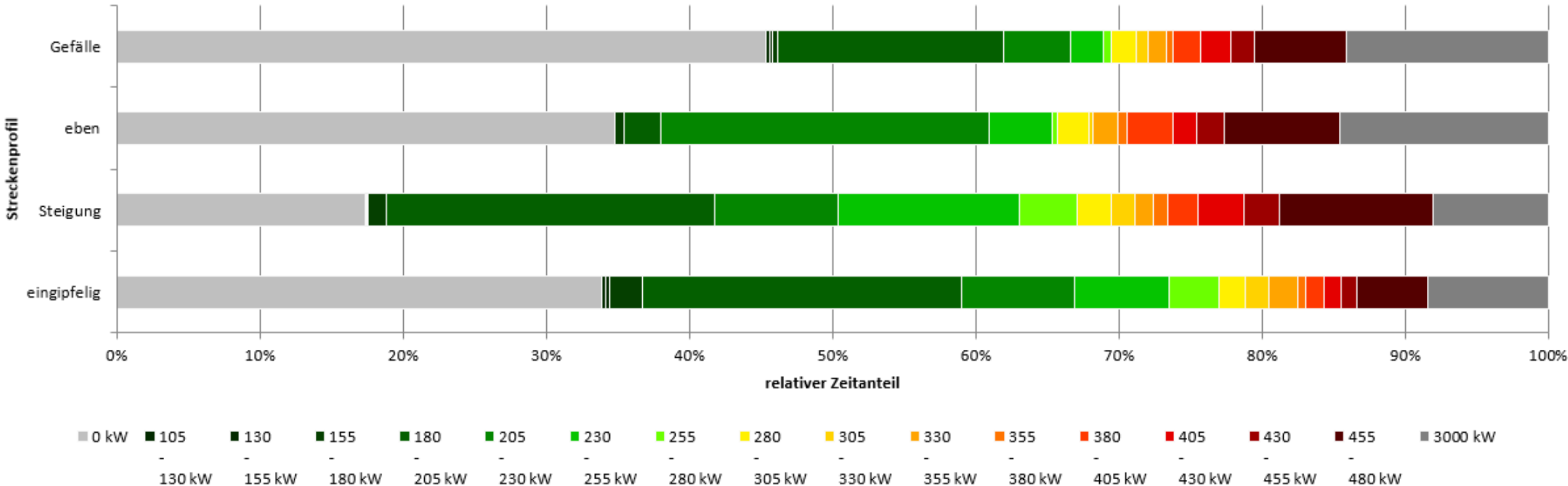


8.4 Charakteristik von Bahn-Dieselmotoren



relativer Zeitanteil der Getriebeeingangsleistung je Klasse
Auswertung nach Streckenprofil



Basis: Auswertung von Getriebedaten von 141 Fahrten, „3000 kW“ = Retarderbetrieb mit Drehzahlanhebung (Energiebedarf Kühlanlage)

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

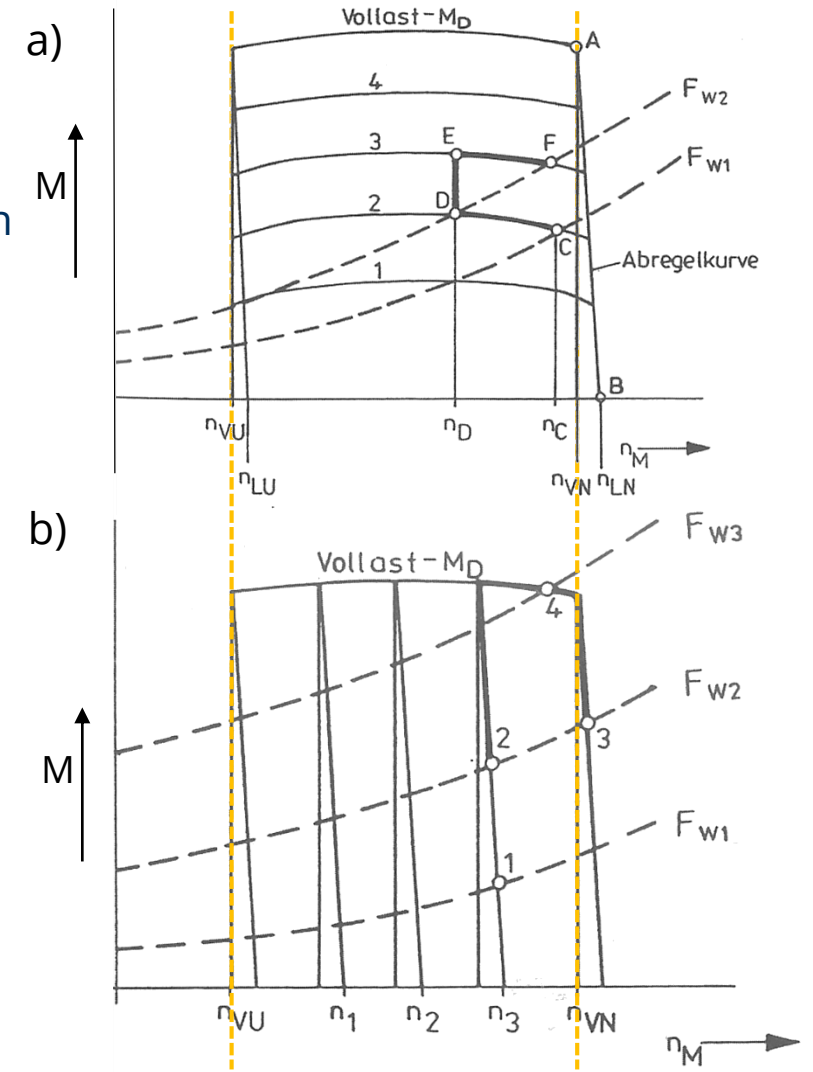
- erforderlich für n/M-Anpassung an Motorbelastung
- Bahn-DM sehr starke Belastungsschwankungen
- hinreichend schnelle und ausreichend feinstufige Regelung erforderlich
- Leistungsgleichung (effektive Leistung):

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

- 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}	Nennvollastdrehzahl
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 den verschiedenen 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

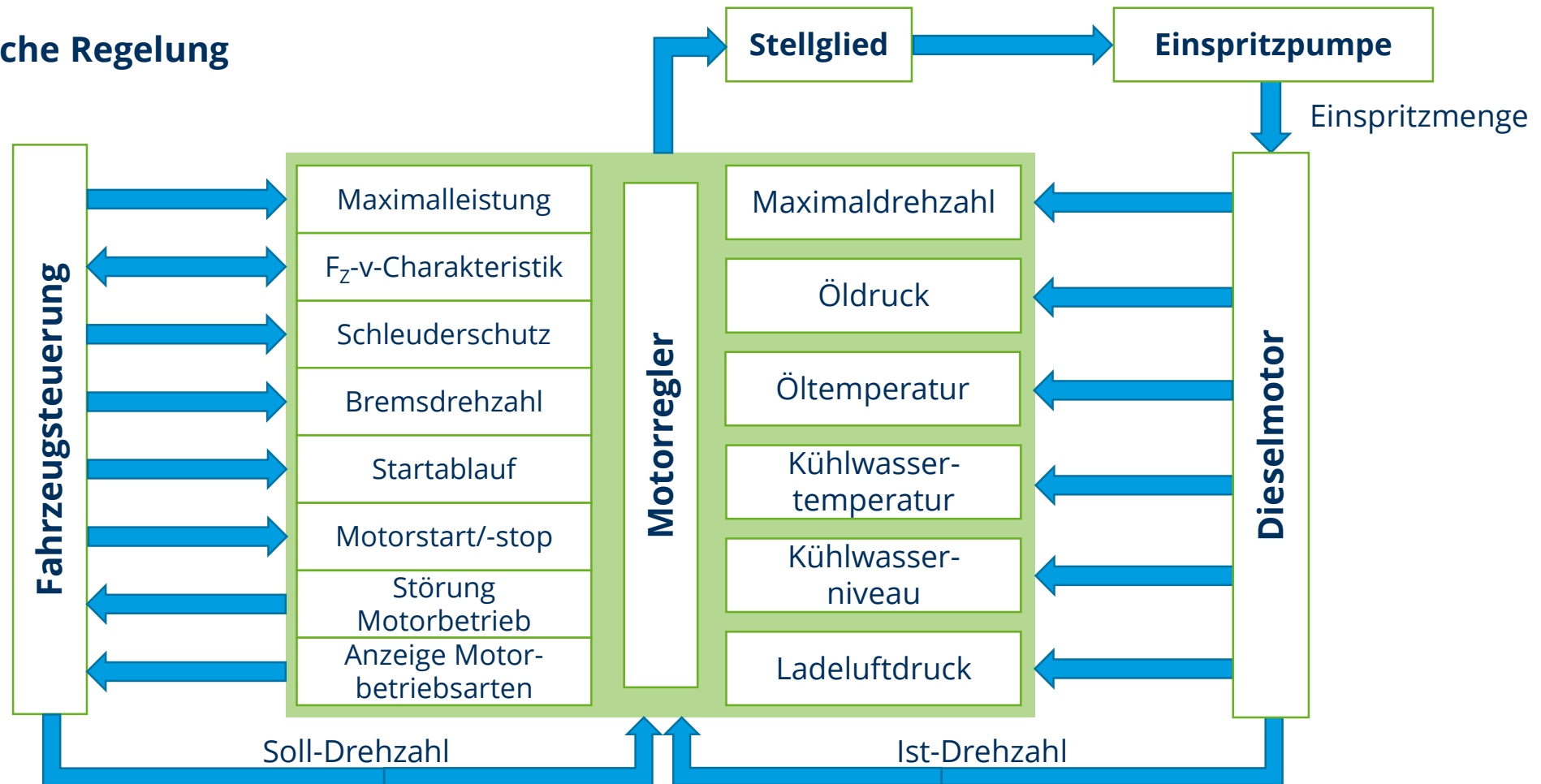


Abbildung: nach Nick, Manfred, „Antriebsanlagen für Dieseltriebwagen“, EI 12/1994

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 1kg Dieselkraftstoff: 14,8 kg ($\lambda=1$)

λ : Luft-Kraftstoff-Verhältnis

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

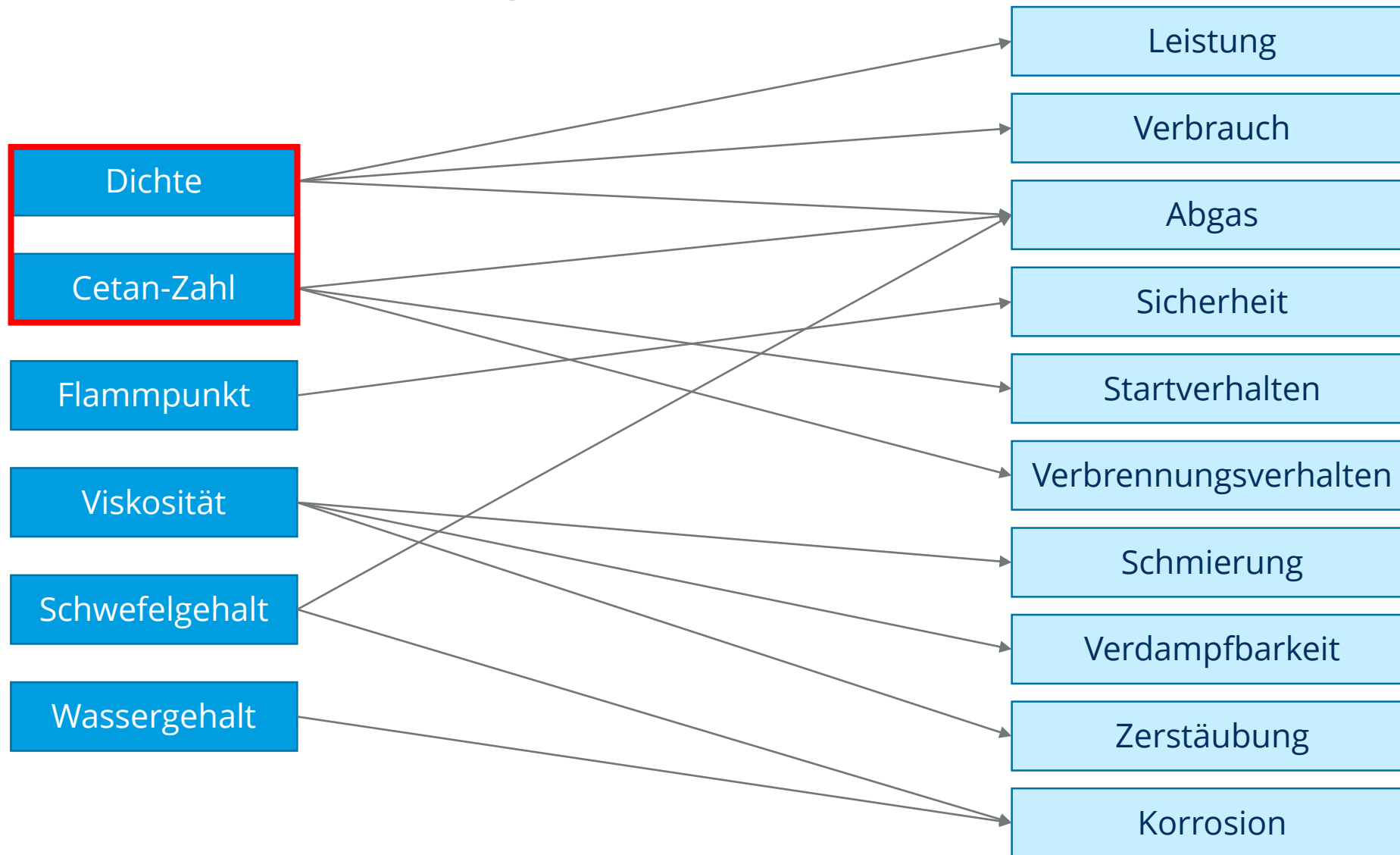
$\lambda > 1$: Luftüberschuss („mageres“ Gemisch)

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

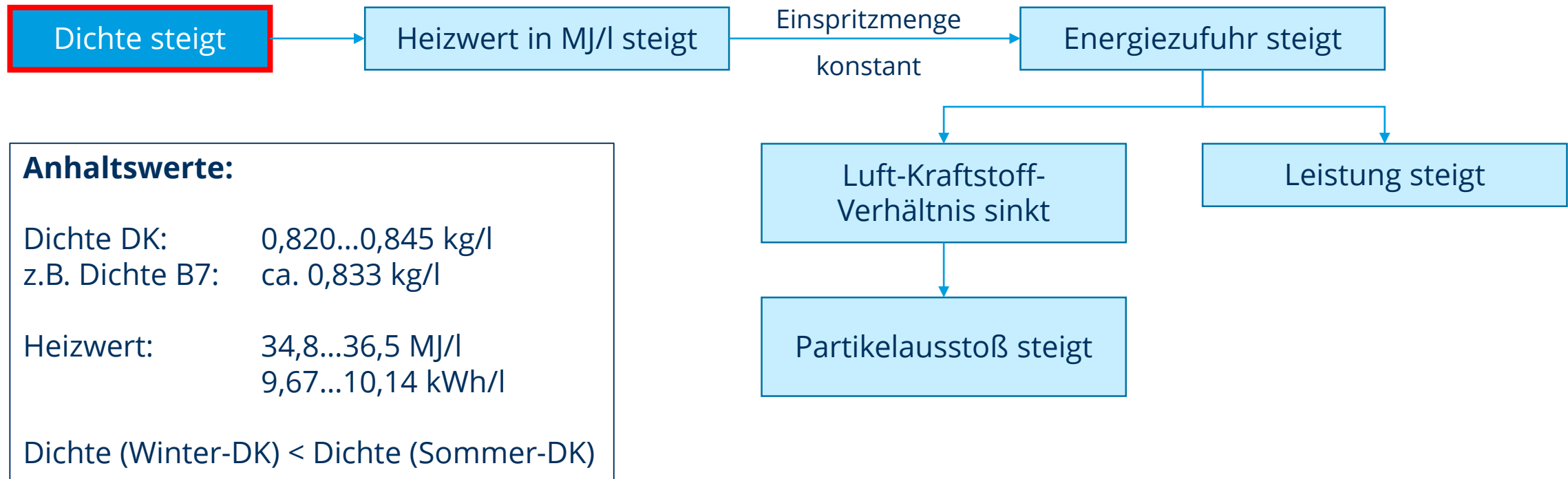
Dieselmotor unter Vollast: $\lambda \approx 1,2$

Dieselmotor im Leerlauf: $\lambda > 8$

8.6 Dieselkraftstoff (Eigenschaften)



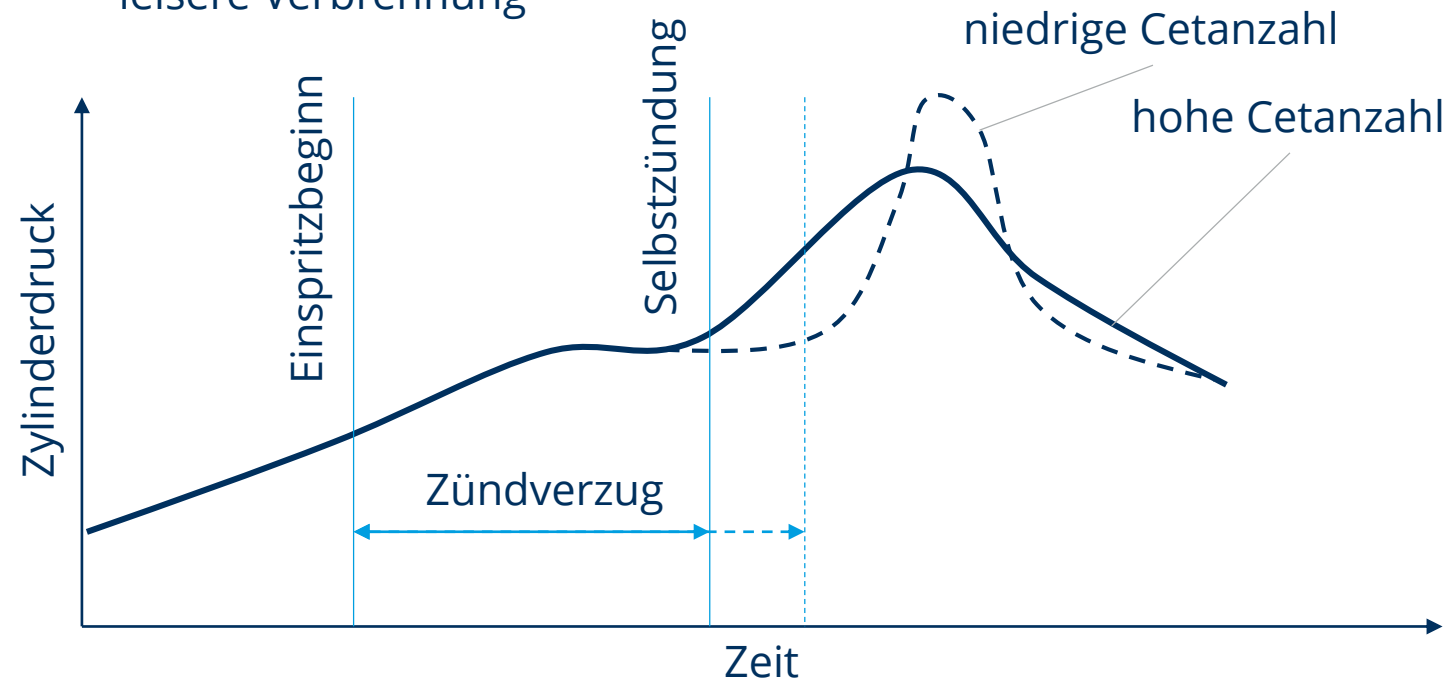
8.6 Dieselkraftstoff (Eigenschaften)



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-Dieseldieselkraftstoff?

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:

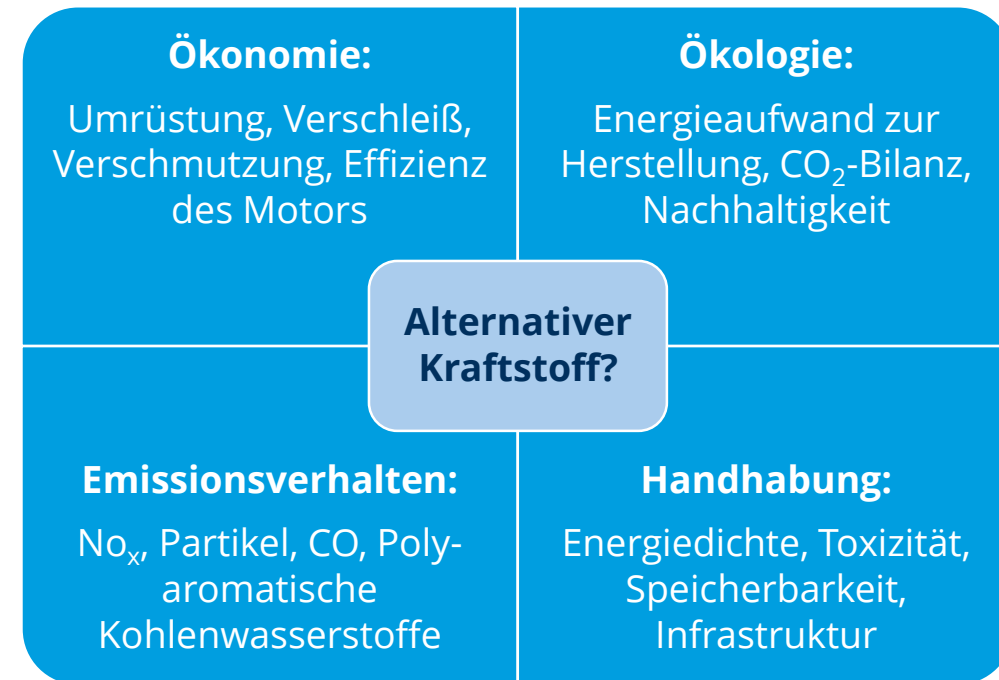
a) biomassebasiert („Biodiesel“)

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

b) strombasiert („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)

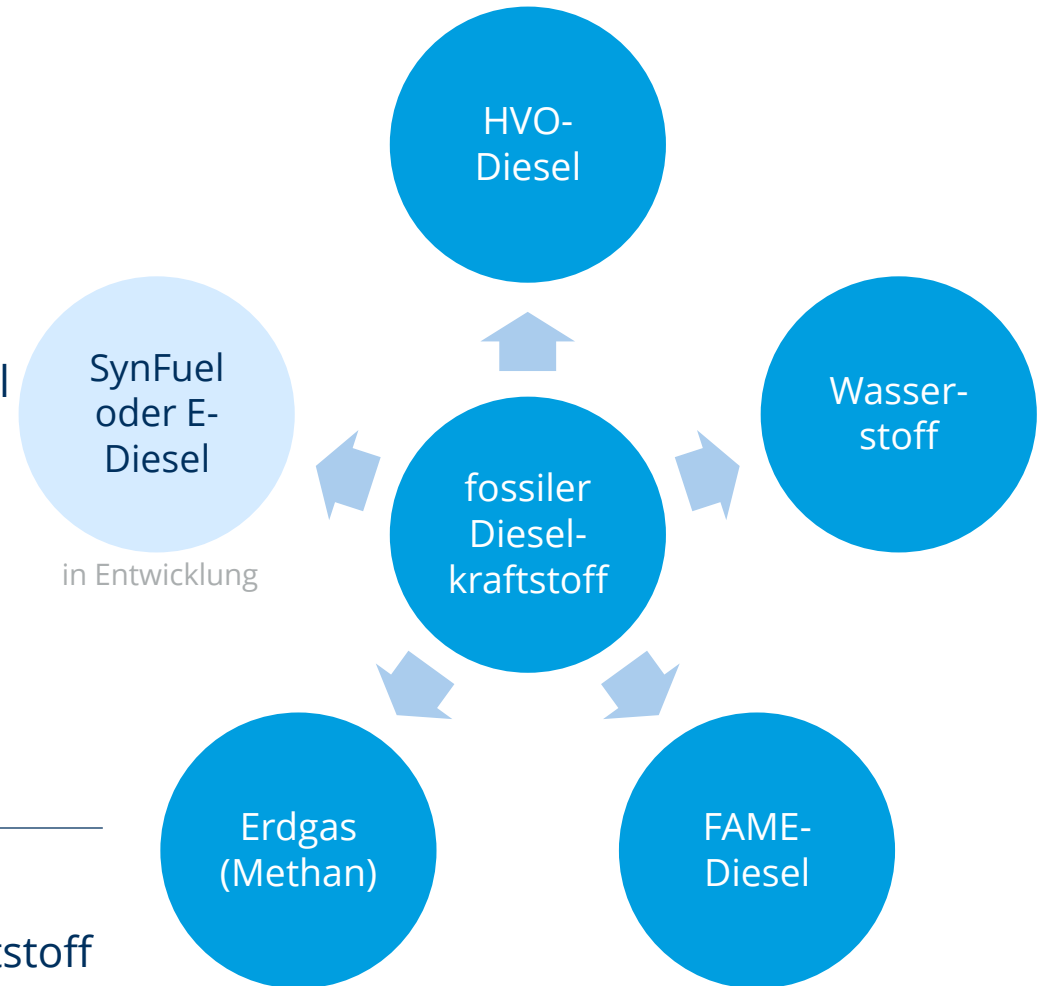
HVO Hydrotreated Vegetable Oil

- 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“)

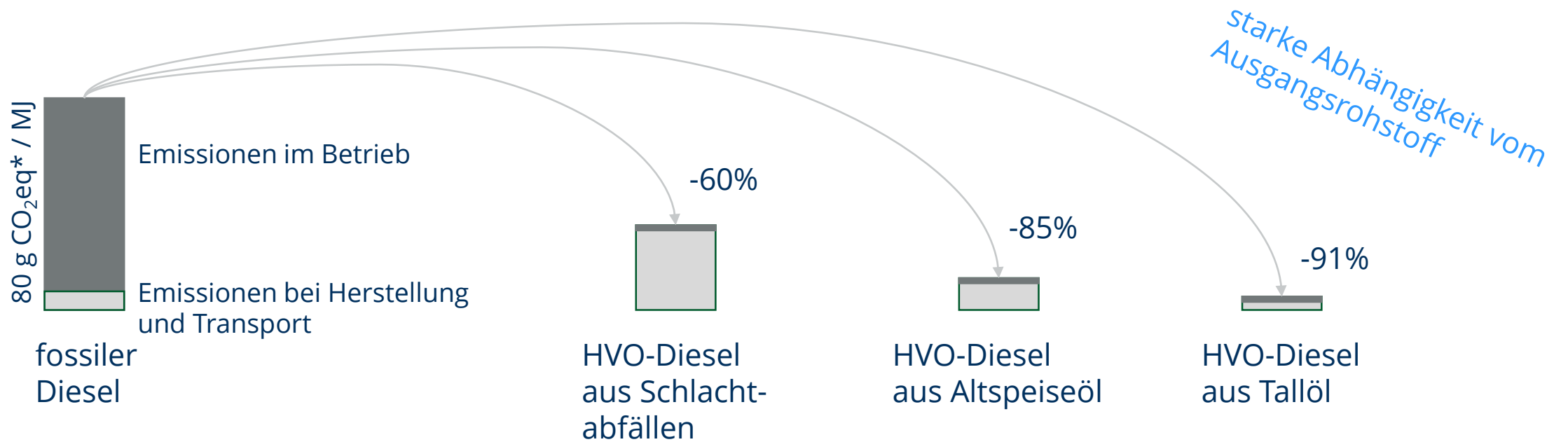
- begrenzte Lagerfähigkeit (3 Monate)
- Verstopfung von Kraftstofffiltern möglich
- Zersetzung von Elastomeren in Dichtungen möglich

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)

Dieseldieselkraftstoff-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.

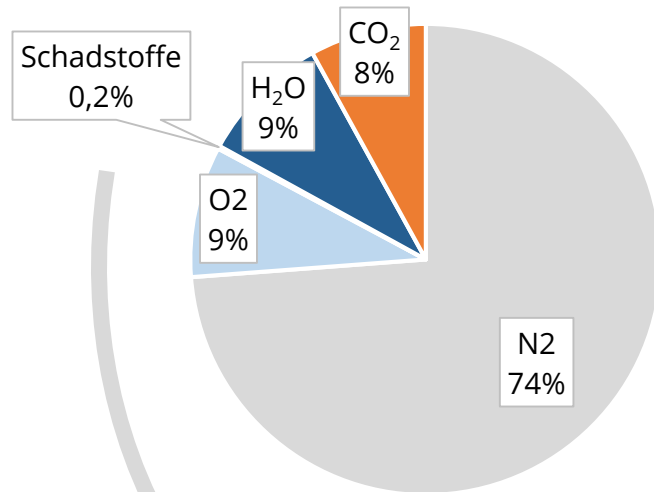


<https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/operail-converts-ge-diesel-loco-to-lng-dual-fuel-operation/58445.article>

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Emissionen

Abgaszusammensetzung



Schadstoffzusammensetzung

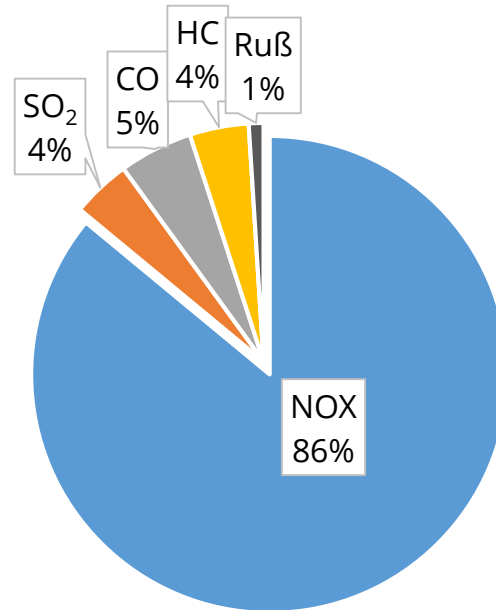


Foto: bahnbilder.de/© Daniel Meyer

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		
> 2000 kW; V _{Zyl} > 5 l		Feb. 2011/2012 ^{d)}	7,4	0,4			
Stage III B ^{b)}			VT > 130 kW	-	0,19	0,025	
	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)	Streckenlokomotiven	≥ 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

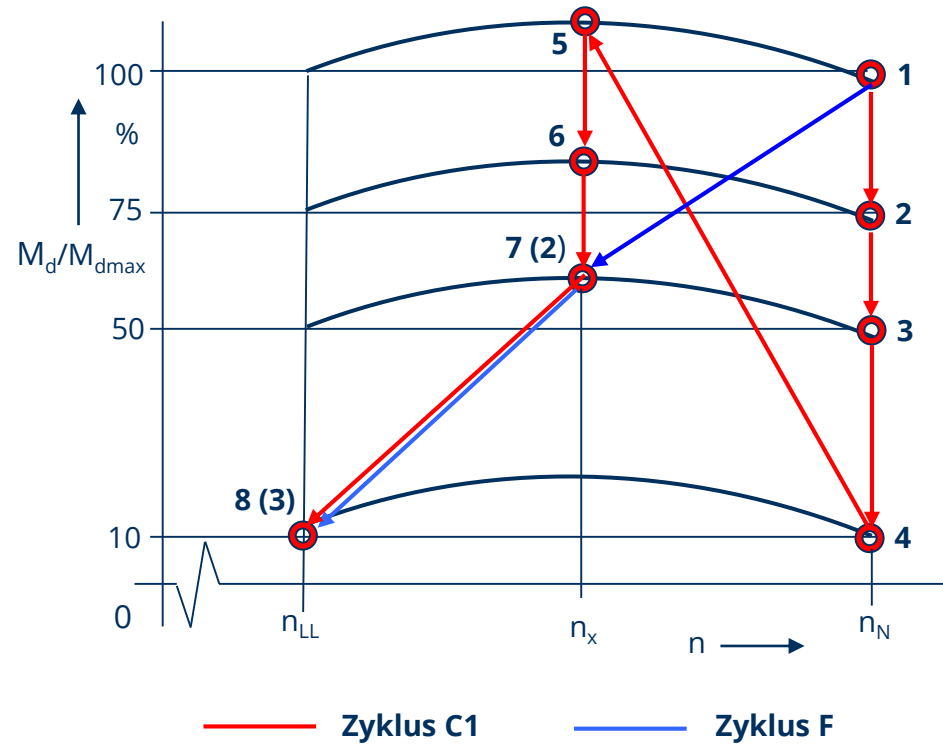
8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

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



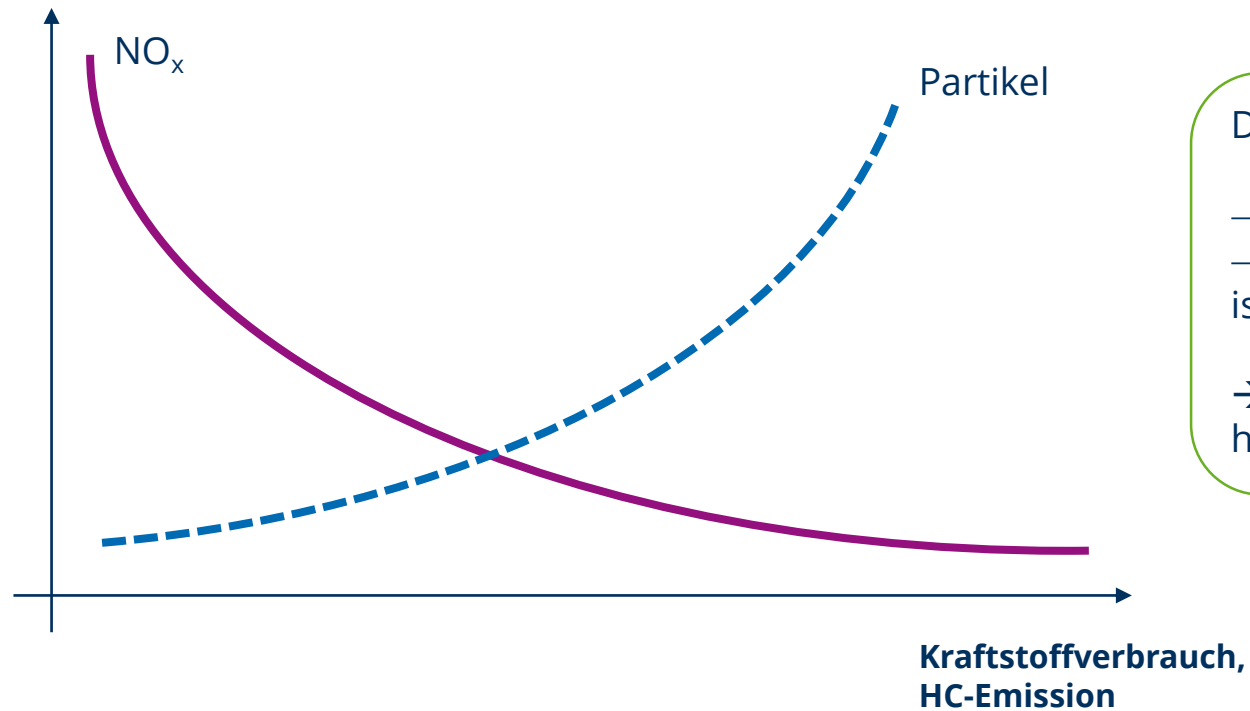
Test-zyklus ^{a)}	Anwendung	$M_d/M_{d,max}$ in %	100	75	50	10	100	75	50	0
			Drehzahl			Zwischen-drehzahl		Leerlauf		
C1	Ril 04/26 EG VT	Faktor	0,15		0,10			0,15		
F	Ril 04/26 EG UIC 1, 2	Lok	0,25	-			0,15	0,60		

^{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, desto größer die

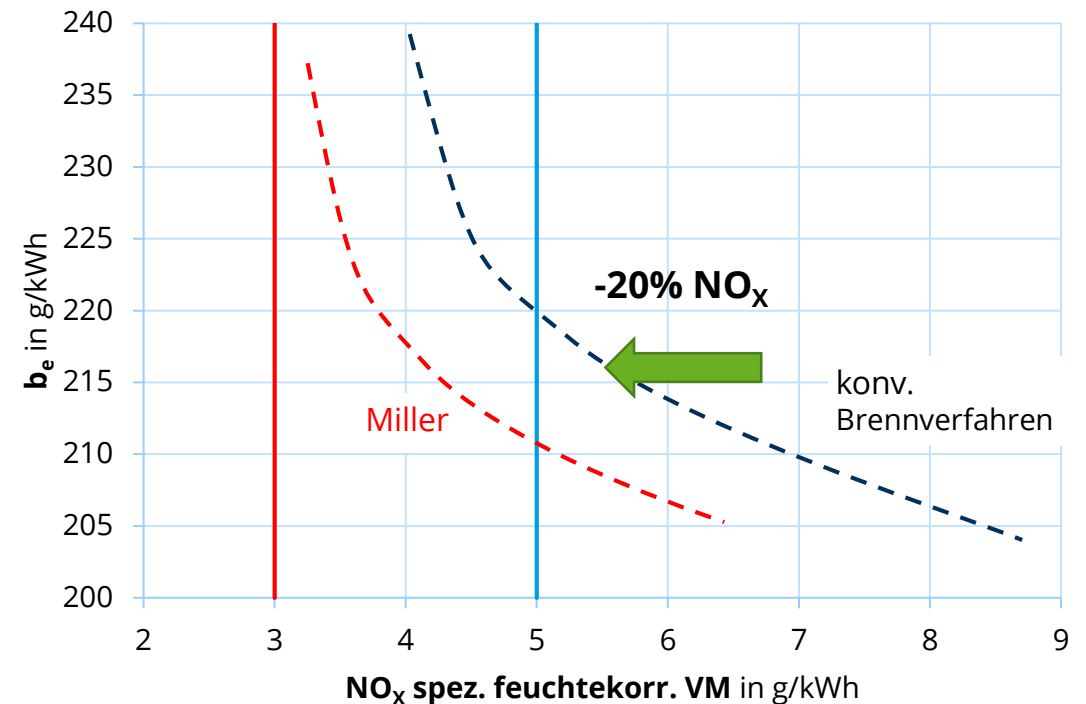
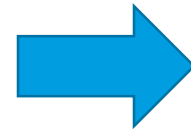
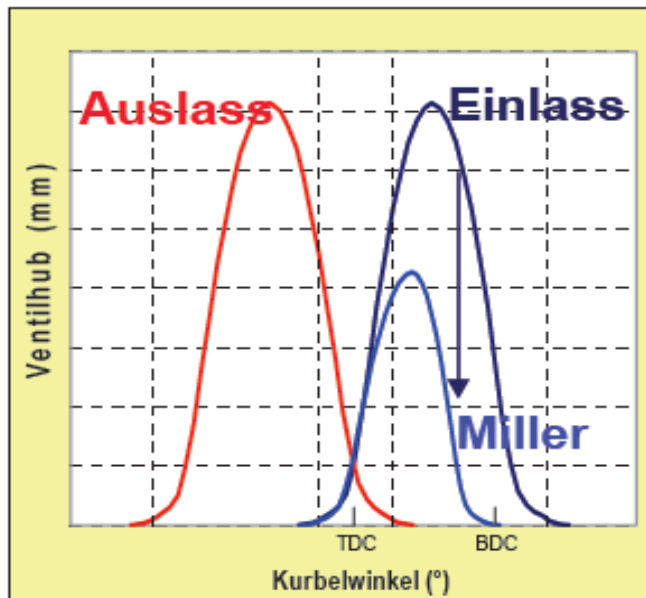
- Verbrennungstemperatur und
- Dauer der hohen Verbrennungstemperatur ist.

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

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

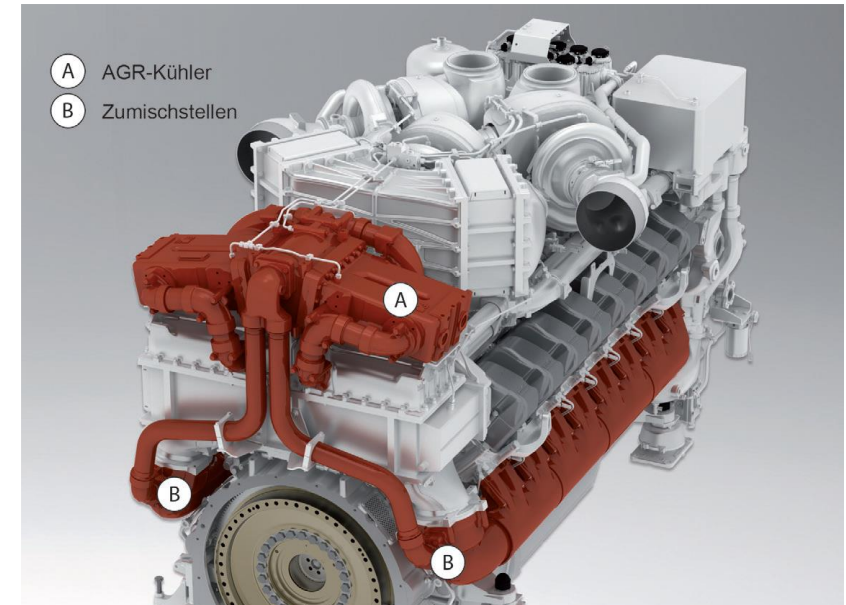
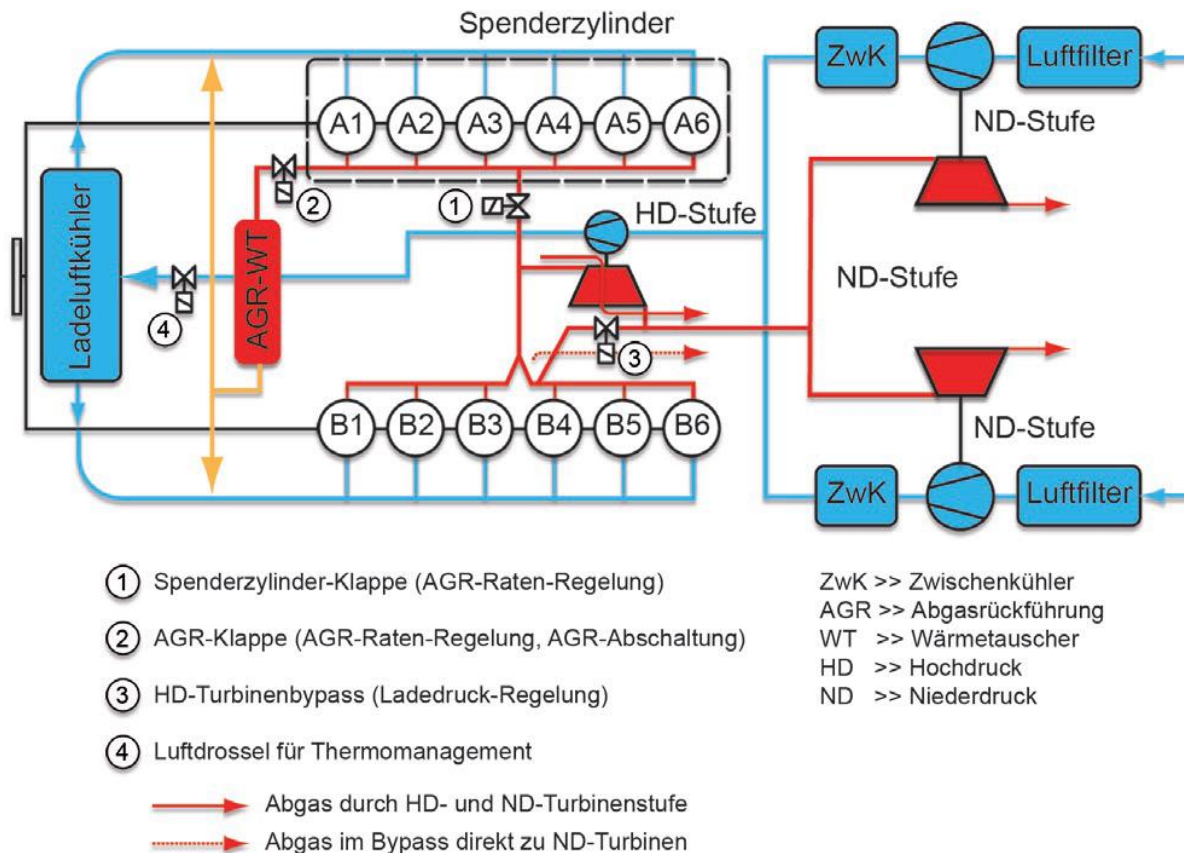
Miller - Verfahren

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



8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Gekühlte Abgasrückführung (AGR)

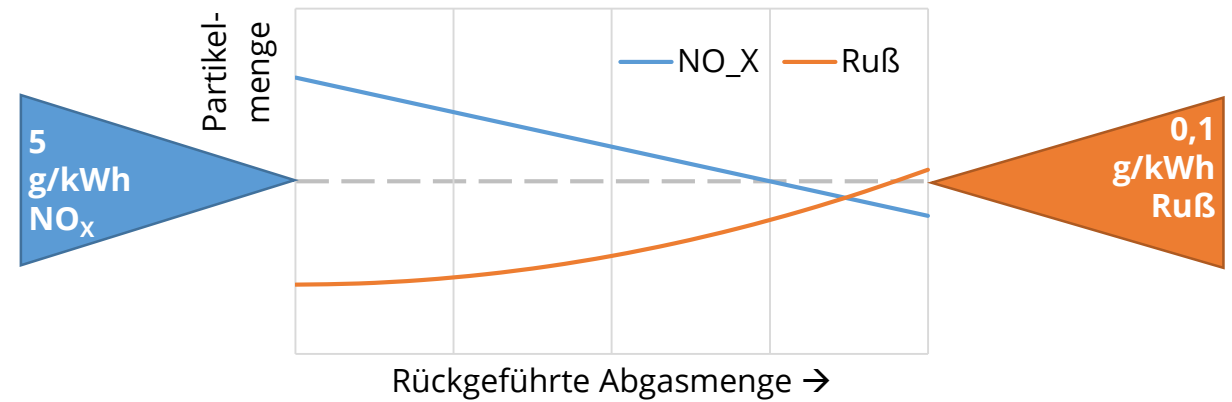
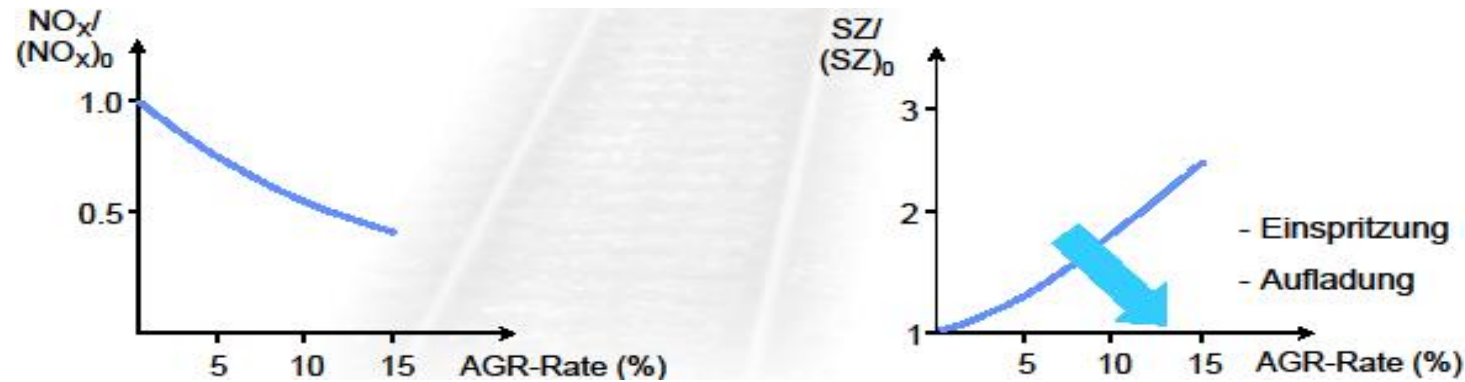


Abbildungen: © MTU

Komponenten AGR am Motor MTU 4000

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

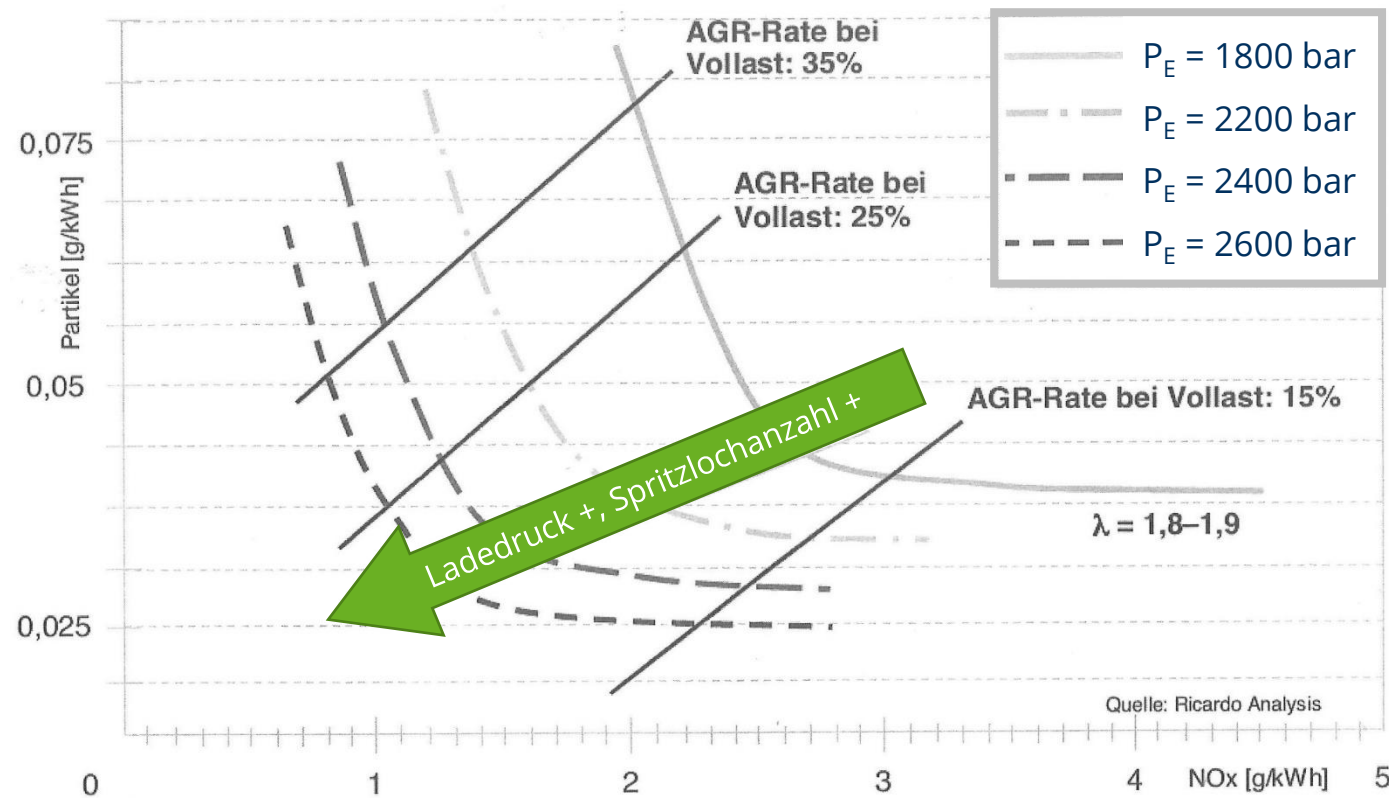
Gekühlte Abgasrückführung (AGR)



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

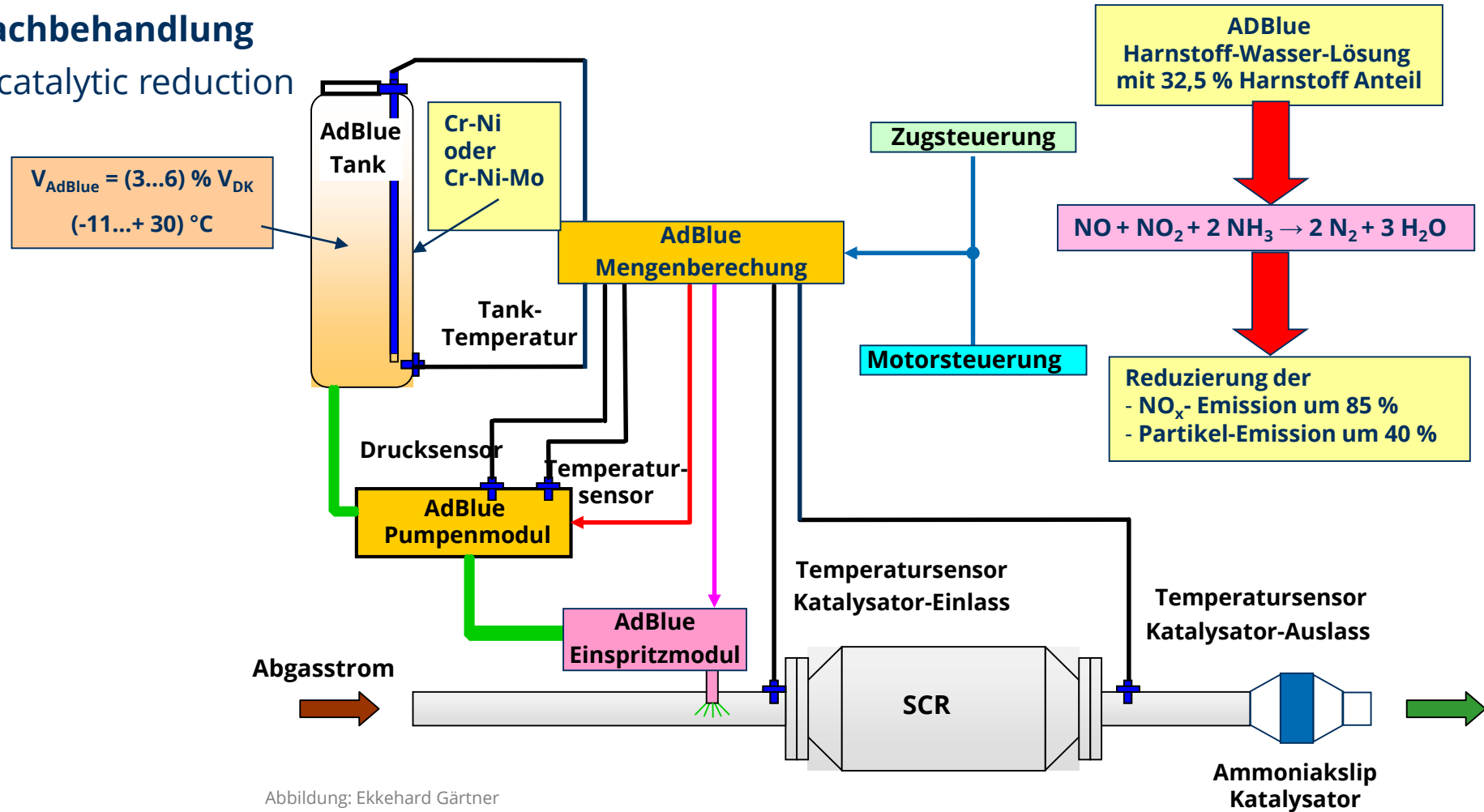
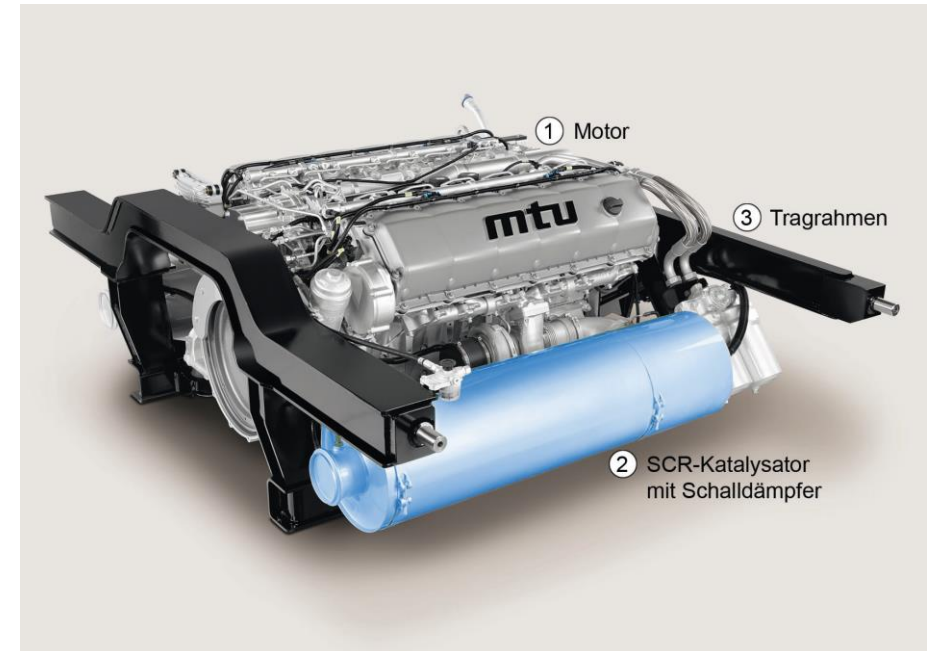
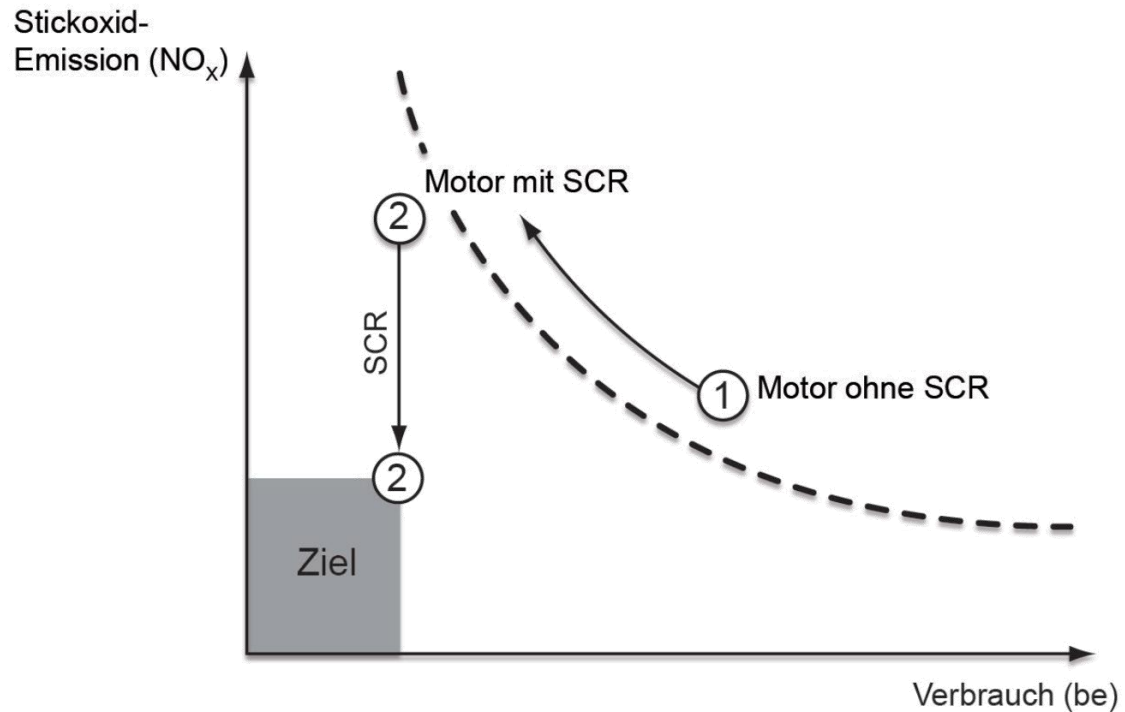


Abbildung: Ekkehard Gärtner

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

SCR-Abgasnachbehandlung

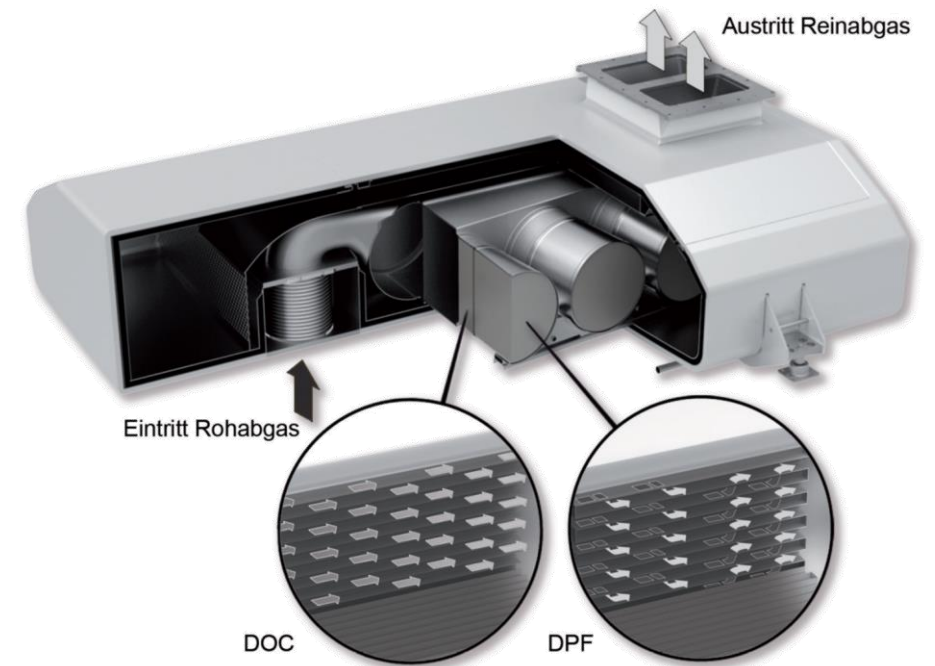
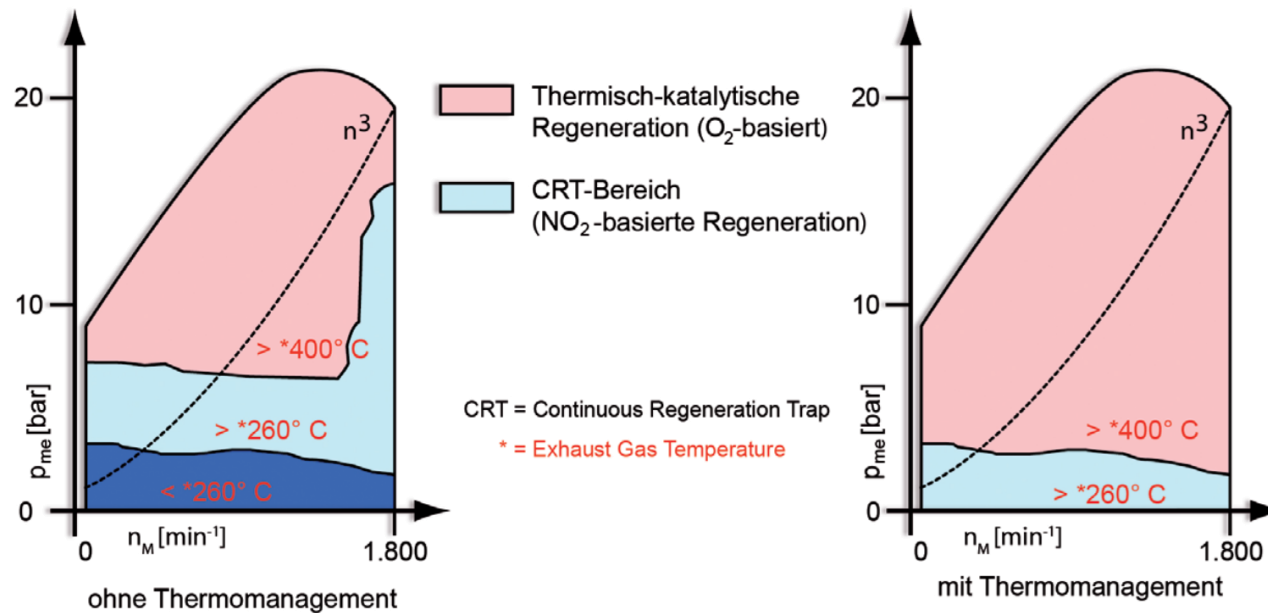


Abbildungen: © MTU

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 Rußabbrand deutlich erhöht

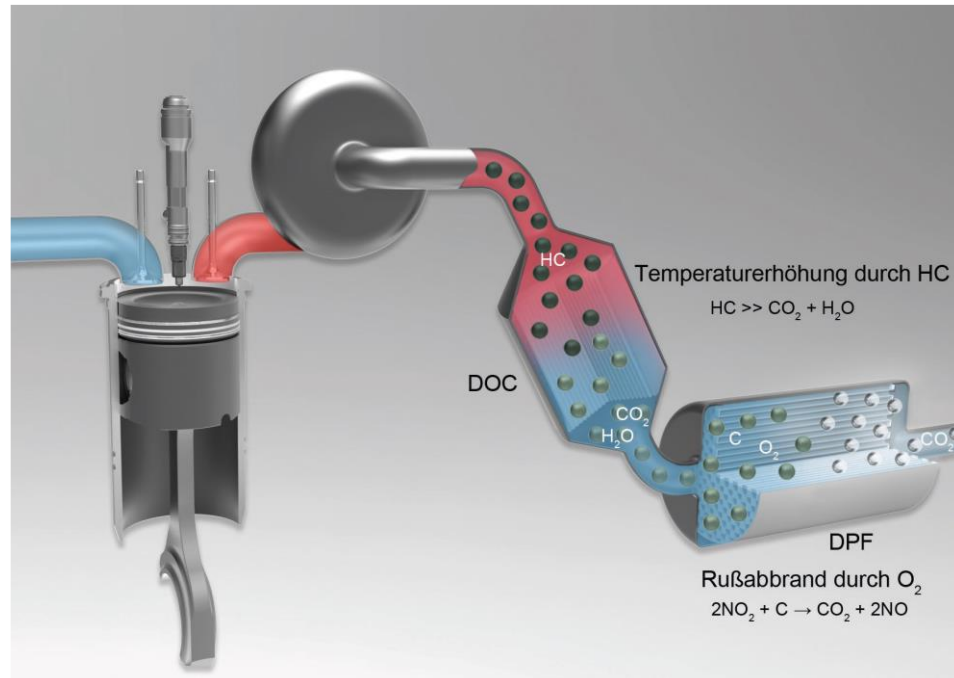


Abbildungen: © MTU

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

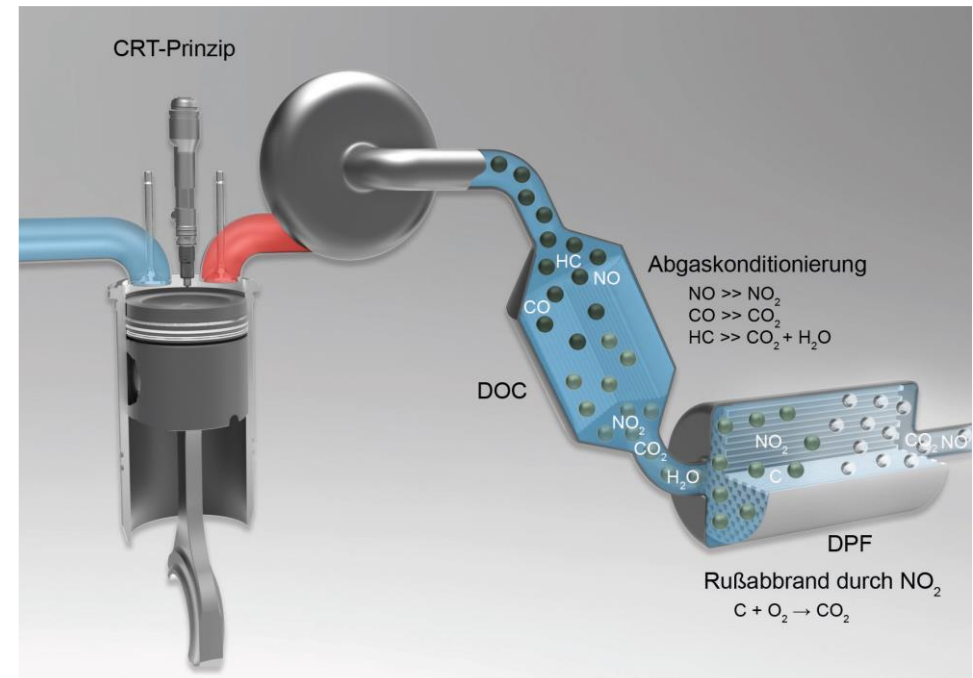
Aktive Regeneration

- Erhöhung der Abgastemperatur für optimalen Rußabbrand



Passive Regeneration/CRT

- chemische Reaktionen begünstigen Rußabbrand



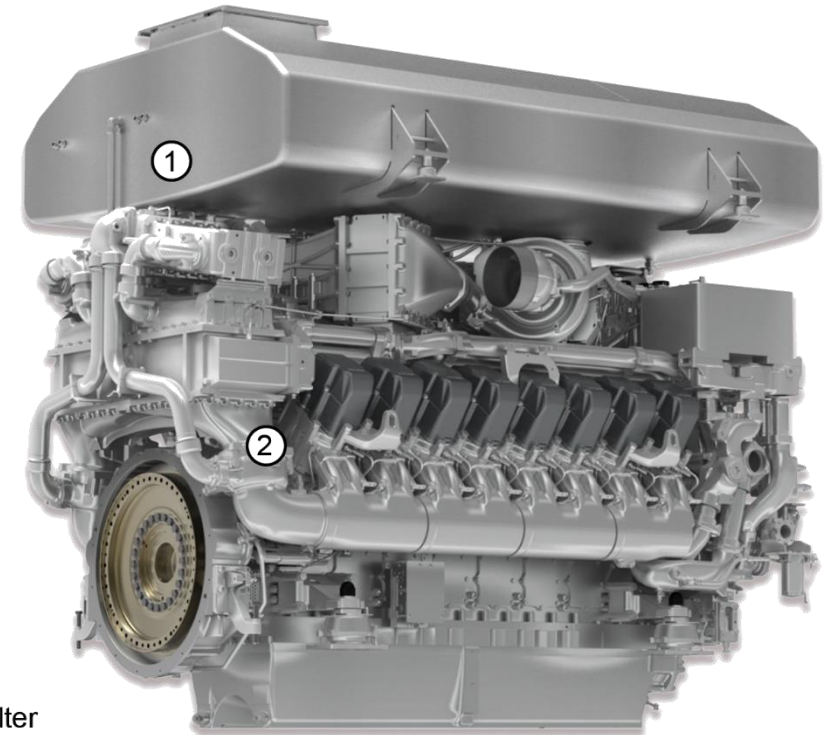
Abbildungen: © MTU

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

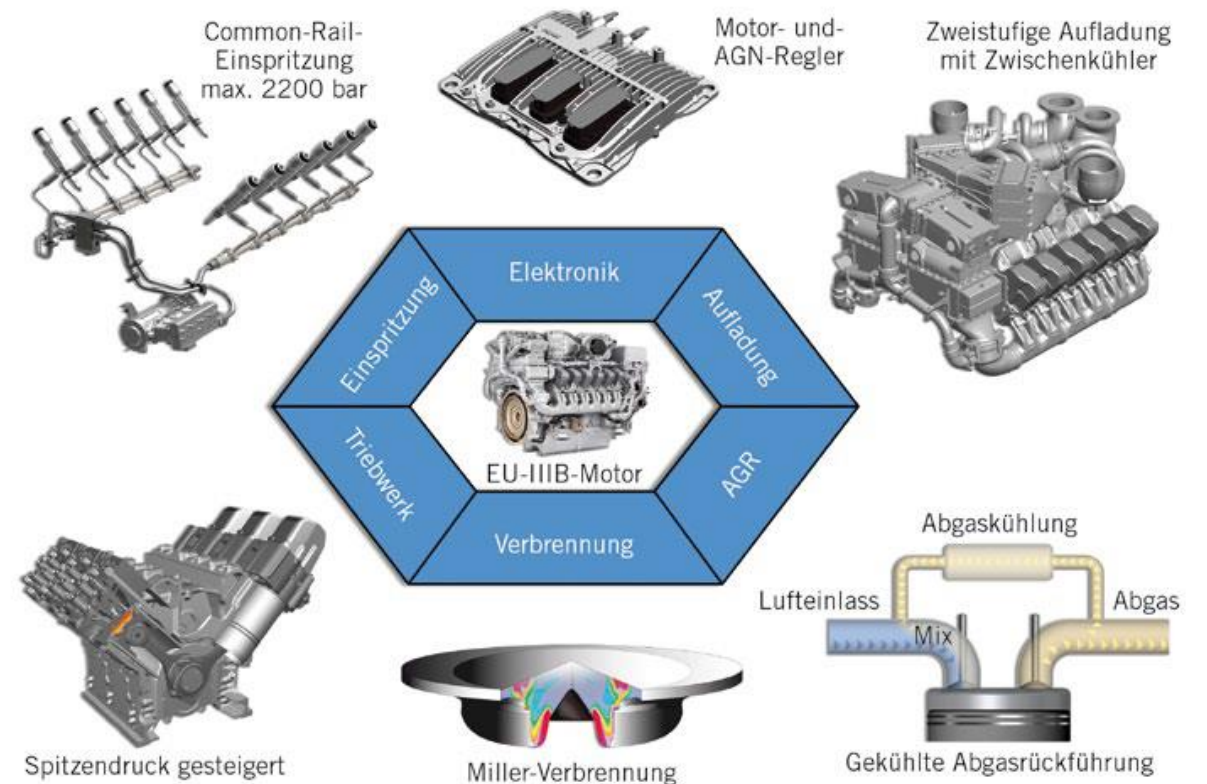
Abbildungen: © MTU

8.7 Abgasproblem und Lösungsansätze

Zusammenfassung – Schlüsseltechnologien zur Emissionsreduzierung am Beispiel MTU

Innermotorische Emissionsreduzierung

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



Abbildungen: © MTU

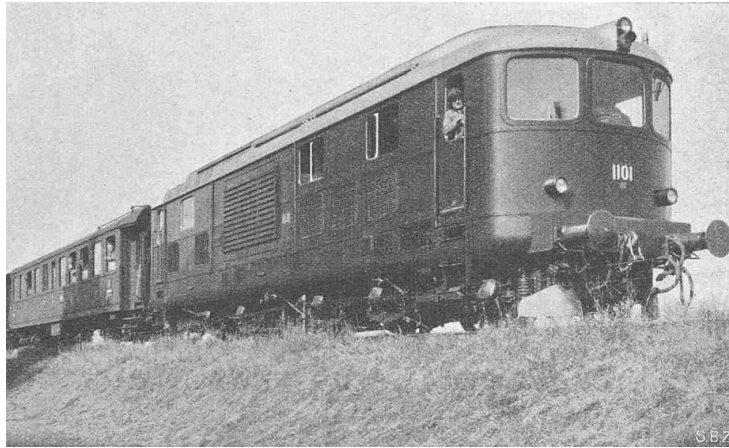


Schienenfahrzeuge mit Gasturbinen-Antrieb

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:

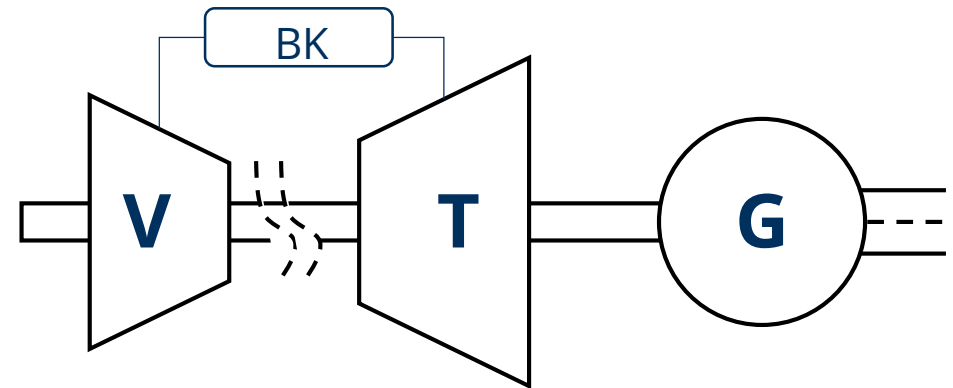
- Leistungssteigerung im Güterverkehr auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten

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



es bedeuten:

V	Verdichter
BK	Brennkammer
T	Turbine
G	elektrischer Generator

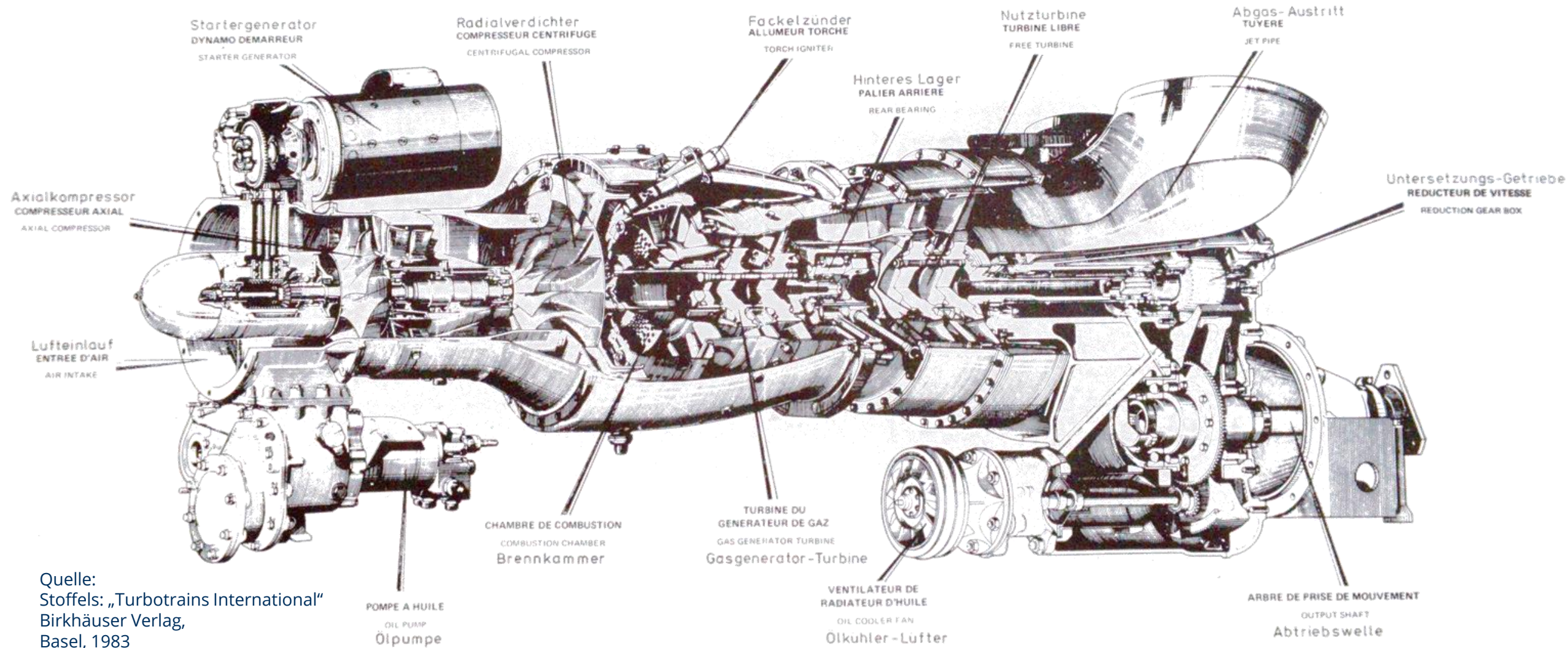
Nutzleistung = Turbinenleistung - Verdichterleistung

Effizienz abhängig von:

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

8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

Hauptbaugruppen:



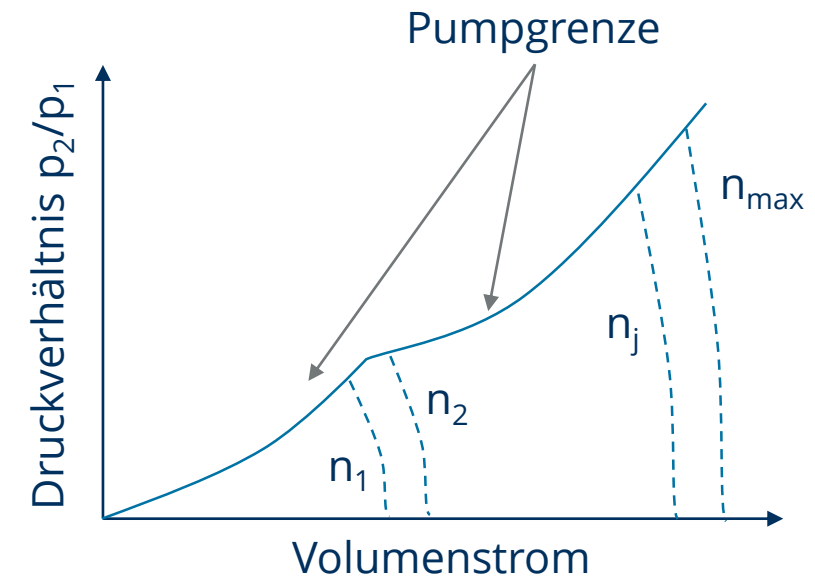
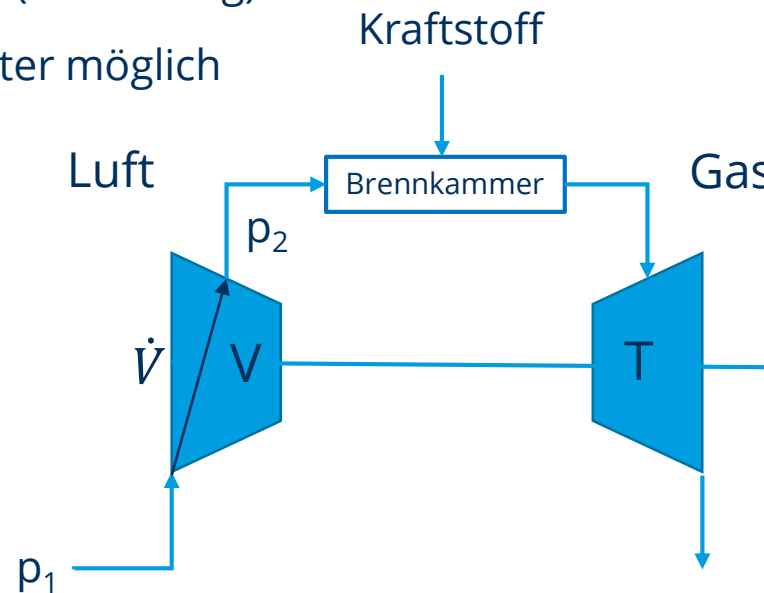
Quelle:
Stoffels: „Turbotrains International“
Birkhäuser Verlag,
Basel, 1983

8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

Hauptbaugruppen

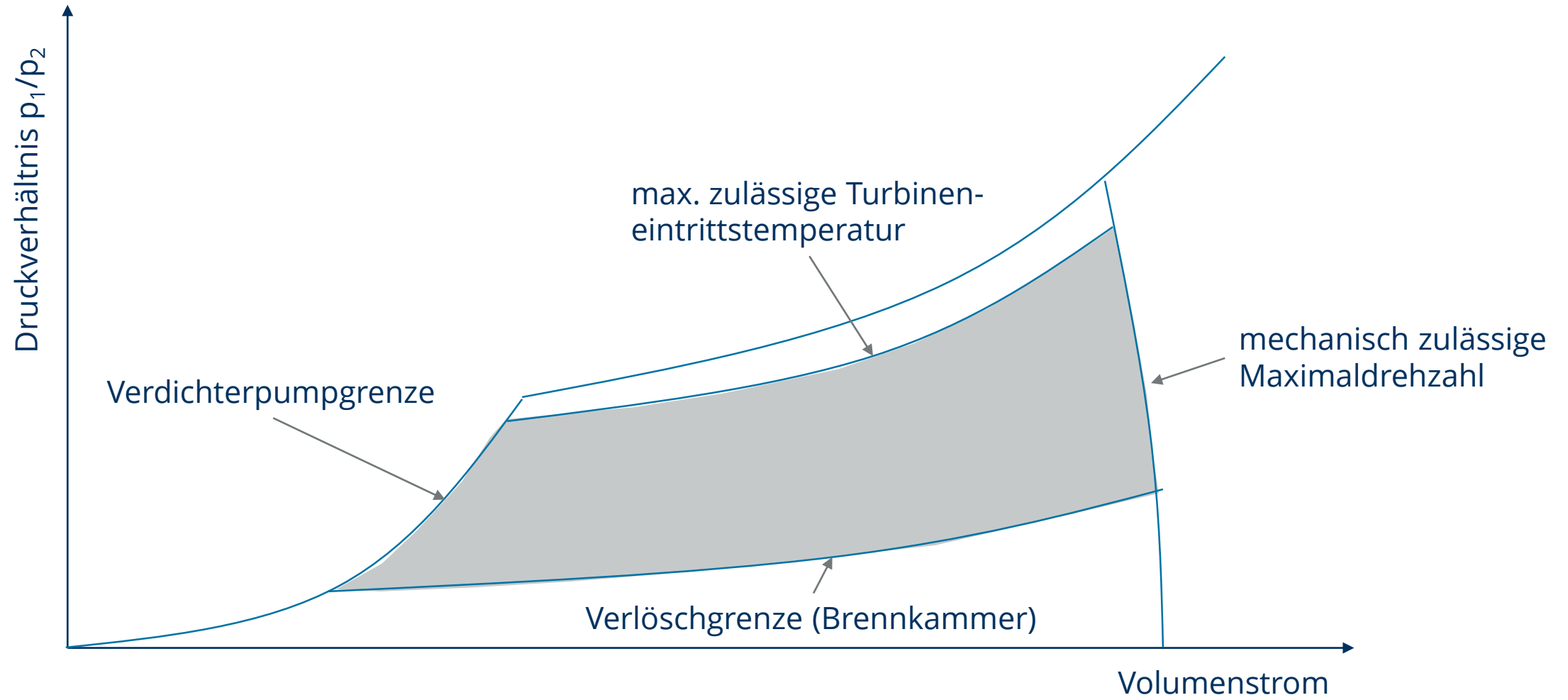
Verdichter:

- 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



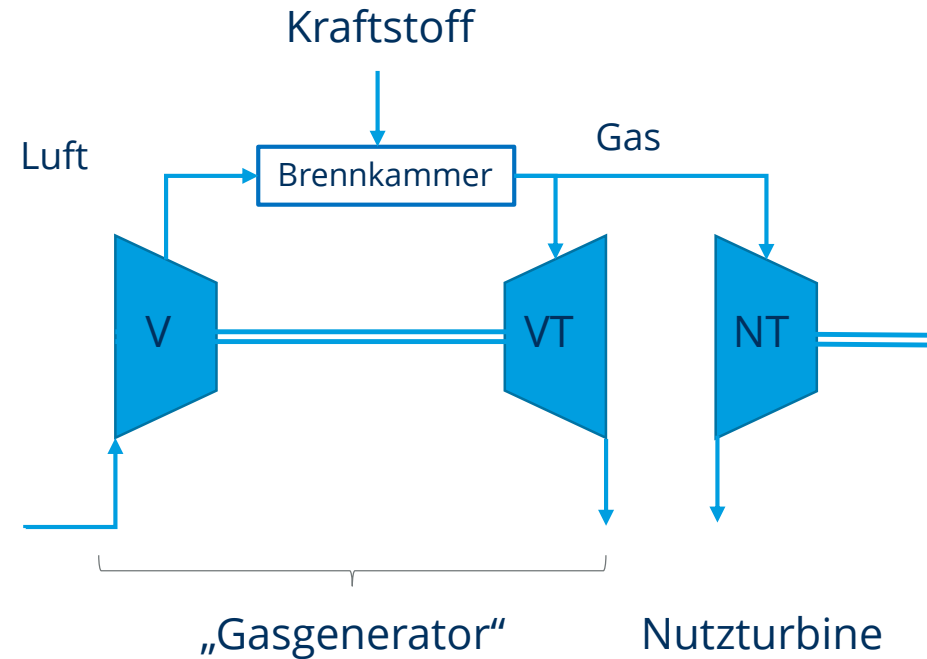
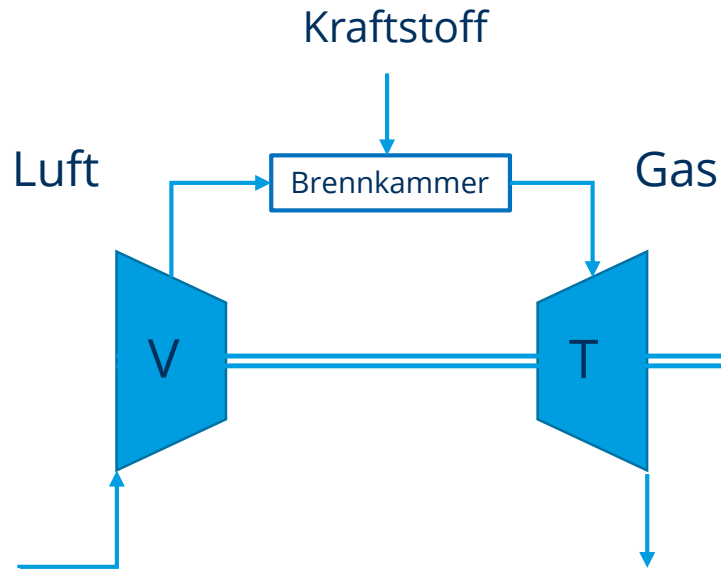
8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

Betriebsgrenzen der Gasturbine



8.8 Gasturbinen in der Schienenfahrzeugtechnik

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



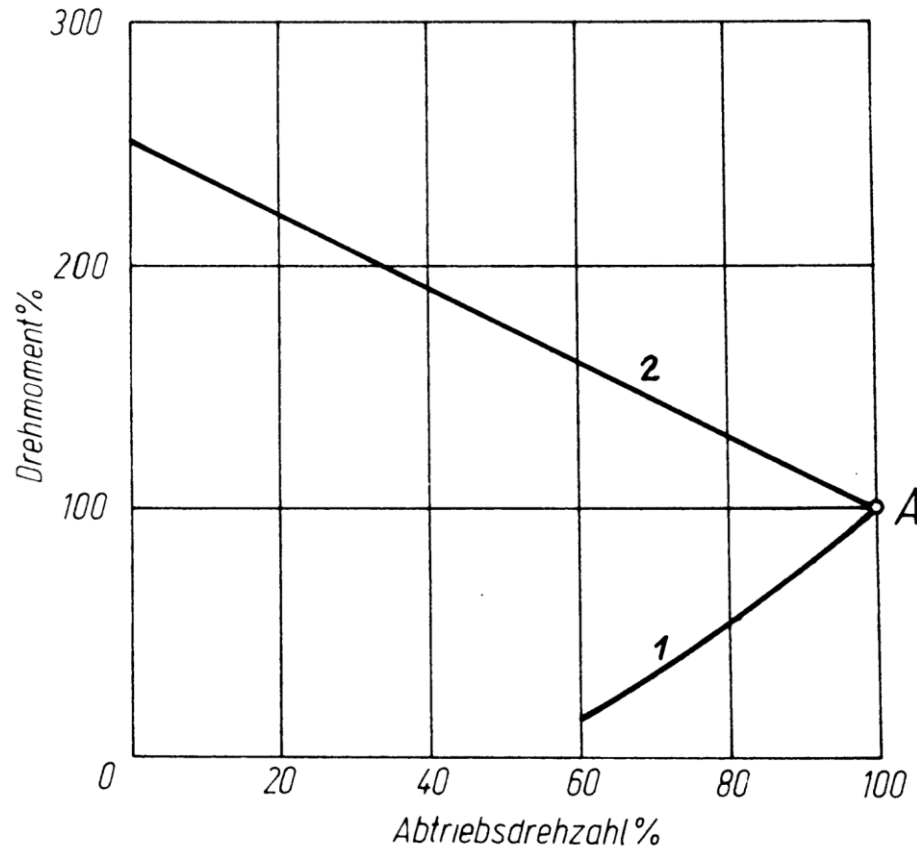
- kein Anfahr Drehmoment generierbar
- schmaler nutzbarer Drehzahlbereich (ca. $0,55 \dots 1,0 n_{\max}$)
- gut mit elektrischer Leistungsübertragung kombinierbar

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

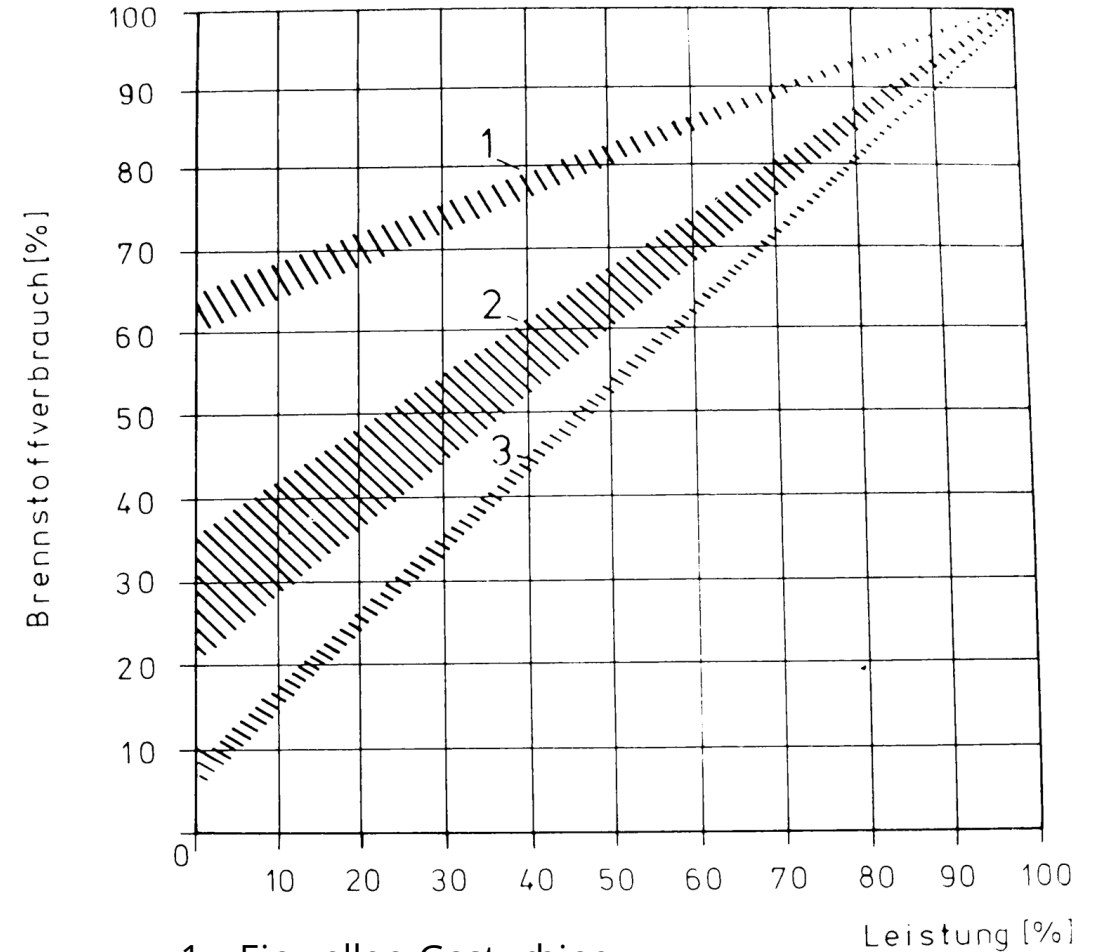
8.8 Gasturbinen in Schienenfahrzeugen

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

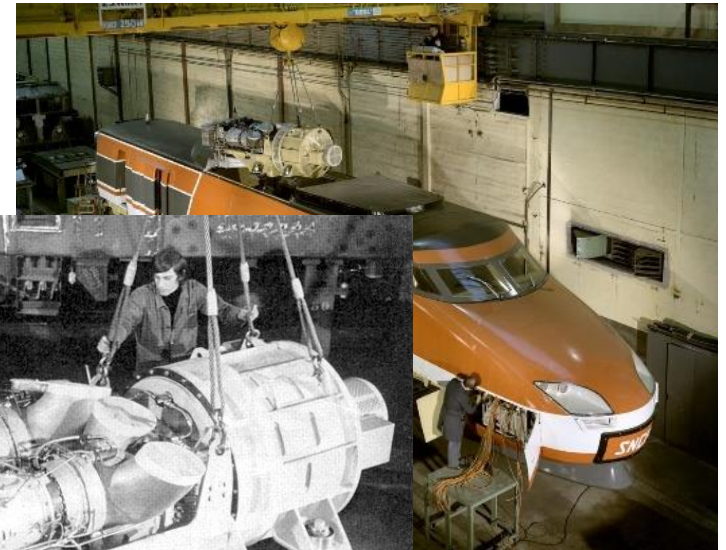
SNCF TGV 001 (1972)

- 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

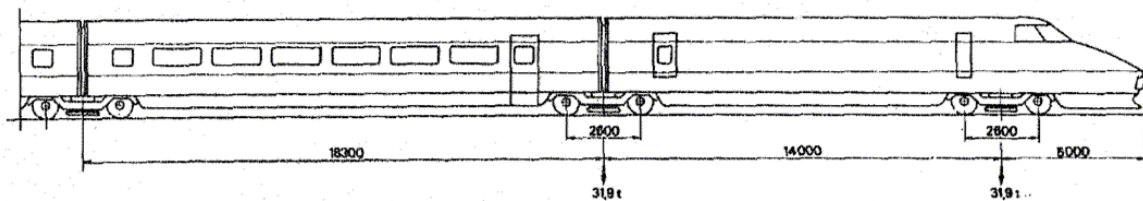
- Gesamtleistung: 4400 kW
- $v_{\text{max}} = 300 \text{ km/h}$ (vorgesehene Betriebsgeschwindigkeit)



Foto: railpictures.com/© Jean-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 Vollast
- 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

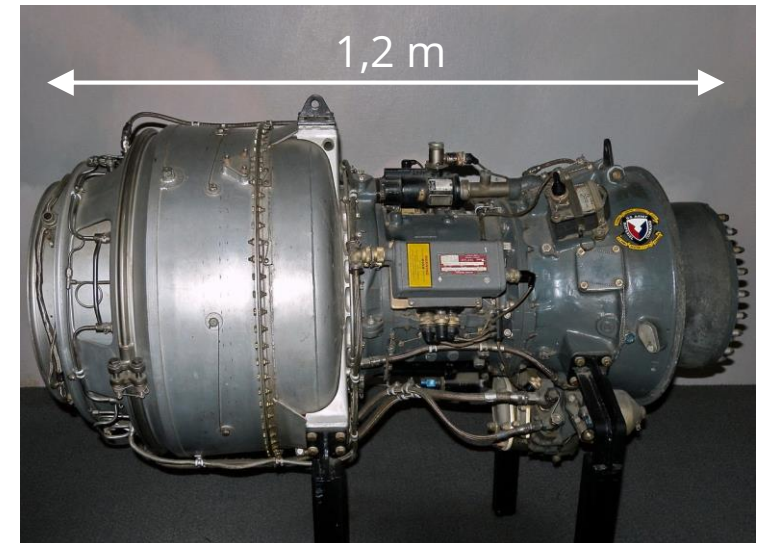


Foto: Wikipedia/Cliff

8.8 Gasturbinen in Schienenfahrzeugen

Referenzfahrzeuge mit Gasturbinenantrieb

DB BR 210 (1970) – Lycoming T53-L

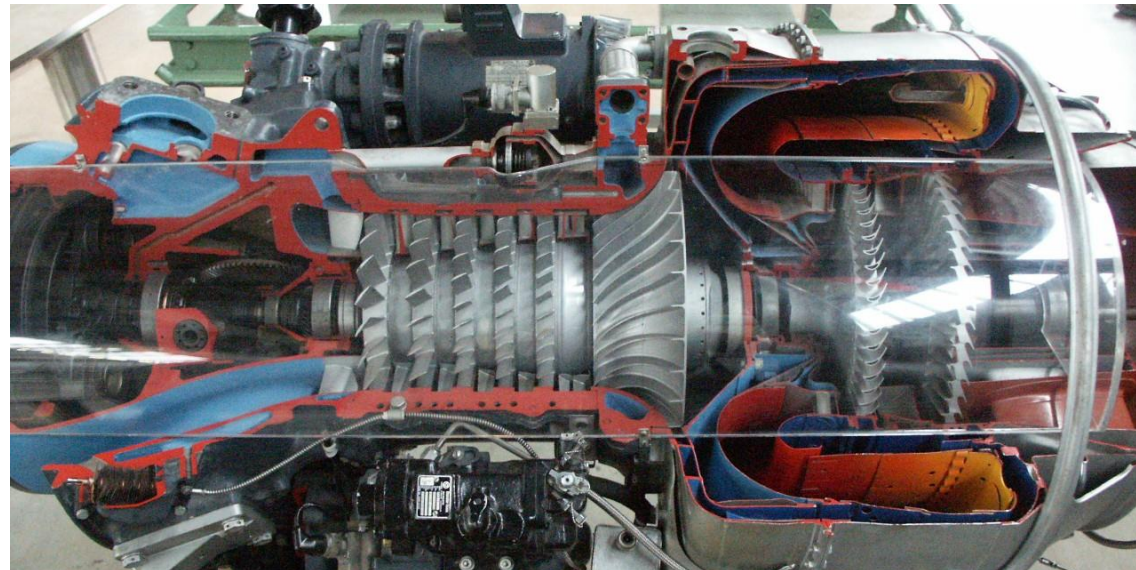
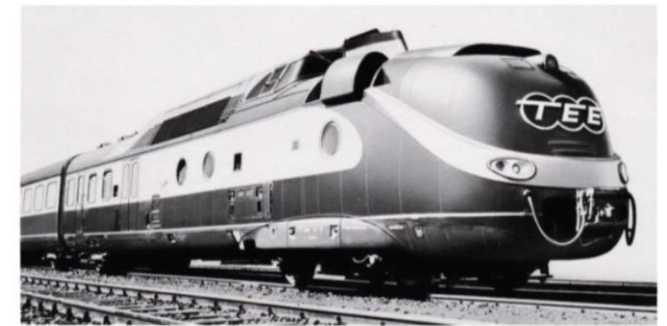


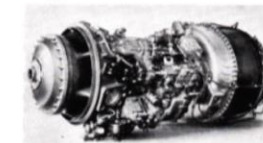
Foto: Wikipedia/Sleipnir



**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 1.200 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-Lädegerät |
| 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 Hilfsbetriebe-Transformator | 27 Fahrmotorlüfter |
| 14 Primär-Luftfilter | 29 Batterien |
| 15 Sekundär-Luftfilter GT | 31 Bremswiderstand |
| 16 HVAC-Anlage | 32 Abgasschalldämpfer |
| 17 Umrichteranlage | |

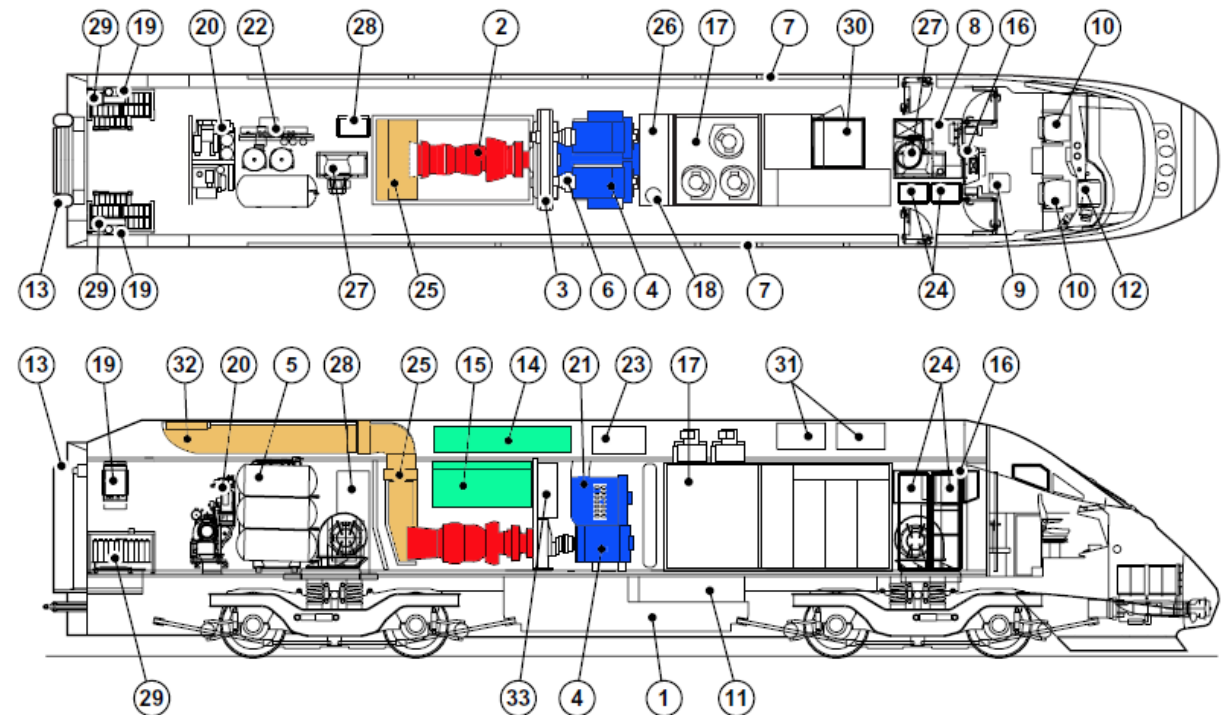


Foto (o.): © Bombardier, Abbildung (u.): turotrain.net

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