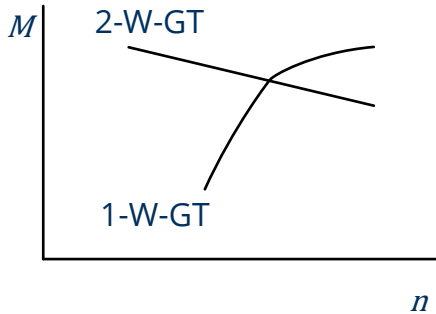
Diesel-Kreisprozess (idealisiert)

- 1-3: Isentrope (Kompression)
- 3-4: Isobare (Wärmezufuhr)
- 4-5: Isentrope (Expansion)
- 5-1: Isochore (Wärmeabfuhr)



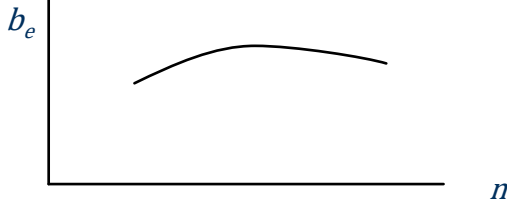
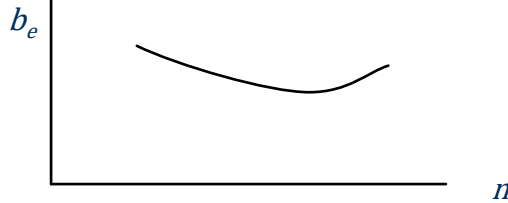
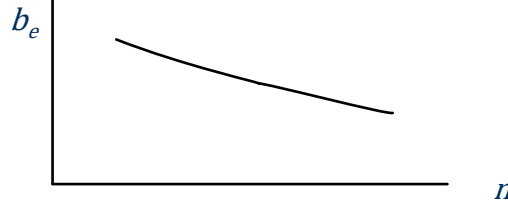
8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

Vergleich mit anderen Verbrennungskraftmaschinen

	Ottomotor	Dieselmotor	Gasturbine
1) Prozessführung	Gleichraumverbrennung 	Gleichdruckverbrennung 	beides möglich, aber für Fz-GT nur Gleichdruckverbrennung 
2) Drehmomentenverlauf			

8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

Vergleich mit anderen Verbrennungskraftmaschinen

	Ottomotor	Dieselmotor	Gasturbine
3) Wirk.-grad	28...32 %	38...42 %	15...35 % (max. 38 %)
4) Teillast-verhalten			
5) Zündung	Zündkerze	Selbstzündung	(Selbstzündung)
6) Kraftstoff	teuer und feuergefährlich	Diesel billiger, weniger feuergefährlich	Palette v. Flugbenzin bis Schweröl (50 % DK)
7) Robustheit	begrenzt	hoch	begrenzt
8) Leistungen	Sfz bis 200...250 kW max.	Sfz bis etwa 4000 kW	Sfz bis etwa 8000 kW
9) Masse	2,5...5,5 kg/kW	4...7 kg/kW	0,4...1 kg/kW
10)Vorteile	Typenmotoren Kfz verwendbar	hohe Lebensdauer, hohe Wart.-intervalle, aufladbar	kurzz. Überlastbarkeit, keine oszill. Teile, Kühlwasser, schnell bereit
11)Nachteile	kl. Masse und Volumen, geringe Max.-Leistung, hoher Verbrauch	große Masse u. Volumen, Geräuschentwicklung	hohe Anschaffungskosten und Geräuschentwicklung, hoher Verbrauch im Teillastbereich

8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

Vergleich mit anderen Verbrennungskraftmaschinen

Zusammenfassung

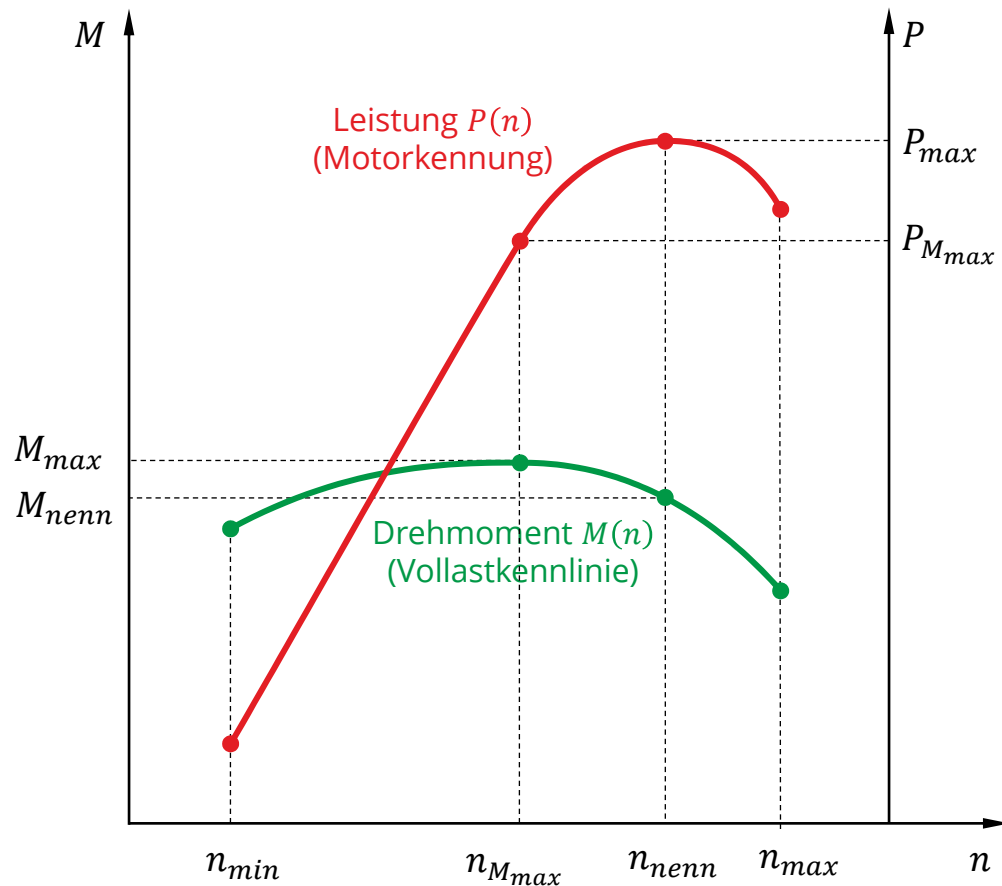
- DM mit Gleichdruckverbrennung günstiger als Ottomotor oder Gasturbine mit Gleichraumverbrennung
- Selbstzünder (2- od. 4-Takt, jeweils 1 Arbeitstakt!) – sehr robust und zuverlässig
- hohen Wirkungsgrad (38-42 %) , gutes Teilleistungsverhalten
- hohe Lebensdauer, lange Wartungsintervalle
- DK mit hohem Energieinhalt, handhabungssicher, verfügbar
- DM mit großem Volumen und großer Masse (3-6 kg/kW)

aber:

- aufgrund scharfer Abgasgesetzgebung nur mit aufwändigen Zusatzelementen (Partikelfilter, AGR, SCR mit Harnstoff, ...) und Aufladung einsetzbar

8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

Betriebsverhalten (Drehmoment- und Leistungscharakteristik)



M	Motor-Drehmoment
P	Motorleistung
n	Motordrehzahl
M_{max}	Maximales Motormoment
$M_{nenn} = M_{P_{max}}$	Motormoment bei maximaler Leistung = Nennmoment
$P_{max} = P_{nenn}$	Maximale Motorleistung = Nennleistung
$P_{M_{max}}$	Motorleistung bei maximalem Motormoment

Leistung:

$$P = M \cdot 2\pi \cdot n$$

Drehzahlelastizität:

$$\varepsilon_n = \frac{n_{nenn}}{n(M_{max})}$$

Drehmomentelastizität:

$$\varepsilon_M = \frac{M_{max}}{M(n_{nenn})}$$

8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

Leistungsgleichung

— indizierte Leistung des DM (P_i):

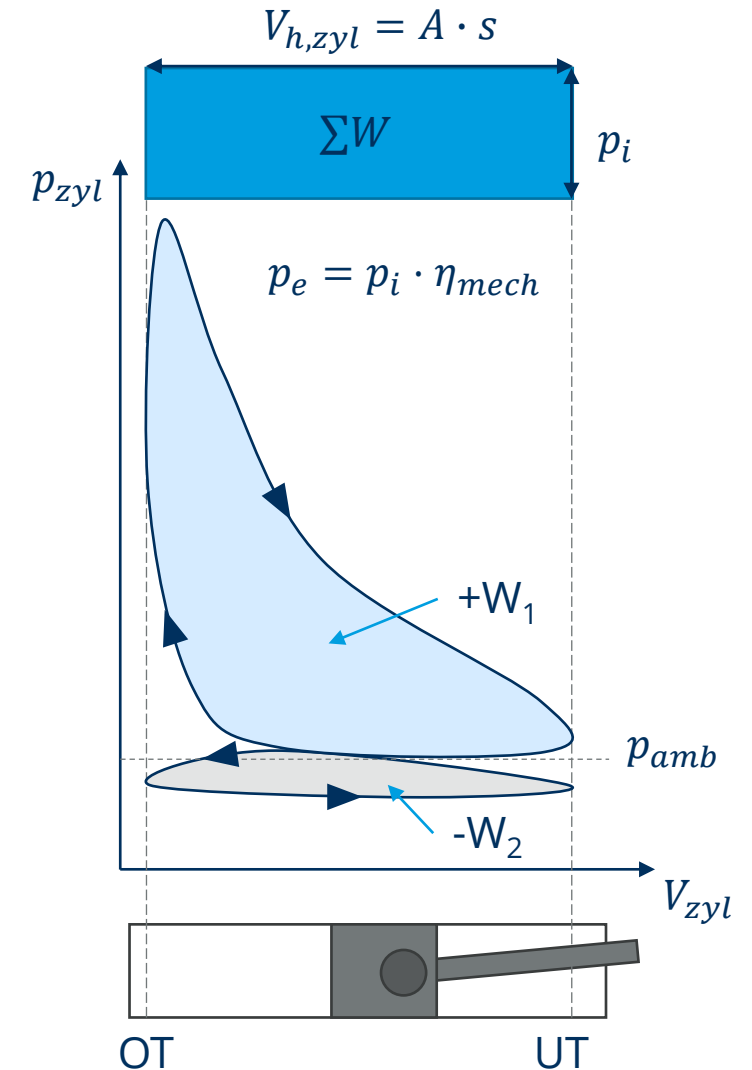
$$P_i = i \cdot n \cdot p_i \cdot V_h = i \cdot n \cdot p_i \cdot A \cdot s \cdot z$$

- i ... Arbeitsspiel je Kurbelwellenumdrehung ($i = 1 \rightarrow 2\text{-Takt}$, $i = 0,5 \rightarrow 4\text{-Takt}$)
- n ... Drehzahl
- p_i ... indizierter Mitteldruck
- V_h ... Hubraum
- A ... Kolbenfläche
- s ... Kolbenhub
- z ... Zylinderzahl

— effektive Leistung des DM (P_e):

$$P_e = i \cdot n \cdot p_i \cdot \eta_{mech} \cdot V_h = P_i \cdot \eta_{mech} = P_i - P_R$$

- η_{mech} ... mechanischer Wirkungsgrad
- P_R ... Reibleistung (Verlustleistung)



8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

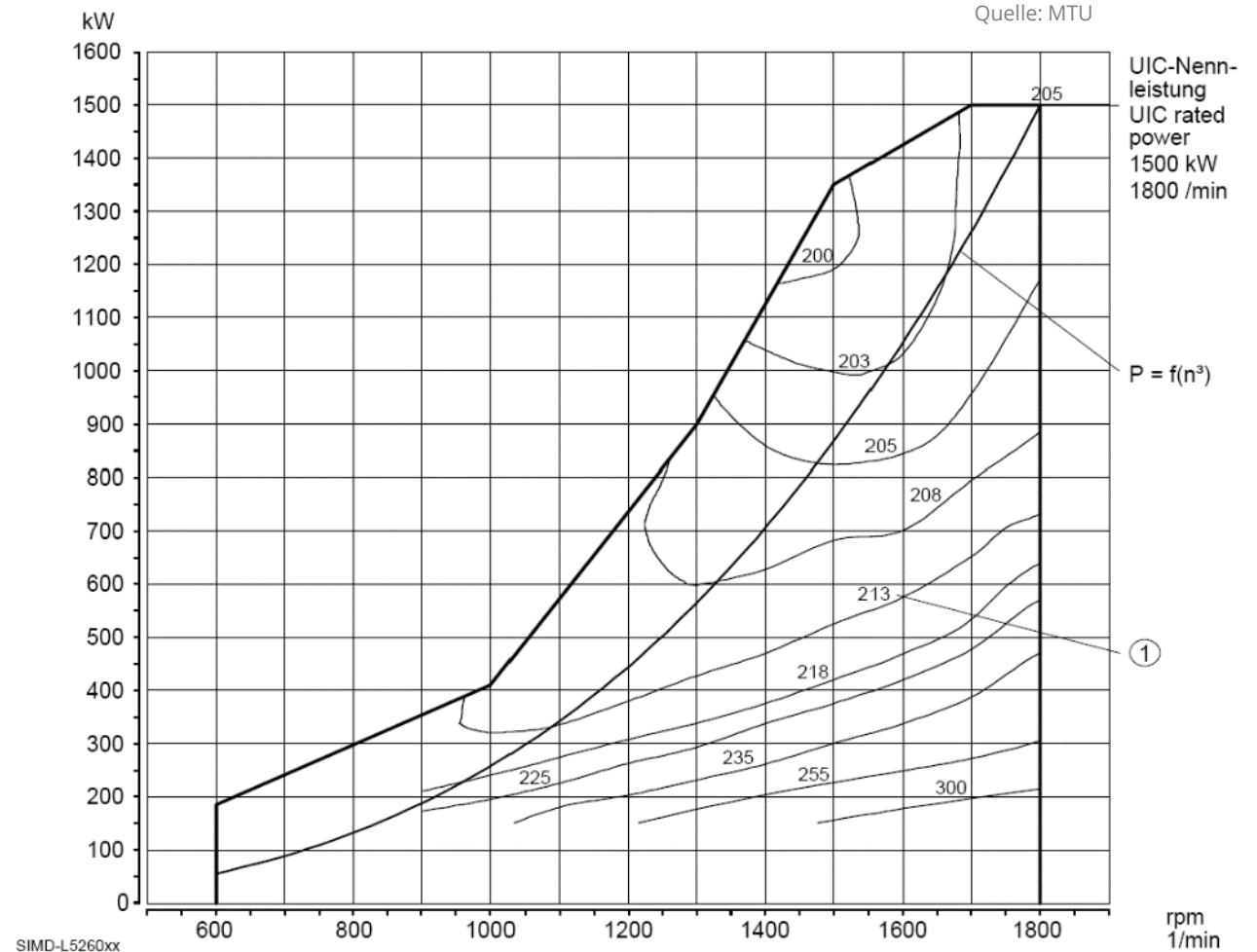
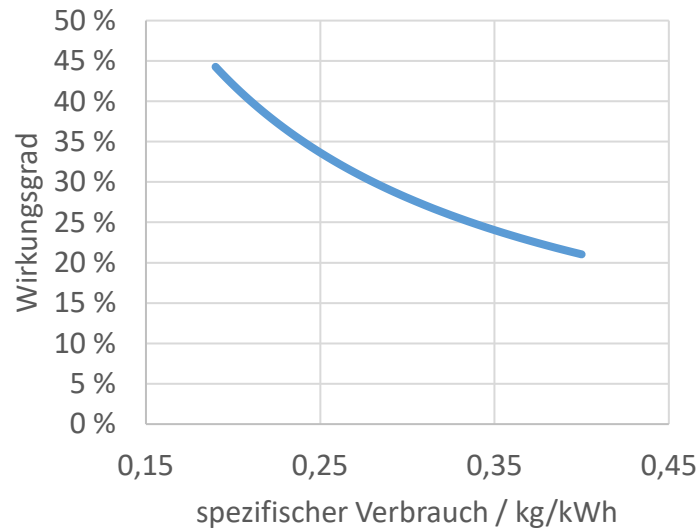
Betriebsverhalten (Kennfeld)

Zusammenhang von spezifischem Verbrauch und Dieselmotorwirkungsgrad:

$$\eta_{DM} = \frac{1}{b_e \cdot H_u} = \frac{1}{b_e \cdot 11,89 \text{ kWh/kg}}$$

spezifischer Verbrauch

unterer Heizwert des Dieselkraftstoffes



8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

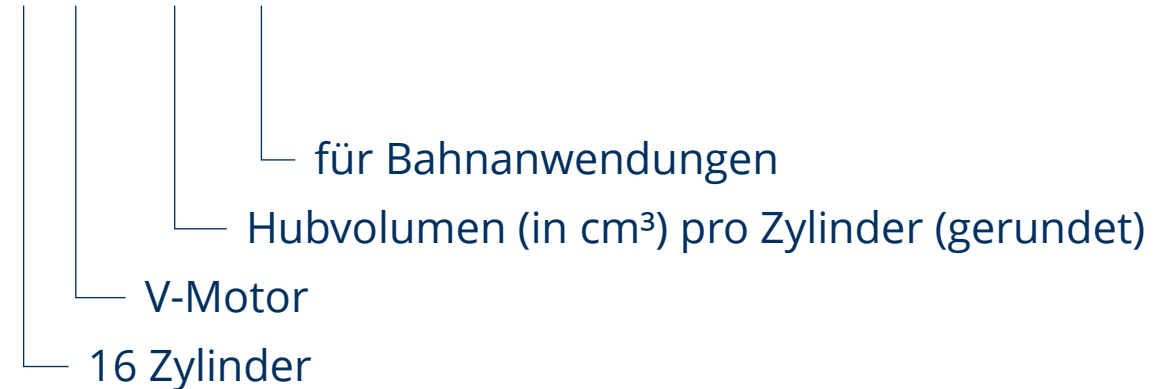
Beispiel: Lokomotivmotor



Fotos : Martin Kache



MTU 16 V 4000 R 41



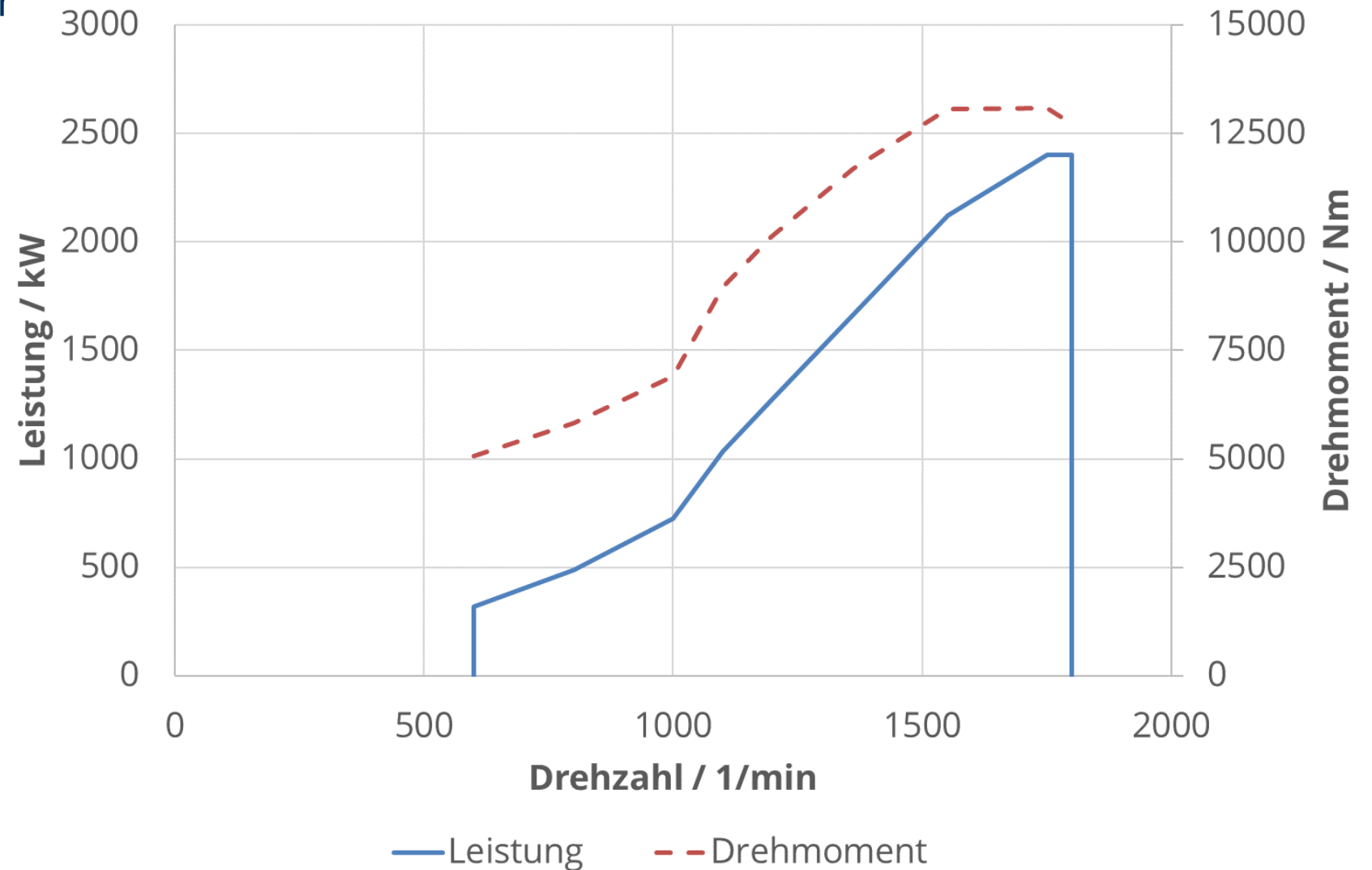
Nennleistung:	2000 kW
Nenndrehzahl:	1800 1/min
effektiver Mitteldruck:	20,5 bar
Gesamthubvolumen:	65 l
spez. Kraftstoffbedarf bei Nennleistung:	195 g/kWh (Wirkungsgrad: 43,1 %)
minimaler spezifischer Verbrauch:	194 g/kWh (Wirkungsgrad: 43,3 %)

8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

Beispiel: Lokomotivmotor



Fotos : Martin Kache



8.2 Charakterisierung von Dieselmotoren

Beispiel: Triebwagenmotor **MTU 6 H 1800 R 85L**



Fotos : Martin Kache

- für Bahnanwendungen
- Hubvolumen (in cm³) pro Zylinder (gerundet)
- Reihenmotor horizontal (liegend)
- 6 Zylinder

Nennleistung:	390 kW
Nenndrehzahl:	1800 1/min
effektiver Mitteldruck:	20,3 bar
Gesamthubvolumen:	12,81 l
spez. Kraftstoffbedarf bei Nennleistung:	208 g/kWh (Wirkungsgrad: 40,4 %)
minimaler spezifischer Verbrauch:	183 g/kWh (Wirkungsgrad: 46,0 %)
Kaltstartfähigkeit ohne/mit Starthilfe:	-20 °C / -40 °C (Umgebungstemperatur)
Summe abzuführender Wärmeleistungen:	324 kW

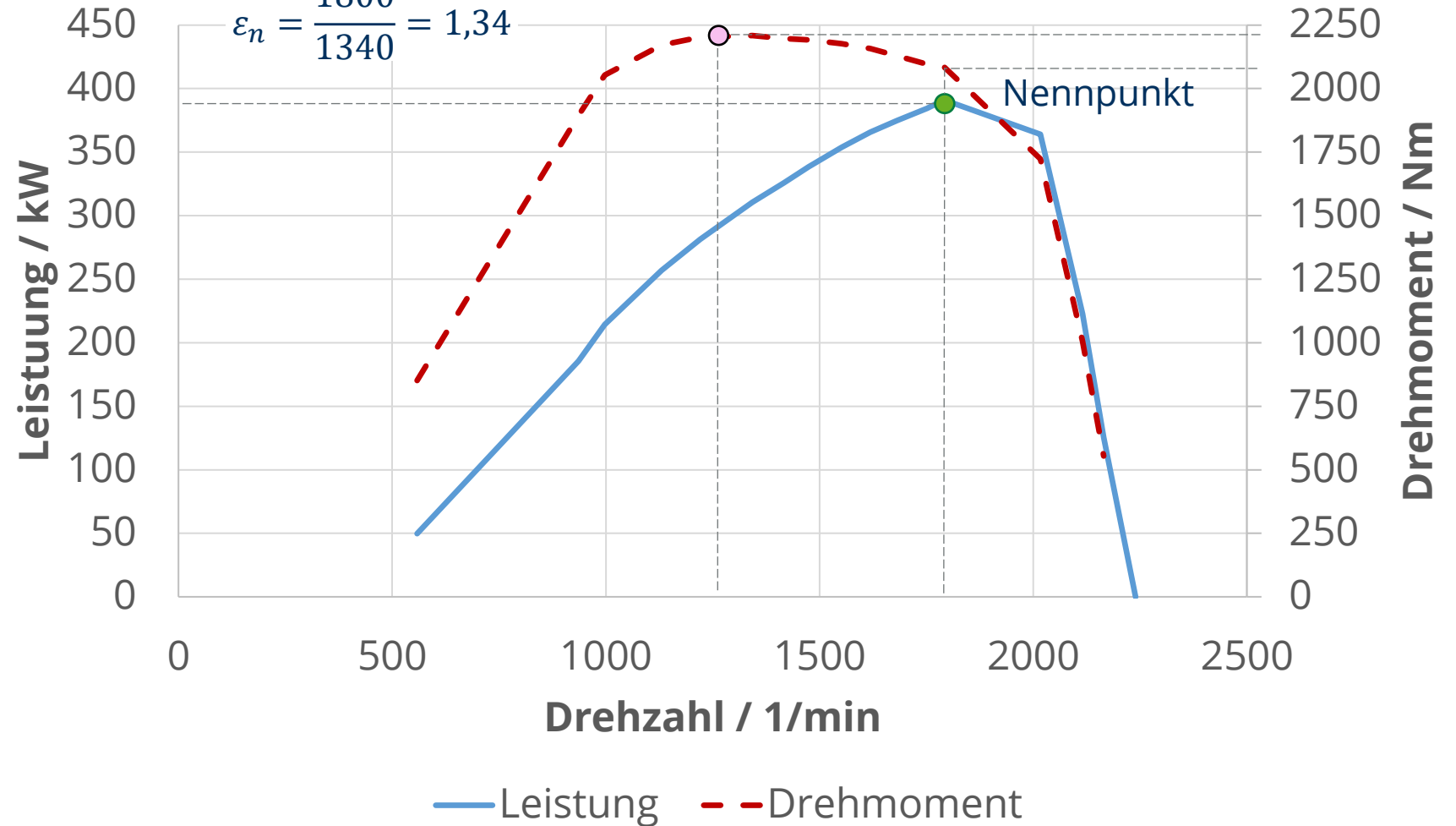
Dieselmotoren

Praxisbeispiel Triebwagenmotor

Nennpunkt: $P_{nenn} = 390 \text{ kW} \Rightarrow M_{nenn} = 2069 \text{ Nm @ 1800 1/min}$

max. Drehmoment: $M_{max} = 2210 \text{ Nm @ 1340 1/min}$

$$\varepsilon_n = \frac{1800}{1340} = 1,34$$

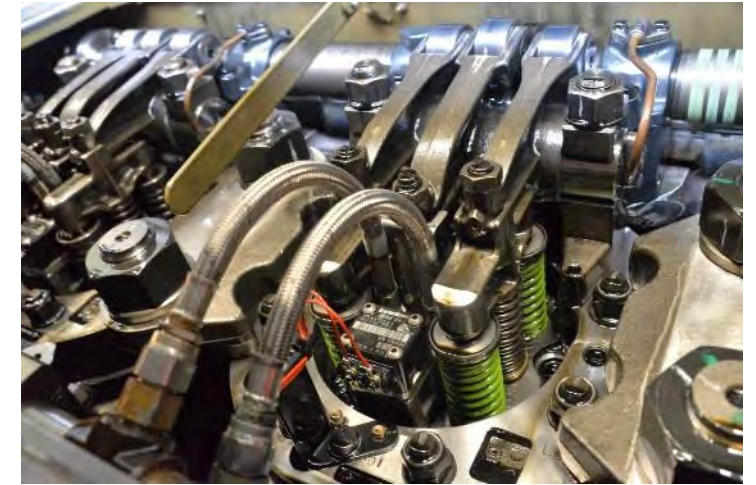


Fotos : Martin Kache

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

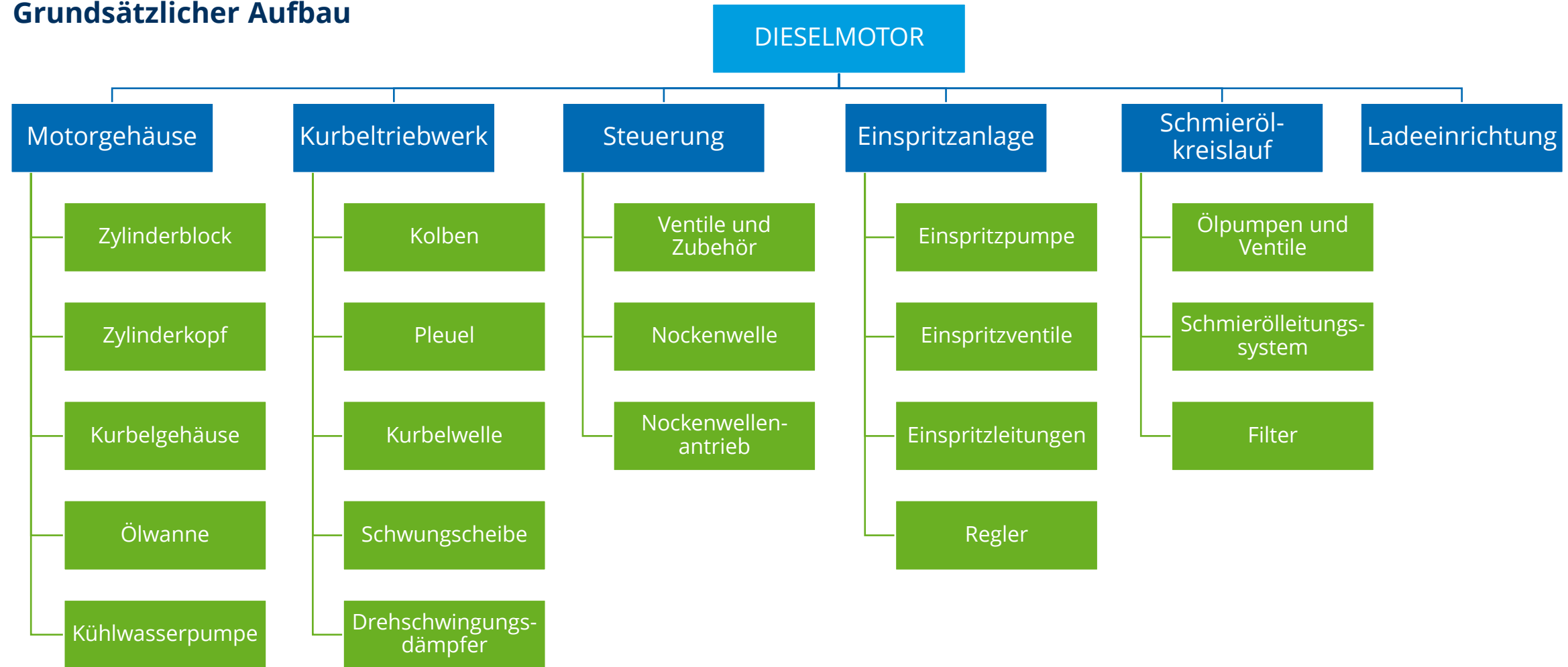


Fotos : Martin Kache



8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Grundsätzlicher Aufbau



8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Grundsätzlicher Aufbau

– Beispiel MTU 8000 (Schiffsdiesel)

- 1) Motorgrundlager
- 2) elektronische Motorsteuerung
- 3) Schwinghebeldeckel
- 4) Luftfilter
- 5) **Motorgrundlager**
- 6) Seewasserpumpe
- 7) Verteilergehäuse Kühlwasser
- 8) **Ölwanne**
- 9) Ölpumpe
- 10) Geräteträger
- 11) **Kurbelwelle**
- 12) Kühlwasserpumpe
- 13) Anschlusskasten Aufladegruppe
- 14) Ölkühler
- 15) Ölzentrifuge
- 16) Schwingungsdämpfer Kurbelwelle
- 17) Anlasser-Zahnkranz
- 18) **Kupplung**
- 19) Anlasser
- 20) Ansaugchalldämpfer
- 21) Abgasturbolader (1)
- 22) Abgasturbolader (2)
- 23) Abgasturbolader (3)
- 24) Abgasturbolader (4)
- 25) **Nockenwelle**
- 26) **Kurbelgehäuse**
- 27) Automatik-Ölfilter
- 28) Trägergehäuse Turbolader
- 29) **Power-Units**
- 30) Zylinderkopfhaube

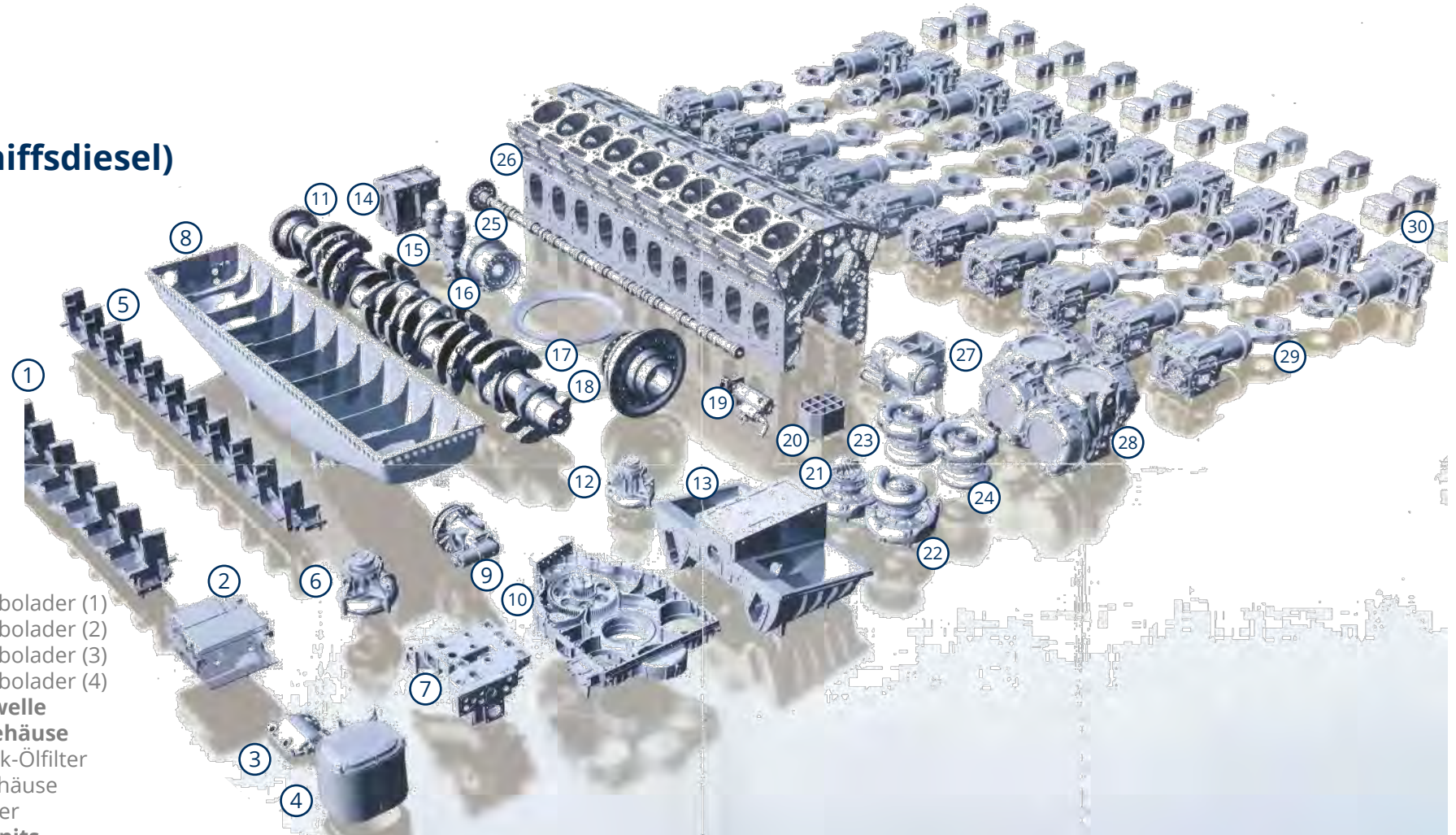
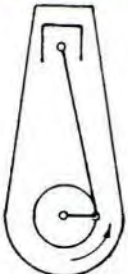
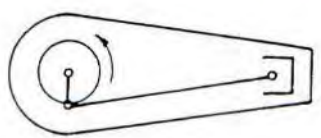


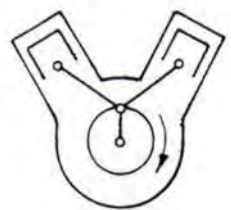
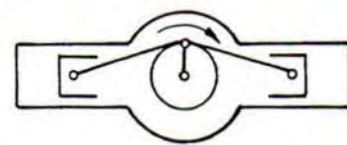
Abbildung: MTU

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Zylinderanordnung

Bauform	Anwendungsbeispiele			
	Motortyp	Firma	Triebfahrzeug	Bahn
 stehender Reihenmotor	6 VD 18/15	SKL	312.1	DB AG
	RHS 518 A	MWM	333	DB AG
	6 S 310	CKD	ex. 107	DR
	8 M 282 AKB	Mak	291	DB AG
 liegender Reihenmotor	U 10	Büssing	798	DB AG
	6 KVD 18 HRW	SKL	772	DB AG
	D 3256 BTXU	MAN	628.0	DB AG
	S 1 DHR	SCL	X 2100	SNCF
	82.17.32	FIAT	Aln 668	FS

Quelle: Feihl/Die Diesellokomotive, transpress 2009

Bauform	Anwendungsbeispiele			
	Motortyp	Firma	Triebfahrzeug	Bahn
 V - Reihenmotor	OM 424 A	MB	628.1	DB AG
	12V 652 TB 11	MTU	212, 290	DB AG
	12 KVD 21-A	KAB	201, 228	DB AG
	16 V R43	MTU	ER 20, Vectron	diverse
	C 175	CAT	Class 68	DRS, UK
	GTO 6	MY	360, 361	DB AG
	6V 331 TC 12	MTU	DE 501	J
	12V 956 TB12	MTU	218	DB AG
	16 PA V200	SEMT		
	12 V 396 TC	MTU	BB 204	PJKA
	16-645 E 3B	EMD	MZ	DSB
	F 12 M 716	KHD	Z 66	SJ
	AGO 240			
	V 16 ESHR	SACM	CC 72000	SNCF
 Boxer - Reihenmotor	D 3650 HM 3U	MAN	614	DB AG

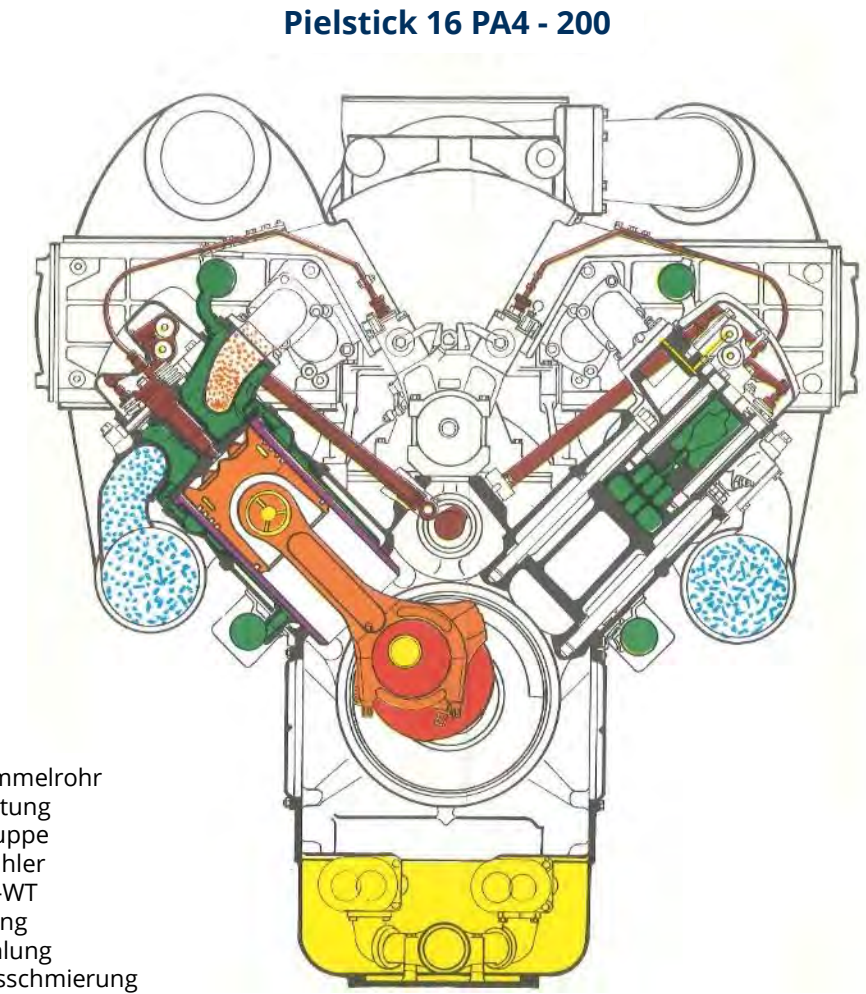
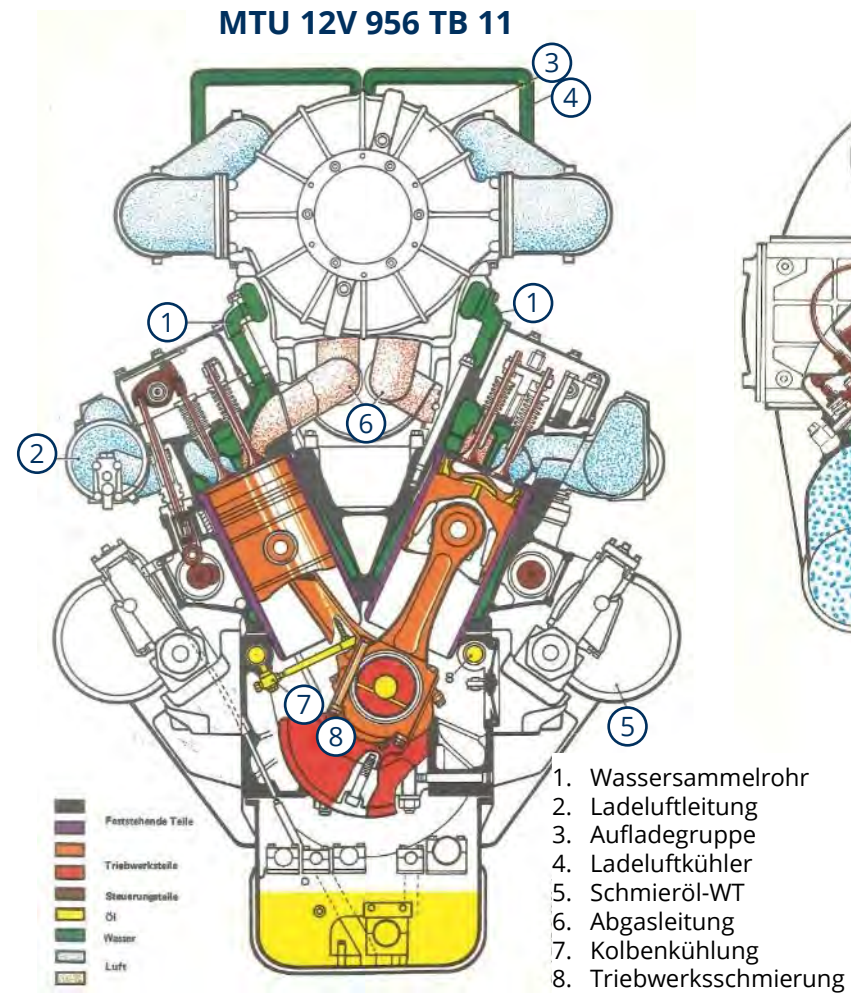
8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Querschnitt V-Motor

— Vergleich Motoren BR 218

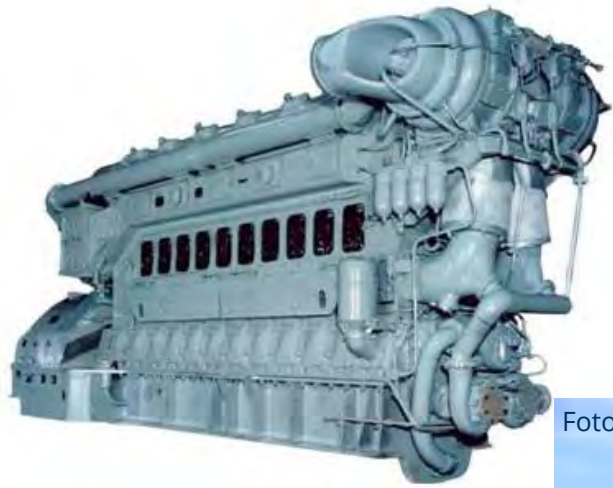


Foto: Wikipedia/Thomas Wolf



8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Außergewöhnliche Motorenkonzepte



10 D 100:
Gegenkolbenmotor
mit 2 Kurbelwellen

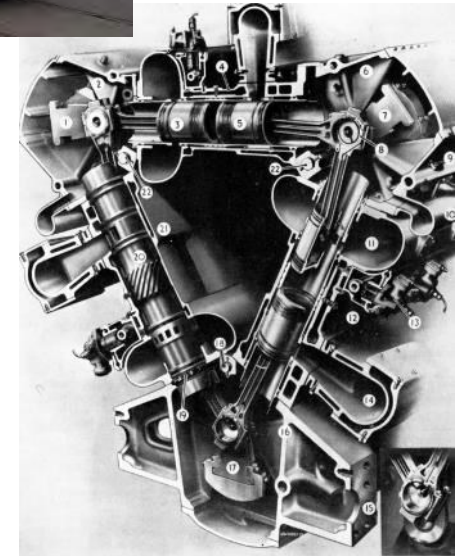
2ТЭ10М (z.B. Kasachstan)

Foto : Martin Kache



BR Class 55 („Deltic“)

Sonderbauart
(historisch)



Napier-Deltic-Motor T18-37K

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Motorgehäuse

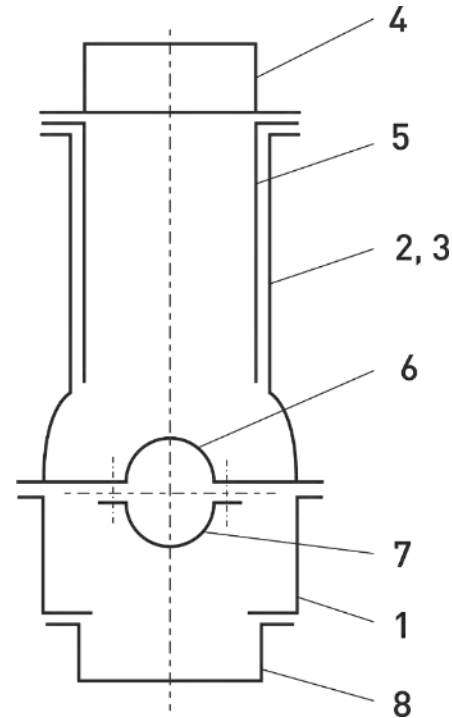
Zylinderblock

Zylinderkopf

Kurbelgehäuse

Ölwanne

Kühlwasserpumpe



1. Rahmen oder Kurbelgehäuseunterteil
2. Kurbelgehäuseoberteil
3. Zylinderblock
4. Zylinderkopf
5. Zylinderlaufbuchse
6. Kurbelwellengrundlager
7. Kurbelwellenagerschale
8. Ölwanne



Motor K6 S 230 DR

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Motorgehäuse – Kurbelgehäuse

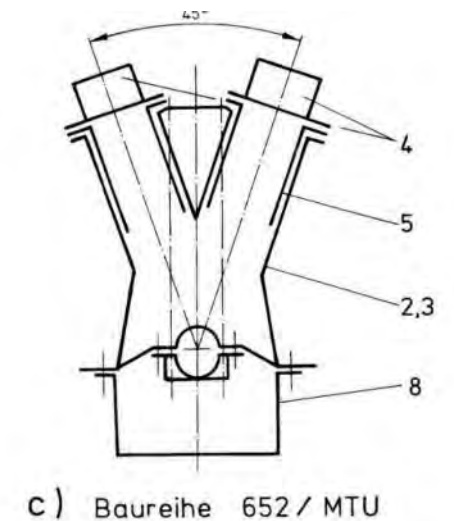
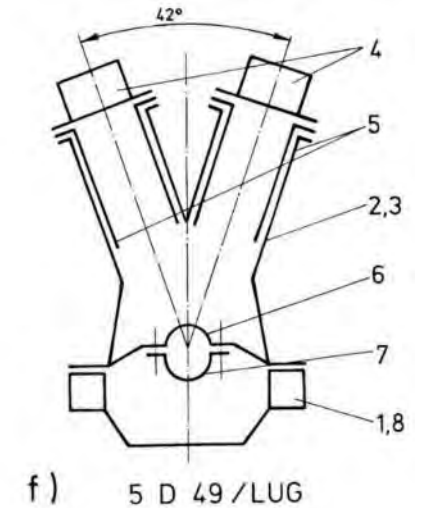
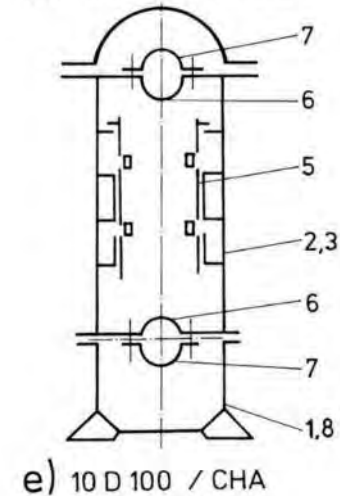
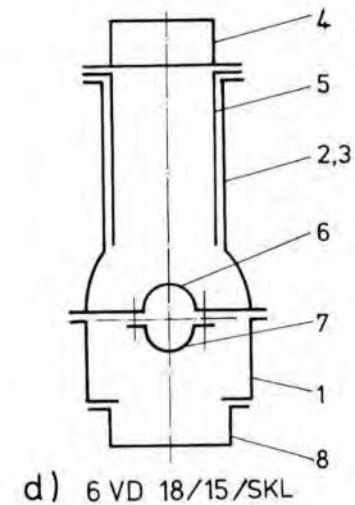
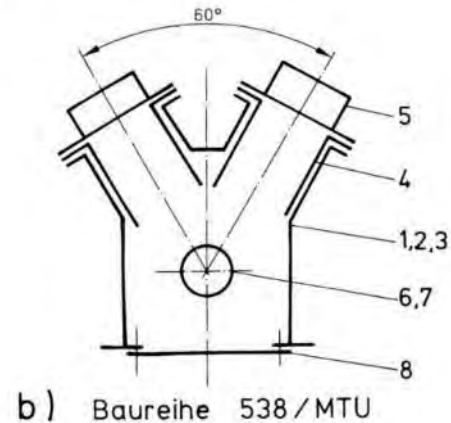
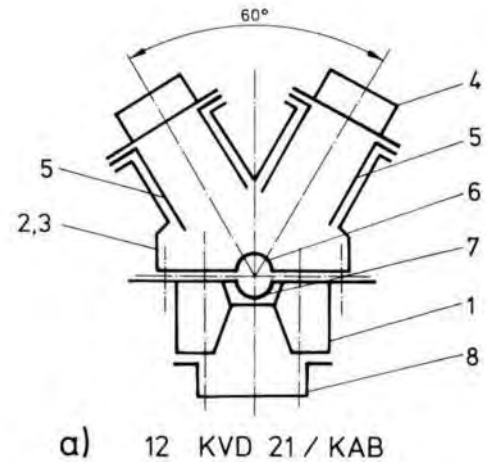


Fotos : Karim Benabdellah

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Motorgehäuse

- 1) Rahmen oder Kurbelgehäuseunterteil
- 2) Kurbelgehäuseoberteil
- 3) Zylinderblock
- 4) Zylinderkopf
- 5) Zylinderlaufbuchse
- 6) Kurbelwellengrundlager
- 7) Kurbelwellenlagerschale
- 8) Ölwanne



Quelle: Feihl/Die Diesellokomotive, transpress 2009

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Kurbeltriebwerk

Kolben

Pleuel

Kurbelwelle

Schwungscheibe

Drehschwingungs-
dämpfer

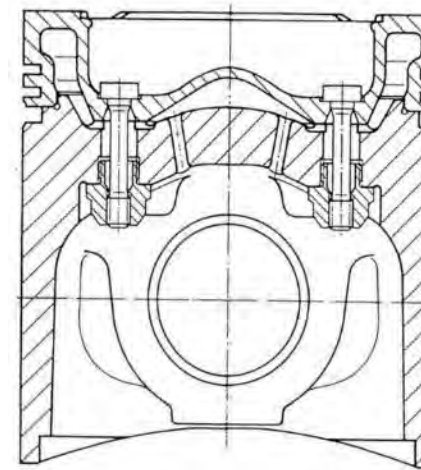


Quelle: MTU

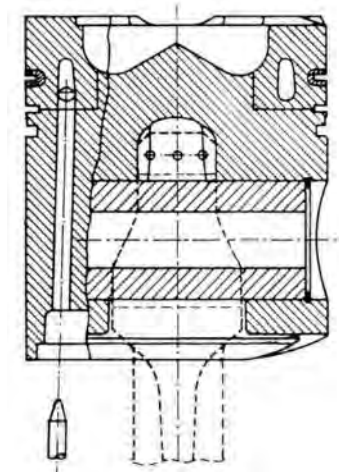
8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Kurbeltriebwerk – Kolben

- Kolben sind die am meisten beanspruchten Bauteile
→ Herz des Motors
- Anforderungen:
 - a) geringe Masse
 - b) geringe Wärmedehnung
 - c) gute Wärmeleitfähigkeit
 - d) große Wärmehärte
 - e) hoher Verschleißwiderstand
 - f) gut dichtende Kolbenringe
- meist einteilige Leichtmetallkolben oder mehrteilige „gebaute“ Kolben (Boden aus hochleg. Stahl, Schaft aus Alu)



gebauter MAHLE-Kolben,
verschraubt (MTU Motor-BR 396-03)

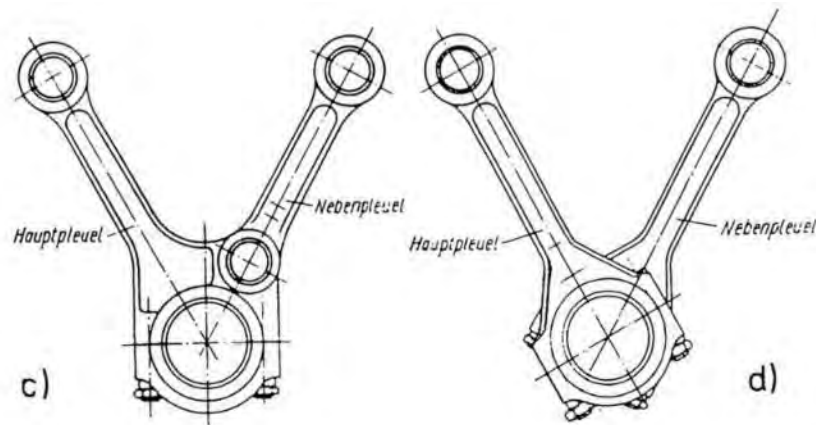


gebauter MAHLE-Kolben,
elektronenstrahlgeschweißt
(MWM Motor-BR 604 B)

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

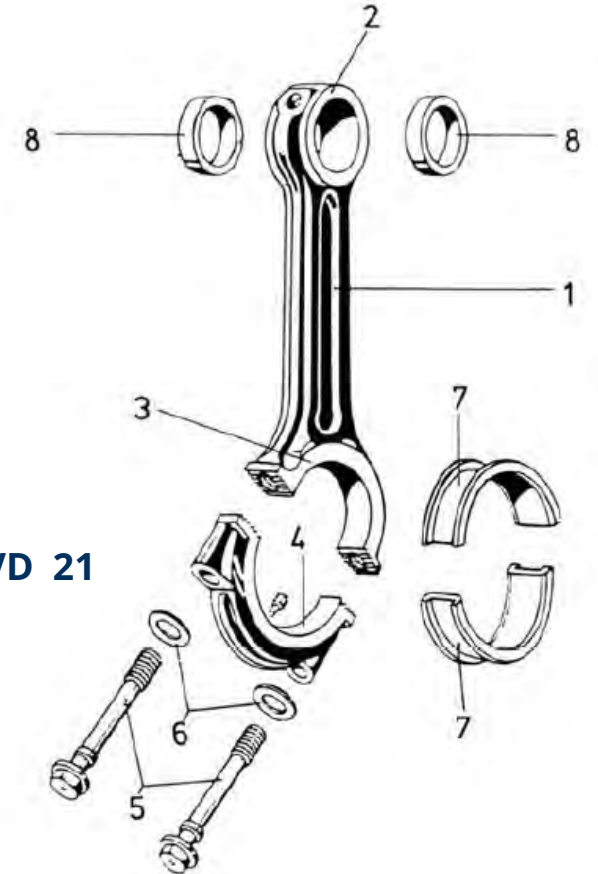
Kurbeltriebwerk – Pleuel

- Verbindungsglied zw. Kolben und Kurbelwelle
- werden durch Wechselbeanspruchungen hoch belastet
- Bei V-Motoren 3 Arten der Lagerung der beiden Pleuelstangen:
 - Gabelstangen
 - Hauptpleuel und Anlenkpleuel (c)
 - zwei normale Pleuelstangen nebeneinander auf einem Zapfen (d),



Pleuel Dieselmotor 12 KVD 21

1. Pleuelschaft
2. Pleuelkopf
3. Pleelfuß, schräg geteilt
4. Pleueldeckel
5. Dehnschrauben
6. Scheiben
7. Lagerschale, geteilt
8. Buchse Kolbenbolzen, geteilt



8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Kurbeltriebwerk – Pleuel



Foto: Wikipedia/A. Gutwein

Anlenkpleuel des Dieselmotors Kolomna 5D49 V16

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Kurbeltriebwerk – „Powerpack/Power Assembly“

- von EMD geprägte Bauweise
- Einheit von Zylinderlaufbuchse, Kolben + Dichtringe, Pleuel, Zylinderkopf
- Motor-Überholung ohne Ausbau des Motors möglich



Foto : Martin Kache



Foto: © E. M. Bell



Abbildung: © EMD

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Kurbeltriebwerk – Kurbelwelle

- Umsetzung der oszillierenden Bewegung v. Kolben und Pleuel in eine rotatorische
- aus einem Stück gegossen, geschmiedet od. aus Einzelteilen zusammengeschraubt
- hochbelastetes Bauteil → wechselnden Biege- und Torsionsbeanspr. und Schwingungen ausgesetzt



Foto : Martin Kache

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Steuerung

- Alle Bauteile und Organe, die zum Ladungswechsel der Zylinder dienen
- 4-Takter: Ventilsteuerung (a),
- 2-Takter: Zweitakter mit Schlitzsteuerung (b) o. komb. Ventil-Schlitz-Steuerung

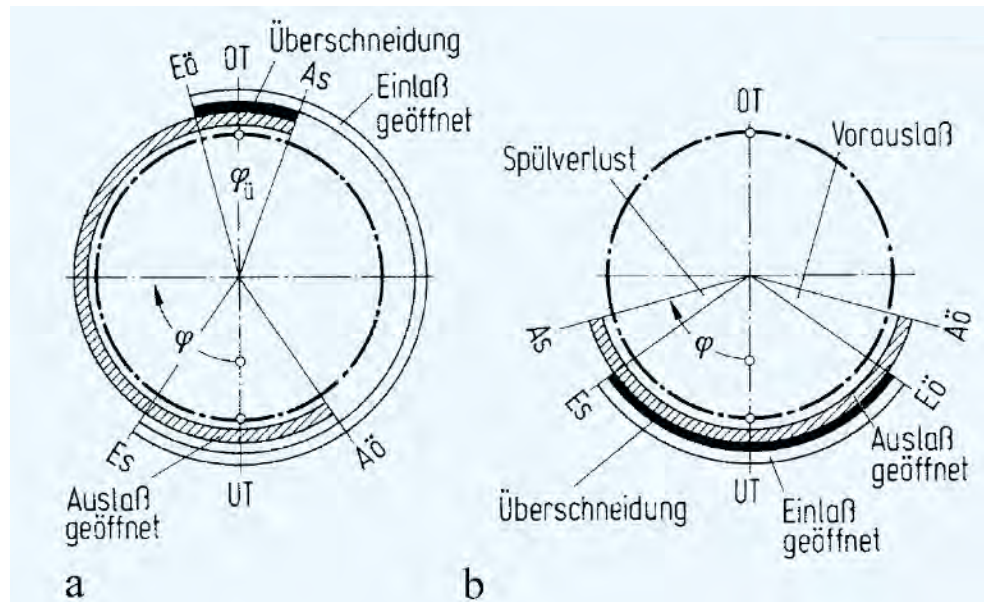


Abbildung: Dubbel

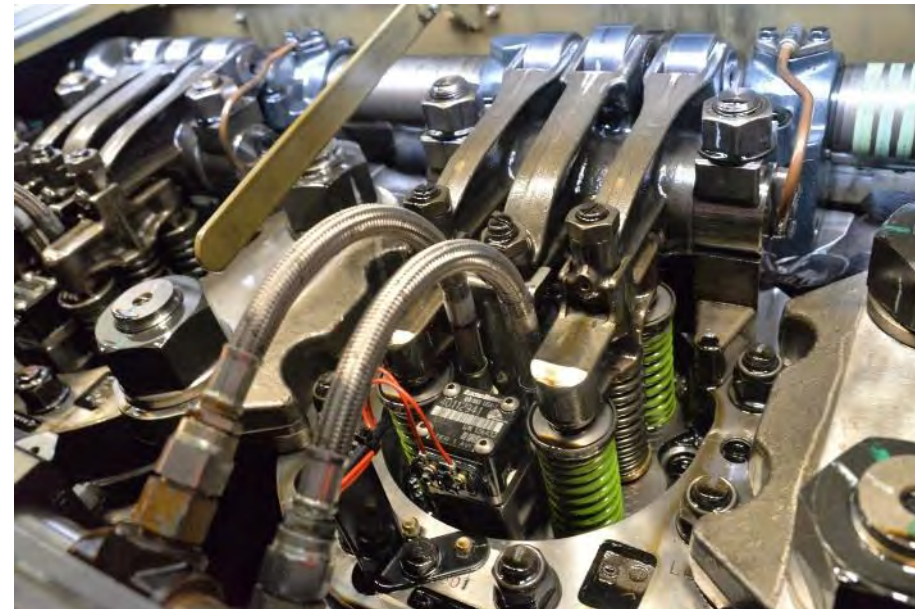


Foto : Martin Kache

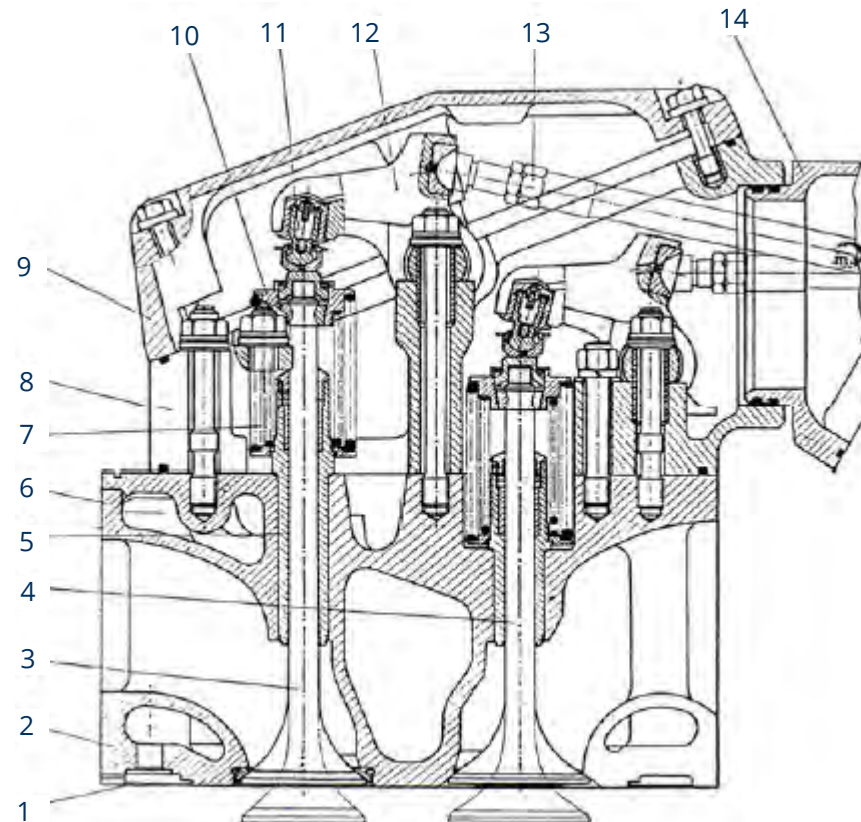
8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Steuerung

Ventile und
Zubehör

Nockenwelle

Nockenwellen-
antrieb



**Schnitt Zylinderkopf
Motor Kolomna 5D49 V16**

- 1) Kühlwassereintritt
- 2) Zylinderkopfgehäuse
- 3) Auslassventil
- 4) Einlassventil
- 5) Ventalführungsbuchse
- 6) Kühlwasseraustritt
- 7) Ventalfedern
- 8) Ventilgehäuse
- 9) Zylinderkopfhaube
- 10) Oberer Ventalfederteller
- 11) Hydraulischer Stößel
- 12) Kipphebel
- 13) Stößelstange
- 14) Übergangsgehäuse zur Nockenwelle



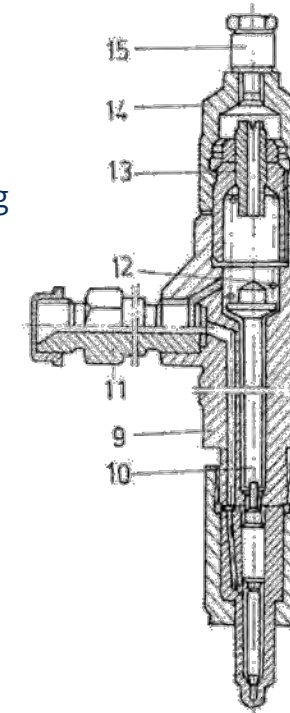
Foto : Martin Kache

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

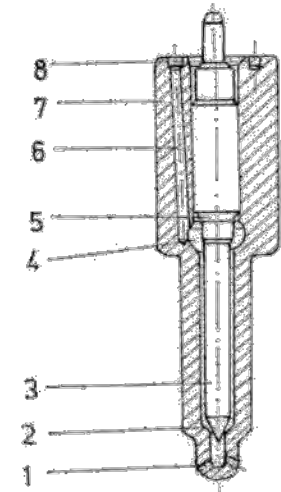
Einspritzanlage



- 1) Mehrlochdüsenbohrung
- 2) Nadelsitz
- 3) Düsennadel
- 4) Ringkanal
- 5) Tragschulter
- 6) Kraftstoffzulaufkanal
- 7) Düsenkörper
- 8) Ringkanal
- 9) Düsenhalter
- 10) Stößel
- 11) Druckstutzen
- 12) Stößelfeder
- 13) Einstellschraube
- 14) Verschlusskappe
- 15) Leckkraftstoffanschluss



Einspritzventil



Einspritzdüse

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Einspritzanlage

Common-Rail-
Verfahren (CR)

Hochdruckpumpe

Injektoren

Hochdruckspeicher
(Rail)

elektronische
Motorsteuerung

- ① Hochdruckpumpe
- ② Hochdruckleitung
- ③ Railsystem
- ④ Injektoren
- ⑤ ECU

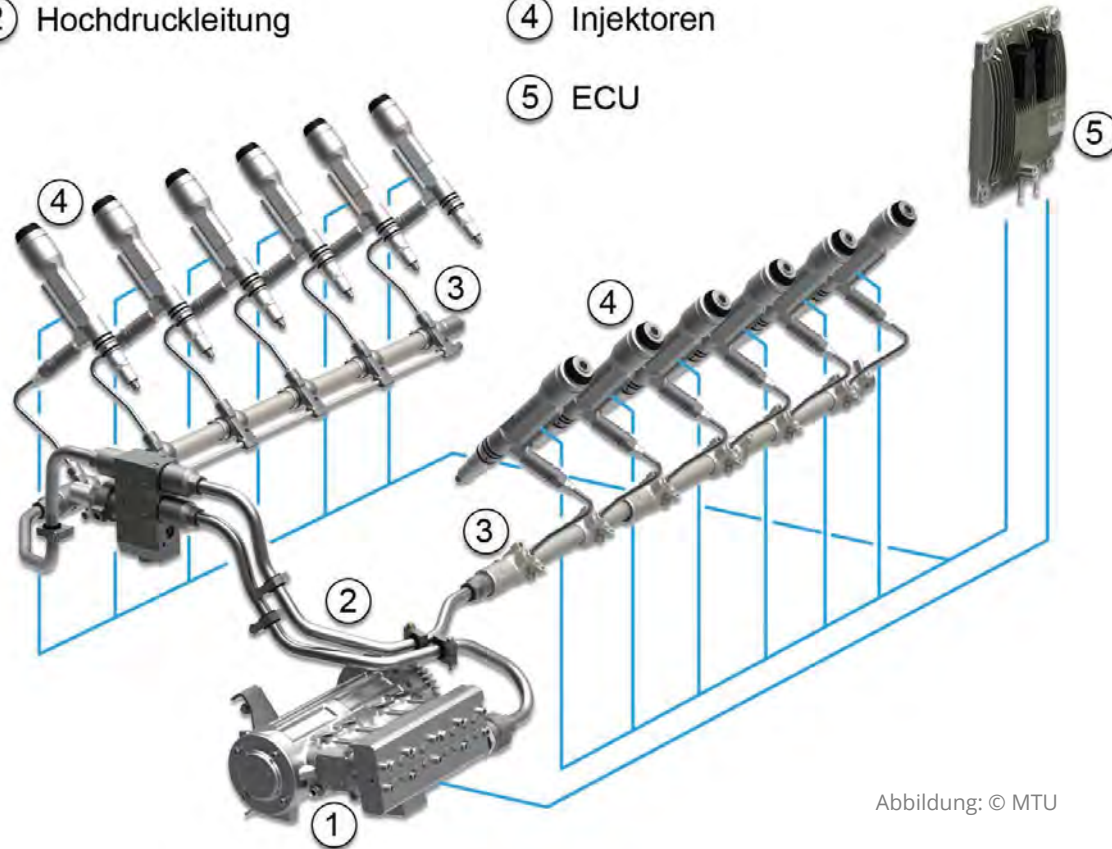
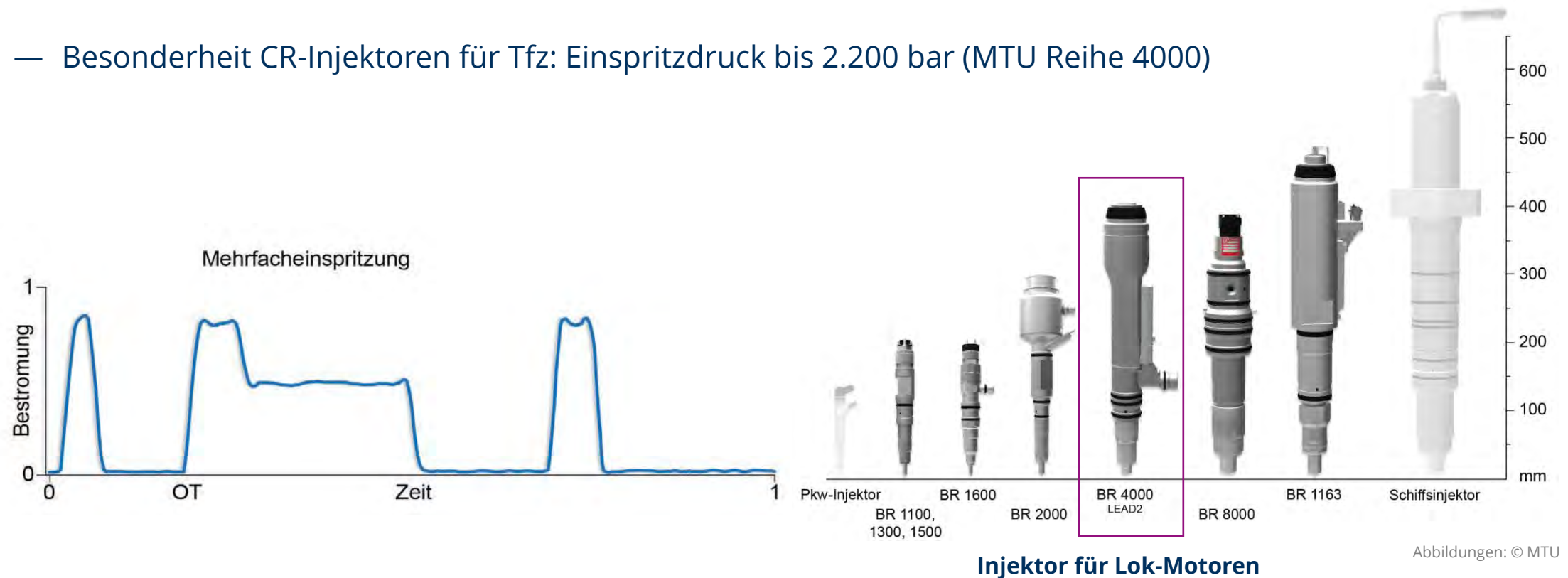


Abbildung: © MTU

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Einspritzanlage - Injektion

- Einspritzverlauf legt fest, zu welcher Zeit wie viel Kraftstoff in den Zylinder eingespritzt wird
- beispielhaft: 3-teiliger Einspritzverlauf (Vor-, Haupt-, Nacheinspritzung)
- Besonderheit CR-Injektoren für Tfz: Einspritzdruck bis 2.200 bar (MTU Reihe 4000)



8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Schmierölkreislauf

- Ziele: Verschleiß gering halten → höhere Lebensdauer
- größte Bedeutung für die Kolben und die Zylinderlaufbuchsen, insbes. beim Anlassvorgang
- Schmierung hat drei Aufgaben zu erfüllen:
 - Schmieren
 - Kühlen
 - Dichten

Ölpumpen und
Ventile

Schmierölleitungs-
system

Filter

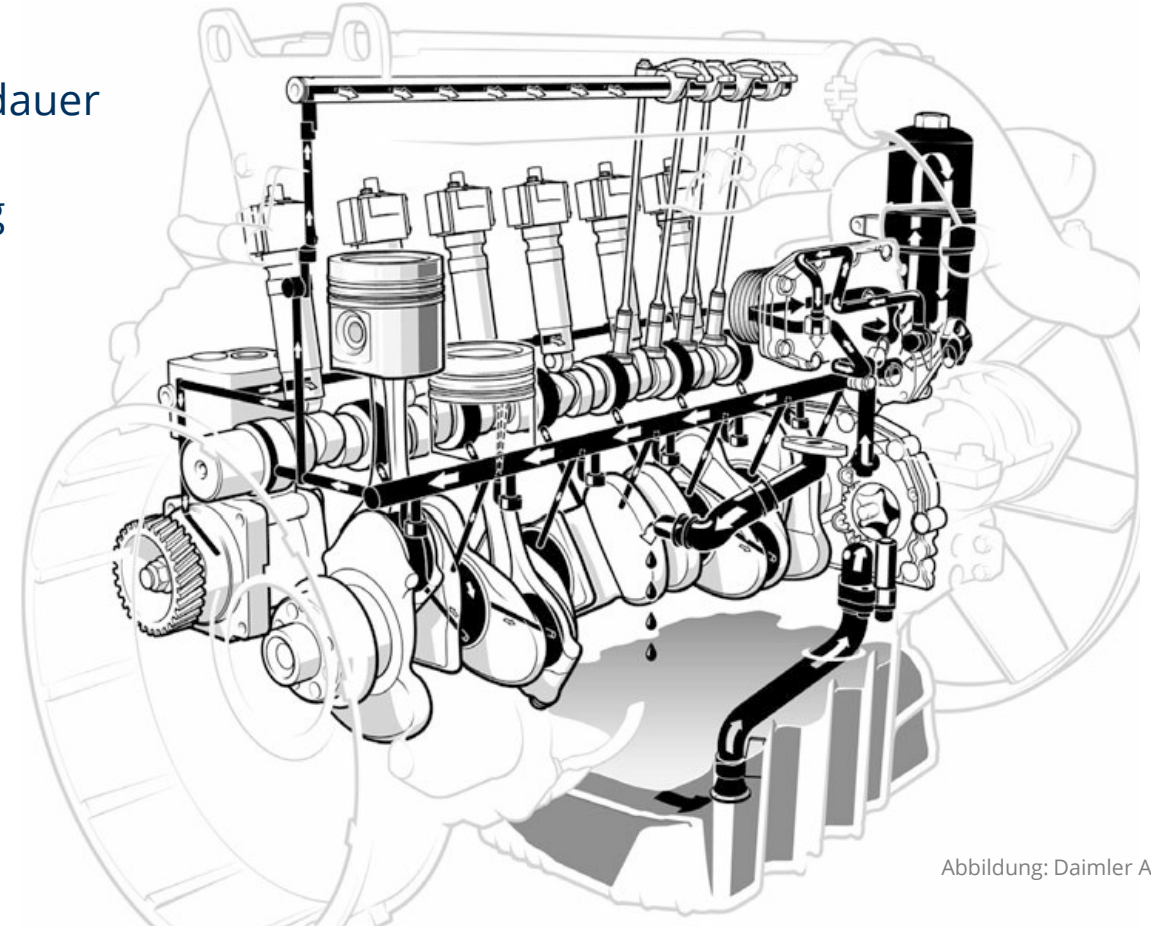


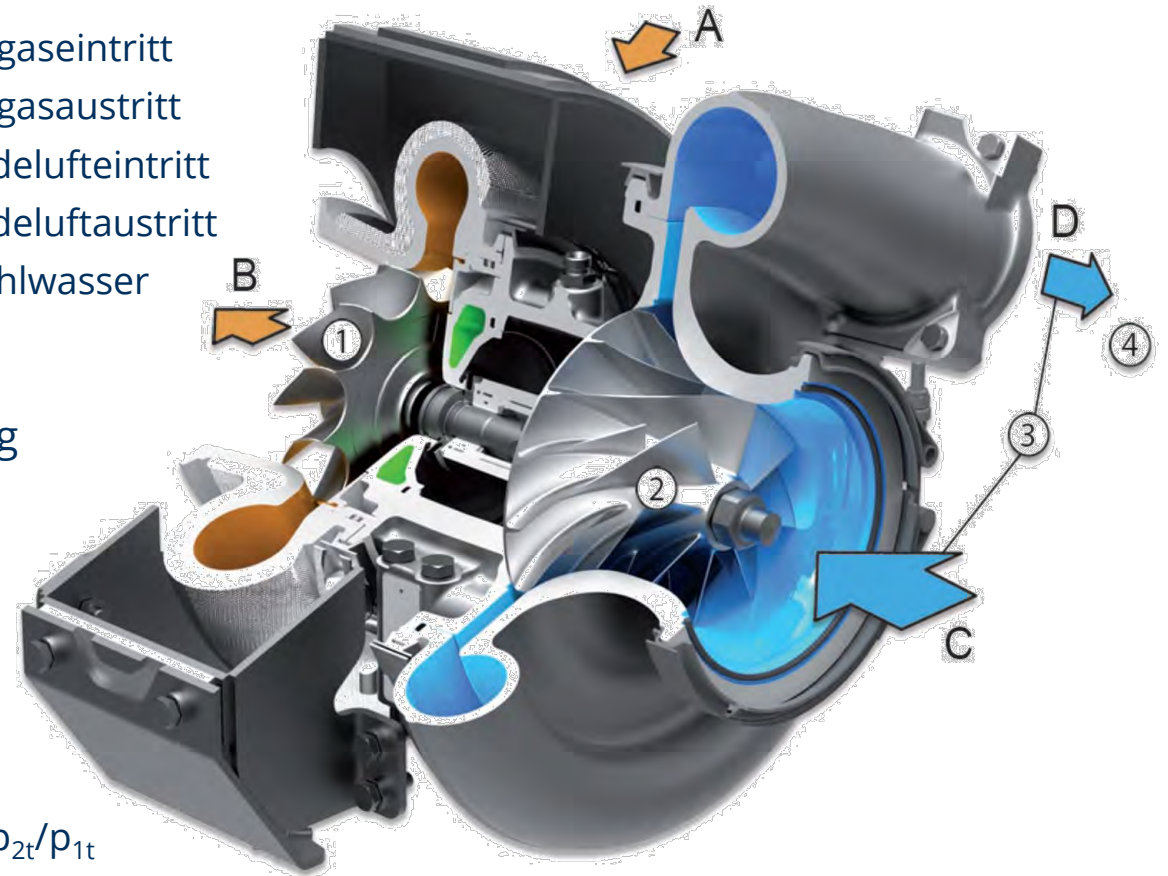
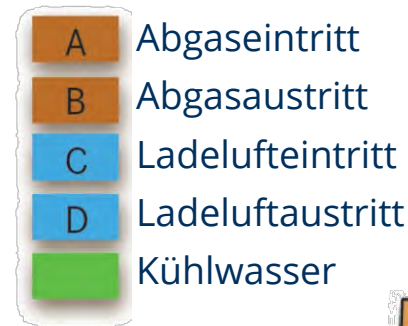
Abbildung: Daimler AG

Schmierstoffschema Kfz-Motor OM 603 LA

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Aufladung

- Zuführung größerer Luftmengen, als Motoren selbst ansaugen können
- je Zylinder können größere Kraftstoffmengen verbraucht und Leistungssteigerungen erzielt werden
- Hochleistungs-Dieselmotoren mit 2-stufiger Aufladung
- Leistungssteigerung durch Aufladung: 50...100%



- 1) Turbinenrad
- 2) Verdichterrad
- 3) Druckverhältnis p_{2t}/p_{1t}
- 4) reduzierter Volumenstrom $V_{red.}$

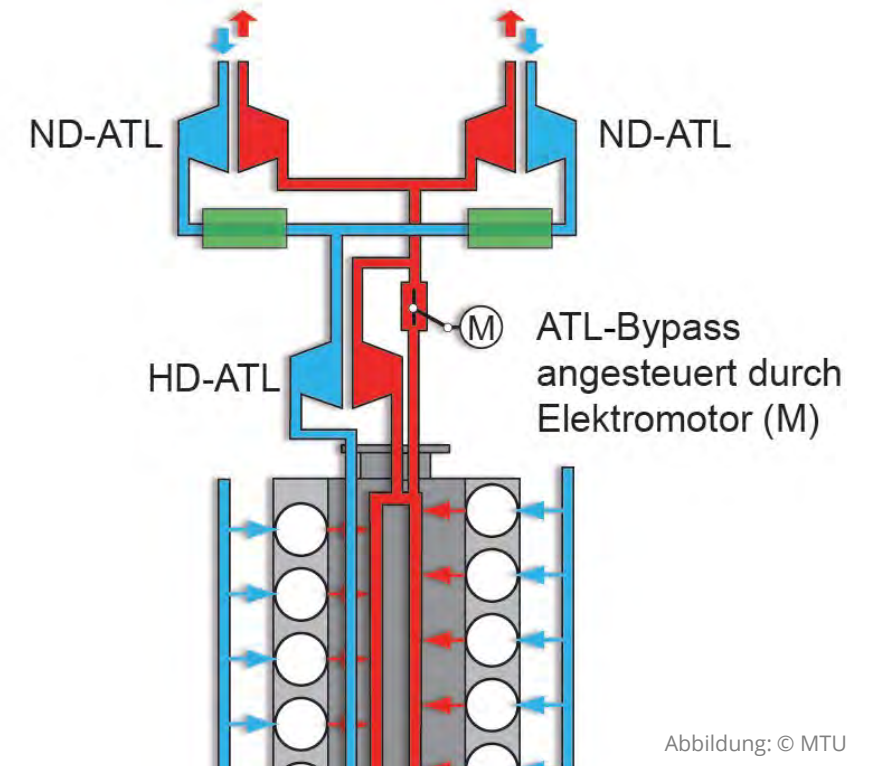
Quelle: MTU

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Ladeeinrichtung

Aufladung erfolgt:

- Einstufig
 - Ladedruck wird für den gesamten Drehzahl- und Lastbereich des Motors durch einen einzigen Lader erzeugt
- Zweistufig, mit Ladeluftzwischenkühlung (Abb.)
 - zwei Turbolader in Reihe geschaltet
 - vom Zylinder kommender Abgasstrom wird geteilt, ein Teil strömt durch die Hochdruckturbinen (HD), ein Teil wird an der Turbinen über einen regelbaren Bypass vorbeigeleitet
 - gesamte Massenstrom fließt danach durch die Niederdruckturbinen (ND).

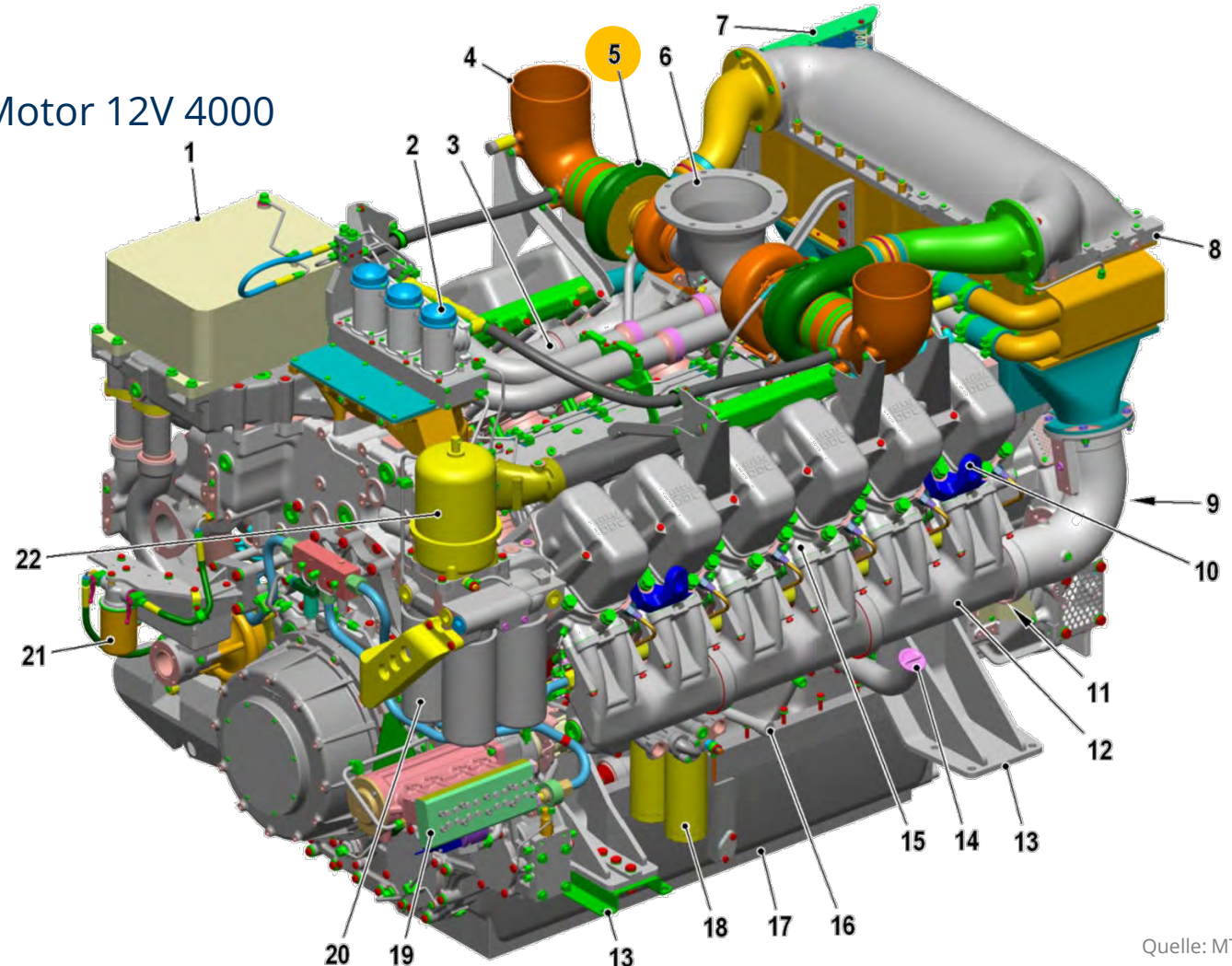


8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Aufladung – Bsp. MTU

- 1) Ölkühler
- 2) Kurbelgehäuseentlüftung
- 3) Abgasleitung
- 4) Anschluss Verbrennungslufteintritt
- 5) **Abgasturbolader**
- 6) Anschluss Abgasaustritt
- 7) Motorregler
- 8) Ladeluftkühler
- 9) Schwungrad
- 10) Aufhängeöse
- 11) Starter
- 12) Ladeluftrohr
- 13) Motorlagerung
- 14) Öleinfüllstutzen
- 15) Zylinderkopf
- 16) Kraftstoffhandpumpe
- 17) Ölwanne
- 18) Kraftstofffilter
- 19) Kraftstoffhochdruckpumpe
- 20) Motorölfilter
- 21) Kühlmittelfilter
- 22) Ölzentrifuge

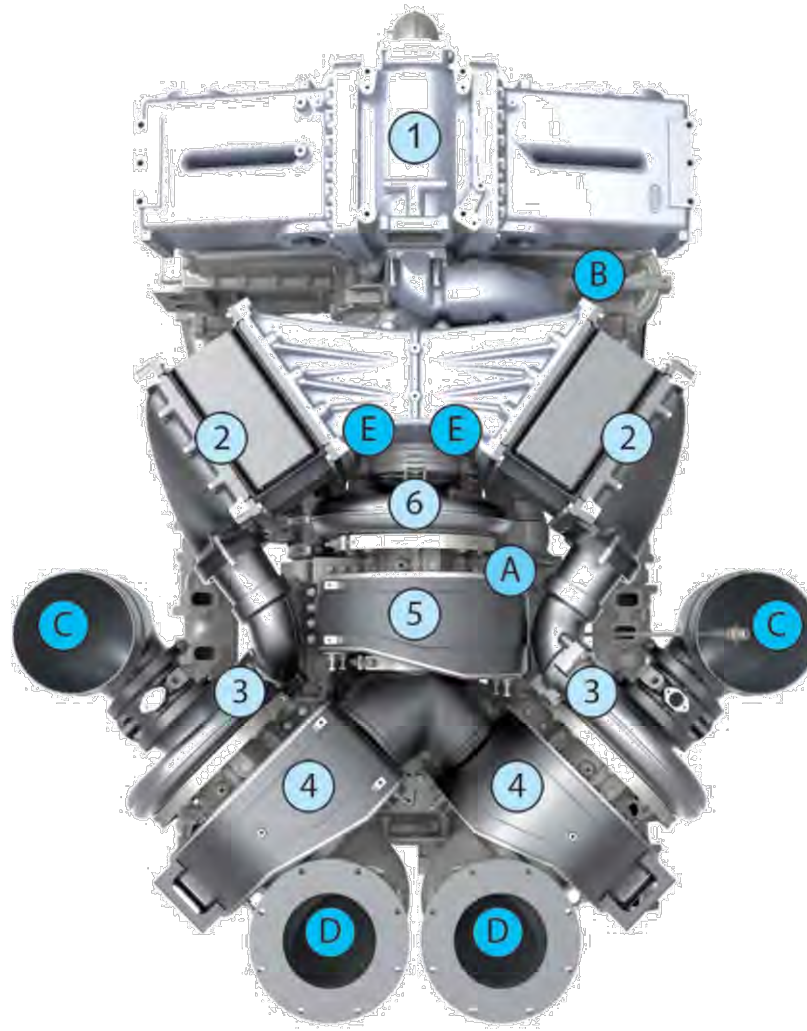
Motor 12V 4000



Quelle: MTU

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Aufladung – Bsp. MTU



- ① Ladeluftkühler
- ② Zwischenkühler
- ③ Niederdruckverdichter
- ④ Niederdruckturbine
- ⑤ Hochdruckturbine
- ⑥ Hochdruckverdichter
- Ⓐ vom Hochdruckverdichter zum Ladeluftkühler
- Ⓑ vom Ladeluftkühler zur Zylinderbank
- Ⓒ Ansaugluft
- Ⓓ Abgasaustritt
- Ⓔ vom Zwischenkühler zum Hochdruckverdichter

Quelle: MTU

8.3 Aufbau und Funktionsweise des Dieselmotors

Dieselmotor-Baureihen (am Beispiel MTU 4000)

Motivation:

- Kostensenkung durch Gleichteile und Modularisierung (Produktion)
- Vorteile in der Instandhaltung (Gleichteile, Technologie)
- Abdeckung eines großen Leistungsspektrums

z.B. 8V 4000 R 43 L

8 Zylinder

V-Anordnung

4000er Reihe

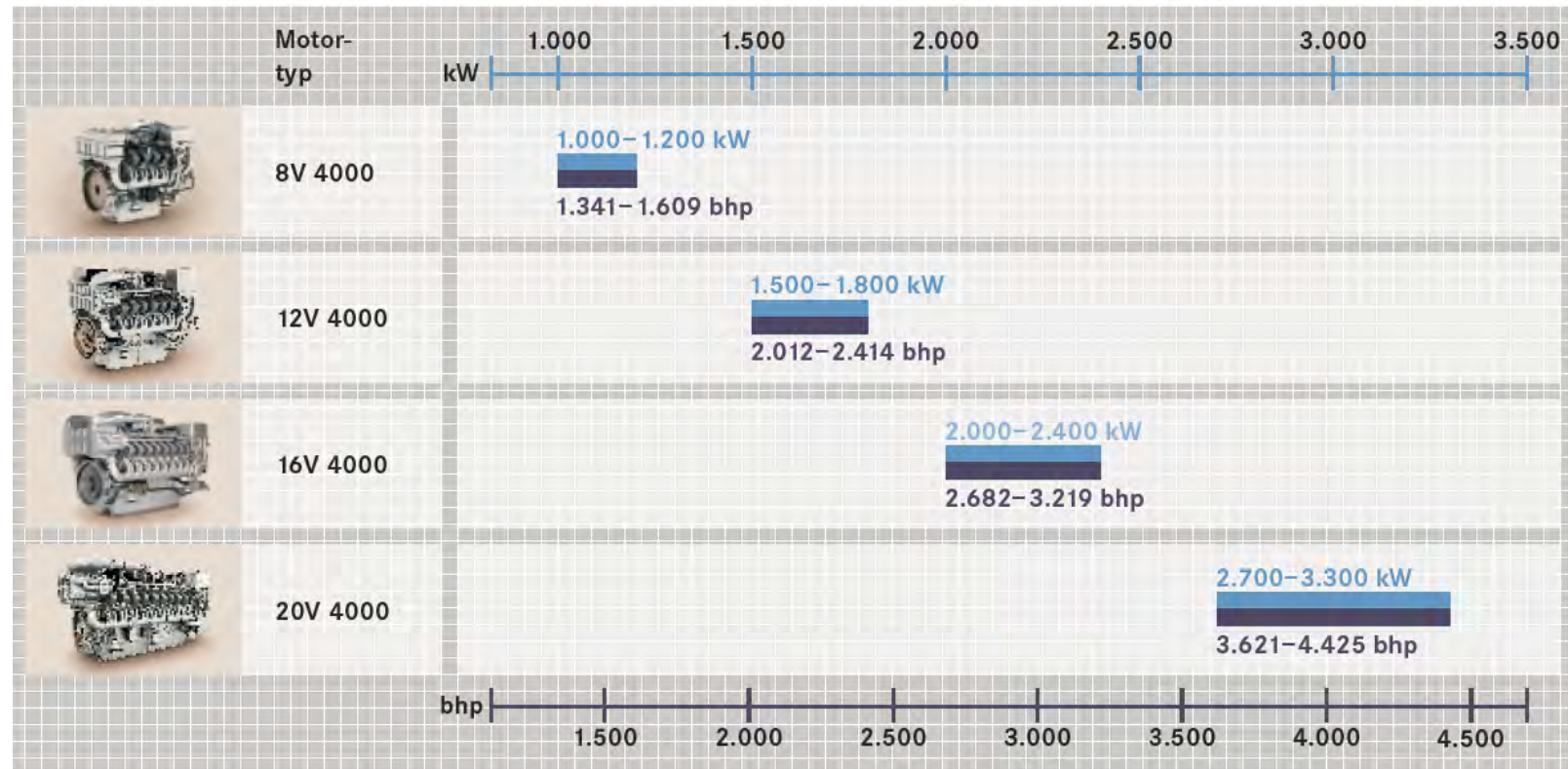
R – für Bahnantriebe (**R**ail)

4 – Leistungssegment

3 – Konstruktions-Index

L - leistungsgesteigert

Beispiel: MTU Baureihe 4000



8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren

„Bahn-Dieselmotor“

- Bahn-Dieselmotoren → Spezial-DM, auf die speziellen Betriebsbedingungen der Bahn zugeschnitten
- Typ. Hersteller: MTU, Caterpillar, Cummins
- auch Einsatz anderer DM in Sfz, z. B. Schiffsdiesel (ABC), Kfz-DM (MAN)

Besonderheiten der Bahn-DM

- intermittierendes Leistungsregime, gekennzeichnet durch:
 - häufigen Lauf bei Teillasten;
 - seltenem Lauf bei Volllast,
 - häufigem Lauf im Leerlauf.
- häufiges Ab- und Wiederanstellen
- Abstellen und Starten bei tiefen Temperaturen
- Platzmangel und Massebeschränkung im Tfz
- Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad → im ges. Leist.-bereich ist mögl. geringer KS-Verbrauch gefordert
- Betriebszuverlässigkeit unter allen Betriebszuständen und klimatischen Bedingungen
- Normative Nutzungszeit von 25...30 Jahren

8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren

8.4.1 Besonderheit der Bahn-DM

... und wenn doch „nur“ Industriemotoren eingesetzt werden:

„Rollkur für Mehrmotoren-Lokomotiven der Baureihe 245“

[Meldung Eisenbahn-Revue International 7 /2018]

„[...] Die Lokomotiven erhalten neue beziehungsweise überarbeitete Dieselmotoren. Bei den sonst vor allem in Bau- und Industriemaschinen verwendeten Caterpillar-Motoren hatte sich gezeigt, dass die Zylinderkopfdichtungen dem Betrieb **mit hohem Vollastanteil** nicht genügten. Inzwischen hat der Motorenhersteller in den USA eine eigene Produktionslinie für Lokomotiv-Dieselmotoren eingerichtet, für die schärfere Anforderungen als bei den Baumaschinen gelten. [...]“



Foto: Karim Benabdellah



Foto: ERI, 2018/07

8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren

Taktzahl

— 2- oder 4-Takt?



Foto: wikipedia/Qualle

EMD Class 66

- 2-Takt EMD-Motor 12N-710G3B-EC
- $n_{\text{nenn}} = 950 \text{ /min}$
- $P_{\text{nenn}} = 2420 \text{ kW}$



Foto: Martin Kache

ER20

- 4-Takt MTU-Motor 16V 4000 R41
- $n_{\text{nenn}} = 1800 \text{ /min}$
- $P_{\text{nenn}} = 2000 \text{ kW}$

8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren

Drehzahl

- Mittelschnell- o. Schnellläufer



Foto: Karim Benabdellah

Voith Maxima 40CC

- ABC-Motor 16V DZC
- $n_{\text{nenn}} = 1000 \text{ /min}$
- $P_{\text{nenn}} = 3600 \text{ kW}$



Foto: Wikipedia/TrainPhotos

UK Light Class 68

- CAT-Motor C175-16
- $n_{\text{nenn}} = 2000 \text{ /min}$
- $P_{\text{nenn}} = 2800 \text{ kW}$

8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren

Drehzahl

- Motoren in modernen Lokomotiven mit $n_{\text{nenn}} = 950 \dots 2000 \text{ min}^{-1}$
- Leistungen bis 3500 ... 4500 kW pro Motor möglich
- im VT-Einsatz kleine, kompakte Motoren bis $n_{\text{nenn}} = 2400 \text{ min}^{-1}$, Leistungsbereich 250 bis 600 kW
- zus. mit Leistungsübertragung in sog. Powerpacks → teilw. mehrmotorige VT

Motorbauart	typ. Drehzahl [min^{-1}]	Drehzahlbereich [min^{-1}]
langsamdrehend	750	625 – 850
mittelschnell drehend	1000	900 – 1200
schnelldrehend	1500	1250 – 2500

8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren

Drehzahl

— Drehzahl-Drehmoment/Leistungs-Kurve – Bsp. MAN-Motor D2676 LE621

D2676 LE621 full power curve

rated power: 338 kW / 1800 rpm

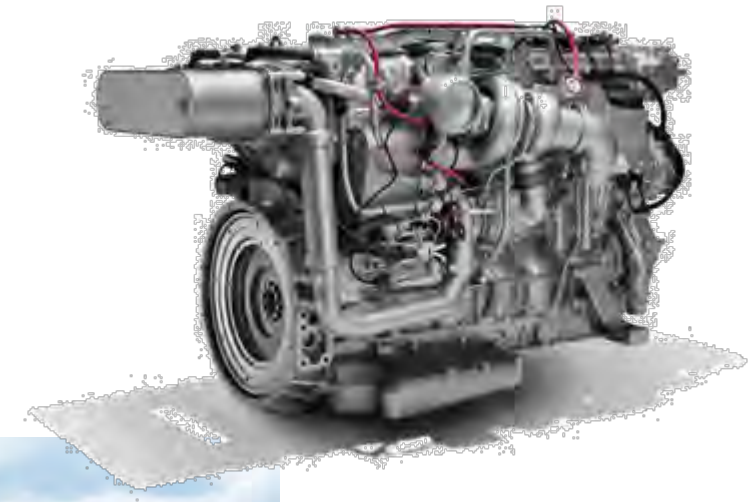
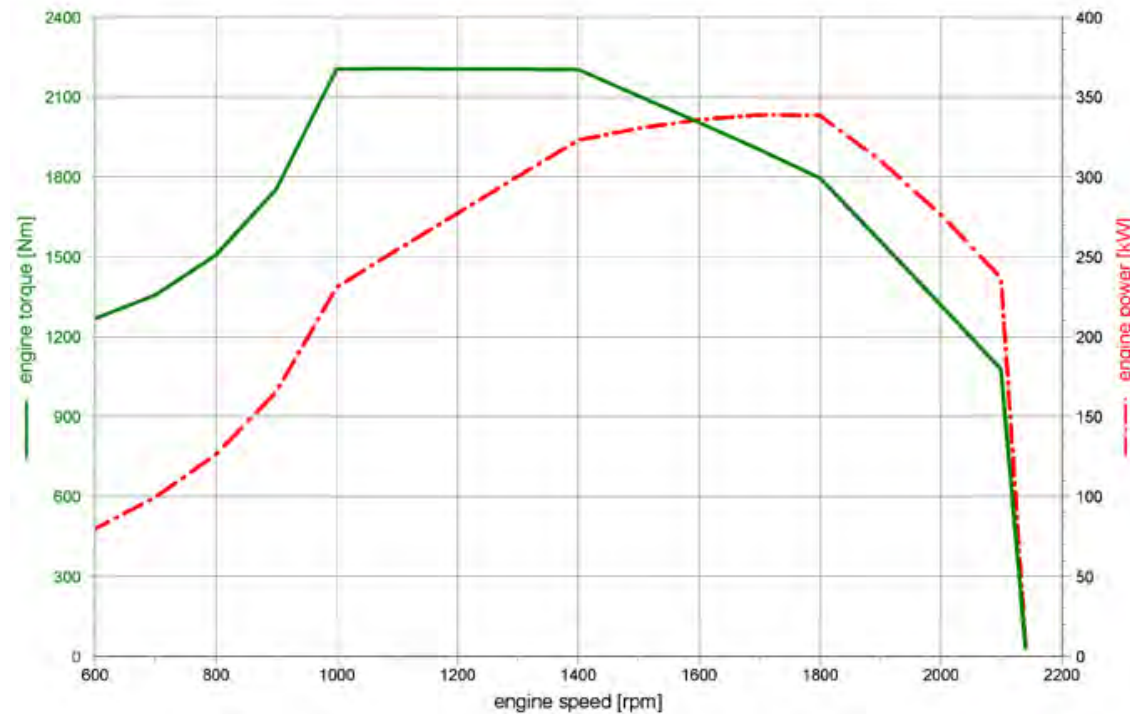
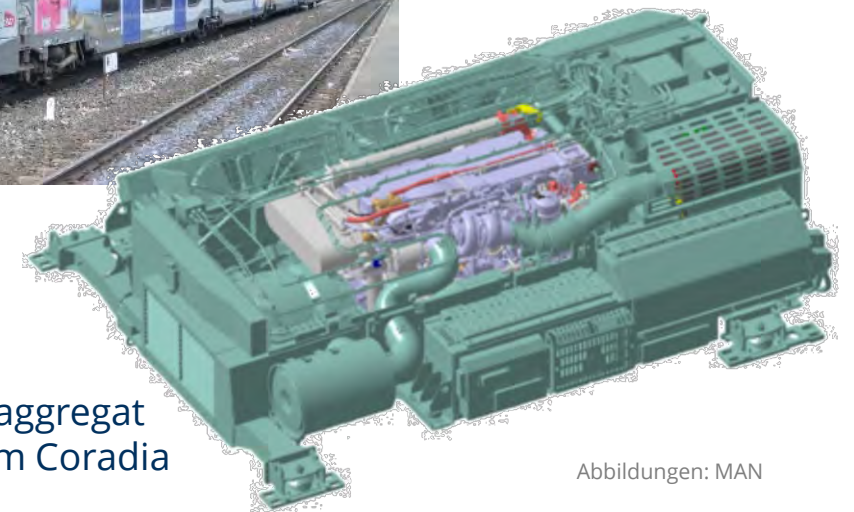


Foto: Martin Kache



Dachaggregat
Alstom Coradia

Abbildungen: MAN

8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren

Einstellung und Abnahme von Bahn-DM

- Bahndieselmotoren auf Dauerleistung B nach DIN 6270 eingestellt
- Nennleistung, die nicht überschritten werden kann und die dem intermittierenden Betrieb Rechnung trägt
- Bahn-DM müssen Typenlauf unterzogen werden
- An mind. einem DM ist Eignung für den Bahneinsatz durch nat. und internat. Zulassungsverfahren nachzuweisen
- Nach UIC besteht die Zulassungsprüfung aus
 - a) einer Leistungsprüfung mit 100 Stunden, gefolgt von einer Dauerleist.-prüfung von 360 h auf dem Prüfstand oder
 - b) einer Leistungsprüfung von 100 h auf dem Prüfstand, gefolgt von einem Betriebsversuch von 4000 h im Streckendienst oder 5000 h im Rangierdienst
- vorgeschriebenes Regime entspricht wechselnden Beanspruchungen im Bahneinsatz

8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren

Übersicht Lokomotivmotoren

Hersteller	Modell	RS-Folge	Leistung [kW]	Masse [t]	Radsatz- last [t]	V-Max [km/h]	Erstes BJ	Motor	Motor- Drehzahl	Emission	p [kW/t] ↑
NEWAG	311Da	Co'Co'	2133	120	20,0	100	2007	GE 7FDL 12 EFI	1050	UIC Stage II	17,8
Vossloh	333.3	Co'Co'	2240	120	20,0	120	2002	GM-EMD 16-645 E3	950		18,7
EMD	JT42CWR-T1	Co'Co'	2420	129,6	21,6	120	2006	EMD 12N-710G3B-T2	950	EU97/68 Stage IIIa	18,7
EMD	JT42CWR "Class 66"	Co'Co'	2420	126	21,0	120	1998	GM-EMD 12N-710G3B-EC	950	UIC Stage II	19,2
Bombardier	DE-AC33C "Blue Tiger"	Co'Co'	2460	126	21,0	120	1996	GE 7FDL12	1050		19,5
GE Transportation	PH37ACmi (GB)	Co'Co'	2750	129	21,5	120	2009	PowerHaul P616	1500	EU97/68 Stage IIIb	21,3
Voith	Maxima 30CC	C'C'	2750	126	21,0	120	2008	ABC 12V DZC	1000	EU97/68 Stage IIIa	21,8
GE Transportation	PH37ACai (EU)	Co'Co'	2750	126	21,0	120	2012	PowerHaul P616	1500	EU97/68 Stage IIIb	21,8
Alstom	BB75000/7500/75300	Bo'Bo'	2000	86	21,5	120	2007	MTU 16V 4000 R41	1800	UIC Stage II	23,3
Henschel	DE 2500 (202 002)	Bo'Bo'	1840	76	19,0	120	1971	MTU MA 12 V 956 TB	1500		24,2
Siemens	ER20	Bo'Bo'	2000	80	20,0	140	2002	MTU 16V 4000 R41	1800		25,0
Bombardier	DE2000	Bo'Bo'	2100	81,6	20,4	160	1997	2x MTU 12V396TC13	1800		25,7
Bombardier	TRAXX P160 DE	Bo'Bo'	2200	84	21,0	160	2006	MTU 16V 4000 R41L	1800	EU97/68 Stage IIIa	26,2
Voith	Maxima 40CC	C'C'	3600	135	22,5	120	2006	ABC 16V DZC	1000	EU97/68 Stage IIIa	26,7
Siemens	Charger (USA)	Bo'Bo'	3280	120	30,0	200	2016	Cummins QSK95	1700	EU97/68 Stage IIIb	27,3
Bombardier	TRAXX DE ME	Bo'Bo'	2256	82	20,5	160	2012	4x CAT C18	2000	EU97/68 Stage IIIb	27,5
Alstom	BB75400	Bo'Bo'	2400	86	21,5	120	2010	MTU 16V 4000 R43L	1800	EU97/68 Stage IIIa	27,9
Vossloh	EURO 3000 Passenger	Bo'Bo'	2390	85	21,3	200	2006	EMD 12N-710G3C-U2	950	EU97/68 Stage IIIa	28,1
Siemens	Vectron DE	Bo'Bo'	2400	84	21,0	160	2010	MTU 16V 4000 R84	1800	EU97/68 Stage IIIb	28,6
Bombardier	TRAXX F140 DE	Bo'Bo'	2400	84	21,0	140	2006	MTU 16V 4000 R43	1800	EU97/68 Stage IIIa	28,6
PESA	Gama 111 Db	Bo'Bo'	2400	84	21,0	160	2014	MTU 16V 4000 R84	1800	EU97/68 Stage IIIb	28,6
Vossloh	EURO 3000 Freight	Bo'Bo'	2460	82	20,5	120	2012	EMD 12N-710G3C-U2	950	EU97/68 Stage IIIa	30,0
GE	China Railways HXN5	Co'Co'	4660	150	25,0	120	2008	GE GEVO16	1050		31,1
Vossloh	UKLIGHT	Bo'Bo'	2800	85	21,2	160	2013	CAT C175-16	2000	EU97/68 Stage IIIa	32,9

8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren

Übersicht Triebwagenmotoren

Hersteller	Modell	RS-Folge	Anz. DM	Leistung je DM [kW]	V-Max [km/h]	Erstes BJ	Motor	Motor-Drehzahl	Emission
Alstom	Alstom Coradia Polyvalent (4-Teiler)	Bo'2'2'2'Bo'	4	340	160	2011	MAN D2676 LE62X	1800	EU97/68 Stage IIIa/b
Pesa	Link	B'2'B'	2	565	140	2012	MTU 6H 1800 R85L	1800	EU97/68 Stage IIIa/b
Alstom	Lint 27	B'2'	1	315	120	1999	MTU 6R 183 TD13H	1900	
Alstom	Lint 41	B'2'B'	2	315	140	1999	MTU 6R 183 TD13H	1900	
Siemens	VT 642	B'2'B'	2	275	120	1999	MTU 6R 183 TD13H	1900	EURO-2
Bombardier	BR 612	2'B'+B'2'	2	560	160	1998	Cummins QSK19-R	2000	
Stadler	RS1	B'B'	2	257	120	1996	MAN D2865 LUH 7	2000	EURO-2
Stadler	BR 646	2'+(Bo)+2'	1	550	120	1996	MTU 12V 183 TD 13 E2	2100	EURO-2



Foto: Martin Kache



Foto: Martin Kache



Foto: wikipedia/Qualle

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

8.5 Leistungsregelung von Dieselmotoren

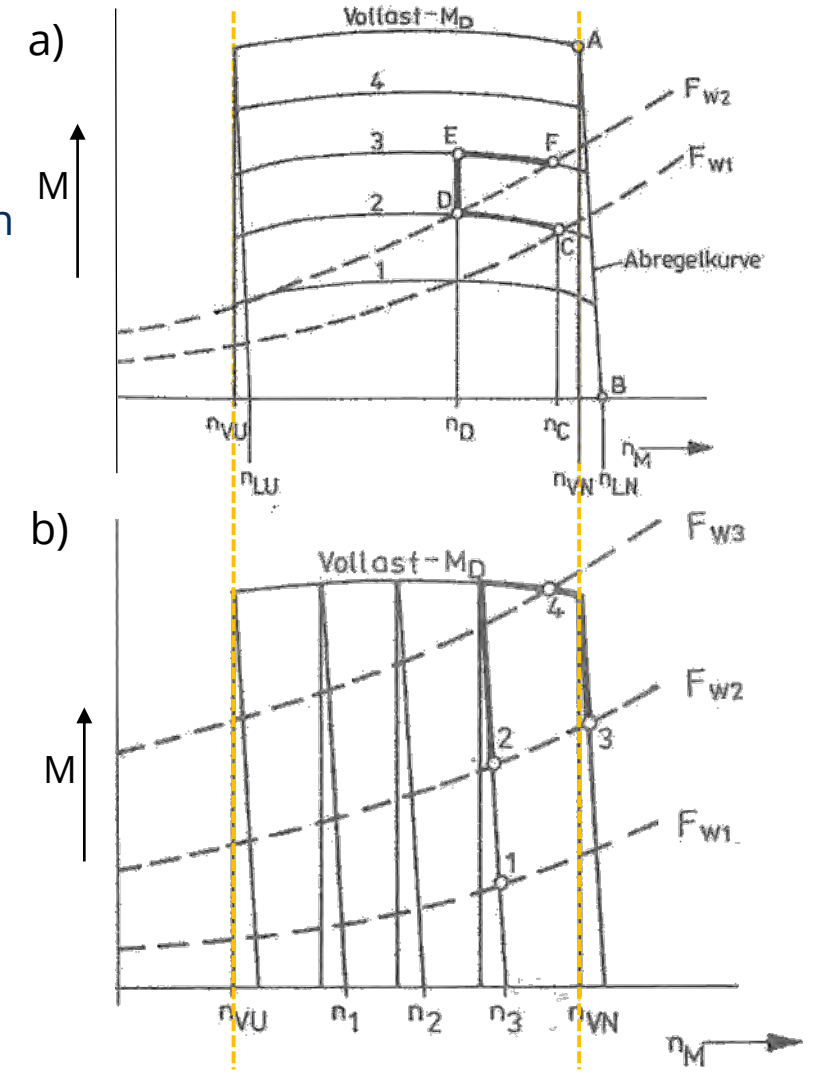
- erforderlich für n/M -Anpassung an Motorbelastung
- Bahn-DM sehr starke Belastungsschwankungen
- hinreichend schnelle und ausreichend feinstufige Regelung erforderlich
- Leistungsgleichung (effektive Leistung):

$$P_e = k \cdot p_e \cdot \Sigma V_h \cdot n$$

- k ... Konstante für Motor-Art
- p_e ... effektiver Mitteldruck
- ΣV_h ... Gesamthubraum
- n ... Drehzahl

- resultierende Regelungsarten:
 - Füllungsregelung (a)
 - Drehzahlregelung (b)

1...4	Teilfüllungsstufen
$n_1...n_3$	Drehzahlstufen
n_{VU}	untere Vollastdrehzahl
n_{LU}	untere Leerlaufdrehzahl
n_{VN}	Nennvollstdrehzahl
n_{LN}	Nennleerlaufdrehzahl
F_{Wx}	Fahrwiderstandslinien



8.5 Leistungsregelung von Dieselmotoren

Füllungsregelung (Leerlauf-Enddrehzahlregelung)

- Zweistufenregler – Begrenzung der unteren (Leerlauf) und oberen (Nenn-)Drehzahl
- automatische Anpassung der Motordrehzahl an verschiedene Füllungsstufen
- lastbedingte Drehzahl-Drückung des Motors (aus $M_{\text{Last}} \uparrow$ folgt $n_{\text{DM}} \downarrow$)
- Anwendung:
 - Triebwagen mit hydromechanischer LÜ (Wandler + Lastschaltgetriebe)
 - Triebfahrzeuge mit hydrodynamischer LÜ und Wandler-Kupplungsgetriebe (v. a. Triebwagen)

Drehzahlregelung

- Vorgabe von festen Drehzahlen (Drehzahlstufen) durch den Regler
- Ausgleich der Drehzahlabweichungen bei Lastschwankungen durch Füllungsänderung ($M_{\text{Last}} \neq \text{konst.} \rightarrow n_{\text{DM}} \approx \text{konst.}$)
- Anwendung:
 - Lokomotiven mit hydrodynamischer LÜ (reine Wandler-Getriebe)
 - Triebwagen und Lokomotiven mit elektrischer LÜ

8.5 Leistungsregelung von Dieselmotoren

Elektronische Regelung

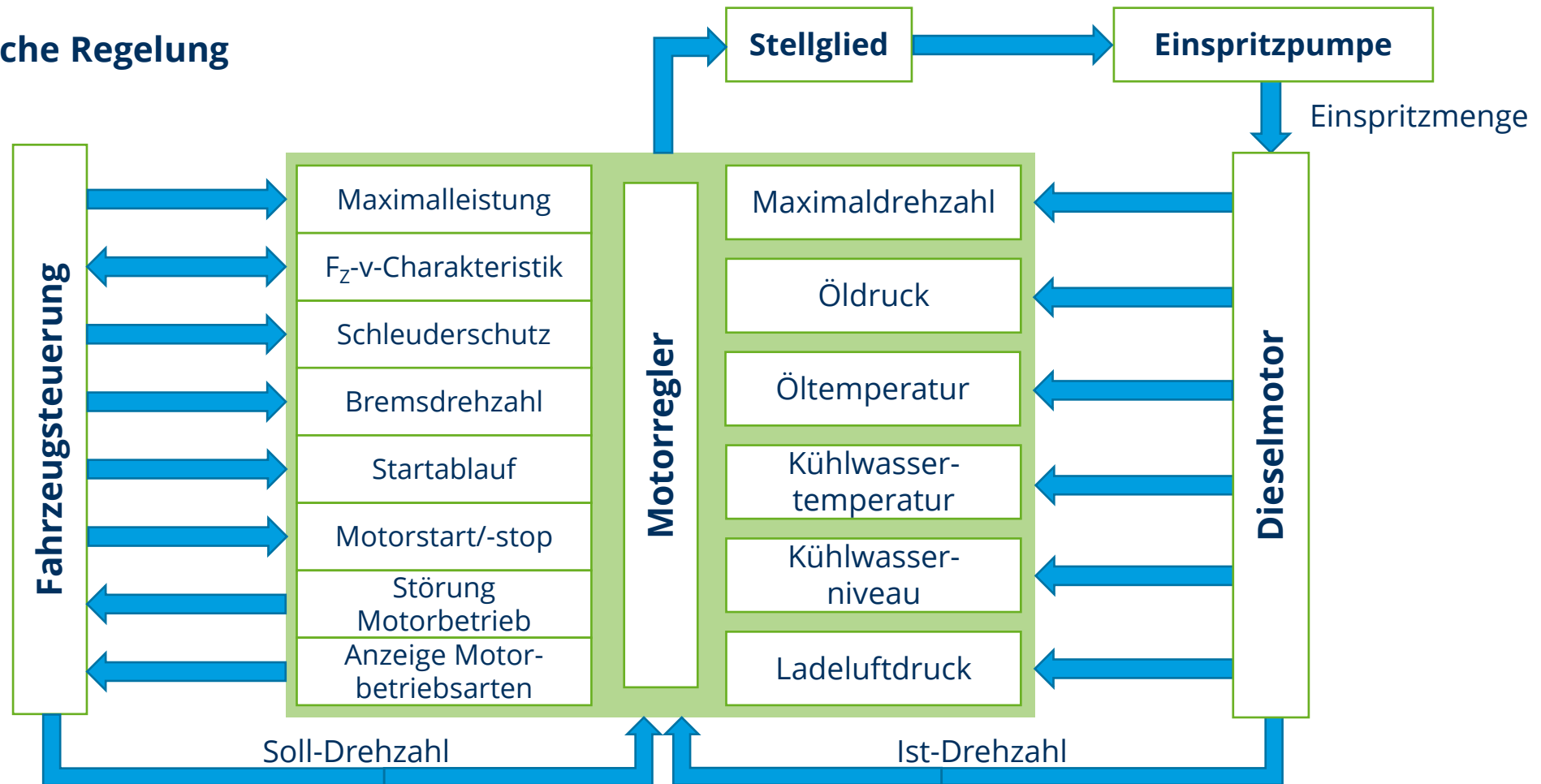


Abbildung: nach Nick, Manfred, „Antriebsanlagen für Dieseltriebwagen“, EI 12/1994

8.5 Leistungsregelung von Dieselmotoren

Elektronische Regelung

Vorteile

- Einflussnahme auf deutlich höhere Anzahl von Regelparametern ggü. nur Drehzahl und Moment bei mechanischen Reglern
- gezielte Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen umsetzbar
- Integration von Motor-Überwachungsfunktionen
- einfache Ansteuerbarkeit
- einfache Anpassung der Regelparameter an jeweilige Einsatzerfordernisse



Beispiel:
ECU 9 (Engine Control Unit)
MTU ADEC (Advanced Diesel Engine Control)

Abbildung: © MTU

8.6 Dieselkraftstoff

Hauptbestandteile:

- Kohlenstoff (ca. 86 % Massenanteil)
- Wasserstoff (ca. 14 % Massenanteil)
- ca. 300 verschiedene Kohlenwasserstoff-Verbindungen
- vorwiegend Alkane (paraffinische Kohlenwasserstoffe)

physikalische Eigenschaften:

- Siedebereich: 180...380 °C
- Dichte @ 15 °C: 820...845 kg/m³ = 0,820...0,845 kg/l
- Cetan-Zahl: mind. 51
- Cetan-Index: min. 46
- Flammpunkt: >55 °C
- Schwefelgehalt: <0,1 %
- Wassergehalt: <2,0 %
- Viskosität @ 40 °C: 2,0...4,5 mm²/s

theoretischer Luftbedarf zur Verbrennung
von 1 kg Dieselkraftstoff: 14,8 kg ($\lambda=1$)

λ : Luft-Kraftstoff-Verhältnis

$\lambda = 1$: stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis

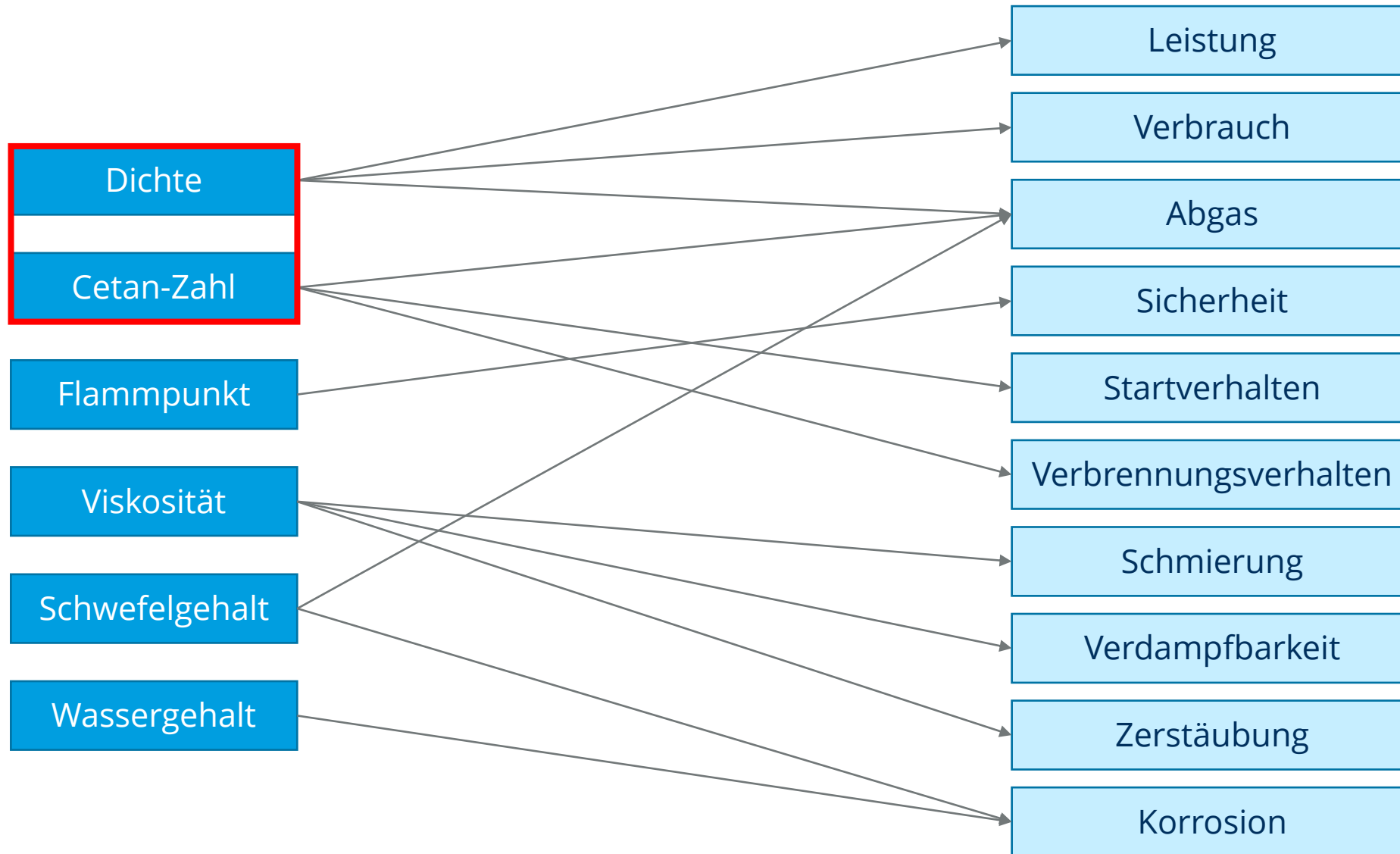
$\lambda > 1$: Luftüberschuss („mageres“ Gemisch)

$\lambda < 1$: Luftmangel („fettes“ Gemisch)

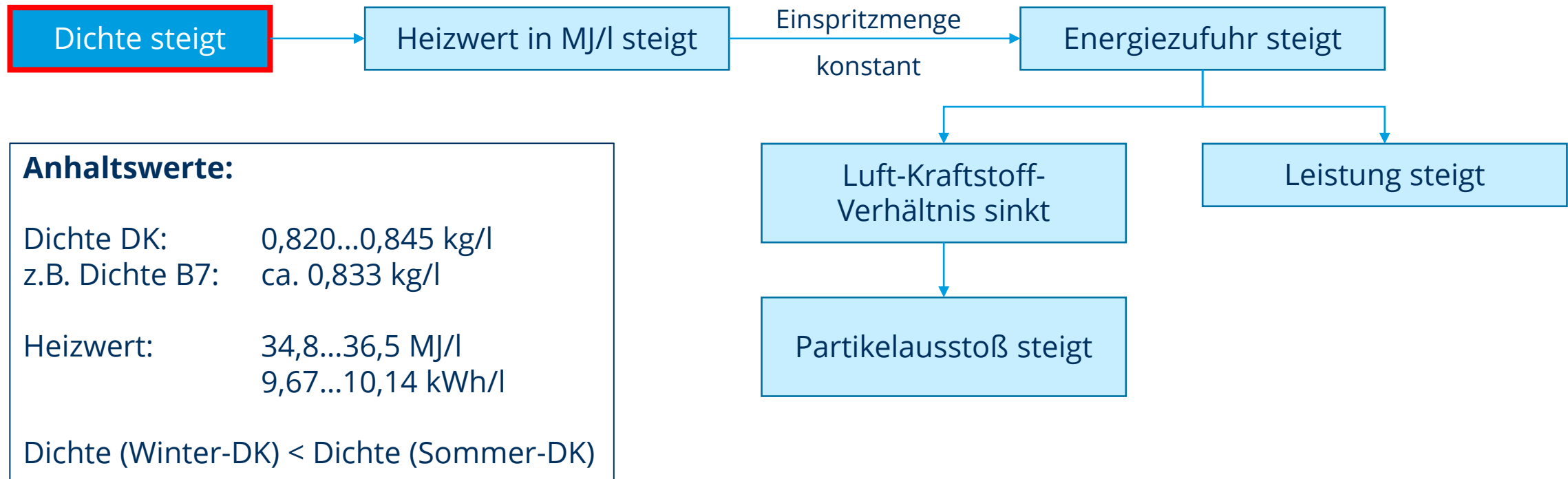
Dieselmotor unter Volllast: $\lambda \approx 1,2$

Dieselmotor im Leerlauf: $\lambda > 8$

8.6 Dieselkraftstoff (Eigenschaften)



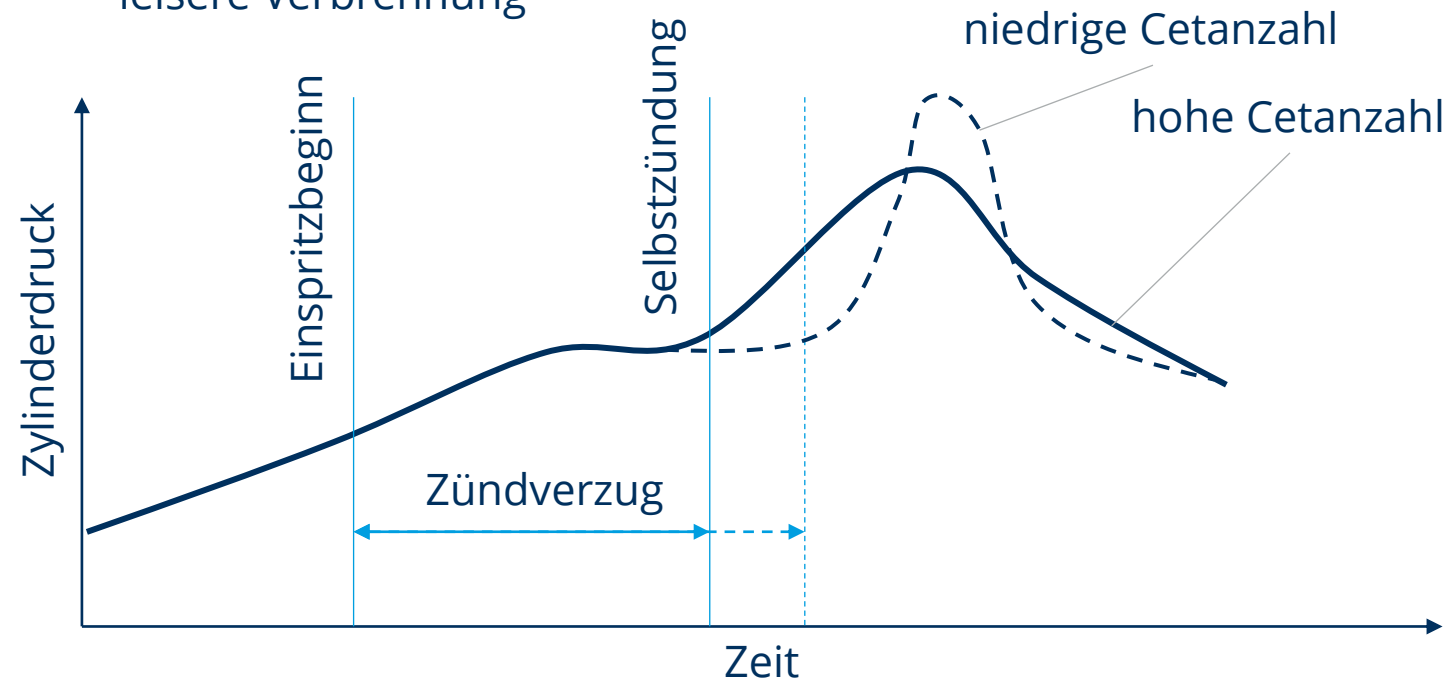
8.6 Dieselkraftstoff (Eigenschaften)



8.6 Dieselkraftstoff (Eigenschaften)

Cetan-Zahl

- Maß für Zündwilligkeit des Kraftstoffes
- hohe Cetan-Zahl = hohe Zündwilligkeit = geringer Zündverzug
- besseres Kaltstartverhalten (geringere Neigung zum „Nageln“)
- bessere Abgasqualität
- leisere Verbrennung



8.6 Dieselkraftstoff (Eigenschaften)

Warum gibt es Winter- und Sommer-Dieselmkraftstoff?

tiefe Temperaturen:

- paraffinische Kohlenwasserstoffe neigen zur Kristallbildung
- Aggregation zu wachsartiger Masse („Gatsch“)
- Fließfähigkeit verringert => Förderfähigkeit verringert
- Filtergängigkeit verringert => Gefahr der Verstopfung von Kraftstofffiltern

Abhilfe:

- Beimischung von Additiven: Wax Anti Settling Additives (WASA)
- Isolation/Beheizung des Tanks
- Beheizung der Kraftstofffilter

Forderung (normativ): Kältebeständigkeit bis -20°C
Premiumkraftstoffe erreichen bis zu -33°C

8.6 Dieselkraftstoff (Alternativen)

Motivation zur Verwendung Alternativer Kraftstoffe:

- Verbesserung der Umweltbilanz (Verringerung von Emissionen)

Kraftstoff als Konstruktionsmerkmal der Motoren auffassen – Adaptionaufwand?

Heute relevante alternative Dieselkraftstoffe:

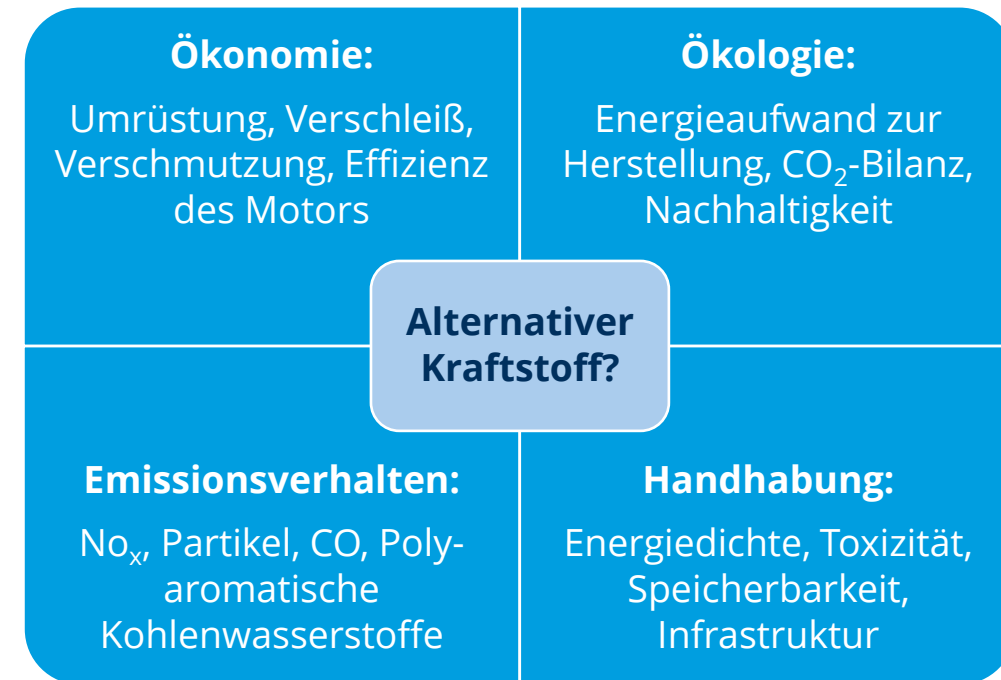
a) **biomasse**basiert („Biodiesel“)

- 1. Generation (Mais, Raps, Palmöl) – **ethisch bedenklich!**
- 2. Generation (Altspeiseöl, Altfett, Tallöl*, u.a.)

b) **strom**basiert („E-Diesel“)

- Schritt 1 (Elektrolyse): $2 \text{ H}_2\text{O} = 2 \text{ H}_2 + \text{O}_2$
- Schritt 2 (Wassergas-Shift-Reaktion): $\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$
- Schritt 3 (Fischer-Tropsch-Synthese):
$$n \text{ CO} + 2n \text{ H}_2 = (\text{CH}_2)_n + n \text{ H}_2\text{O}$$

*ölhaltiges Stoffgemisch als Nebenprodukt bei Zellstoffherstellung



8.6 Dieselkraftstoff (Alternativen)

FAME **F**atty **A**cid **M**ethyl **E**ster (Fettmethylester) = „Biodiesel“

- B7-Kraftstoff*: 93% fossiler Diesel + 7% FAME-Diesel
- B100-Kraftstoff: reiner Biodiesel (FAME)

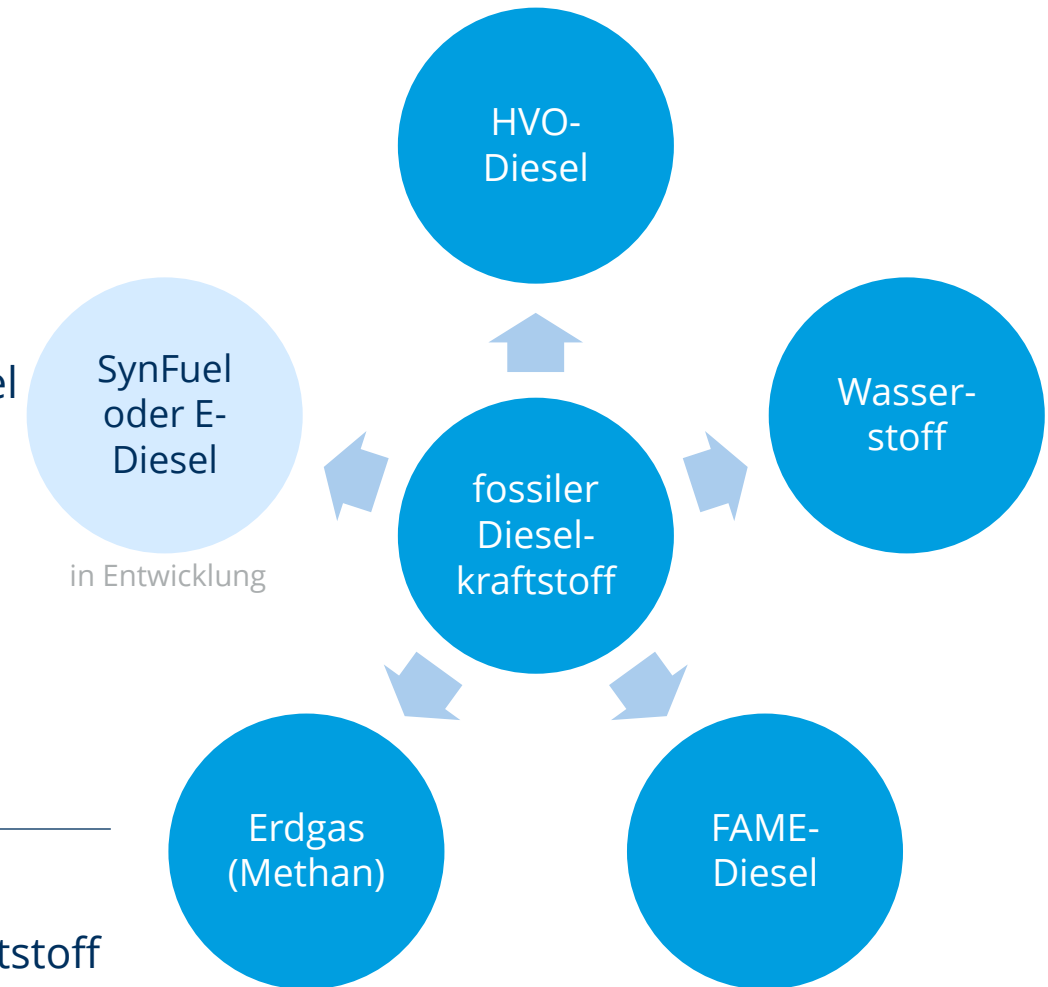
HVO Hydrotreated Vegetable Oil

- früher: Pflanzenöle
- heute: zunehmend Nutzung von Abfallprodukten

*Standard an europäischen Tankstellen

relevante Normen:

- **EN 590** Eigenschaften und Anforderungen Dieselkraftstoff
- EN 14214 Eigenschaften und Anforderungen an **Biodiesel**kraftstoff
- EN 15940 Eigenschaften und Anforderungen an synthetischen Dieselkraftstoff (Synthese oder HVO)



8.6 Dieselkraftstoff (Alternativen)

relevante Eigenschaften alternativer Kraftstoffe

FAME-Diesel („Biodiesel“)

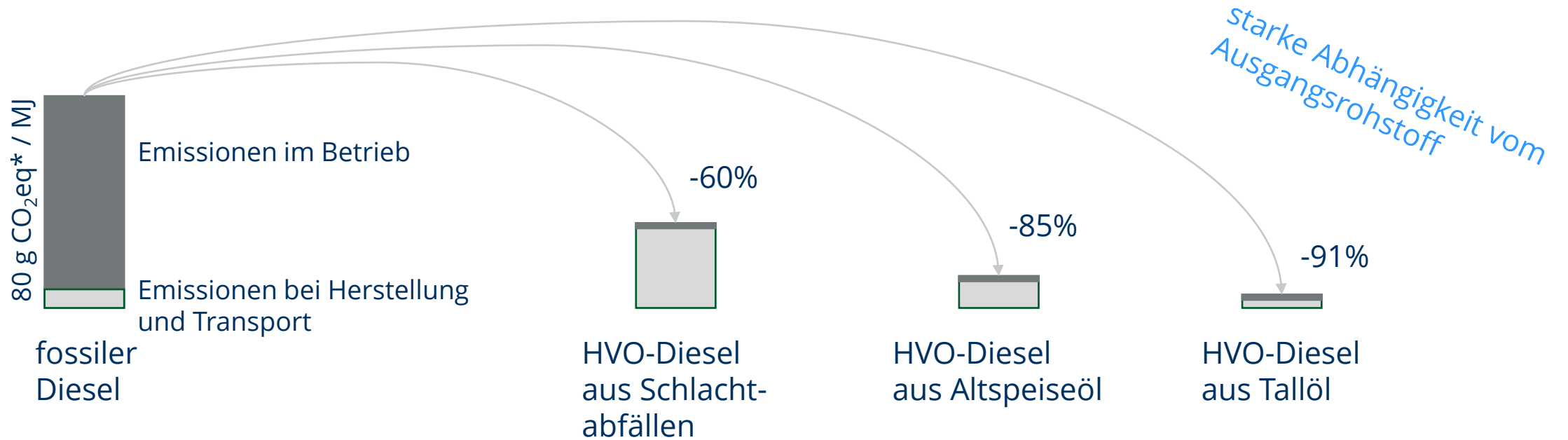
- begrenzte Lagerfähigkeit (3 Monate)
- Verstopfung von Kraftstofffiltern möglich
- Zersetzung von Elastomeren in Dichtungen möglich

HVO-Diesel

- keine Sauerstoff-, Stickstoff- und Schwefelanteile, keine Aromaten (Verbesserung der Abgaszusammensetzung)
- hohe Cetanzahl (bessere Steuerung des Verbrennungsprozesses möglich)
- gute Lagerfähigkeit
- Leistungseinbußen möglich (ältere Motoren ohne Common-Rail-Technologie)

8.6 Dieselkraftstoff (Alternativen)

Treibhausgasbilanz von HVO-Diesel



*CO₂eq – Berücksichtigung der Freisetzung und Bindung aller Treibhausgase und Umrechnung der Wirkung auf CO₂

Quelle: Haudenschild, Meier und Kramer, Eisenbahn-Revue International, 4/2021, S. 192 ff.

8.6 Dieselkraftstoff (Alternativen)

Dieseldkraftstoff-Alternativen im Vergleich

SBB:
mittelfristig
beste
Kompromiss-
lösung

	Fossiler Diesel (B0)	Diesel B7 (7% FAME)	HVO Blend (≈25% HVO)	HVO 100% (R100)	SynFuel (R100)	Wasserstoff (cH2)
Rohstoff(e)	Erdöl	Erdöl + Altspeiseöl	Erdöl + organische Abfälle, Fette, Reststoffe	organische Abfälle, Fette, Reststoffe	CO ₂ , H ₂ und elektrische Energie	H ₂ O und elektrische Energie
Emissionen im Betrieb	100 %	100 %	ca. -15 % Schadstoffe und Partikel	-20 % Schadstoffe und Partikel	-20 % Schadstoffe und Partikel	-100 % (lokal)
Nachhaltigkeit?	nein	kaum	gering bis moderat	moderat bis gut	moderat bis gut	sehr gut, wenn elektrische Energie regenerativ erzeugt
Reduktion CO ₂ eq*	0 %	max. 5 %	2 – 23 %	47 – 92 %	bis zu 99 %	bis zu 100 %
Verfügbarkeit	problemlos	problemlos	gut	begrenzt bis gut	experimentell	gering

*CO₂eq – Berücksichtigung der Freisetzung und Bindung aller Treibhausgase und Umrechnung der Wirkung auf CO₂

Quelle: Haudenschild, Meier und Kramer, Eisenbahn-Revue International, 4/2021, S. 192 ff.

8.6 Dieselkraftstoff (Alternativen)

Beispiele für den Einsatz alternativer Kraftstoffe im Eisenbahnbetrieb

DB Cargo UK tests vegetable oil fuelled Class 60

19 February 2021

UK: DB Cargo UK and Tata Steel have trialled the use of hydro-treated vegetable oil to fuel a Class 60 diesel locomotive which hauled 2 500 tonnes of steel coil from Margam steel works in Port Talbot to the Round Oak terminal at Brierley Hill in the West Midlands.

Quelle: <https://www.railwaygazette.com/uk/db-cargo-uk-tests-vegetable-oil-fuelled-class-60/58558.article>



Railway Gazette
INTERNATIONAL

8.6 Dieselkraftstoff (Alternativen)

Beispiele für den Einsatz alternativer Kraftstoffe im Eisenbahnbetrieb

Vegetable oil-fuelled Class 66 hauls steel train

4 January 2021

UK: DB Cargo UK has tested the use of hydro-treated vegetable oil to fuel an Electro-Motive Diesel Class 66 locomotive.

<https://www.railwaygazette.com/uk/vegetable-oil-fuelled-class-66-hauls-steel-train/58132.article>



Railway Gazette
INTERNATIONAL

8.6 Dieselkraftstoff (Alternativen)

Beispiele für den Einsatz alternativer Kraftstoffe im Eisenbahnbetrieb



Operail converts GE diesel loco to LNG dual-fuel operation

4 February 2021

ESTONIA: National freight operator Operail has begun work to convert one of its US-built General Electric C36 diesel locomotives to be dual fuelled with liquefied natural gas.

<https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/operail-converts-ge-diesel-loco-to-lng-dual-fuel-operation/58445.article>



Inhalte

Vorlesung Triebfahrzeugtechnik (Antriebskonfigurationen)

7. Leistungsauslegung von Triebfahrzeugen

8. Dieselmotor und andere Verbrennungskraftmaschinen

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

9. Leistungsübertragungsanlagen

10. Hilfs- und Nebenbetriebe

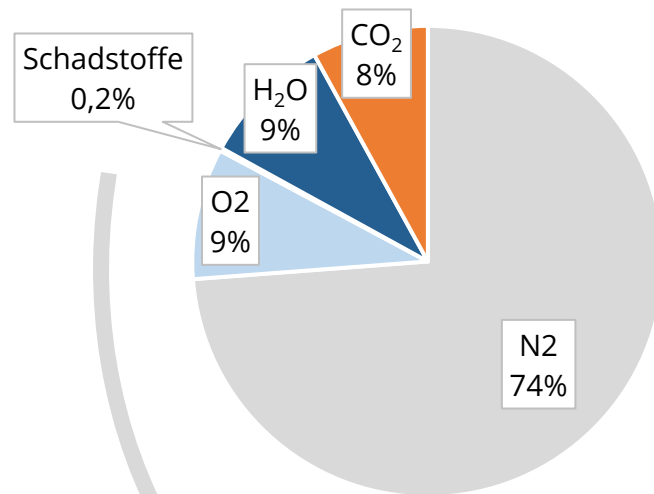
11. Leittechnik (Überblick)

12. Fallstudien unkonventionelle Triebfahrzeuge

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Emissionen

Abgaszusammensetzung



Schadstoffzusammensetzung

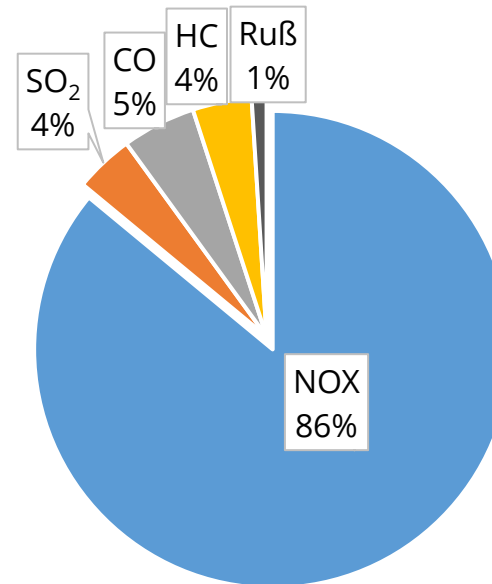


Foto: bahnbilder.de/© Daniel Meyer

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

- a) Schwefelgehalt des DK ≤ 300 ppm (300 g/t)
- b) Schwefelgehalt des DK ≤ 10 ppm (10 g/t)
- c) $P < 560$ kW / $P \geq 560$ kW; $n < 1000$ min⁻¹ / $P \geq 560$ kW; $n \geq 1000$ min⁻¹
- d) Typgenehmigung / Inverkehrbringen der Dieselmotoren
- e) Baujahr der Lokomotiven

Schadstoff-Grenzwerte im Abgas für D-Tfz in g/kWh

Norm	Regelwerk	Anwendung	gültig ab	Schadstoff-Grenzwerte			
				NO _x	HC	CO	Partikel
Euro I-VI	ECE	nicht für Sfz.	1993 - 2015				
UIC 1	UIC	alle Diesel-Tfz.	≤ 2002	12	0,8	3,0	1,6 - 2,5
UIC 2			2003-2005	6,0/9,9/9,5 ^{c)}	0,6/0,8/0,8 ^{c)}	2,5/3,0 ^{c)}	0,25
Stage III A ^{a)} = UIC 3	RiL 04/26 EG	(130..560) kW	Juli 05/2006 ^{d)}	4,0 (gemeinsam)		3,5	0,2
		> 560 kW	2008/2011 ^{d)}	6,0	0,5		
Stage III B ^{b)}		> 2000 kW; V _{zyl} > 5 l	Feb. 2011/2012 ^{d)}	7,4	0,4		0,025
		VT > 130 kW		-	0,19		
		Lok > 130 kW		4,0 (gemeinsam)			
Stage IV	RiL 04/26 EG	nicht für Sfz.	≥ 2014	0,4	0,19	3,5	0,025
Stage V		alle Triebwagen	≥ 2021 ^{d)}	2,0	0,19	3,5	0,015
		alle Lokomotiven		4,0 (gemeinsam)			0,025
Tier 0	EPA (USA)	Strecken-lokomotiven	≥ 1973 ^{e)}	12,74	1,34	6,71	0,81
Tier 1			2002-2004 ^{e)}	9,92	0,74	2,95	0,60
Tier 2			2005-2011 ^{e)}	7,38	0,40	2,01	0,27
Tier 3			2012-2014 ^{e)}				0,13
Tier 4			≥ 2015 ^{e)}	1,88 (gemeinsam)			0,04

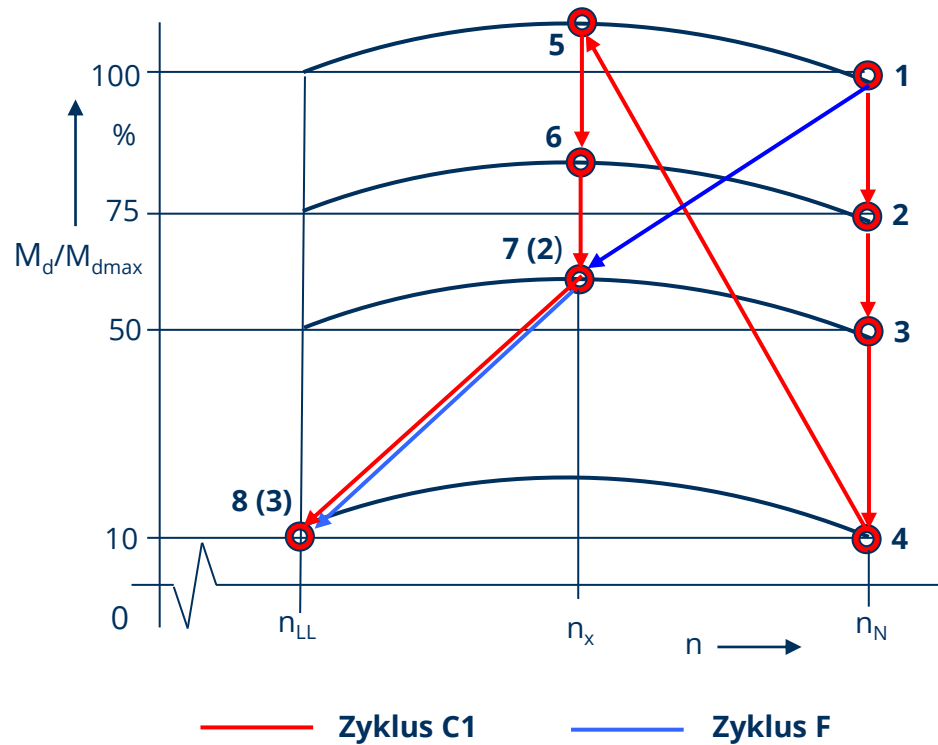
8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Maßnahmen zur Emissionsminimierung



8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Lastzyklen zur Bestimmung der Schadstoff-Emission im Abgas von Bahn-Dieselmotoren nach DIN EN ISO 8178-4



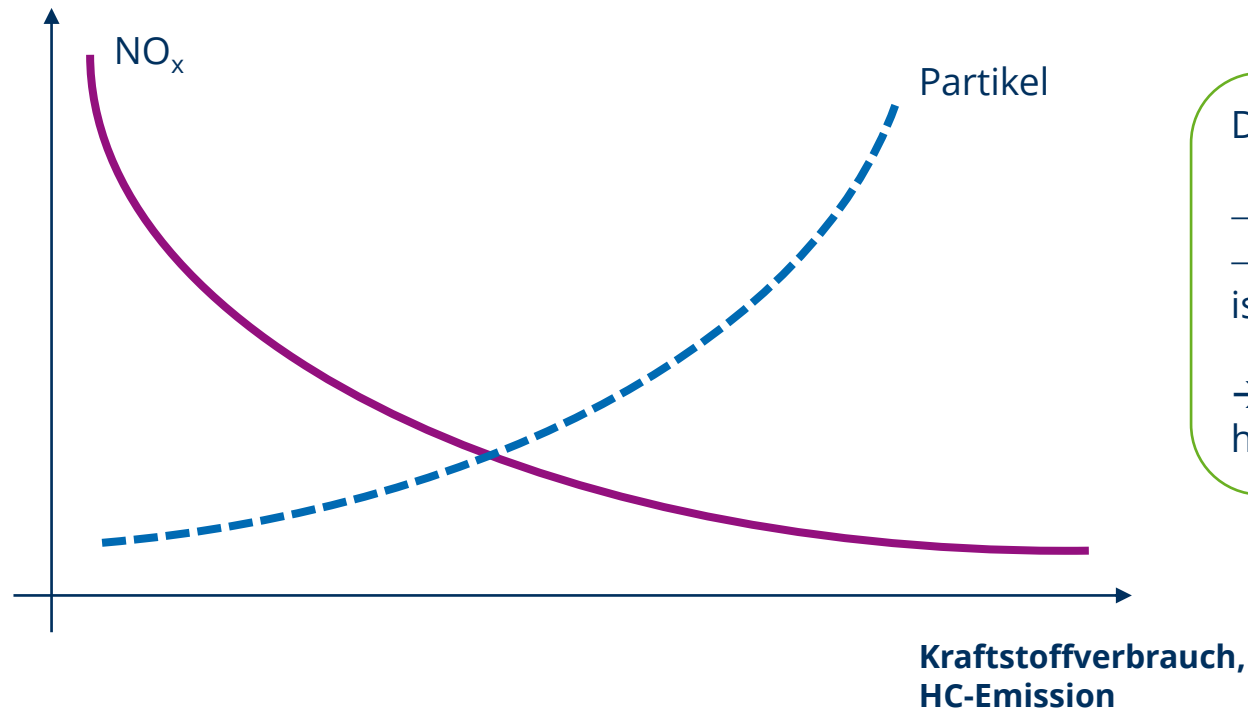
Test- zyklus ^{a)}	Anwendung	$M_d/M_{d,max}$ in %	100	75	50	10	100	75	50	0
		Drehzahl	Nenndrehzahl				Zwischen- drehzahl			Leerlauf
C1	Ril 04/26 EG VT	Faktor	0,15		0,10				0,15	
F	Ril 04/26 EG UIC 1, 2 Lok	Faktor	0,25	-				0,15		0,60

^{a)} keine Anwendung bei US-Bahnen: 8 Laststufen Traktion, 1 Stufe elektrodyn. Bremse, 1 Stufe Leerlauf

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Schematische Zusammenhänge Dieselmotor

Kraftstoffverbrauch – Stickoxidemissionen – Kohlenwasserstoffe – Partikel



Die NO_x - Emission ist umso größer, je größer die

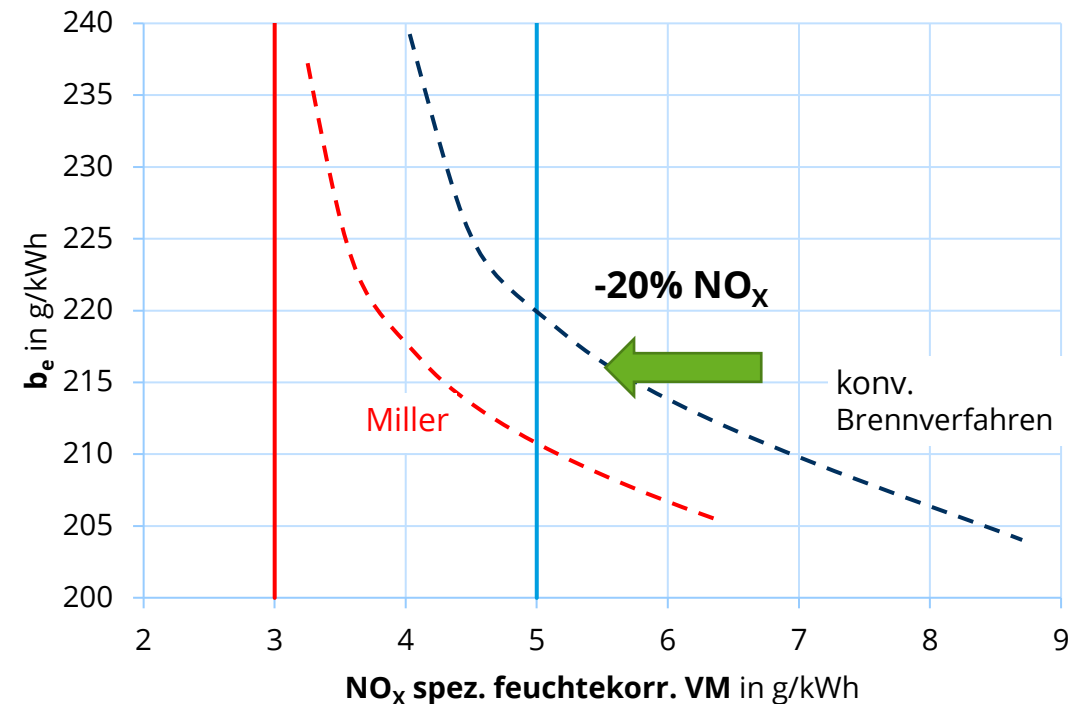
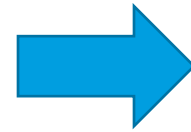
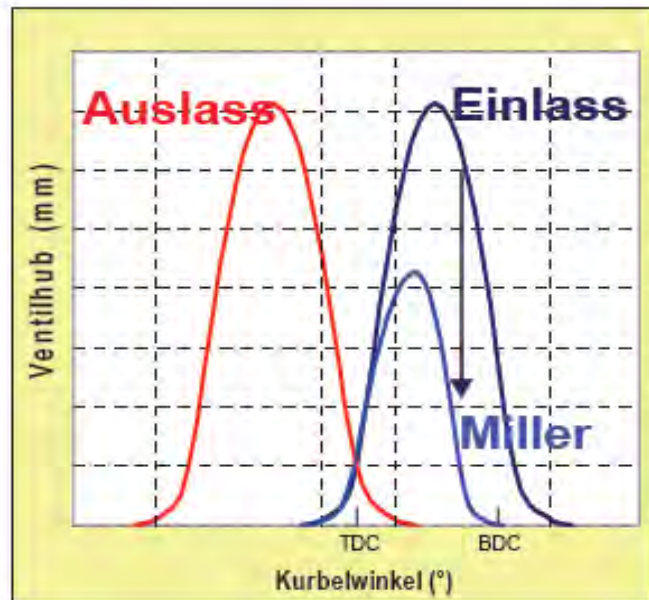
- Verbrennungstemperatur und
- Dauer der hohen Verbrennungstemperatur ist.

→ Motoren kleiner Leistung mit hohen Drehzahlen haben eine niedrigere NO_x-Emission.

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

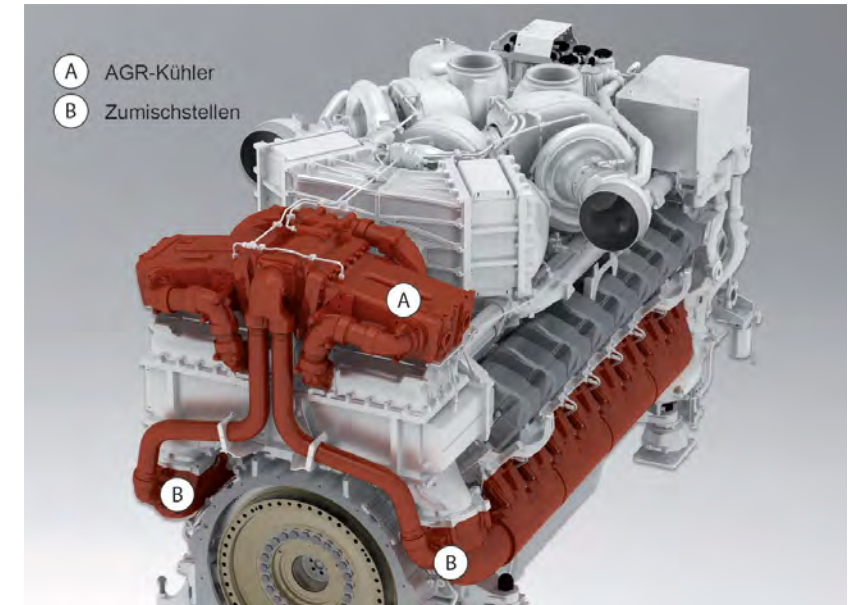
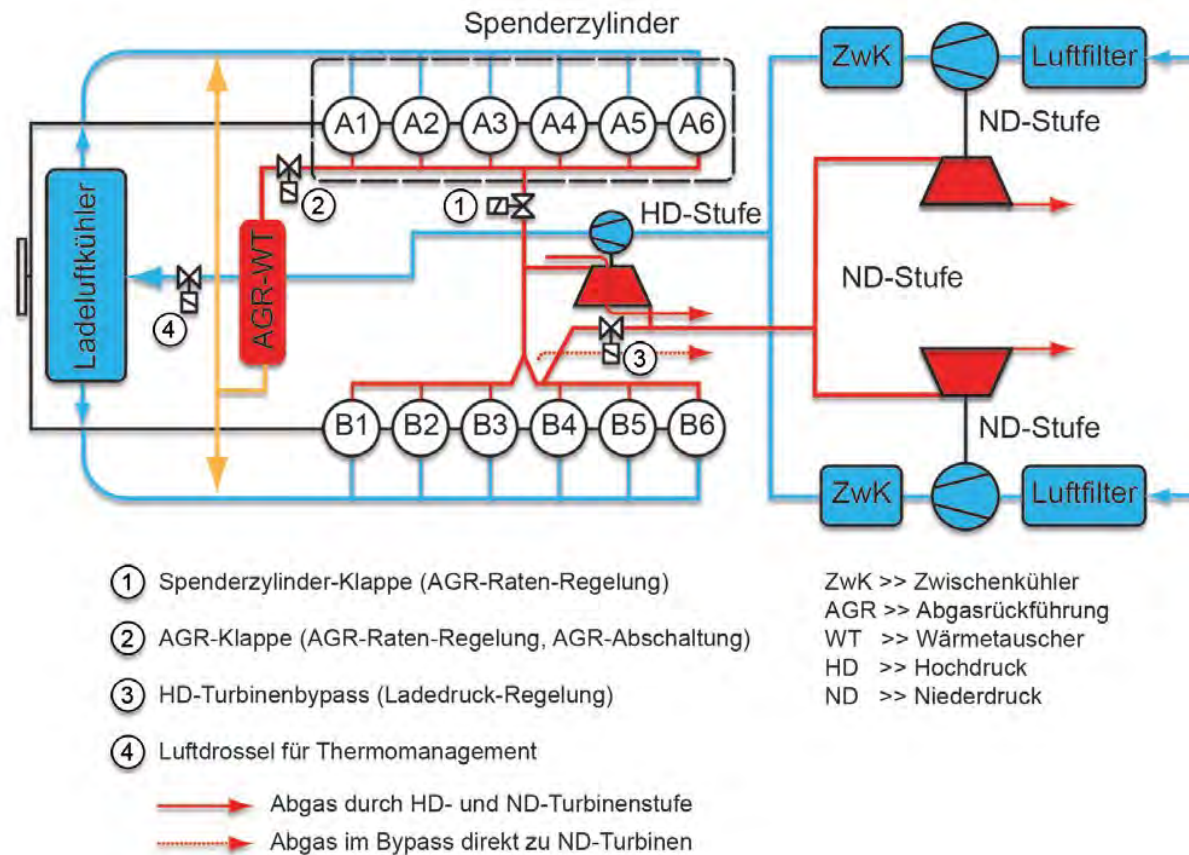
Miller – Verfahren

- Kleinere Einlassventilhübe mit früherem Schließen bewirken niedrigere Verbrennungstemperaturen
- niedrigere NO_x-Emissionen



8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Gekühlte Abgasrückführung (AGR)

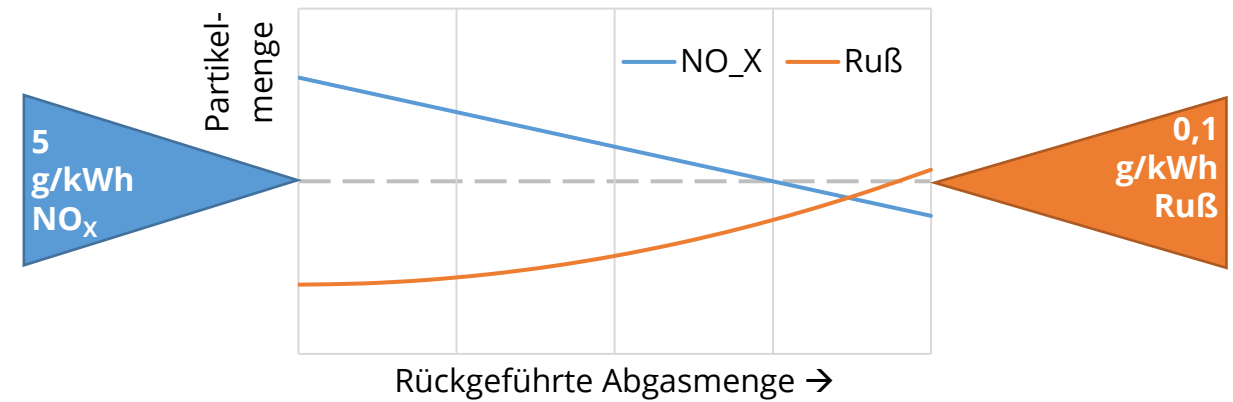
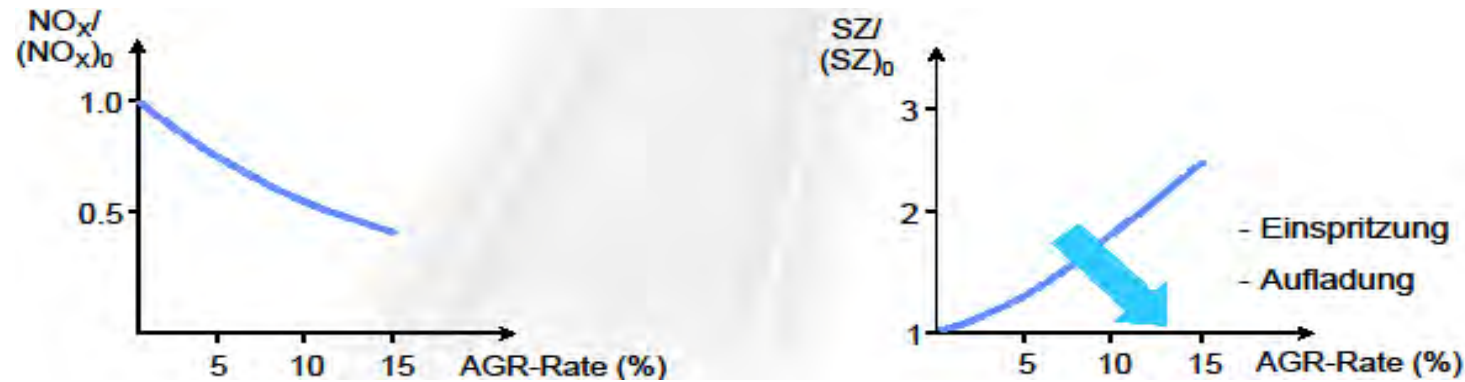


Abbildungen: © MTU

Komponenten AGR am Motor MTU 4000

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

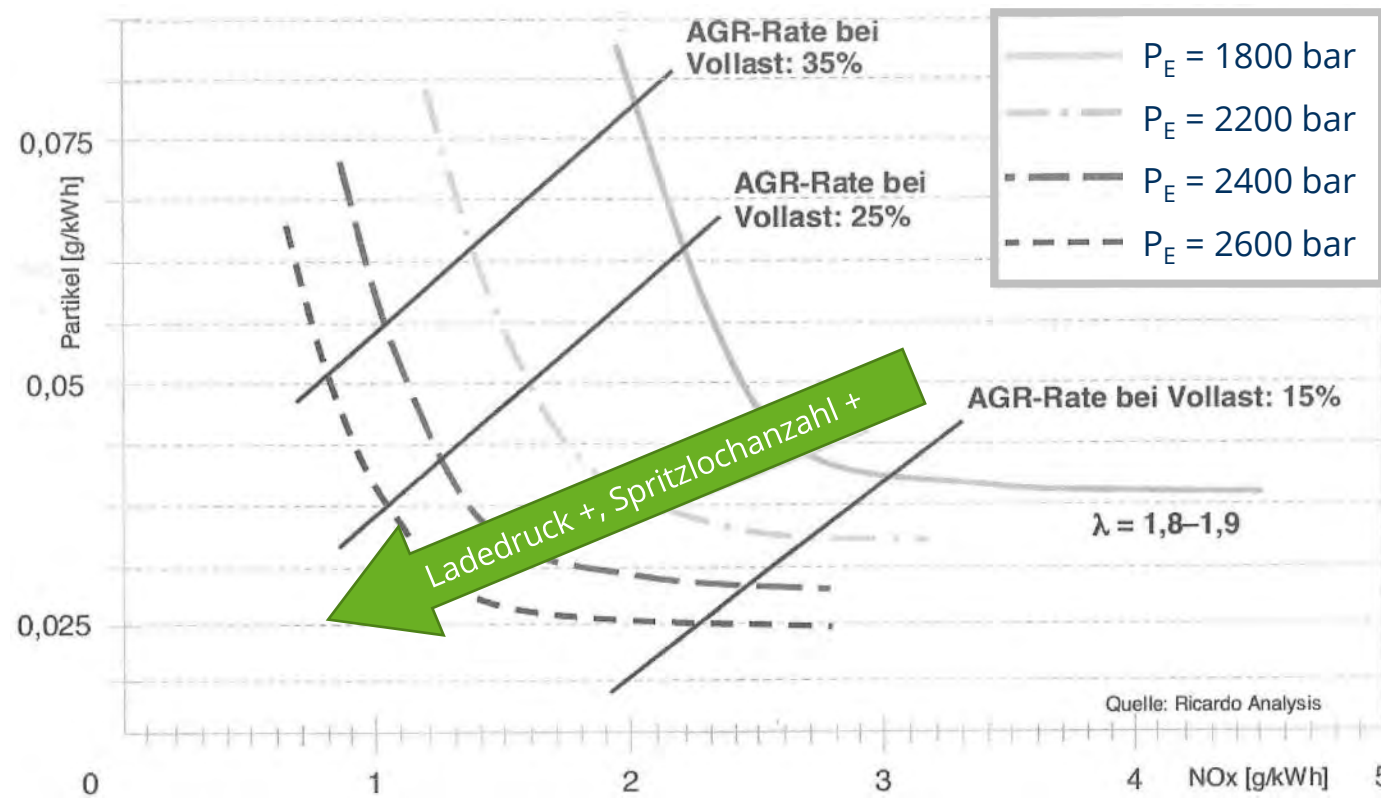
Gekühlte Abgasrückführung (AGR)



8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

AGR-Verhältnisse und maximale Einspritzdrücke

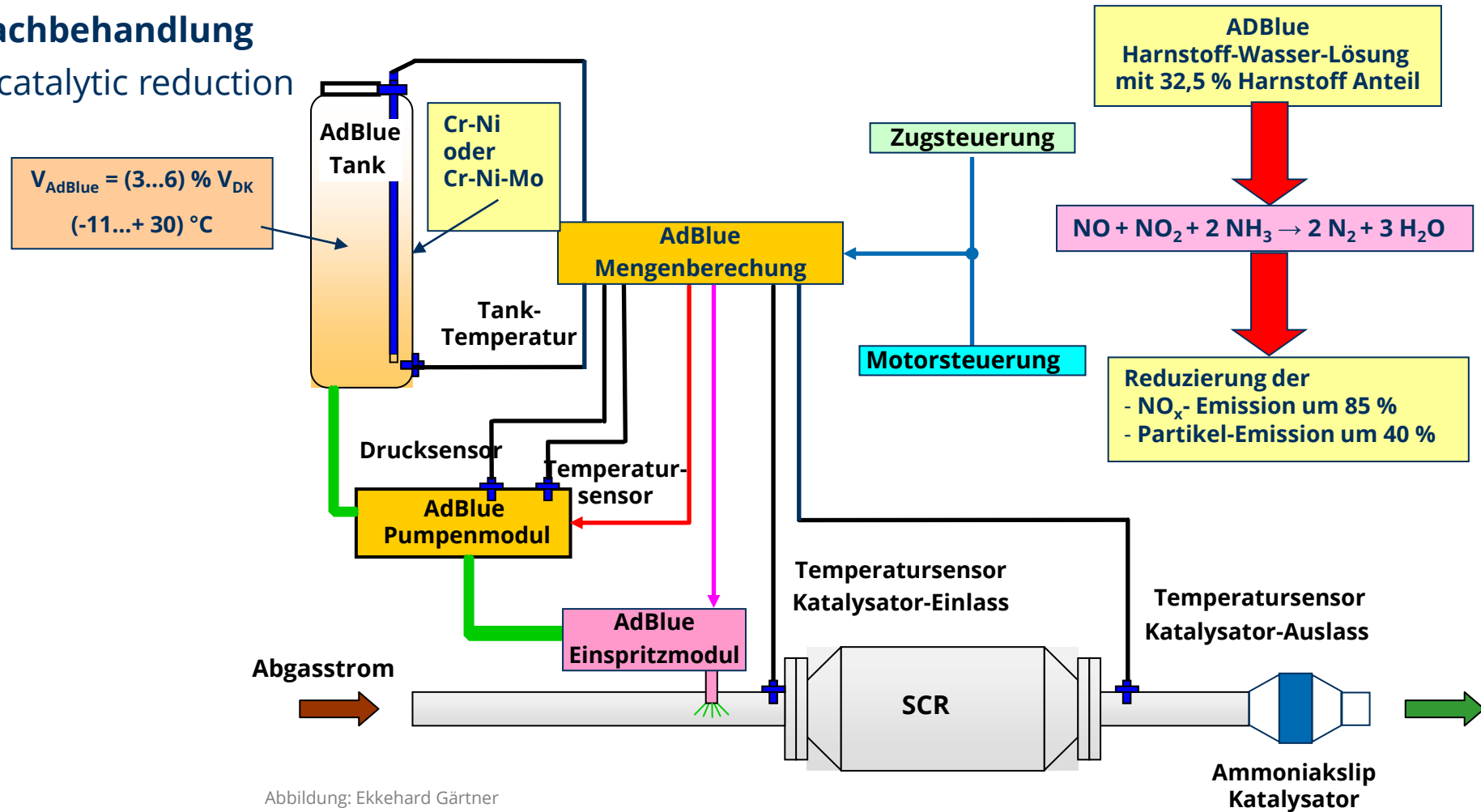
- NO_x - und Partikel-Zielkonflikt für unterschiedliche AGR-Verhältnisse und maximale Einspritzdrücke (P_E)



8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

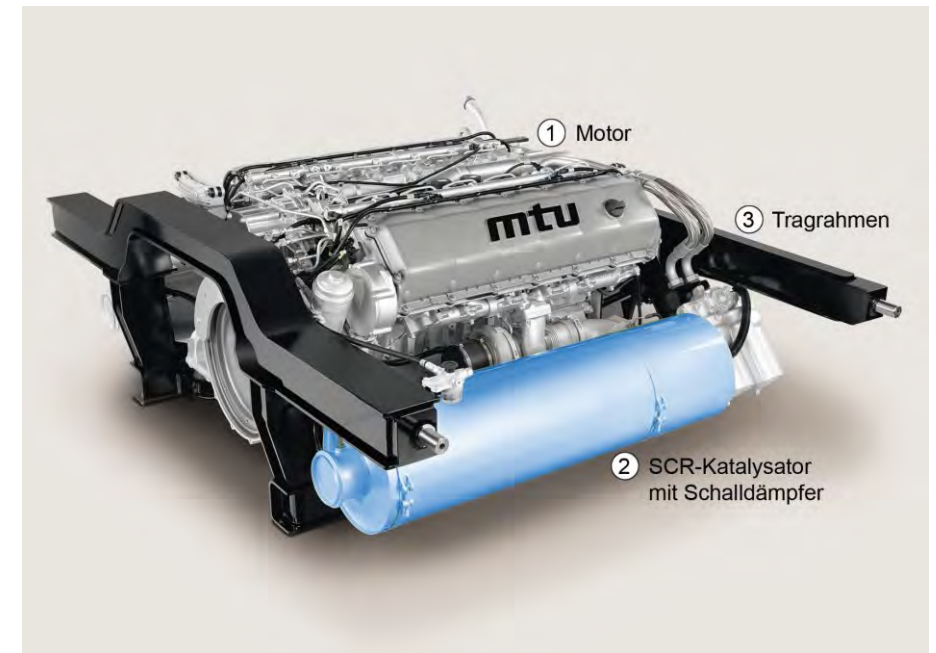
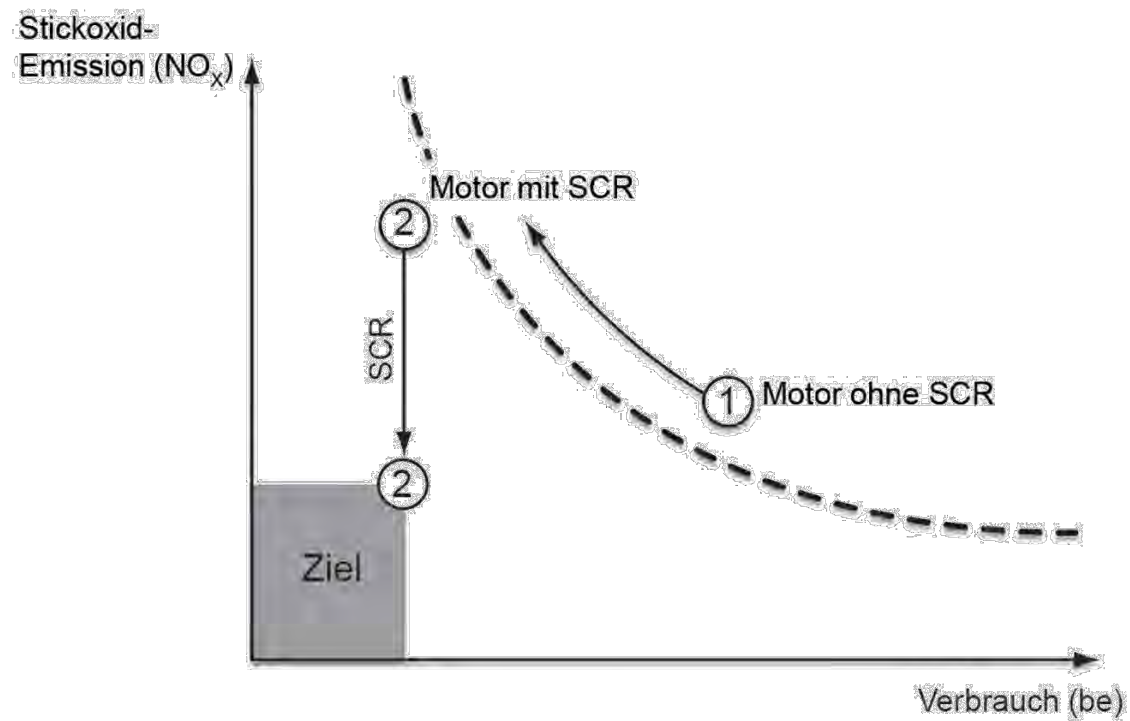
SCR-Abgasnachbehandlung

SCR = selective catalytic reduction



8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

SCR-Abgasnachbehandlung

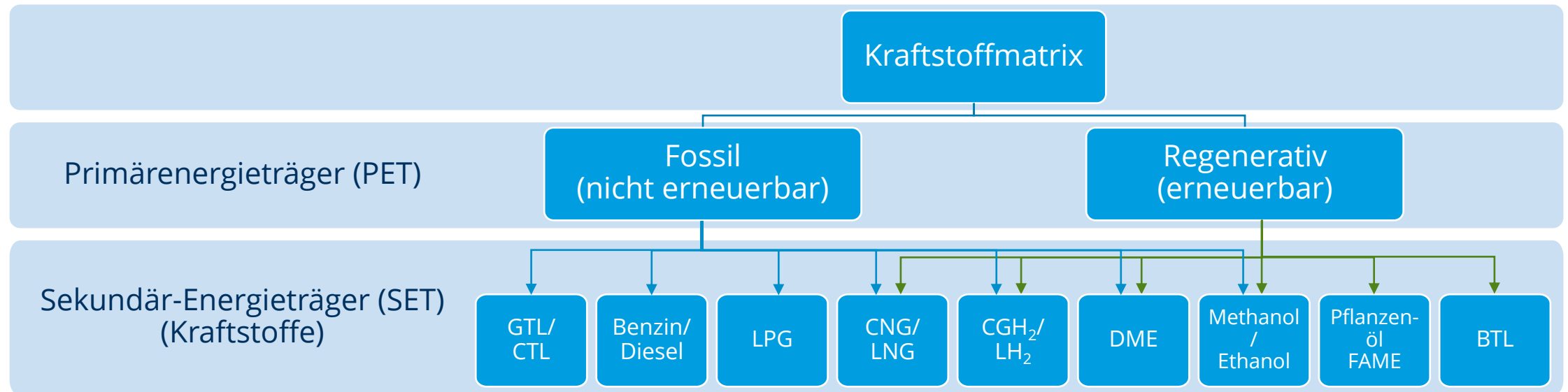


Abbildungen: © MTU

8. Dieselmotor u. a. Verbrennungskraftmaschinen

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Alternativkraftstoffe

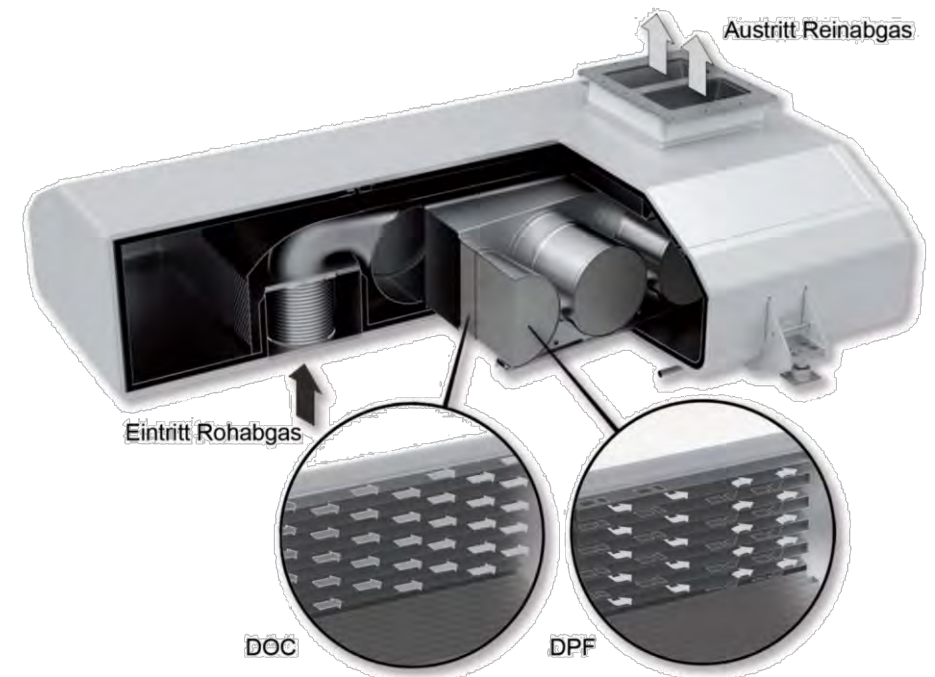
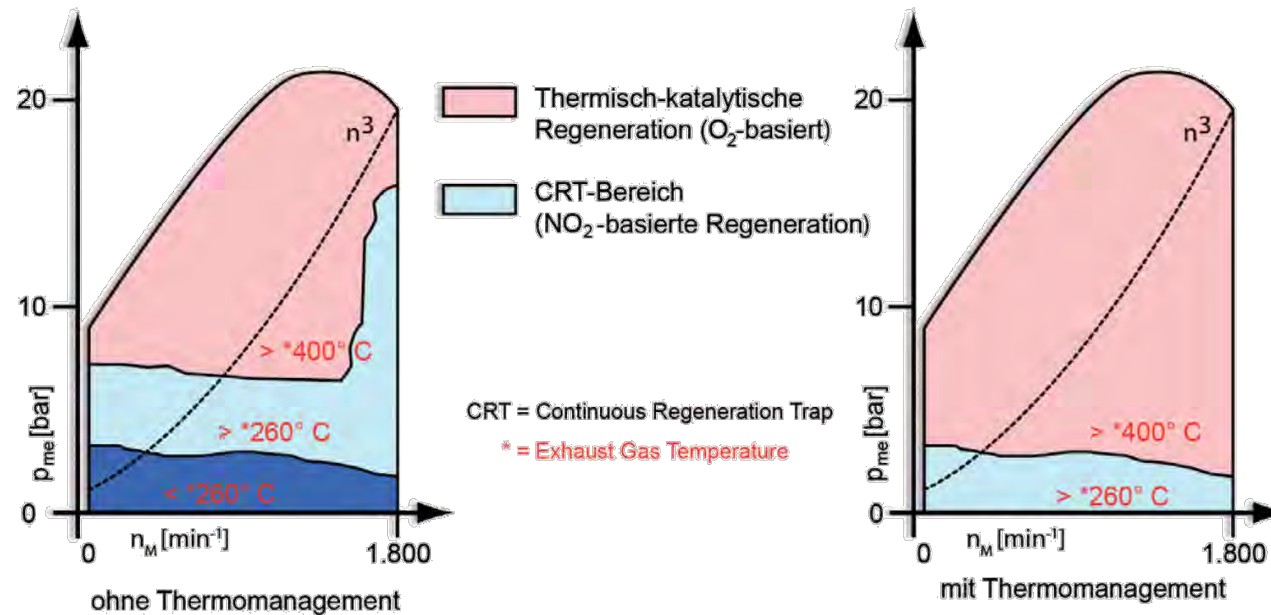


- **typische Fossile PET:** Rohöl, Uranerz, Kohle, Erdgas
- **typische regenerative PET:** Wasser, Wind, Solarstrahlung, **Biomasse**
- Energiewandlungen beachten – **Elektrische Energie** stellt meist ein Prozess-Stadium dar

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Partikelfilter

- Bei normalen Betriebszuständen reichen Abgastemperaturen des Motors für kontinuierlichen Rußabbau im Dieselpartikelfilter aus
- Bei besonderen Bedingungen wird die Regeneration durch Thermomanagement unterstützt und Abgastemperatur und damit der Rußabbau deutlich erhöht

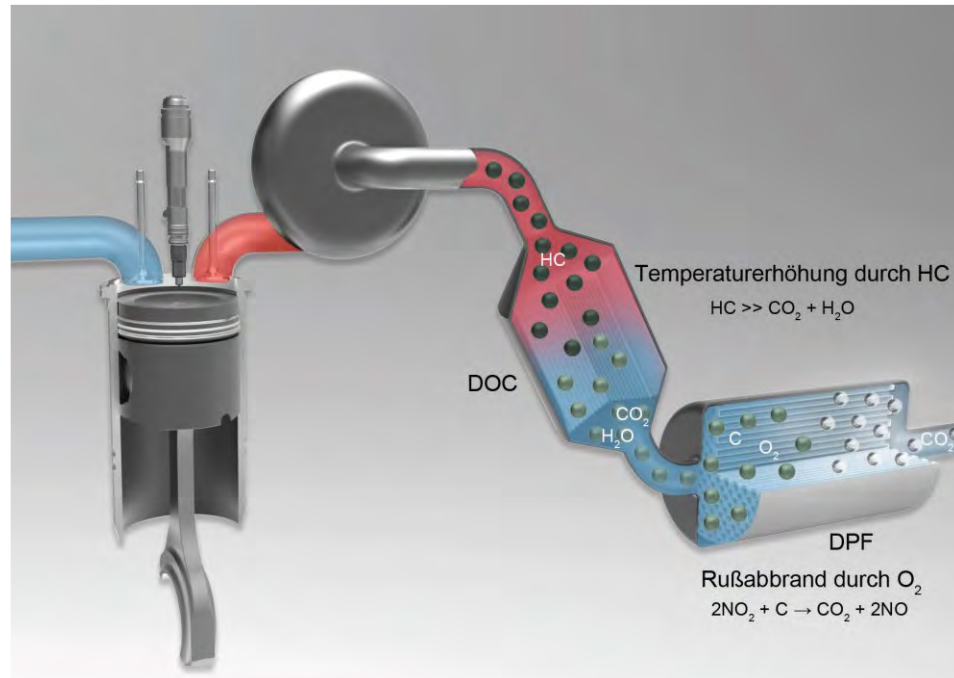


Abbildungen: © MTU

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

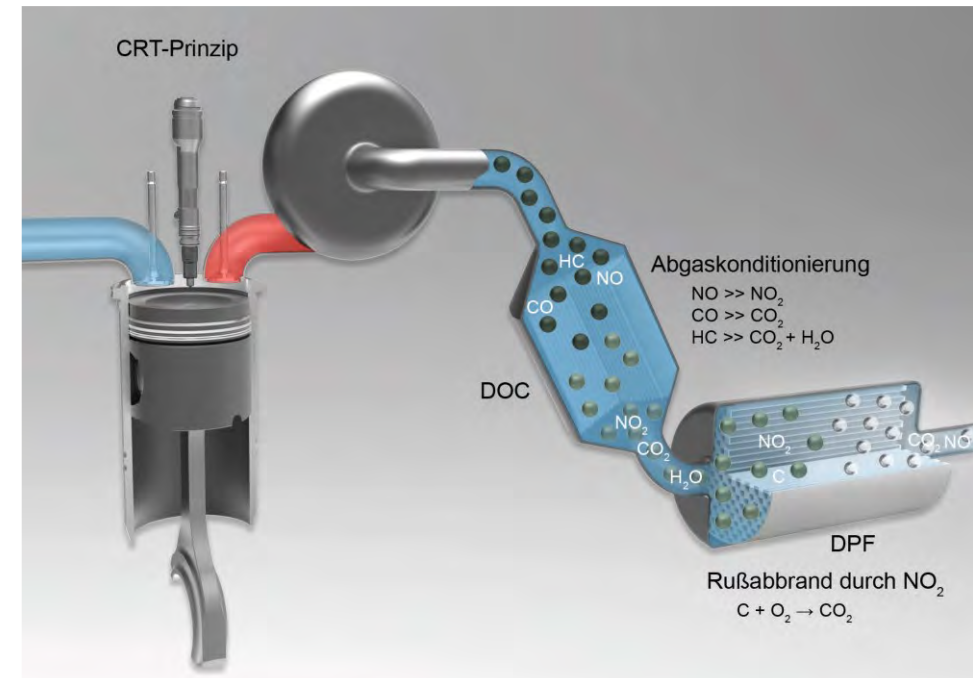
Aktive Regeneration

- Erhöhung der Abgastemperatur für optimalen Rußabbrand



Passive Regeneration/CRT

- chemische Reaktionen begünstigen Rußabbrand



Abbildungen: © MTU

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Zusammenfassung – Schlüsseltechnologien zur Emissionsreduzierung am Beispiel MTU 4000

Abgasnachbehandlung (außermotorisch)

- Selektive katalytische Reduktion (SCR)
- Dieselpartikelfilter (DPF)
- Dieseloxidationskatalysator (DOC)



① Dieselpartikelfilter

② Bahnmotor 16V 4000 RX4

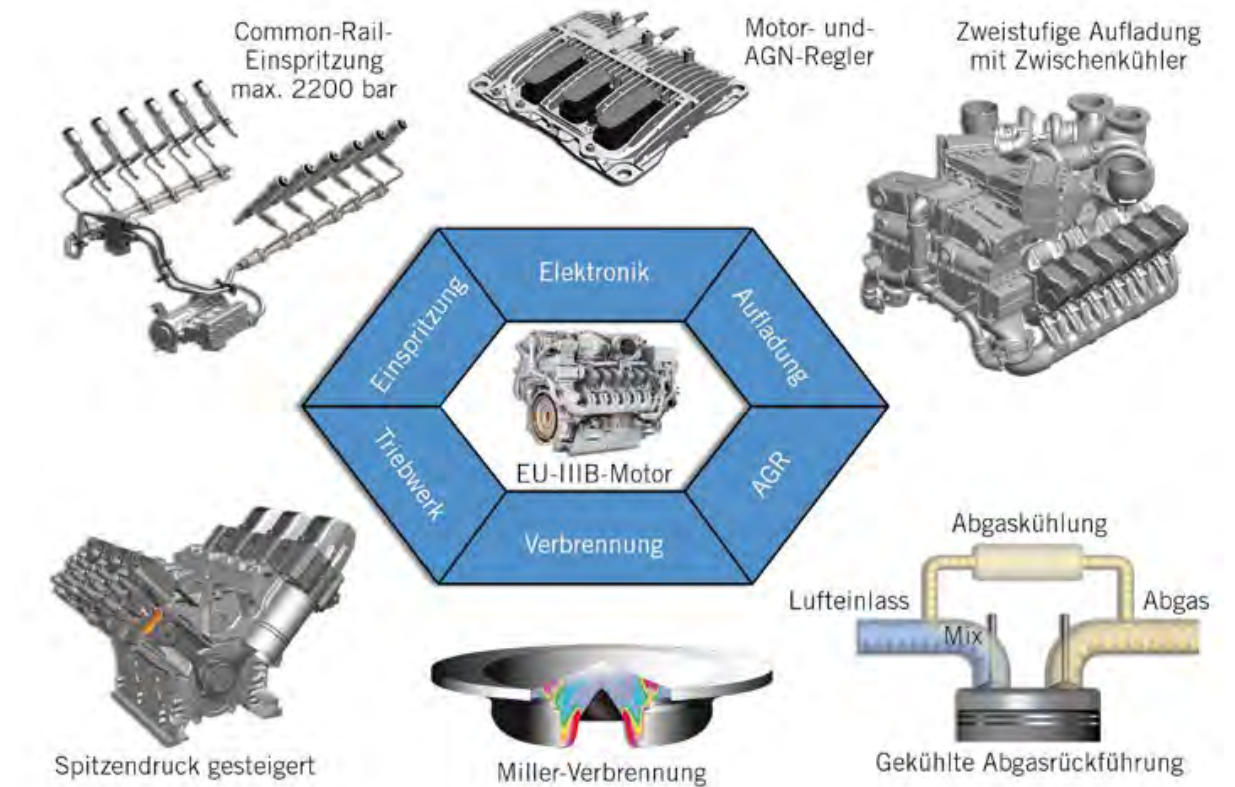
Abbildungen: © MTU

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Zusammenfassung – Schlüsseltechnologien zur Emissionsreduzierung am Beispiel MTU

Innere motorische Emissionsreduzierung

- Abgasrückführung (AGR)
- Zweistufige Turboaufladung
- Common-Rail-Einspritzung
- Miller-Verbrennung
- Evtl. Neue Kraftstoffe



Abbildungen: © MTU

Inhalte

Vorlesung Triebfahrzeugtechnik (Antriebskonfigurationen)

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

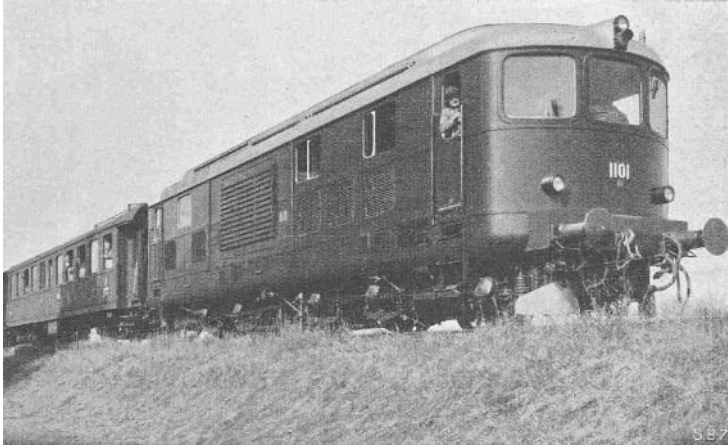


Schienenfahrzeuge mit Gasturbinen-Antrieb

8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

Ein Blick zurück

Phase 1: 1938 - 1965



Am 4/6 der SBB (1938)

Foto: Wikipedia

Motivation:

- Ersatz des Dieselmotors
- Leistungssteigerung
- Exportgedanke (CH)

Prototypen und Versuchsfahrzeuge

Phase 2: 1965 - 2005



TGV 001 der SNCF (1972)

Motivation:

- Leistungssteigerung
- Ergänzung von Dieselantrieben
- Brückentechnologie (fehlende Elektrifizierung)

Prototypen und kleinere Serien

Phase 3: seit 2005



FT1 der RŽD (2007)

Foto: Wikipedia

Motivation:

- Leistungssteigerung im Güterverkehr auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten

Prototypen und geplante Serie

8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

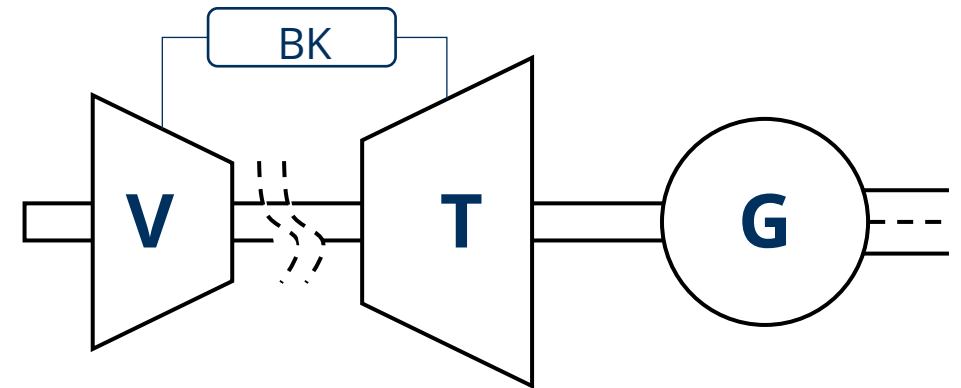
Grundprinzip (offenes Arbeitsverfahren):

1. Ansaugung und Verdichtung von Umgebungsluft
2. Verbrennung des Brennstoffes in Brennkammer unter hohem Luftüberschuss
3. Ausdehnung des komprimierten Luft-Gas-Gemisches unter Abgabe mechanischer Leistung
4. Abkühlung des Abgases

Nutzleistung = Turbinenleistung - Verdichterleistung

Effizienz abhängig von:

- Strömungswiderständen (Ansaugung, innere Strömungswiderstände, Abgasführung)
- Reibarbeit (rotierende Teile)
- Wärmeabstrahlung
- Beschau felung, Verdichtungsverhältnis, Temperatur
- u.a.

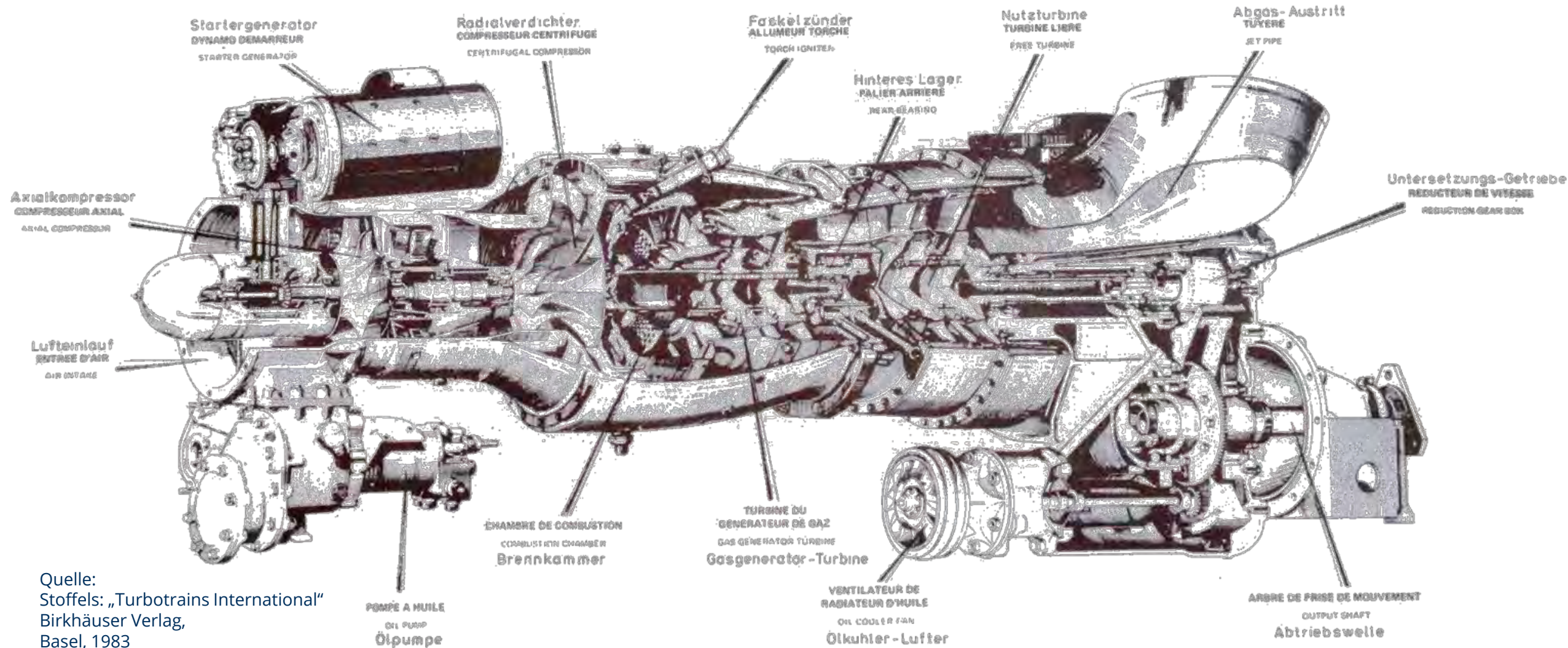


es bedeuten:

V	Verdichter
BK	Brennkammer
T	Turbine
G	elektrischer Generator

8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

Hauptbaugruppen:



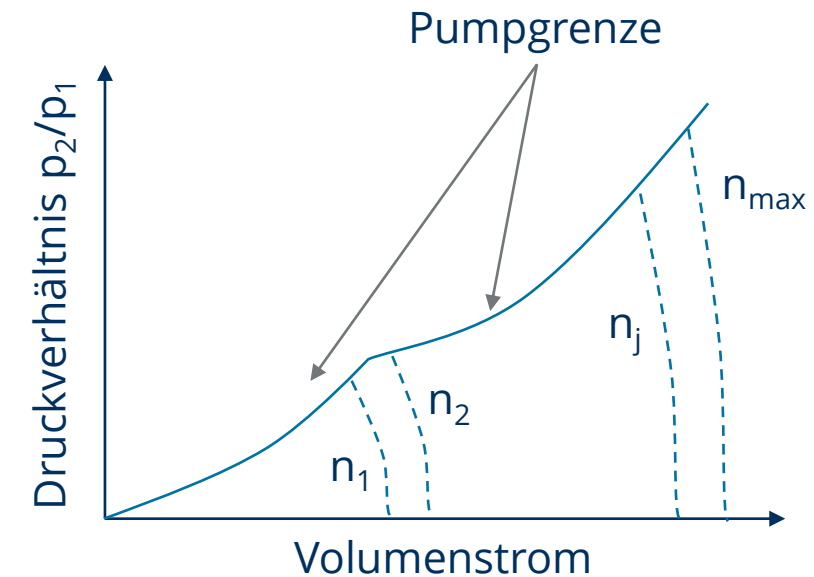
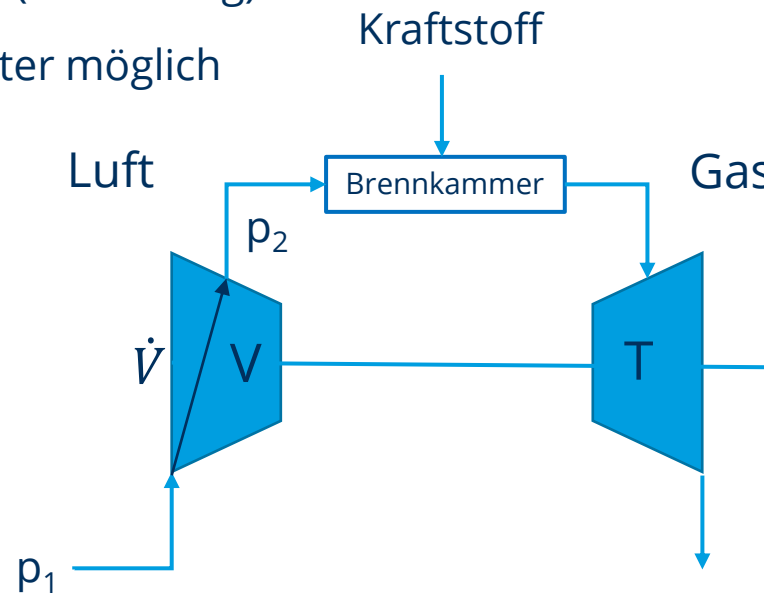
Quelle:
Stoffels: „Turbotrains International“
Birkhäuser Verlag,
Basel, 1983

8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

Hauptbaugruppen

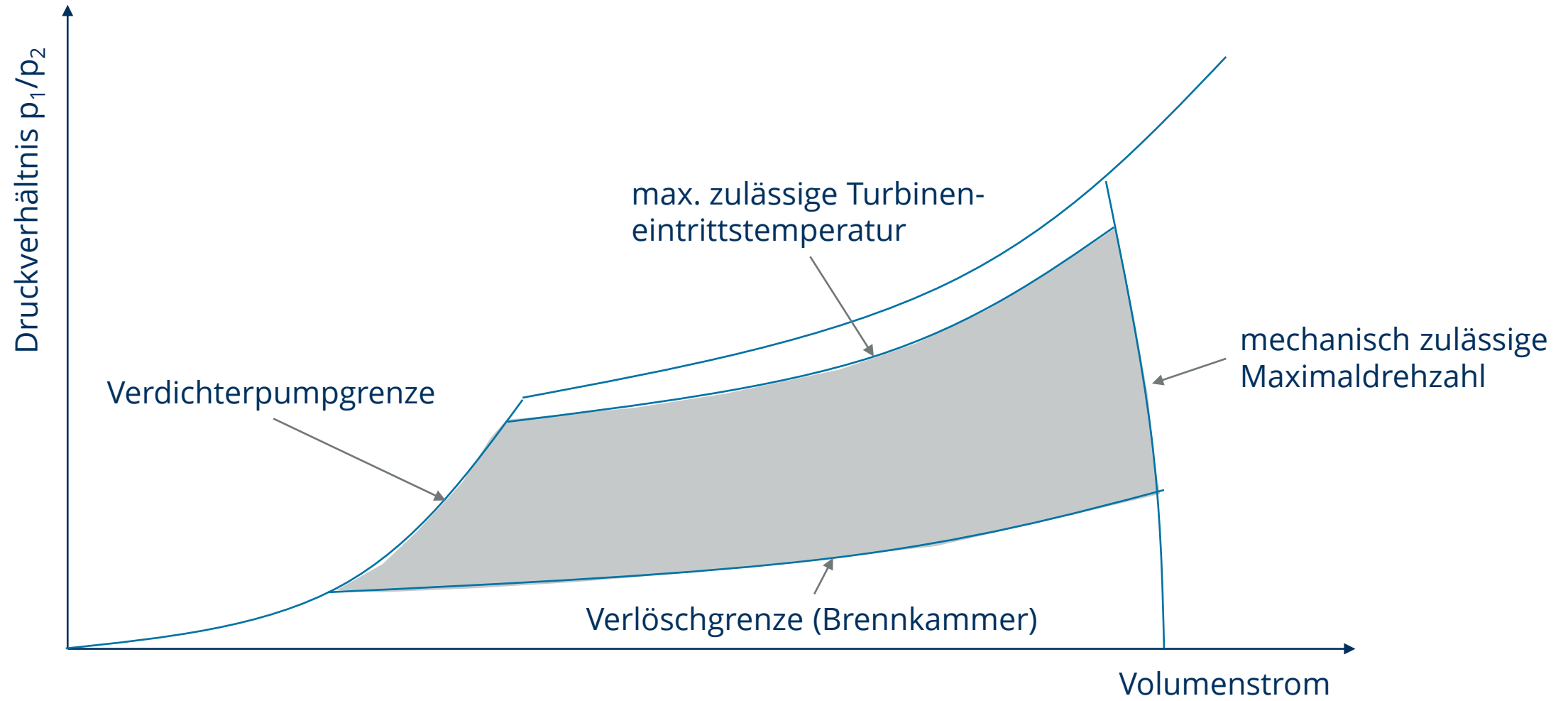
Verdichter:

- Förderung großer Luftmengen mit gutem Wirkungsgrad
- Verdichtung der angesaugten Luft auf relativ geringes Druckniveau
- kleine Leistungen: Radialverdichter (ein- oder zweistufig) – Stufendruckverhältnis: ca.
- große Leistungen: Axialverdichter (mehrstufig)
- Kombination Axial-/Radialverdichter möglich
- Stufendruckverhältnis (typisch):
 - 1,4 Axialverdichter
 - 2,8 Radialverdichter



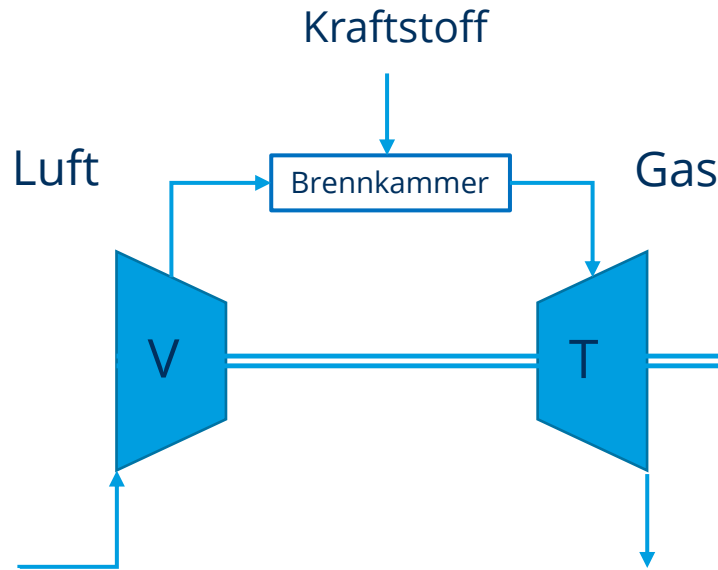
8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

Betriebsgrenzen der Gasturbine

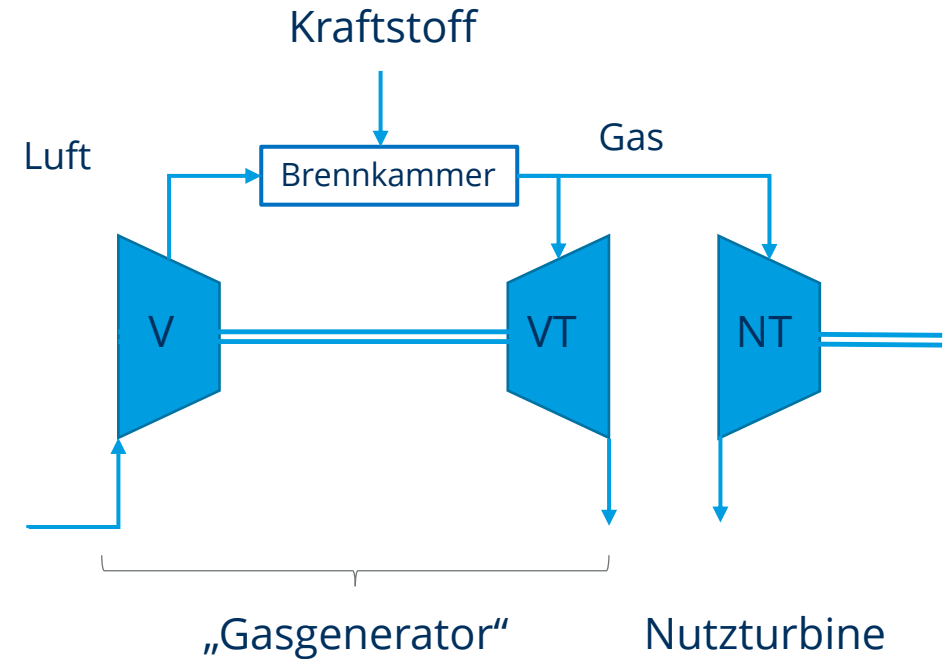


8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

Einwellengasturbine vs. Gasturbine mit freier Nutzturbine (veraltet: „Zweiwellengasturbine“)



- kein Anfahr Drehmoment generierbar
- schmaler nutzbarer Drehzahlbereich (ca. $0,55 \dots 1,0 n_{\max}$)
- gut mit elektrischer Leistungsübertragung kombinierbar



- Drehmomentabgabe bei Drehzahl (Nutz turbine) = 0 möglich
- breiteres Drehzahlband nutzbar
- energetisch günstigeres Teillastverhalten

8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

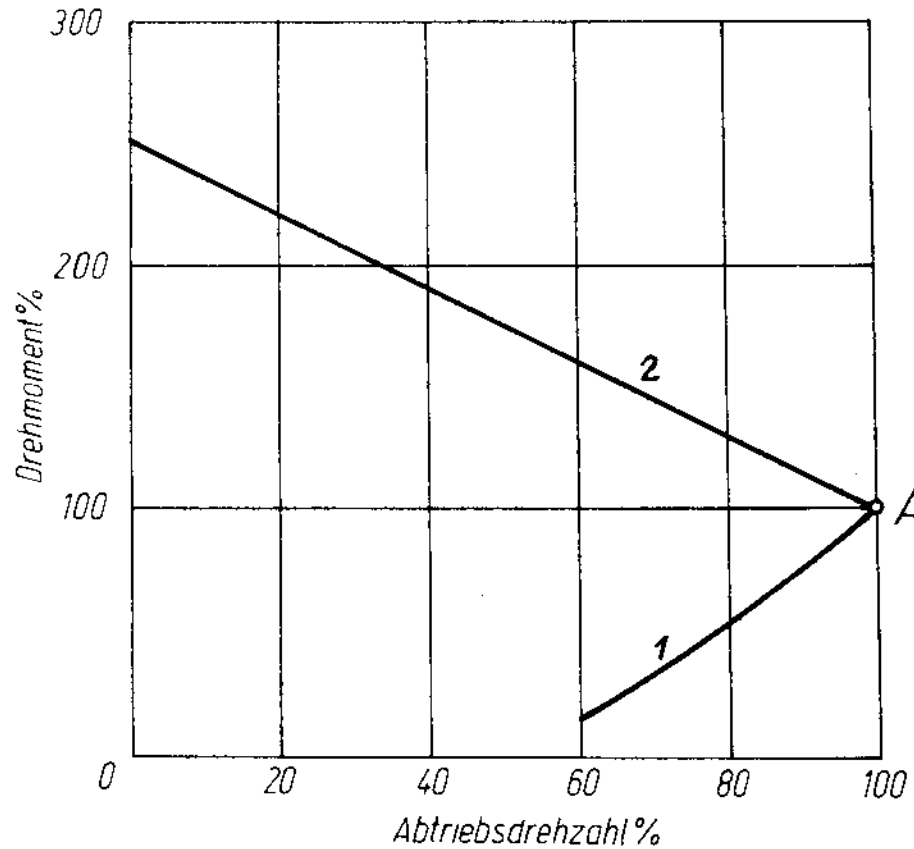


8.8 Gasturbinen in Schienenfahrzeugen

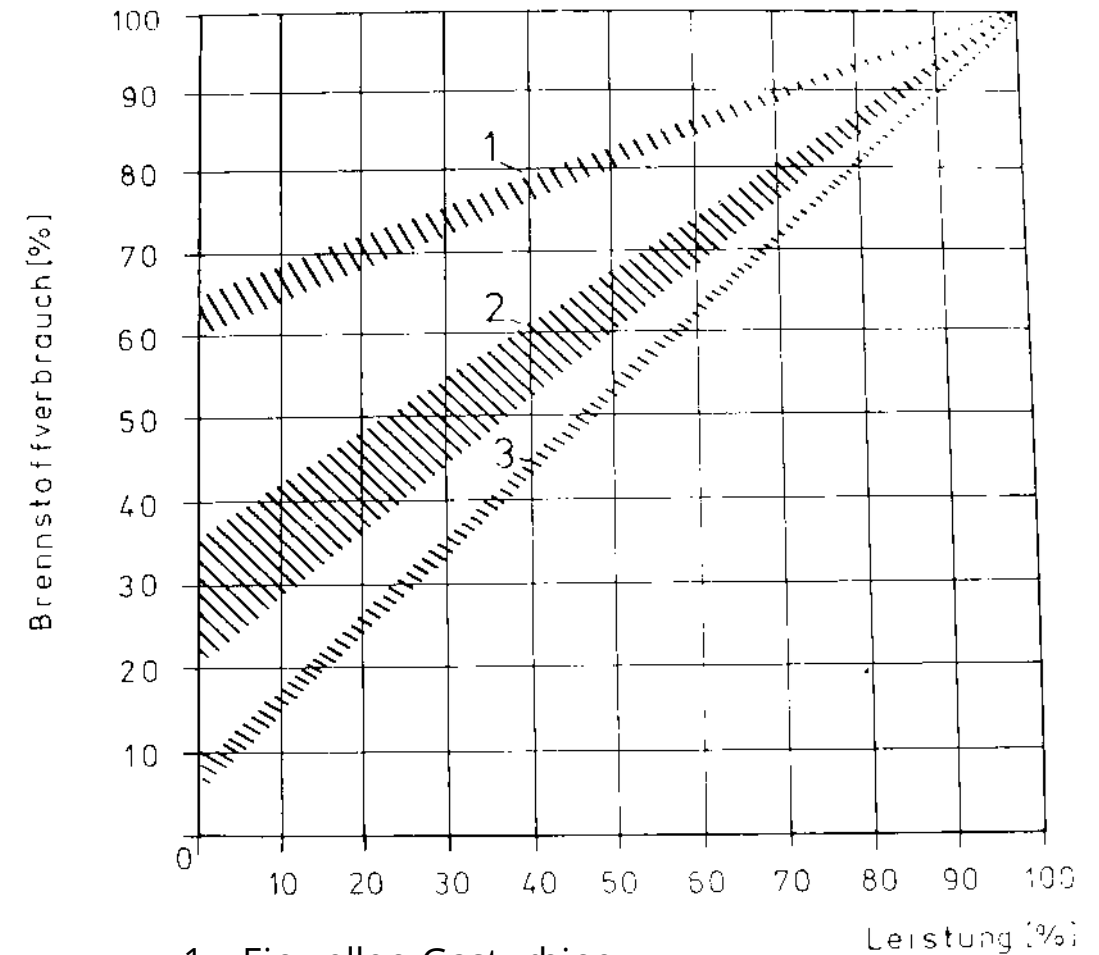
Quelle:

Stoffels: „Turbotrains International“, Birkhäuser Verlag, Basel, 1983

Betriebsverhalten



A - Auslegungspunkt



- 1 - Einwellen-Gasturbine
- 2 - Gasturbine mit freier Nutzturbine
- 3 - Dieselmotor

8.8 Gasturbinen in Schienenfahrzeugen

Vergleich Gasturbine vs. Dieselmotor

	Gasturbine	Dieselmotor
Masse je Leistungseinheit	0,5...2,0 kg/kW	4,4...8,0 kg/kW
spezifischer Kraftstoffverbrauch	330...450 kg/kWh	190...240 kg/kWh
Luftdurchsatz je 1000 kW	5,0...8,0 kg/s	1,7...2,0 kg/s
Verdichtungsenddruck	3...12 bar	30...50 bar
größter Arbeitsdruck	4...12 bar	60...80 bar
Verdichtungsendtemperatur	150...300 °C	600...750 °C
größte Arbeitstemperatur	800...950 °C	2000 °C
Abgastemperatur	450...550 °C	400...600 °C
Drehmoment bei Abtriebsdrehzahl = 0	ja (freie Nutzturbine)	nein
Kaltstartfähigkeit	problemlos	Vorwärmung erforderlich
Wartungsintervall	2000...3000 Bh	10000...15000 Bh

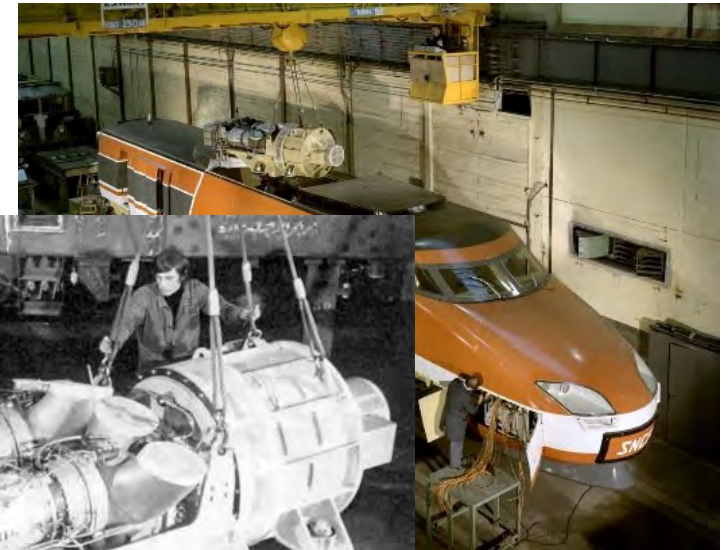
8.8 Gasturbinen in Schienenfahrzeugen

SNCF TGV 001 (1972)

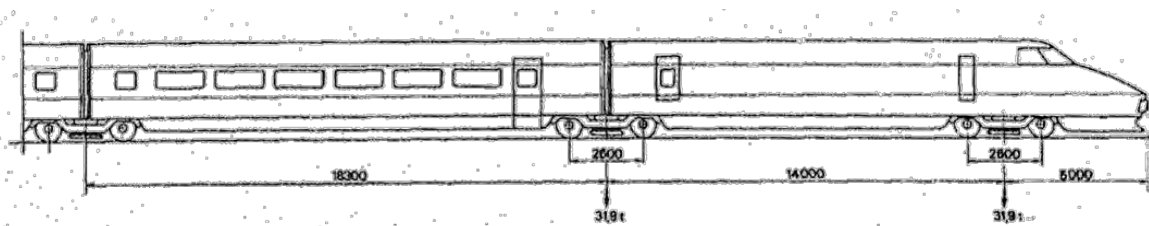
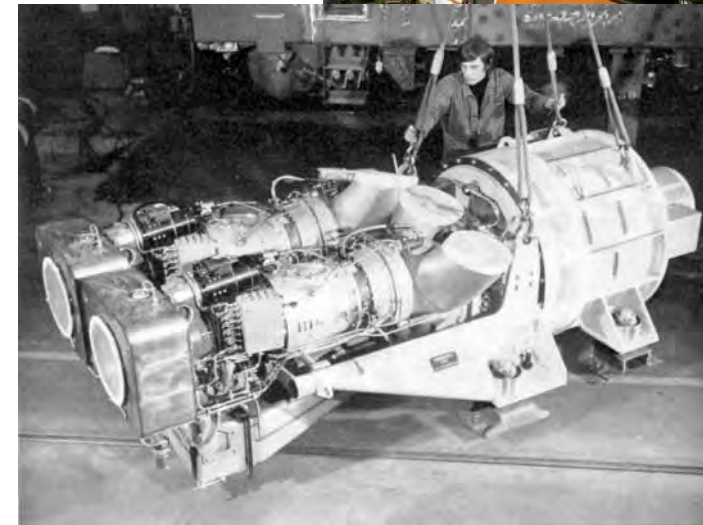
- entgegen Serienfahrzeugen: TGV-Prototyp mit Gasturbinenantrieb
- 5-Wagen Triebzug mit Vollantrieb
- Antriebsaggregat pro Triebkopf mit je 2 Gasturbinen (5785 min^{-1}) +
Sammelgetriebe + Synchrongenerator (4000 min^{-1})
- Gleichstrom-FM mit Hohlwellenantrieb
- Gesamtleistung: 4400 kW
- $v_{\text{max}} = 300 \text{ km/h}$ (vorgesehene Betriebsgeschwindigkeit)



Foto: railpictures.com/© Jeam-Marc Frybourg



Fotos: openarchives.sncf.com



8.8 Gasturbinen in Schienenfahrzeugen

SNCF RTG „Rame à turbine à gaz“ (1973)

- 2. Generation franz. GT-Triebwagen, Bj. ab 1973
- Konzept:
 - TK + 3 MW + TK, pro TK...
 - je 1 Antriebs-GT (Turbomeca Turmo IIIB, 775 kW; später Turmo XII, 1150 kW)
 - je 1 Hilfsbetriebe-GT (Turbomeca Astazou), 300 kW
 - hydrodynamische LÜ



Foto: Holger Fricke



Foto: Wikipedia/Stahlkocher

8.8 Gasturbinen in Schienenfahrzeugen

Erkenntnisse aus dem praktischen Einsatz

- typisches Lastspektrum (Zeitanteile):
 - Leerlauf: 35...40 %
 - 5...12% Nennleistung: 0,5...2 %
 - 12...30% Nennleistung: 1...5 %
 - 30...50% Nennleistung: 18...22 %
 - 50...66% Nennleistung: 9...11%
 - 66...83% Nennleistung: 2,5...4 %
 - 83...98% Nennleistung: 1...4 %
 - >98% Nennleistung: 12...20 %
- Anzahl Auf- und Abregelung der Leistung: ca. 70...90 je Stunde (Fernverkehr)
- Anzahl Schnellabschaltungen (Nennleistung => Leerlauf): ca. 1-2 je Stunde
- Anzahl Startvorgänge: 0,8...1,5 je Betriebsstunde

* Die Zahlenwerte in Tabelle beziehen sich nicht explizit auf diese Fahrzeuge



Beispiel: RTG der SNCF*

8.8 Gasturbinen in Schienenfahrzeugen

DB BR 210 (1970)

- insg. 8 leistungsgesteigerte Streckenloks der DB V160-Familie durch Einbau einer kompakten Gasturbine
- LÜ der GT ($n_{\text{nenn}} = 19'250 \text{ min}^{-1}$) via Untersetzungs- und Strömungsgetriebe mit zusätzlichem Eingang auf Antriebsseite
- Zuschaltung der GT nur bei erhöhtem Leistungsbedarf (z. B. Beschleunigung) → GT-Betrieb vorrangig bei Volllast
- durch GT ($P = 845 \text{ kW}$) Gesamtleistung von 2684 kW möglich
- $v_{\text{max}} = 160 \text{ km/h}$
- Problem: häufiges Zu- und Abschalten der GT führte zu frühen Ausfällen und verkürzter Lebensdauer der Aggregate
- nach ca. 10 Jahren Einsatz Ausbau aller GT



Foto: Wikipedia/Spoorjan

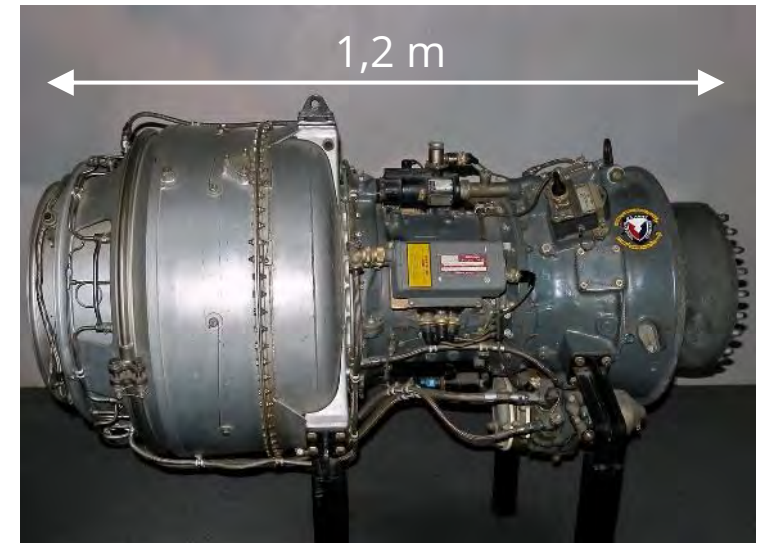


Foto: Wikipedia/Cliff

8.8 Gasturbinen in Schienenfahrzeugen

Referenzfahrzeuge mit Gasturbinenantrieb

DB BR 210 (1970) – Lycoming T53-L

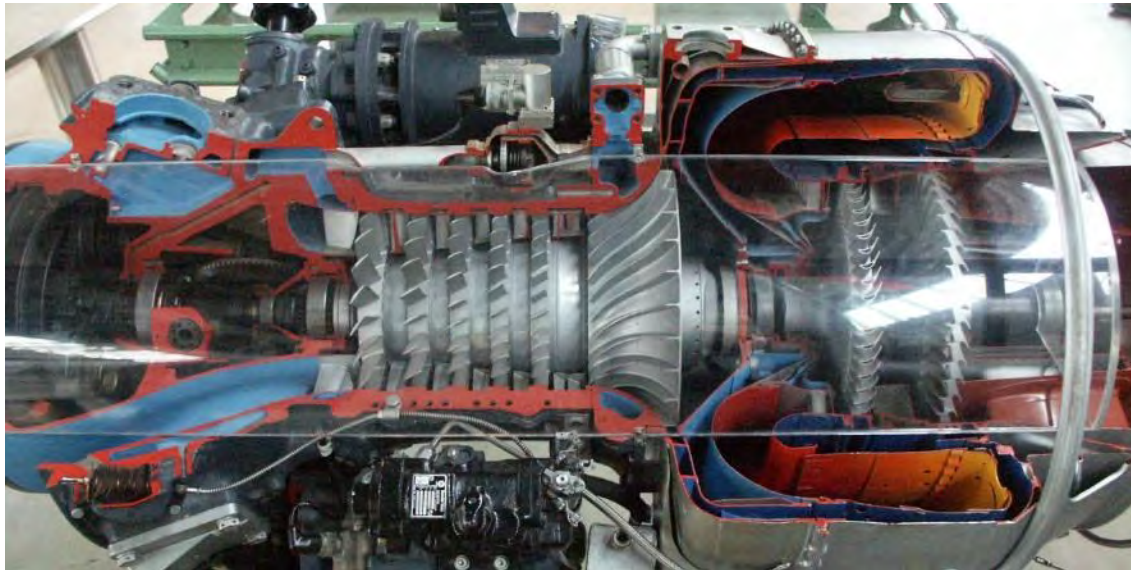
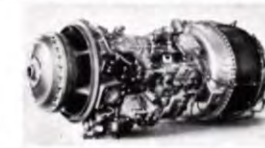


Foto: Wikipedia/Sleipnir



**Für die Reise in die Zukunft:
Turbinenkraft jetzt auch auf Schienen.**

Die KLÖCKNER-HUMBOLDT-DEUTZ AG hat von der Deutschen Bundesbahn den Auftrag erhalten, die schnellsten Züge noch schneller zu machen. Diese Aufgabe verwirklicht KHD mit Gasturbinen. Die Lokomotiven der Baureihe 210 erhalten als Zusatzantrieb eine 1200 PS-Gasturbine T 53-L-13



Lizenzbau Lycoming als Ergänzung zum 2.500 PS-Dieselmotor. Die TEE- bzw. Inter-City-Züge erhalten als Hauptantriebsmaschinen zwei 2.200 PS starke

Gasturbinen Lycoming. Deutsche Bundesbahn: Die Reise in die Zukunft wird immer schneller.

Ein Produkt der KHD-Gruppe.
KHD
Klöckner-Humboldt-Deutz AG

historische Werbeanzeige „Reise in die Zukunft“

8. Dieselmotor u. a. Verbrennungs-KM

8.8 Gasturbinen in der Sfz-Technik

8.2.3 Referenzfahrzeuge mit Gasturbinenantrieb

Bombardier JetTrain (2002)

- Prototyp-TK (Einzelstück)
- Leistung des TK: 3300 kW
- Jet Turbine von Pratt & Whitney mit $P=3750$ kW



Legende (Auswahl)

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 Treibstofftank | 19 Batterie-Ladegerät |
| 2 Gasturbine | 20 Druckluftanlage |
| 3 Reduziergetriebe | 21 Generator-Kühler |
| 4 Generator | 22 Bremsgerüst |
| 5 Luftbehälter | 23 Turbinen-Getriebeöl-Kühler |
| 6 Flexible Kupplung | 24 Steuerschränke |
| 7 Lüftungsöffnungen | 25 Abgastrakt |
| 11 Hilfbetriebe-Transformator | 27 Fahrmotorlüfter |
| 14 Primär-Luftfilter | 29 Batterien |
| 15 Sekundär-Luftfilter GT | 31 Bremswiderstand |
| 16 HVAC-Anlage | 32 Abgasschalldämpfer |
| 17 Umrichteranlage | |

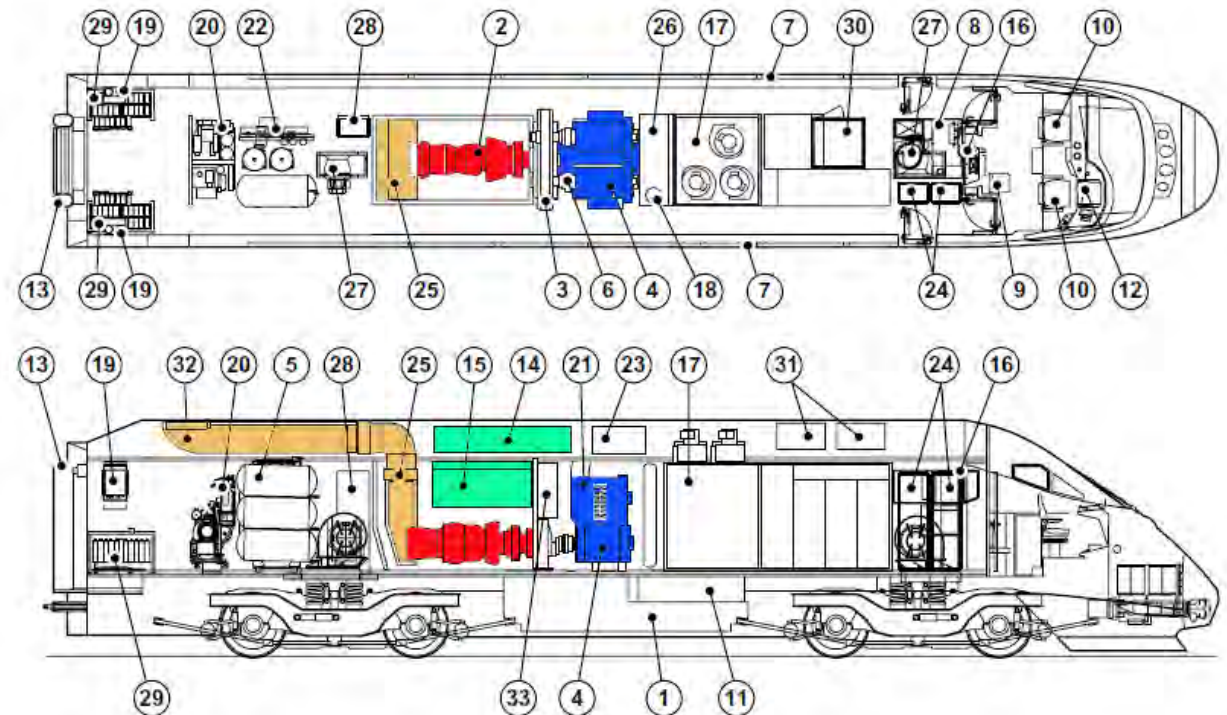


Foto (o.): © Bombardier, Abbildung (u.): turotrain.net

8. Dieselmotor u. a. Verbrennungs-KM

8.8 Gasturbinen in der Sfz-Technik

8.2.3 Referenzfahrzeuge mit Gasturbinenantrieb

RZD GT1 001/GT1 002 (2007/2013)

- 2-teilige Großdieselloks für Güterzugeinsatz
- Gasturbinenantrieb mit el. LÜ (AC-DC)
- eine GT ($n_{\text{nenn}} = 6000 \text{ min}^{-1}$) als Hauptantrieb im 1. Fahrzeugteil, Kraftstoffvorrat im 2. Fahrzeugteil
- Betrieb der GT mit LNG → geringere Betriebskosten (ca. 30%)
- Gesamtleistung des Fahrzeugs 8300 kW
- Reichweite ca. 750 km

- weitere Technische Daten:
 - $F_z = 980 \text{ kN}$
 - $v_{\text{max}} = 100 \text{ km/h}$
 - $m_{\text{Tfz}} = 300 \text{ t}$



Fotos: Wikipedia