



VERBRENNUNGSKRAFTMASCHINEN II

Prof. Dr.-Ing. Kurt Imren YAPICI

8 Aufladung 2

9 Gestaltungsmerkmale

10 Kräfte und Momente

11 Öl- und Kühlkreislauf

12 Reibung

13 Mess- und Prüftechnik

14 Hybridtechnik

ältere Auflagen tw. veraltet

Einführend - Übersichten:

- Otto- und Dieselmotoren, Grohe / Russ, Vogel Fachbuch, 14. Auflage, 2007
- Handbuch der Kfz-Technik, Band 1, Balzer u.a., Motorbuch Verlag, 2000

Vertiefend:

- Verbrennungsmotoren, Merker / Schwarz / Stiesch / Otto, Teubner, 2004
- • Ottomotoren-Management, Bosch, Vieweg, 3. Auflage, 2005
- • Dieselmotoren-Management, Bosch, Vieweg, 4. Auflage, 2004
- • Kraftfahrzeug-Motoren, Küntscher / Hoffmann, Vogel, 4. Auflage, 2006
- Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Bosch, 26. Auflage, 2007
- • Handbuch Verbrennungsmotor, v. Basshuysen / Schäfer, Vieweg, 4. Auflage, 2005
- • Handbuch Dieselmotoren, Mollenhauer, 3. Auflage, 2007 (Springer e-Book)
- Internal Combustion Engine Fundamentals, Heywood, McGraw-Hill, 1988

Bücher vor 2000 sind in Details zur Gemischbildung / Brennverfahren / Abgasnachbehandlung veraltet.

Sehr zu empfehlen:

- MTZ, Motortechnische Zeitschrift (Bibl. Paul-Bonatz)

Verbrennungskraftmaschinen II

Kapitel 8

Aufladung von Verbrennungsmotoren

8 Aufladung

Gliederung

- Einteilung, Aufteilung, allg. Aufbau
- Downsizing
- Abgasturboaufladung
 - Funktionsweise
 - Konstruktiver Aufbau
- Mechanische Aufladung
 - Aufladesysteme
 - Funktionsweise
 - Konstruktiver Aufbau

8 Aufladung

Einleitung

- Hauptaufgabe der Aufladung : Erhöhung der Frischladungsmasse
- Bedienung des Ansaugtraktes mit Luft höherer Energiedichte
- Dazu Verdichtung der Ansaugluft, ggf. mit Kühlung
- Erforderliche Arbeit aus :
 - Abgas
 - mechanisch
 - elektrisch
 - sonst

8 Aufladung

Aufteilung

Aufladesysteme

Abgasturboaufladung

Nutzung Abgasenergie
(Turbomaschine)

mech. Aufladung

separater Antrieb

sonstige Systeme

elektrischer Antrieb
Impulsaufladung

8 Aufladung

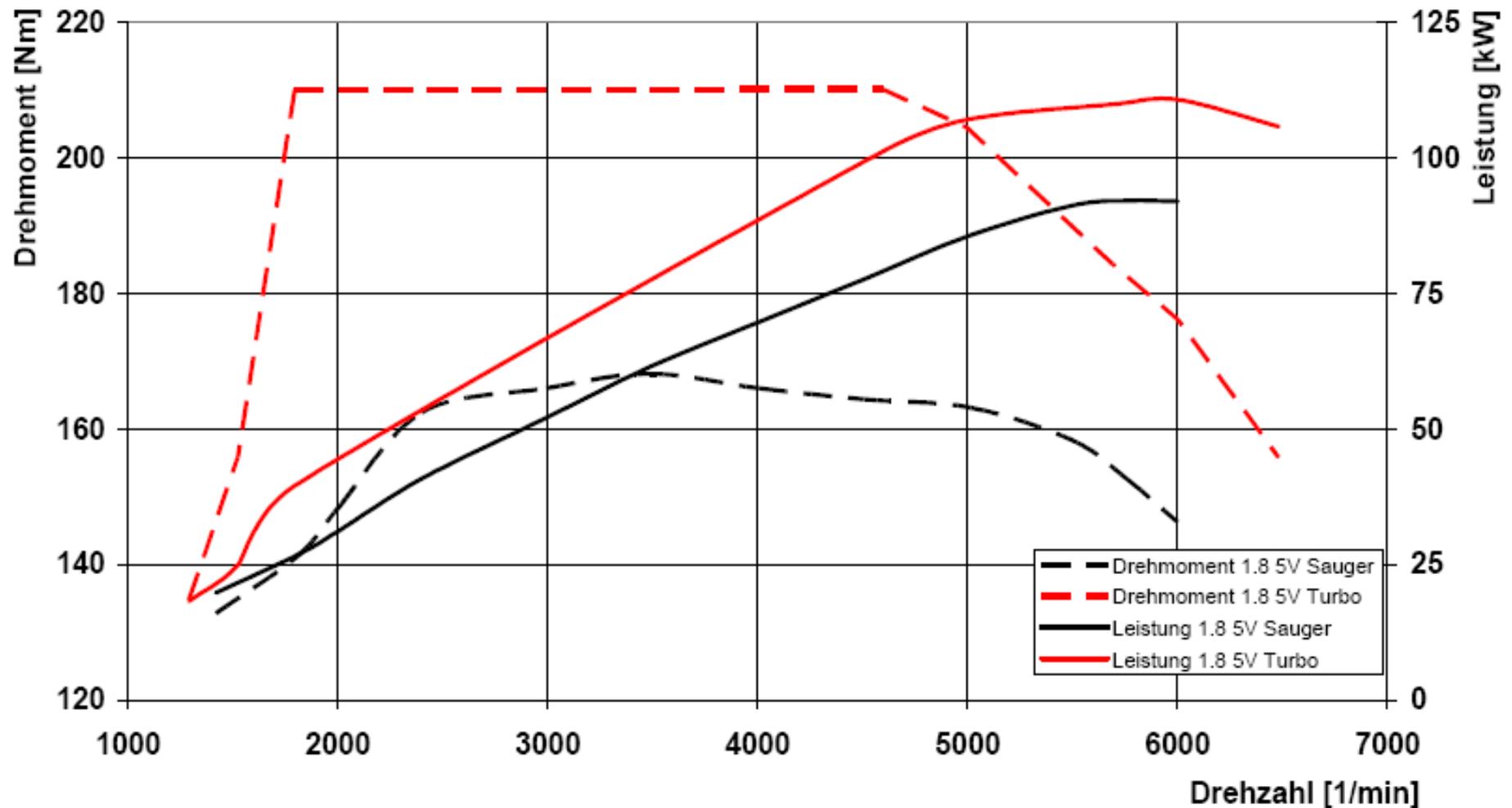
Verbesserung durch Aufladung

- Leistungssteigerung
- Drehmomentverlauf
- Leistungsverhalten im Höhenbetrieb
- Abgasverhalten
- Geräusch
- Kraftstoffverbrauch
- Ladungswechsel

8 Aufladung

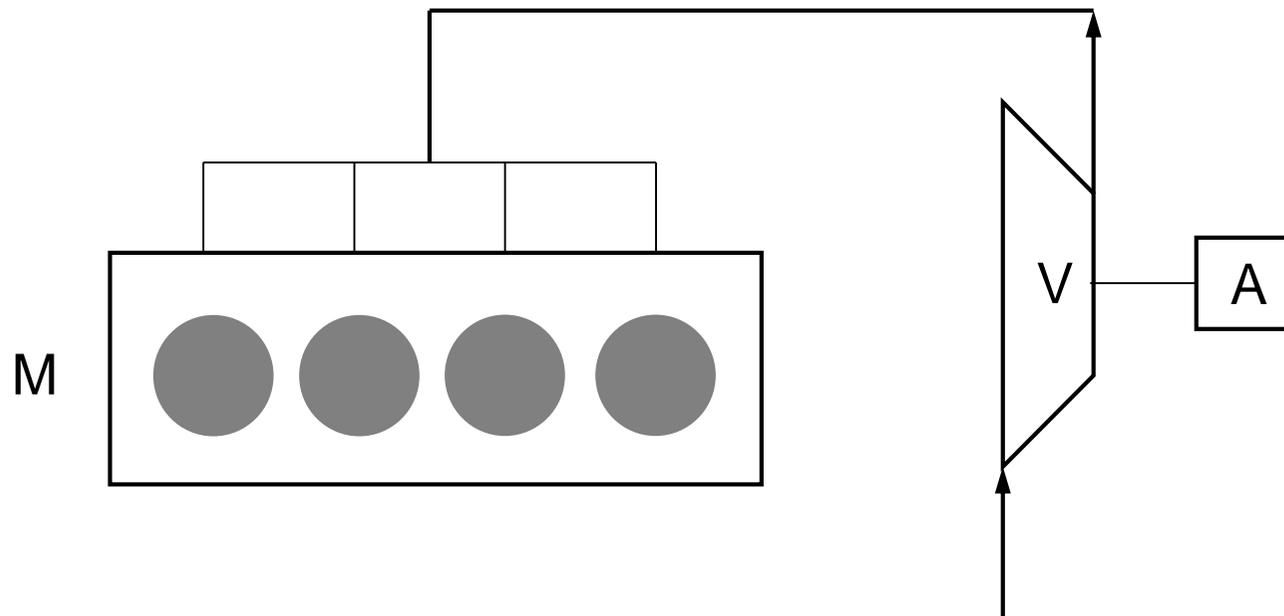
Vergleich Saugmotor / Turbomotor

Drehmoment und Leistungsvergleich
Audi 1.8 5V als Saugmotor- und Turbovariante



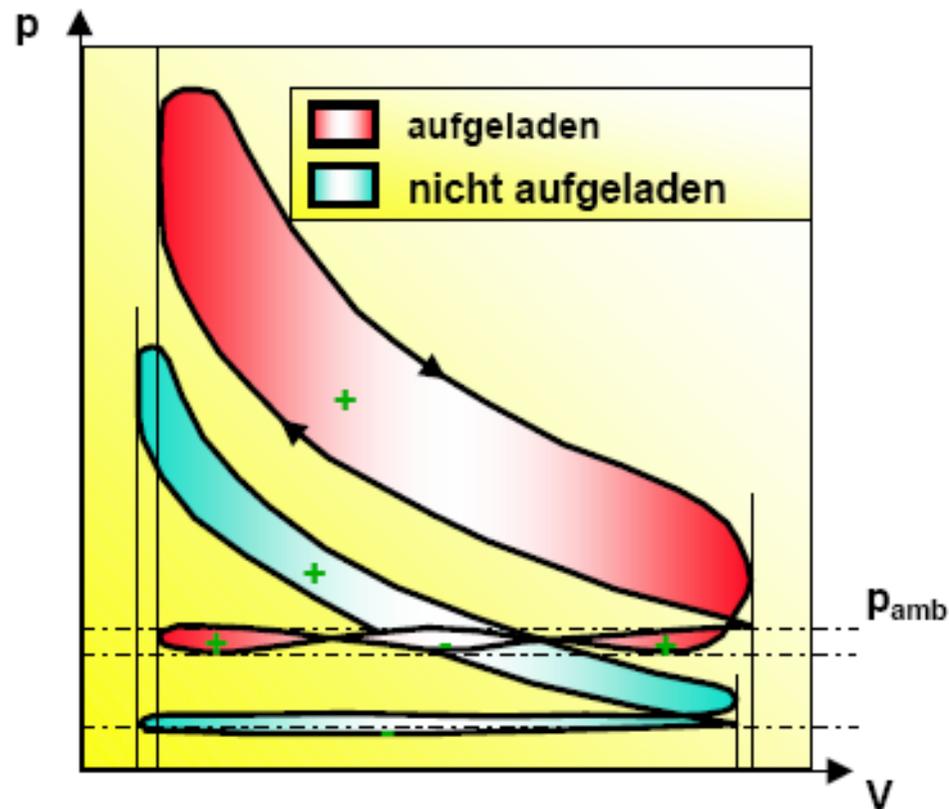
8 Aufladung

Allgemeiner Aufbau



8 Aufladung

Prinzipielle Funktionsweise



Leistungsgleichung:

$$\begin{matrix} \uparrow P_e \\ \text{Leistung} \end{matrix} = V_H \cdot n \cdot \begin{matrix} \uparrow p_{me} \\ \text{eff. Mittel-} \\ \text{druck} \end{matrix}$$

Hub- Dreh-
volumen zahl

8 Aufladung

Prinzipielle Funktionsweise

$$\begin{array}{ccccccc} \uparrow P_e & = & V_H & \cdot & n & \cdot & \uparrow p_{me} \\ \text{Leistung} & & \text{Hub-} & & \text{Dreh-} & & \text{eff.} \\ & & \text{volumen} & & \text{zahl} & & \text{Mittel-} \\ & & & & & & \text{druck} \end{array}$$

Downsizing - Frage : Was muss verändert werden, damit die Leistung erhalten bleibt, aber der VM verkleinert werden kann?

Antwort : Erhöhung der Drehzahl
 Erhöhung Mitteldruck

8 Aufladung

Prinzipielle Funktionsweise

Erhöhung der Drehzahl :

Die Drehzahlerhöhung geht quadratisch in die mechanische Belastung ein!

→ Erhöhung Mitteldruck

8 Aufladung

Lufteinsatz und Motorleistung

$$\dot{m}_L = \dot{m}_B \cdot L_{St} \cdot \lambda$$
$$l_e = \frac{\dot{m}_L}{P_e}$$

$$l_e = b_e \cdot L_{St} \cdot \lambda$$

$$\bullet b_e = \frac{b_i}{\eta_m}$$

$$\bullet b_i = \frac{1}{H_u \cdot \eta_i}$$

l_e = effektiver spezifischer Luftverbrauch

$$l_e = \frac{L_{St} \cdot \lambda}{H_u \cdot \eta_i \cdot \eta_m} \quad \text{<analog } l_i \text{>}$$

Otto (PKW):

($\epsilon = 10,0$), $b_e = 270 \text{ g/kWh}$ (Nennleistung), $\lambda = 1$
($b_e = 240 \text{ g/kWh}$ Bestpunkt)

$$l_e = 270 \cdot 14,5 \cdot 1 \cdot \text{g/kWh} = 3,9 \text{ kg/kWh}$$

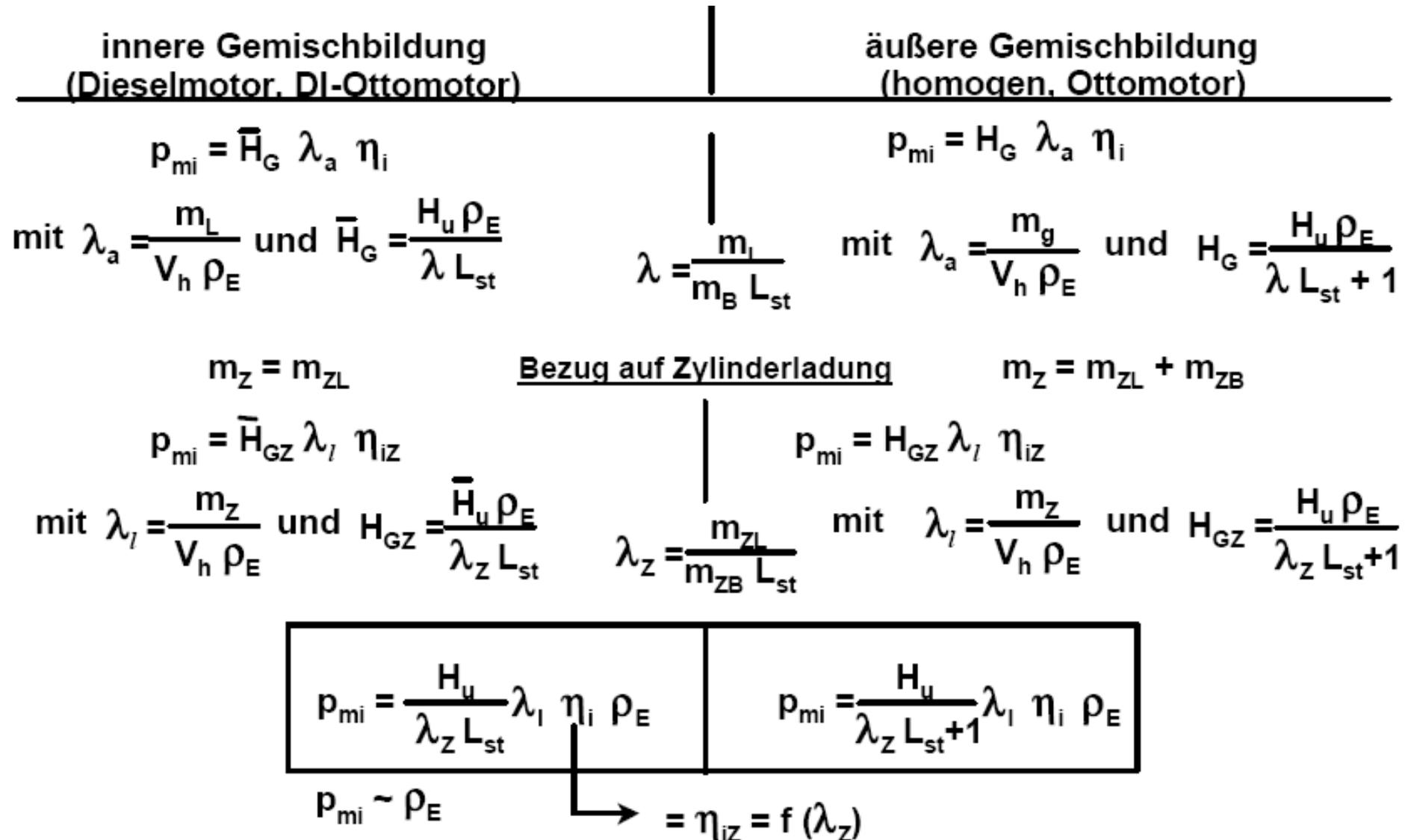
DI-Diesel (PKW):

($\epsilon = 19,5$), $b_e = 245 \text{ g/kWh}$ (Nennleistung), $\lambda = 1,4$
($b_e = 205 \text{ g/kWh}$ Bestpunkt)

$$l_e = 245 \cdot 14,6 \cdot 1,4 \cdot \text{g/kWh} = 5,0 \text{ kg/kWh}$$

8 Aufladung

Gemischdichte und indiz. Mitteldruck



8 Aufladung

Liefergrad

$$p_{mi} = \frac{H_u}{\lambda_z L_{St(+1)}} \lambda_l \cdot \eta_i \cdot p_E$$

$$\lambda_l = f(p_E, T_E) \quad p_E \uparrow \quad T_E \uparrow$$

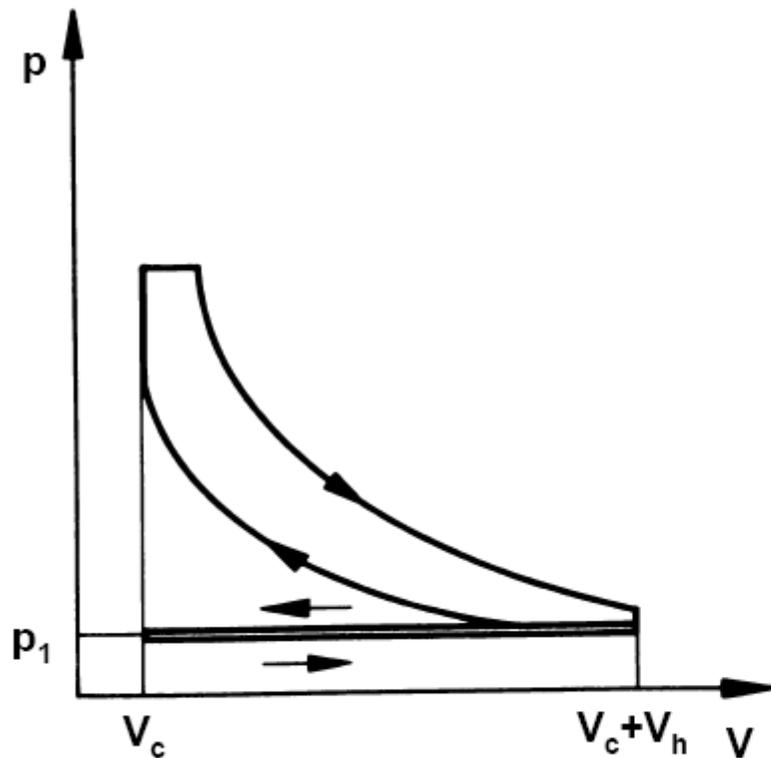
a) $T_E > T_{E0} : \lambda_l > \lambda_{l0}$

empirisch $\frac{\lambda_l}{\lambda_{l0}} = \left(\frac{T_E}{T_{E0}} \right)^a$ 0,2 0,25

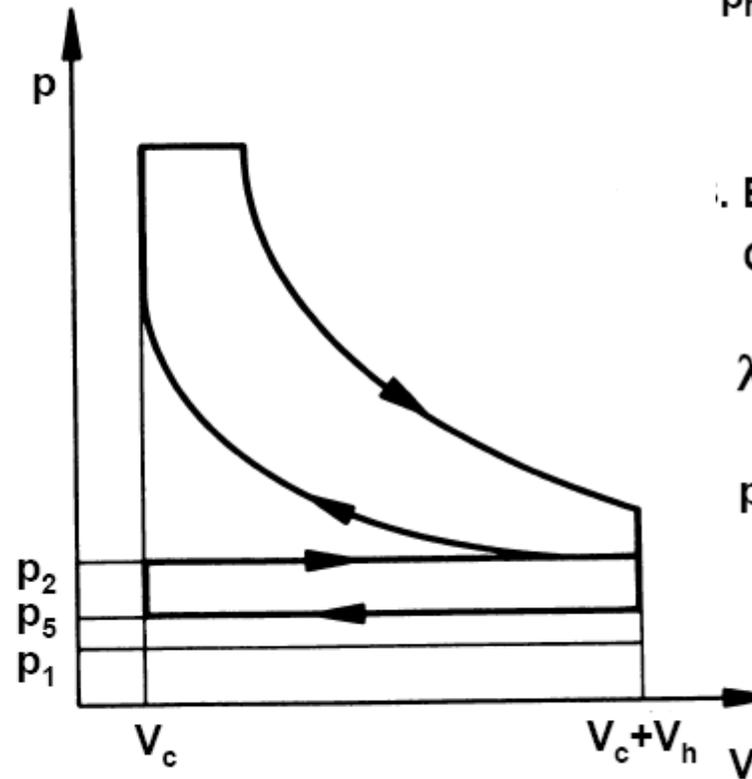
Vollst. Restgasspülung: $\frac{\lambda_l}{\lambda_{l0}} = \left(\frac{T_E}{T_{E0}} \right)^a \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}$

8 Aufladung

Einfluss der Gaswechsellarbeit



ohne Aufladung



mit Aufladung

$$p_{mi} = \frac{H_u}{\lambda_z L_{St(+1)}} \lambda_l \cdot \eta_i \cdot p_E$$

Einfluss der positiven Gaswechsellarbeit:

$$\lambda_z = \text{konst.}, p_E = p_A : \eta_i = \eta_{i0}$$

$$p_E > p_A : p_{mi} = p_{mi}^* + p_E - p_A$$

8 Aufladung

Mitteldruck bei Aufladung

$$p_{mi} = \frac{H_u}{\lambda_z L_{st} + 1} \lambda_l \eta_i \rho_E \quad \text{mit } \eta_i H_u = \frac{1}{b_i} : = \frac{\lambda_l}{\lambda_z L_{st} + 1} \frac{\rho_E}{b_i}$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_z = \text{konst} \\ p_E = p_A \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} \eta_i = \eta_{io} \\ p_{mi} = p_{mi}^* \end{array} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_{mi}^*}{p_{mio}} = \frac{\cancel{H_u} \cdot \lambda_l \cdot \cancel{\eta_i} \cdot \rho_E}{\cancel{H_u} \cdot \lambda_{lo} \cdot \cancel{\eta_{io}} \cdot \rho_{Eo}} = \frac{\lambda_l}{\lambda_{lo}} \cdot \frac{\rho_E}{\rho_{Eo}}$$

$\left(\frac{T_E}{T_{Eo}} \right)^a \left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \right] \quad \downarrow \text{Gasgleichung} \quad \frac{\rho_E}{\rho_{Eo}} \cdot \frac{T_{Eo}}{T_E}$

$$\frac{p_{mi}^*}{p_{mio}} = \frac{\rho_E}{\rho_{Eo}} \left(\frac{T_{Eo}}{T_E} \right)^{1-a} \left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \right]$$

$$p_{mi} = p_{mio} \frac{\rho_E}{\rho_{Eo}} \left(\frac{T_{Eo}}{T_E} \right)^{1-a} \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} + p_E - p_A$$

8 Aufladung

Mechanischer Wirkungsgrad bei Aufladung

$$\eta_{mM} = \frac{p_{meM}}{p_{meM} + p_{mrM}} = \frac{1}{1 + \frac{p_{mrM}}{p_{meM}}}$$

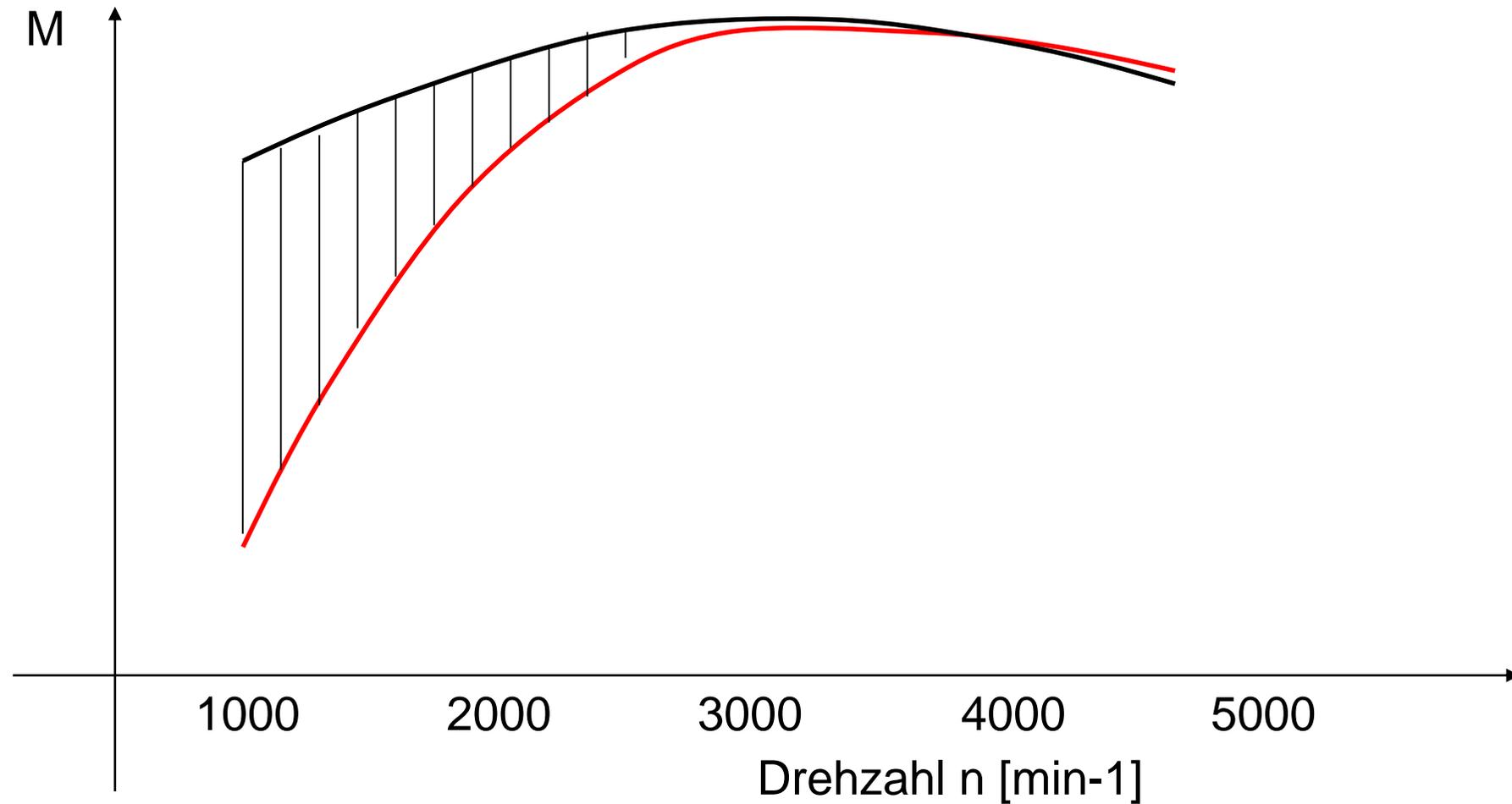
Aufladung: $p_{meM} \uparrow$; $p_{mrM} \uparrow$; $\frac{p_{mrM}}{p_{meM}} \downarrow$

$\Rightarrow \eta_{mM} \uparrow$

Der Anstieg der Reibkräfte ist kleiner als der Anstieg des Mitteldruckes.

8 Aufladung

Anfahrschwäche bei Turbomotoren



8 Aufladung

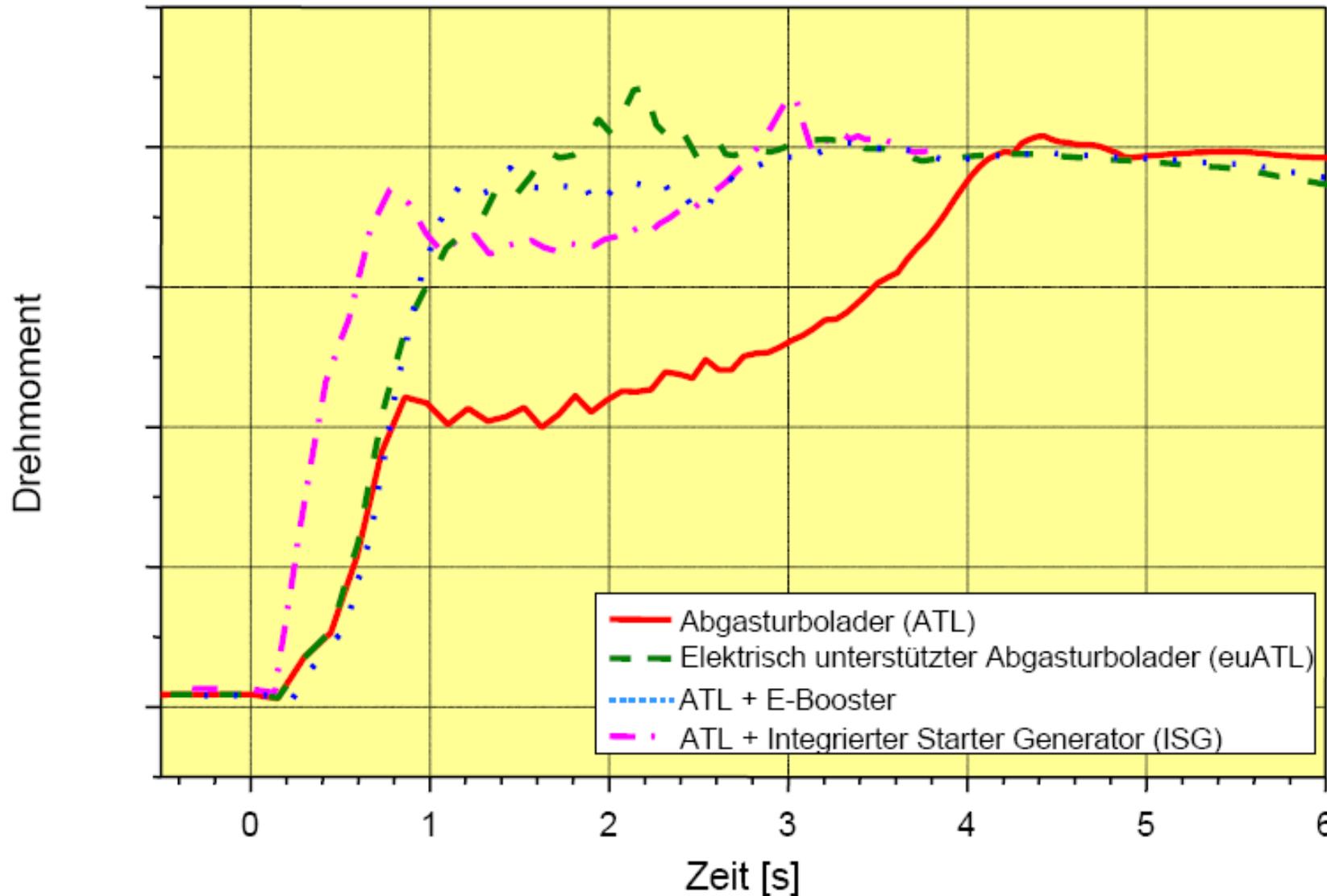
Anfahrschwäche bei Turbomotoren

Verbesserung des Low-End-Torque-Verhaltens :

- mechanische Aufladung
- verstellbare Leitschaufel
- zwei ATL
- Druckluft in die Turbine
- kleiner mech. Lader + ATL
- elektrisch unterstützter ATL (euATL)
- elektrisch angetriebener Verdichter

8 Aufladung

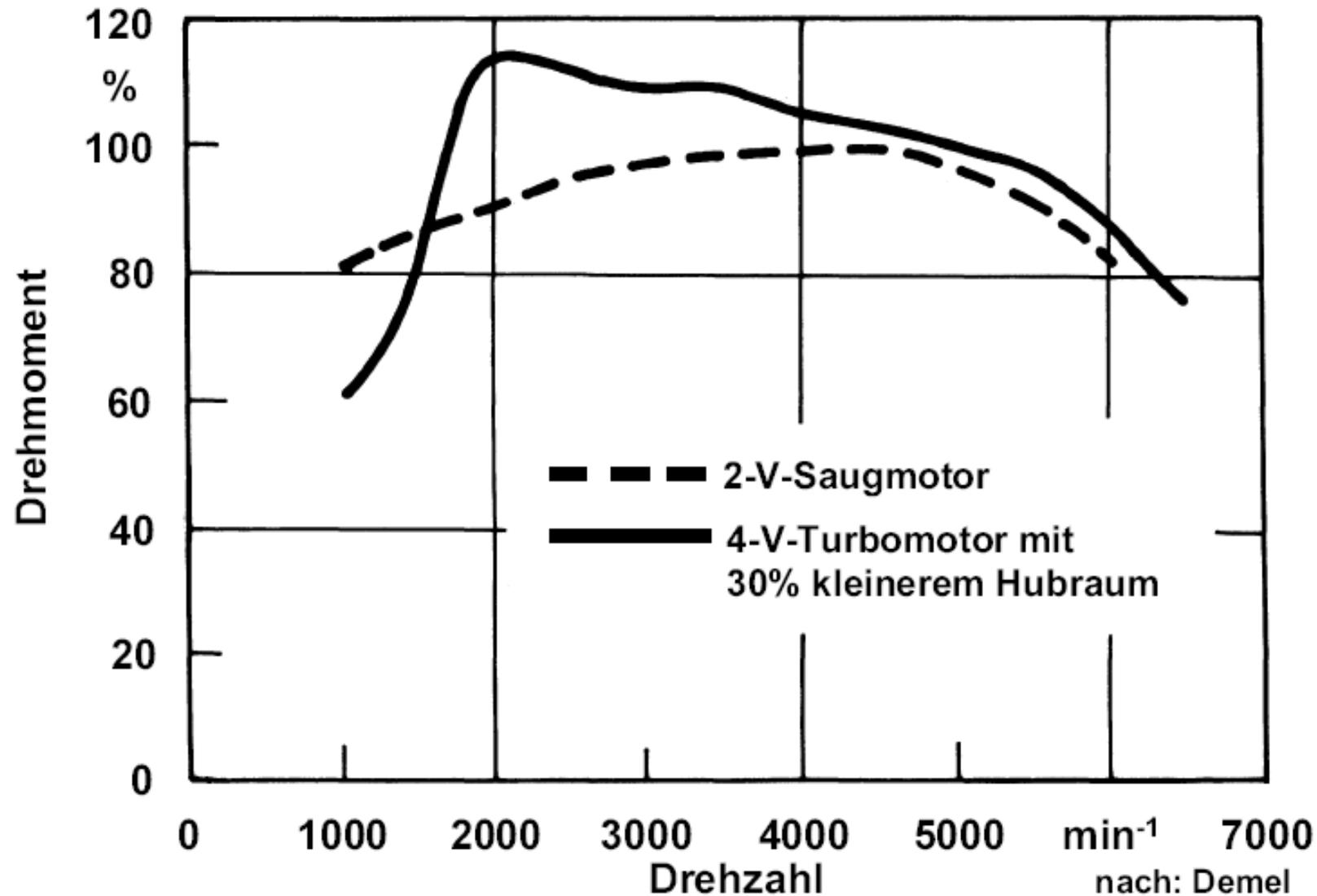
Anfahrschwäche bei Turbomotoren - Massnahmen



Quelle : TH Aachen

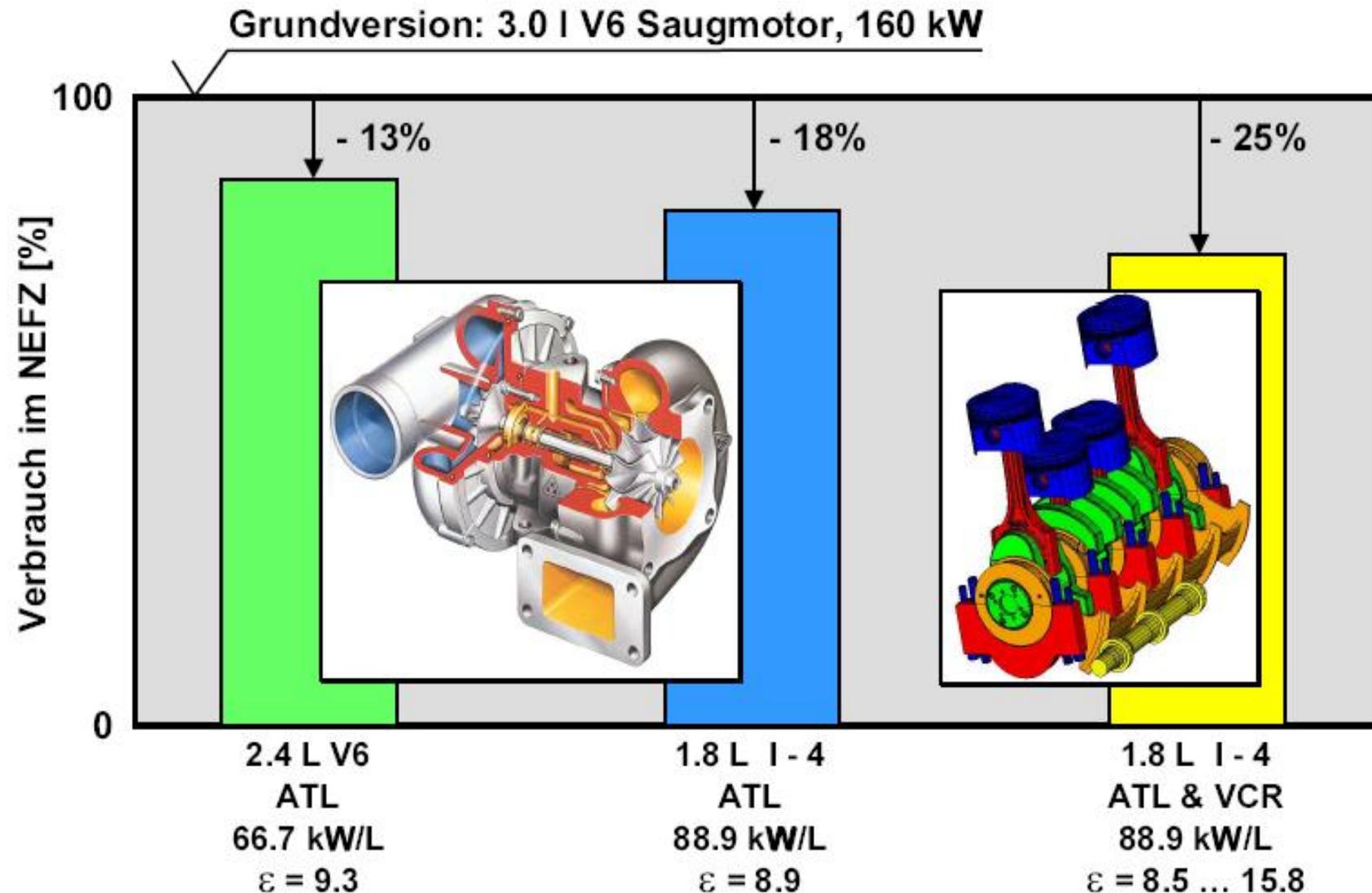
8 Aufladung

Downsizing – Turbomotor – Saugmotor



8 Aufladung

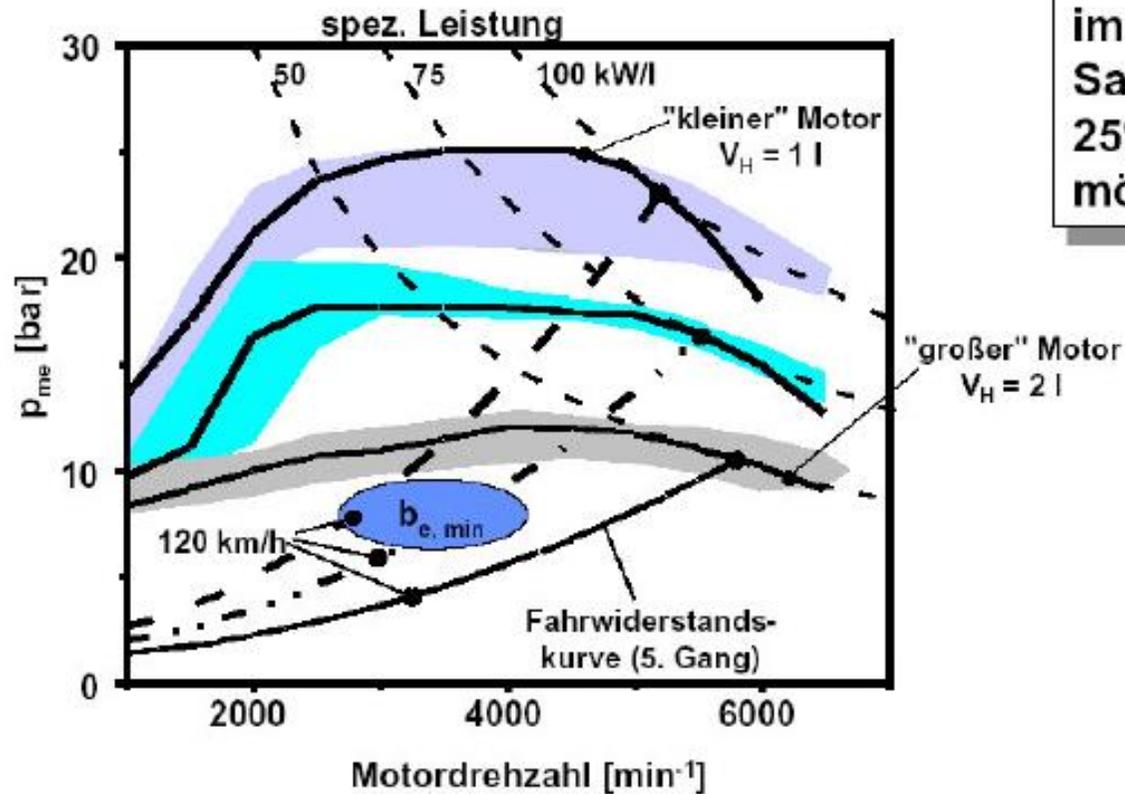
Downsizing – ATL mit var. Verdichtung



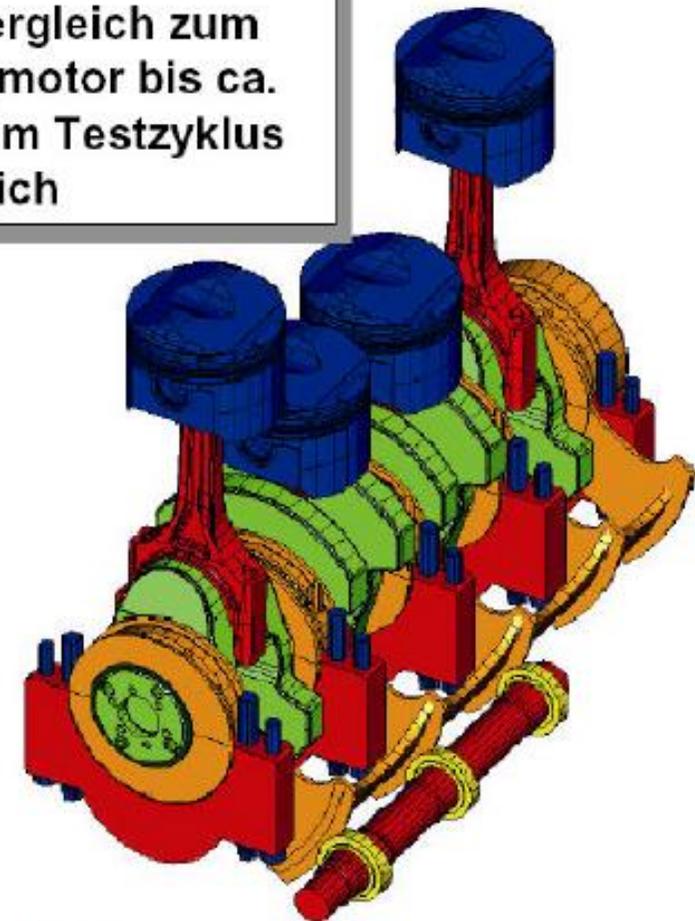
8 Aufladung

Downsizing – ATL mit var. Verdichtung

Hochdruckaufladung ...



Verbrauchsvorteil im Vergleich zum Saugmotor bis ca. 25% im Testzyklus möglich



... plus variables Verdichtungsverhältnis

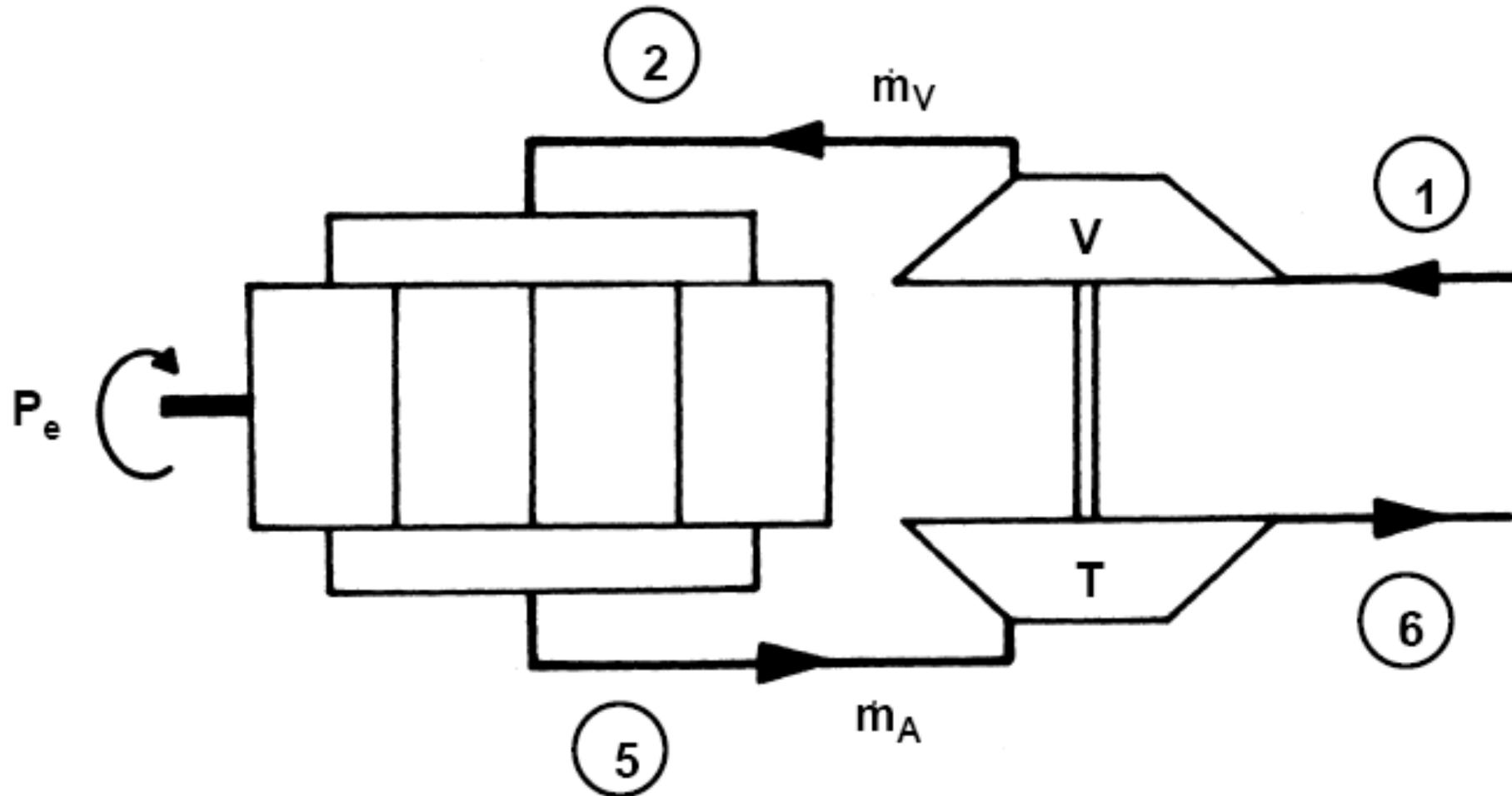
8 Aufladung

Umgesetzte Mitteldrücke

	aufgeladen		freisaugend
	$(p_2 - p_u)_{\max}$ [bar]	$p_{me \max}$ [bar]	$p_{me \max}$ [bar]
Diesel - Motoren	Nfz	bis 2,0	11 ÷ 22
	Pkw	0,5 ÷ 1,5	7 ÷ 9
Otto - Motoren	Pkw	12 ÷ 21	7,5 ÷ 8,5
	Rennmotoren (Formel 1)	0,4 ÷ 1,0	10 ÷ 14
		1,8 ÷ 2,0	31,9 ÷ 56
			—16,6

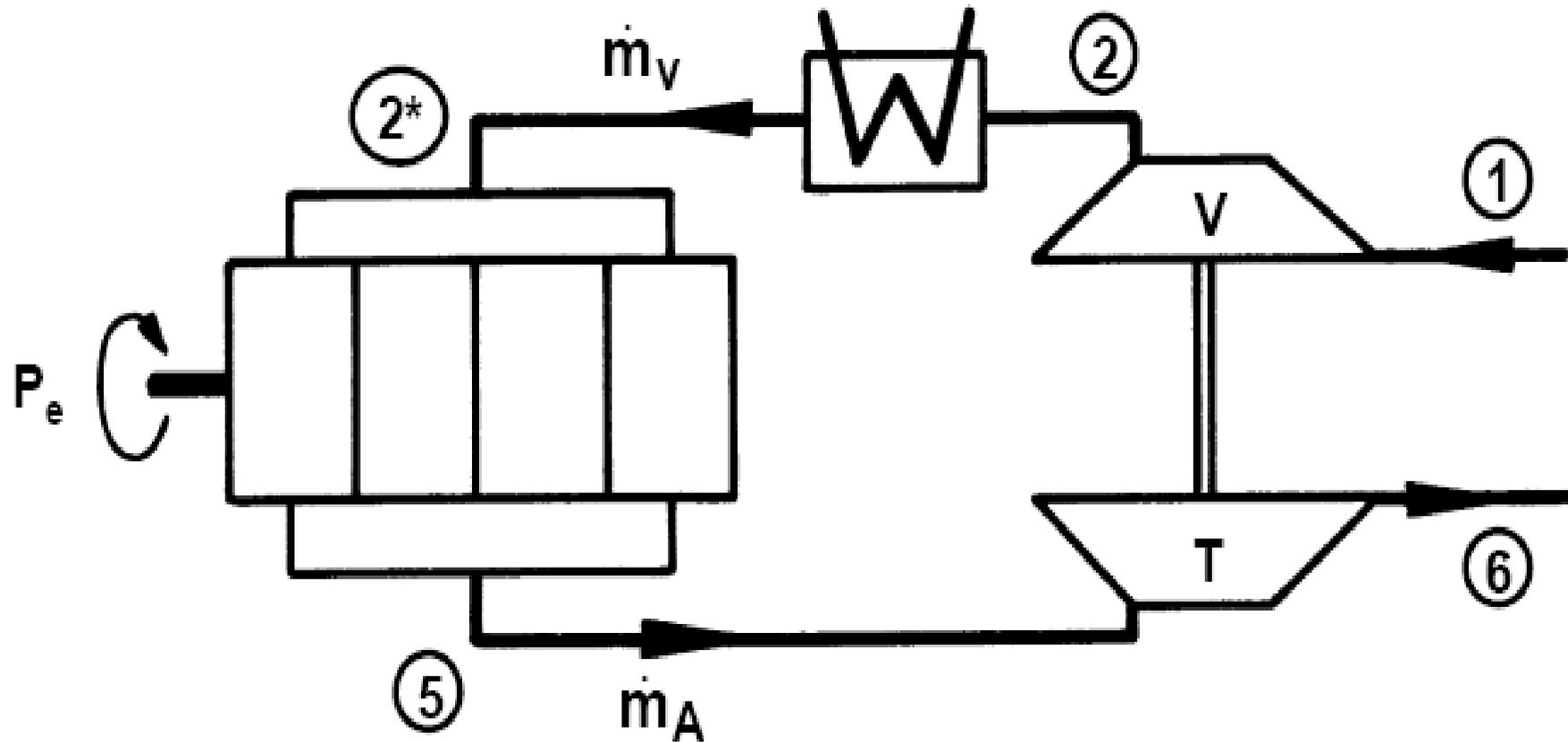
8 Aufladung

Abgasturboaufladung



8 Aufladung

Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung (LLK)

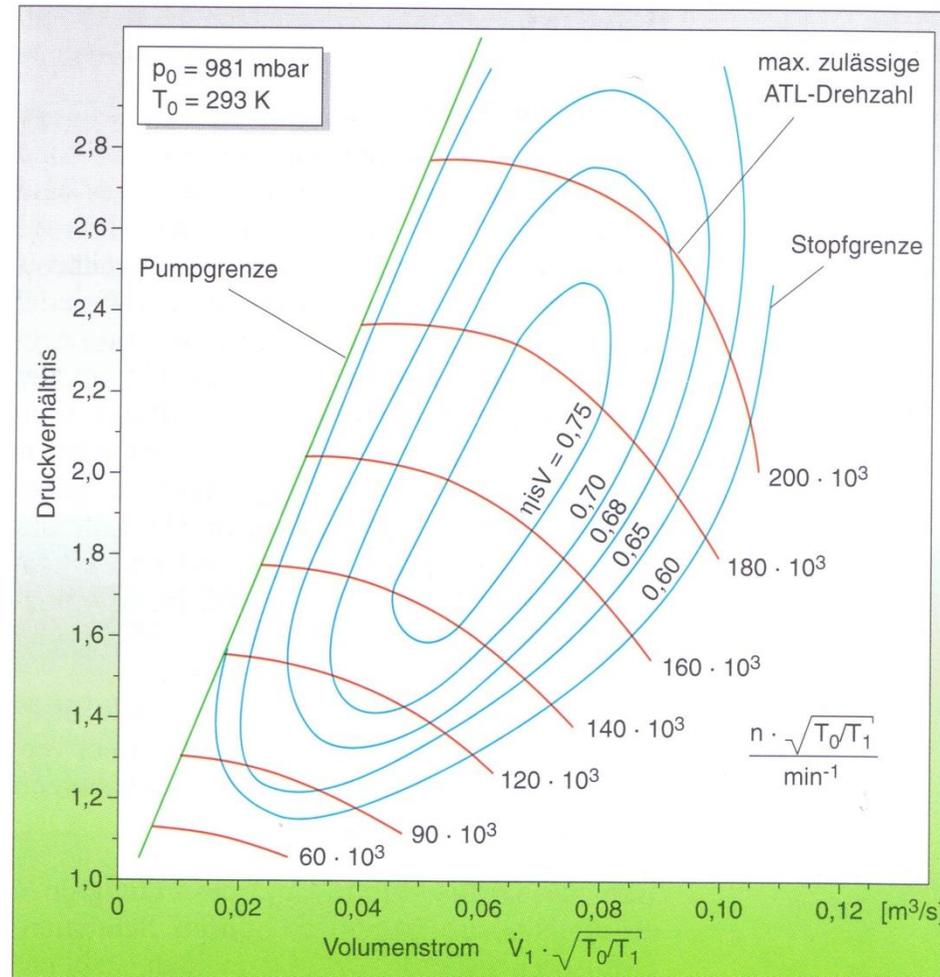


8 Aufladung

Abgasturboaufladung – Grenzen im Kennfeld

Pumpgrenze :

Bei zu kleinen Volumenströmen und zu hohen Druckverhältnissen löst sich die Strömung von den Verdichterschaufeln. Der Fördervorgang wird dadurch unterbrochen. Die Luft strömt rückwärts durch den Verdichter, bis sich ein stabiles Druckverhältnis mit positivem Volumenstrom einstellt. Der Druck baut sich erneut auf. Der Vorgang wiederholt sich in rascher Folge. Aus dem dabei entstehenden Geräusch leitet sich das Wort „pumpen“ ab.

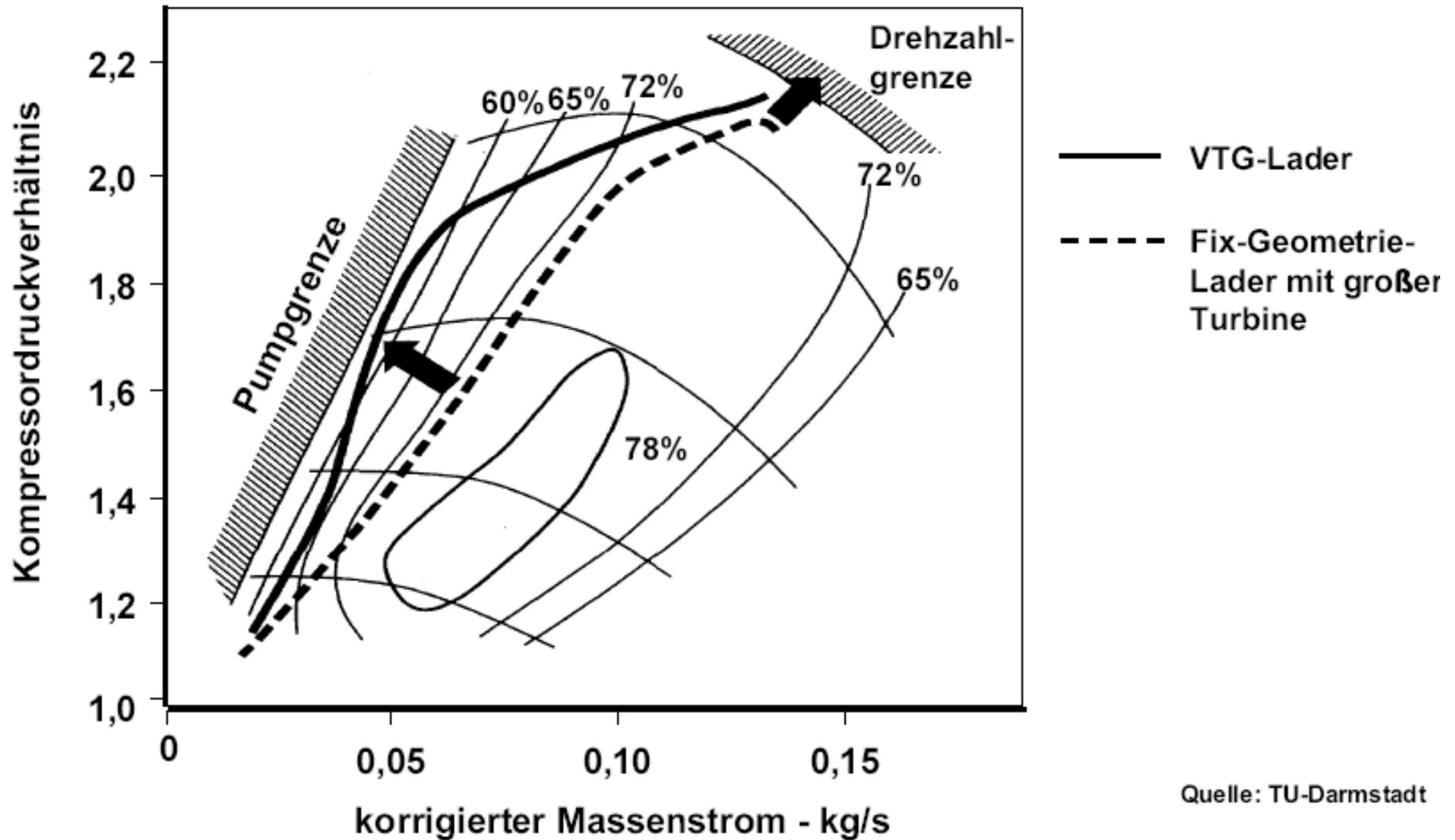


Stopfgrenze :

Der maximale Volumenstrom eines Radialverdichters ist in der Regel durch den Querschnitt am Verdichtereintritt begrenzt. Erreicht die Luft im Radeintritt die Schallgeschwindigkeit, so ist kein weiteres Anwachsen des Durchsatzes mehr möglich.

8 Aufladung

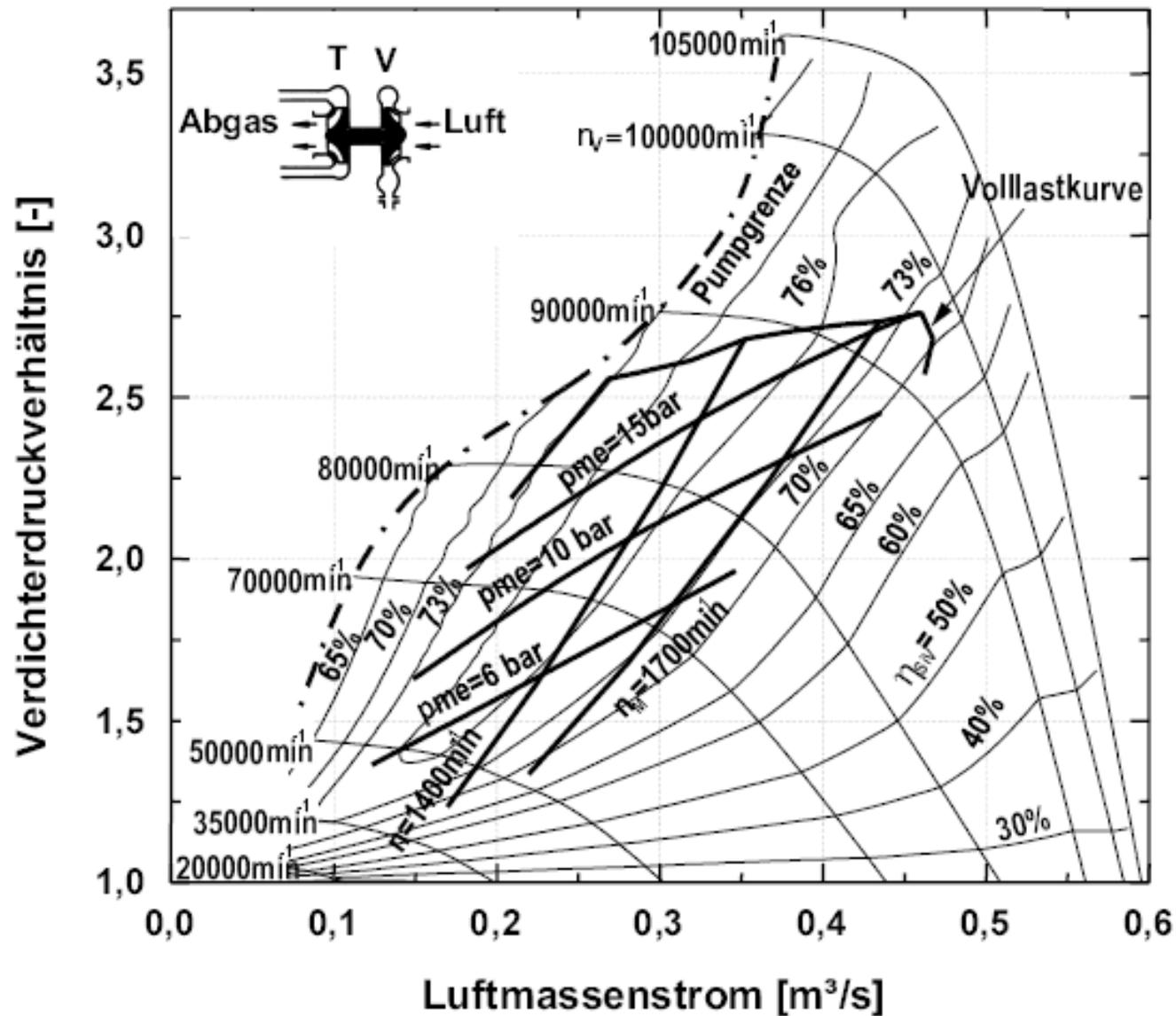
Abgasturboaufladung – Variable Turbinengeometrie (VTG)



Quelle: TU-Darmstadt

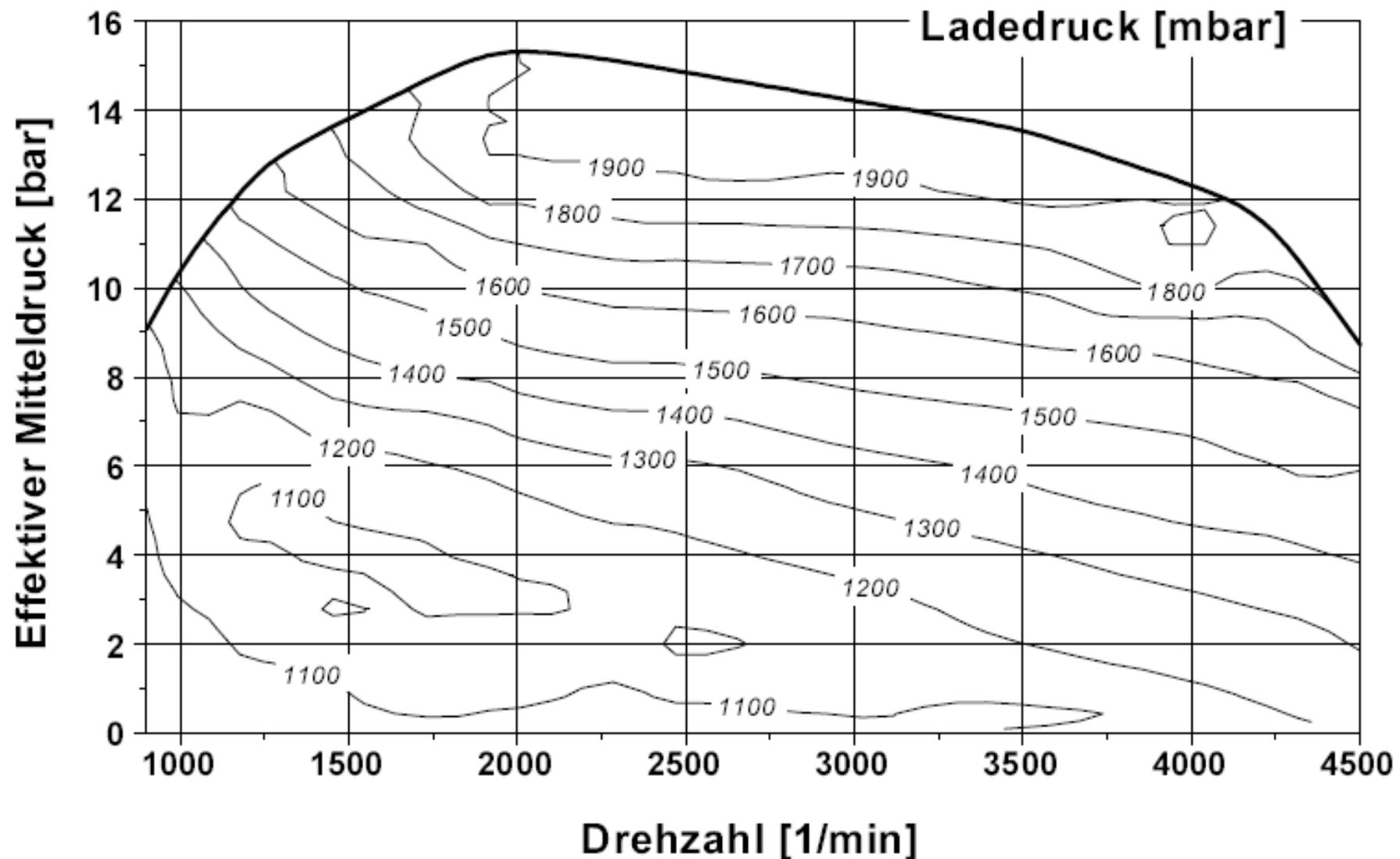
8 Aufladung

Abgasturboaufladung – Kennfeld Dieselmotor mit ATL



8 Aufladung

Abgasturboaufladung – Ladedruckkennfeld Dieselmotor



8 Aufladung

Abgasturboaufladung – Freilaufbedingung

$$P_T = P_V$$

$$\bullet P_T = \dot{m}_A w_{sT} \eta_{siT} \eta_{mT}$$

$c_5 = c_6$; $\kappa_A = \text{konst}$:

$$w_{sT} = \Delta h_{sT} = c_{pA} T_5 \left[1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{\kappa_A - 1}{\kappa_A}} \right]$$

$$\bullet \dot{m}_A w_{sT} \eta_{siT} \eta_{mT} = \dot{m}_V w_{sV} \frac{1}{\eta_{siV} \eta_{mV}}$$

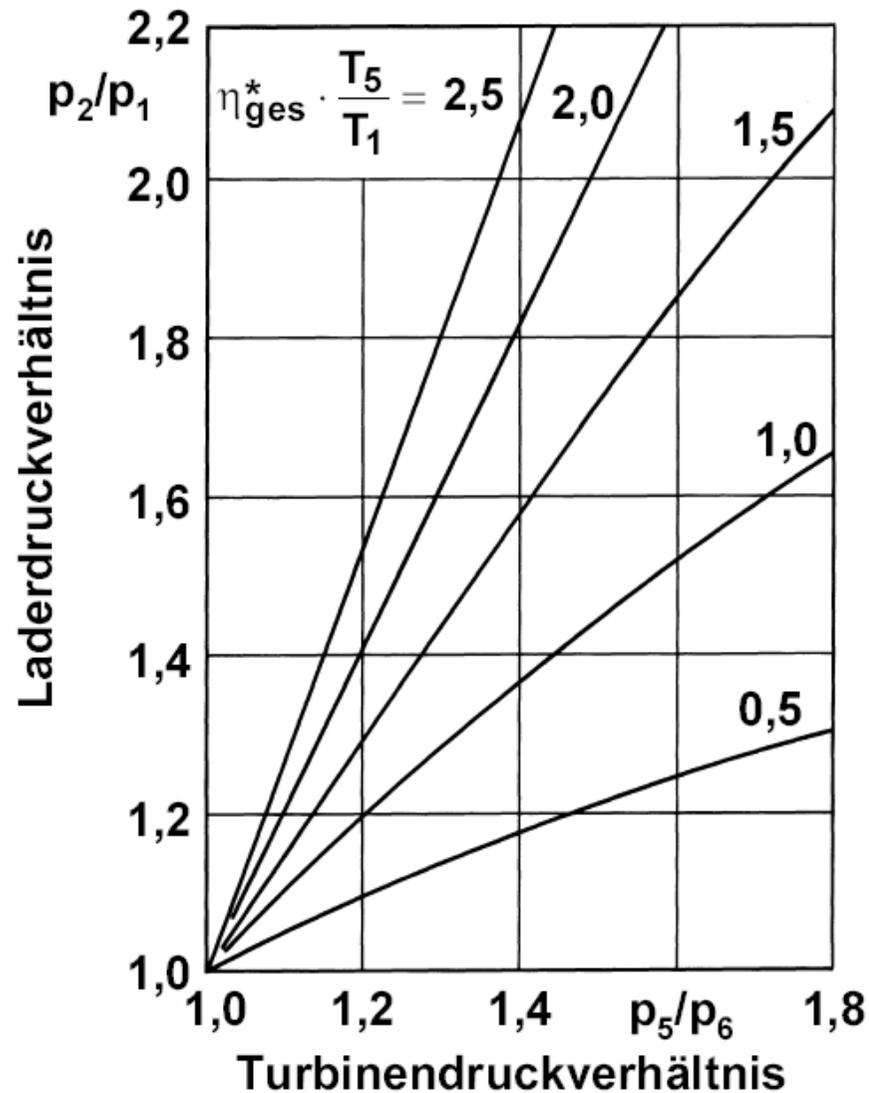
$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_V} \cdot \eta_{siT} \eta_{siV} \underbrace{\eta_{mT} \eta_{mV}}_{\eta_{mA}} = \frac{w_{sV}}{w_{sT}}$$

$$\underbrace{\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_V} \cdot \eta_{siT} \eta_{siV} \eta_{mA}}_{\eta_{ges}^*} \cdot \frac{T_5}{T_1} = \frac{c_{pV} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa_V - 1}{\kappa_V}} - 1 \right]}{c_{pA} \left[1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{\kappa_A - 1}{\kappa_A}} \right]}$$

$$\boxed{\frac{p_2}{p_1} = f \left(\frac{p_5}{p_6}, \eta_{ges}^*, \frac{T_5}{T_1} \right)}$$

8 Aufladung

Abgasturboaufladung – Freilaufbedingung



8 Aufladung

Abgasturboaufladung – Turbinenschlucklinie

Abgasmassenstrom durch die Turbine

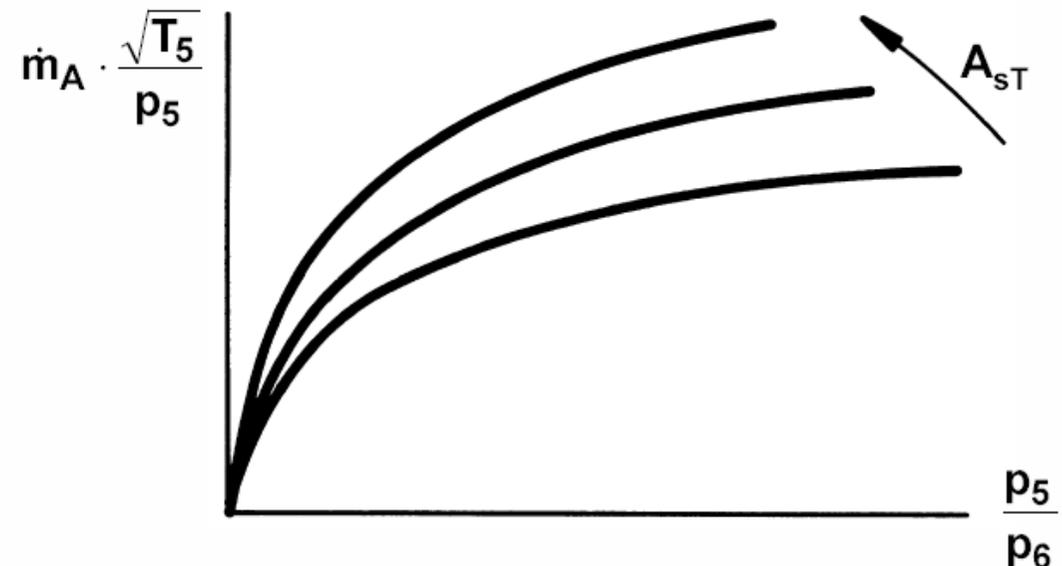
$$\dot{m}_A = A_{sT} \cdot \rho_s \cdot c_s$$

$A_{sT} \hat{=}$ isentroper Ersatzquerschnitt der Turbine

$$\rho_s = \frac{p_5}{R \cdot T_5} \cdot \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{1}{\kappa_A}}$$

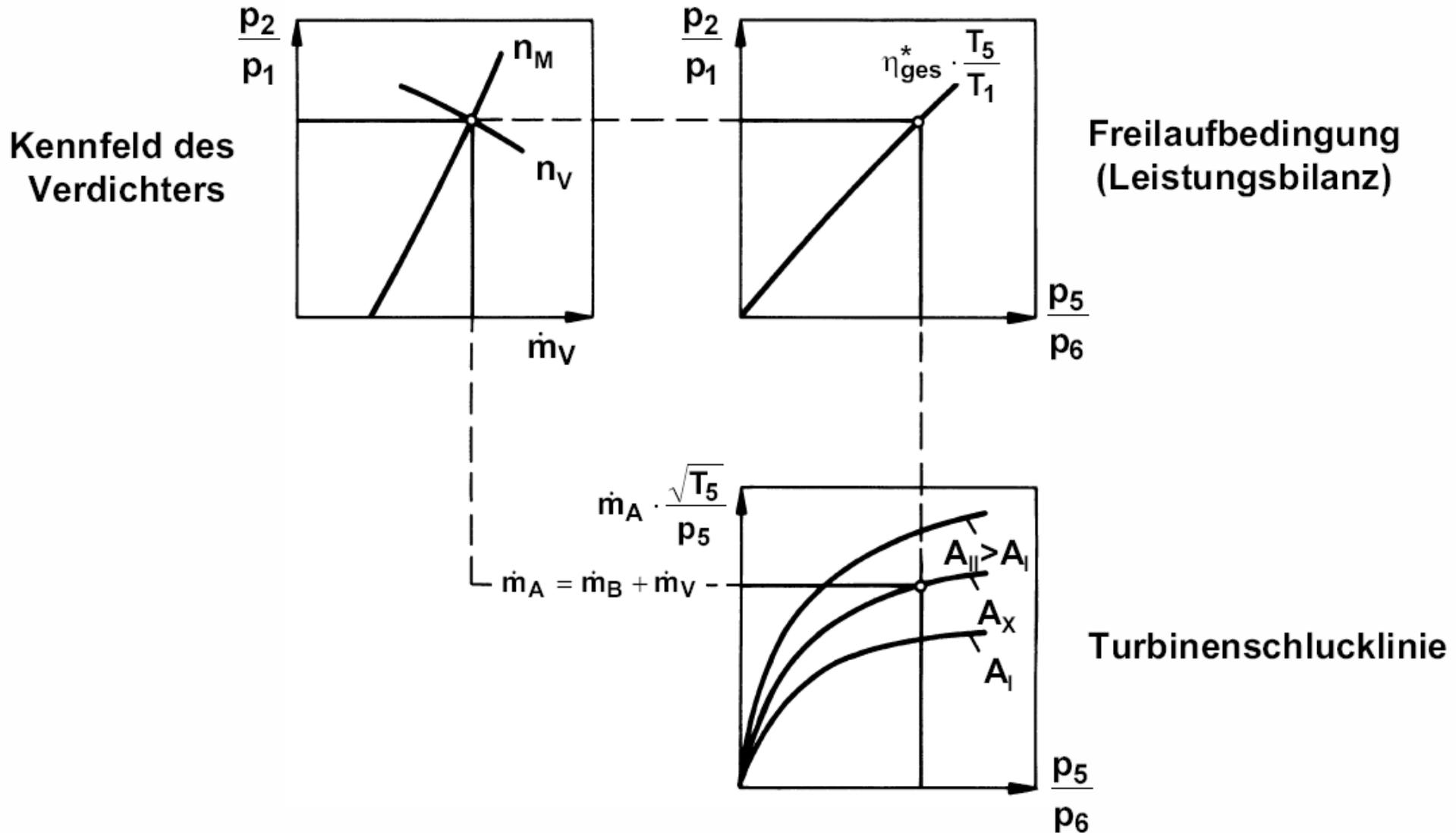
$$c_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa_A}{\kappa_A - 1} \cdot R \cdot T_5 \left[1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{\kappa_A - 1}{\kappa_A}} \right]}$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_A \cdot \frac{\sqrt{T_5}}{p_5} = A_{sT} \cdot f\left(\frac{p_5}{p_6}\right)}}$$



8 Aufladung

Abgasturboaufladung – Turbinenquerschnitt

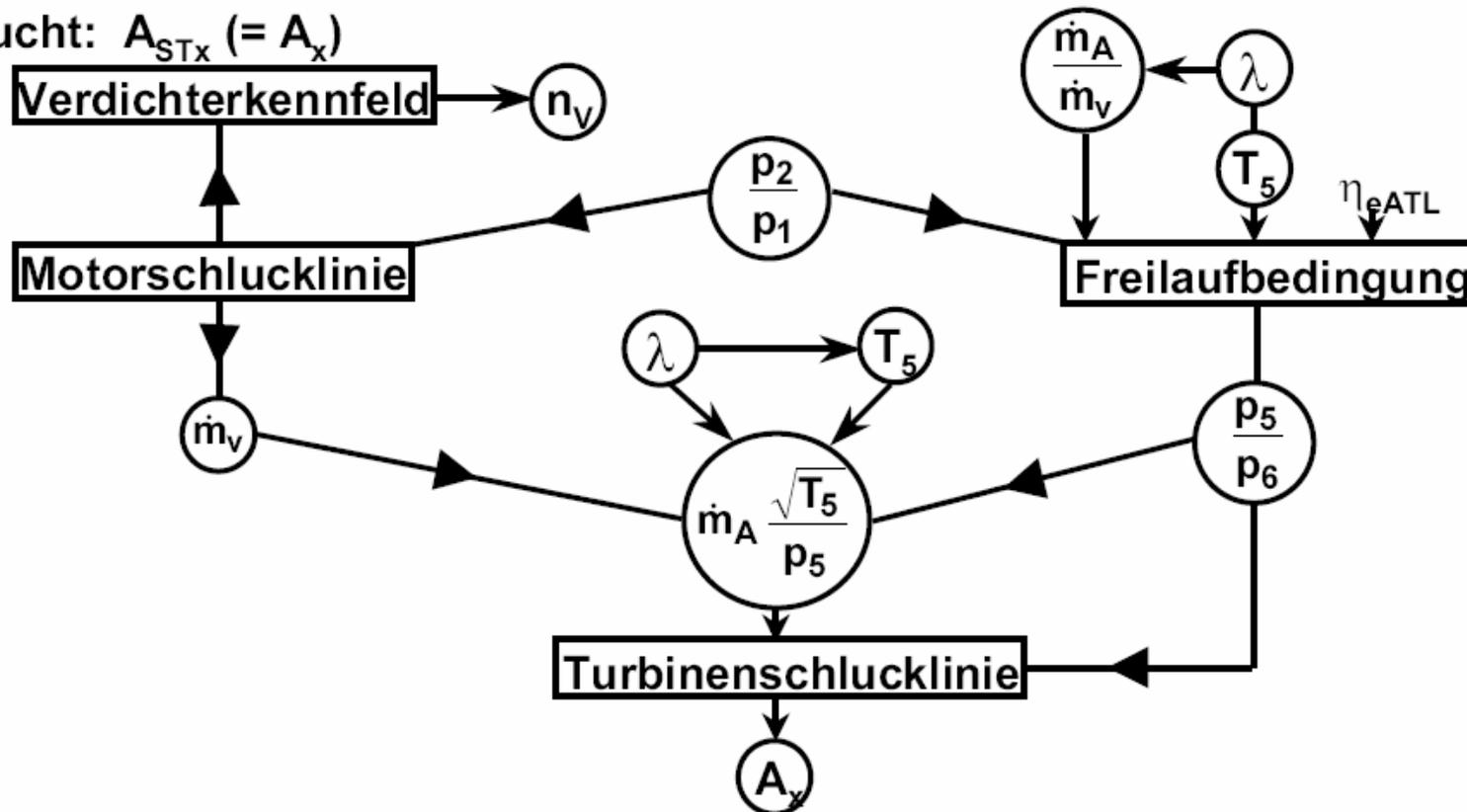


8 Aufladung

Abgasturboaufladung – Auslegung Turbinenquerschnitt

gegeben: Motor, n und λ_a (Motorschlucklinie), p_2 , λ , $T_5 = f(\lambda)$,
 Turbinenwirkungsgrade, Verdichter (Kennfeld), Turbinenschlucklinien

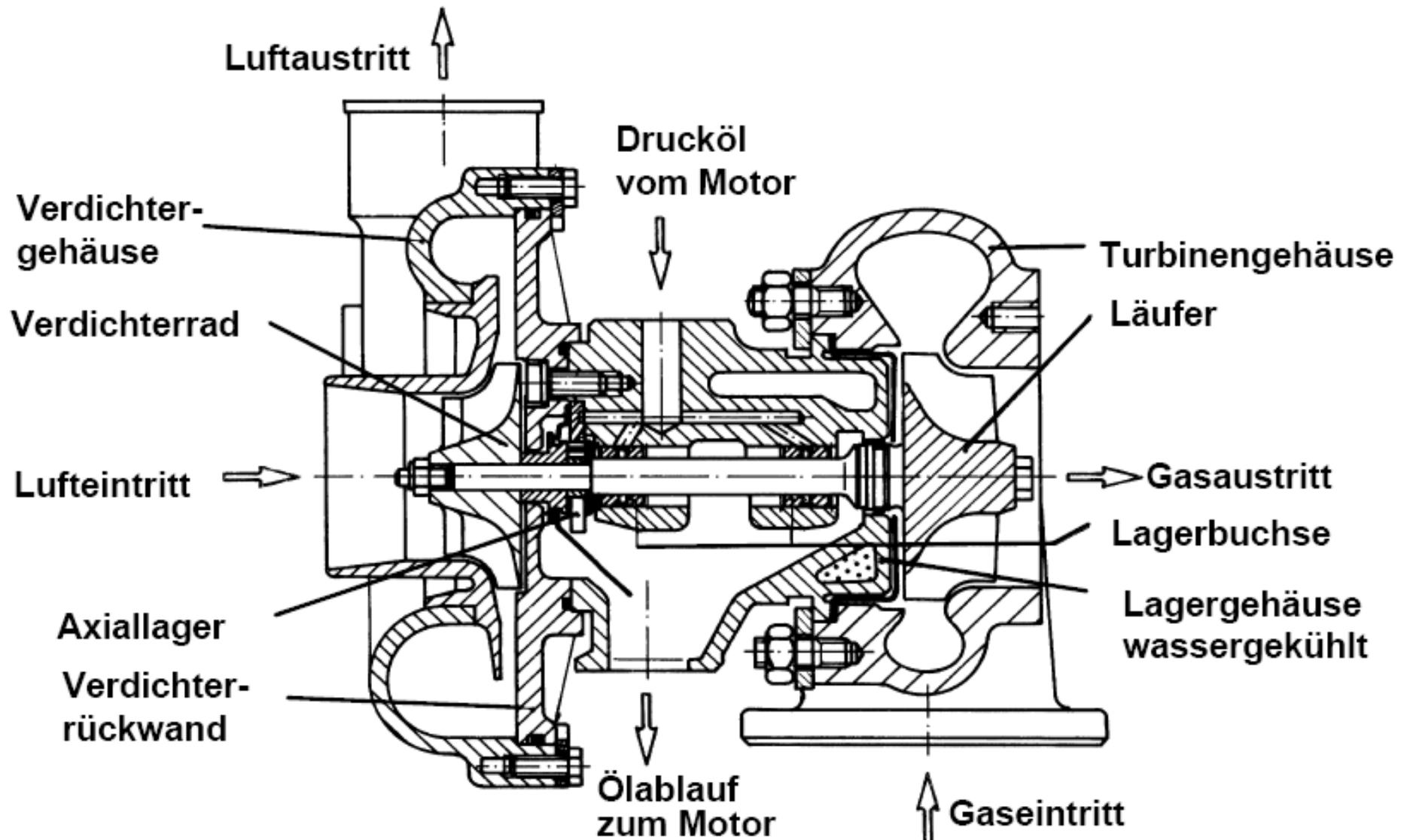
gesucht: $A_{STx} (= A_x)$



$$\dot{m}_A = \dot{m}_v \left(1 + \frac{1}{\lambda \cdot L_{ST}} \right)$$

8 Aufladung

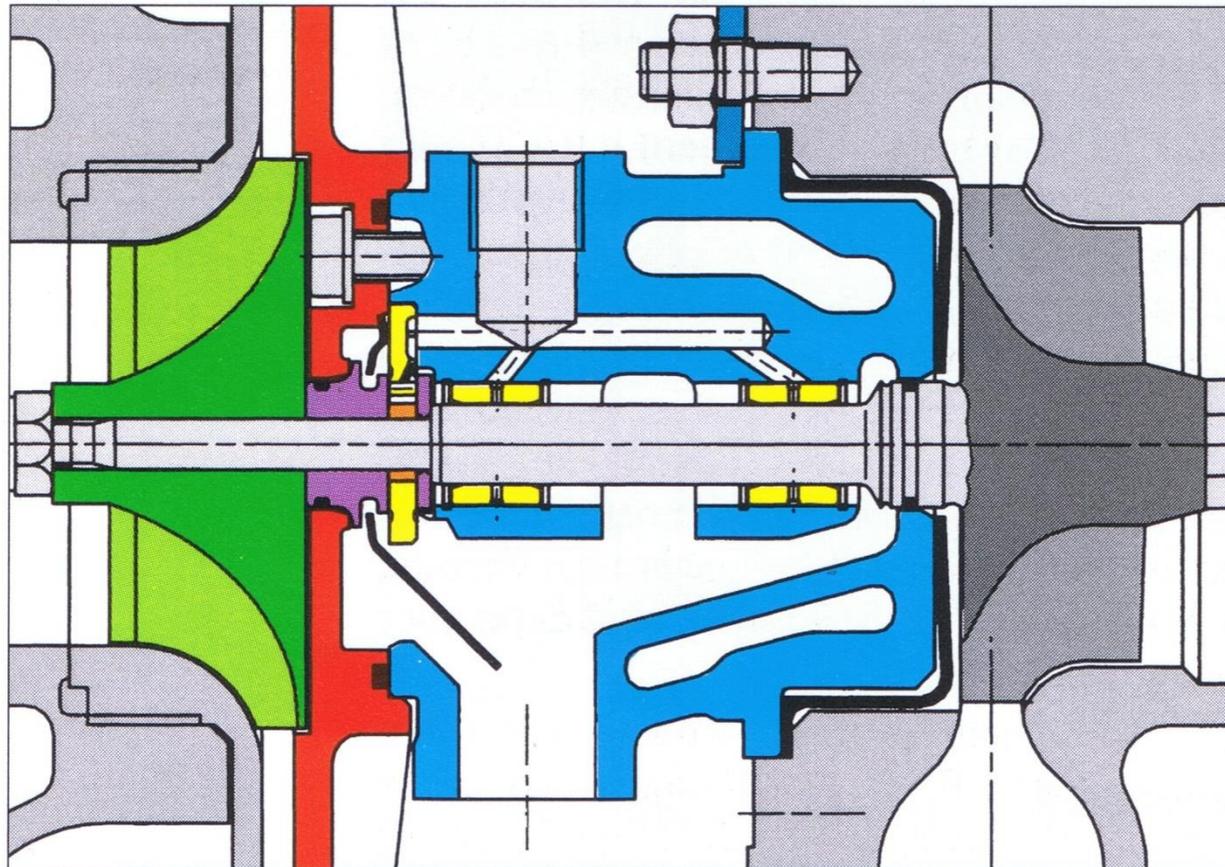
Abgasturbolader – Aufbau und Bezeichnungen



8 Aufladung

ATL – Konstruktiver Aufbau

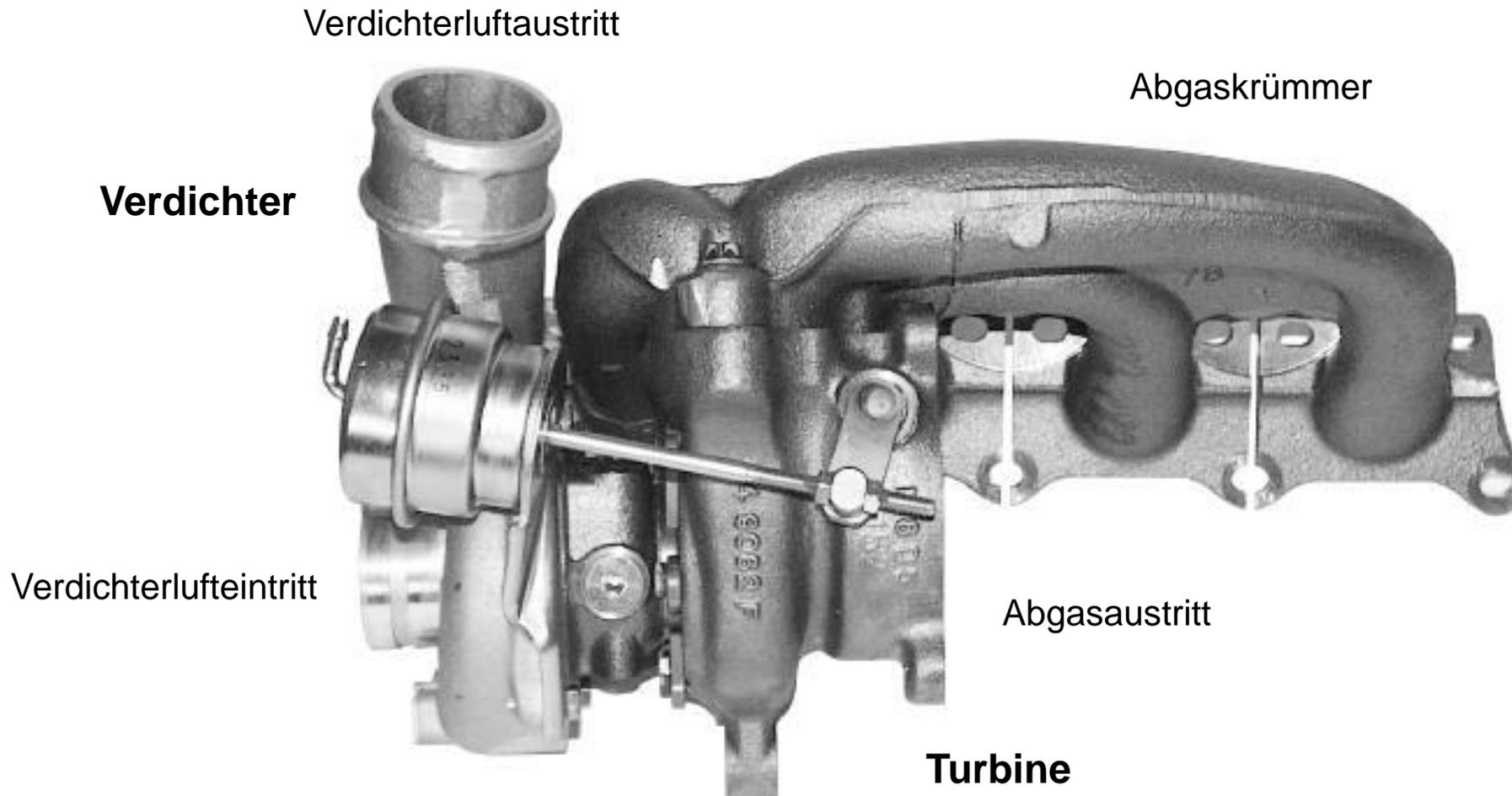
Verdichter



Turbine

8 Aufladung

ATL – Konstruktiver Aufbau

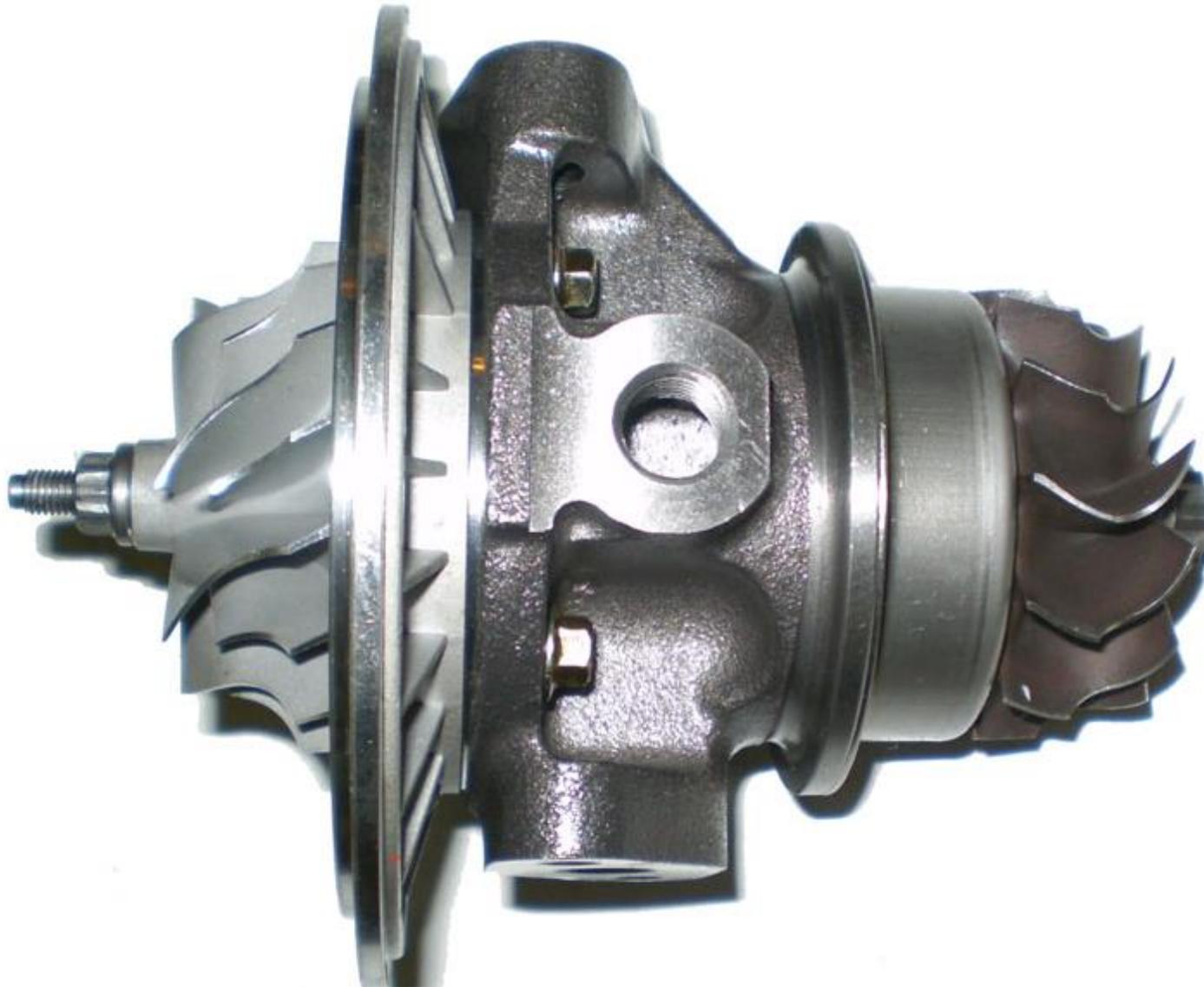


8 Aufladung

ATL – Konstruktiver Aufbau, Rumpfgruppe

Verdichter

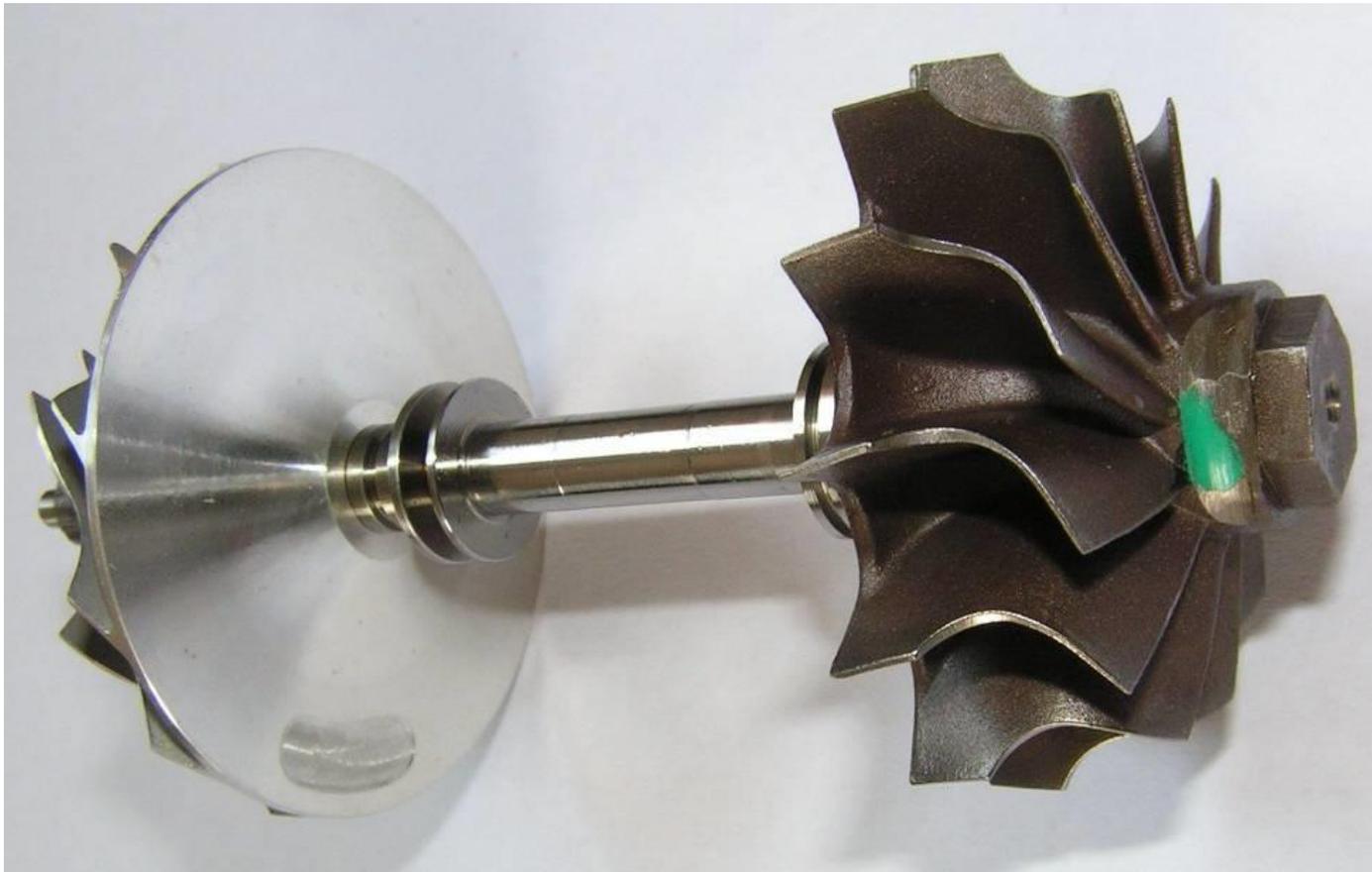
Turbine



8 Aufladung

ATL – Konstruktiver Aufbau, Rotoreinheit

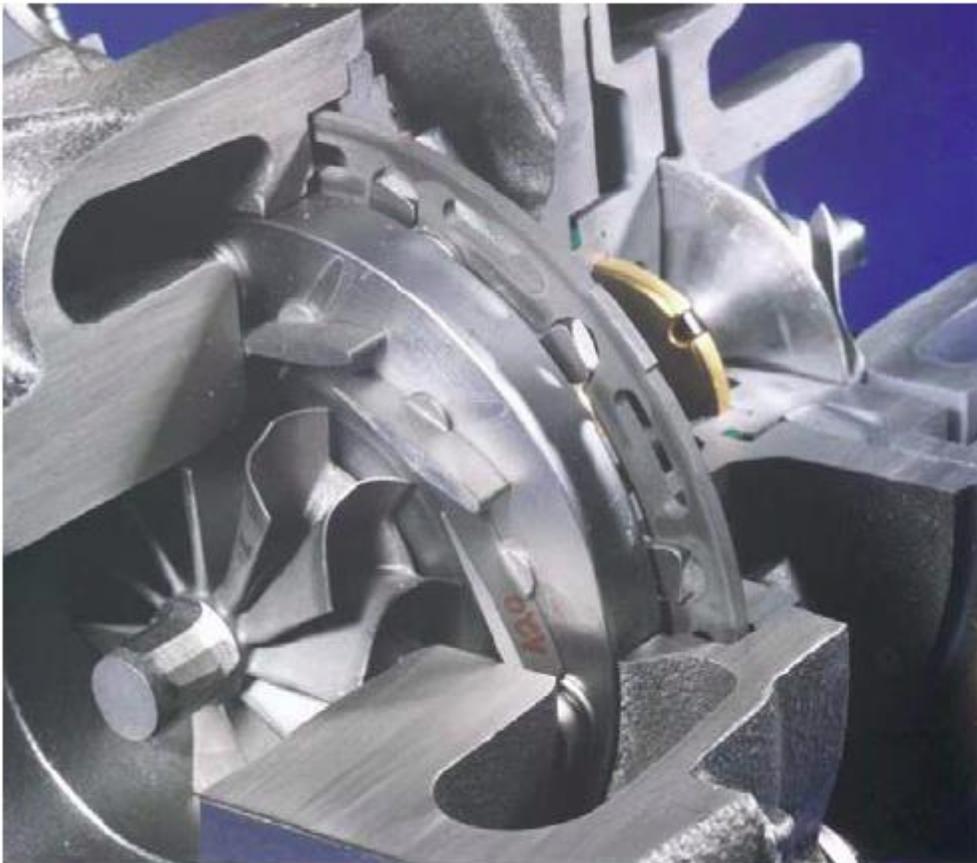
Verdichter



Turbine

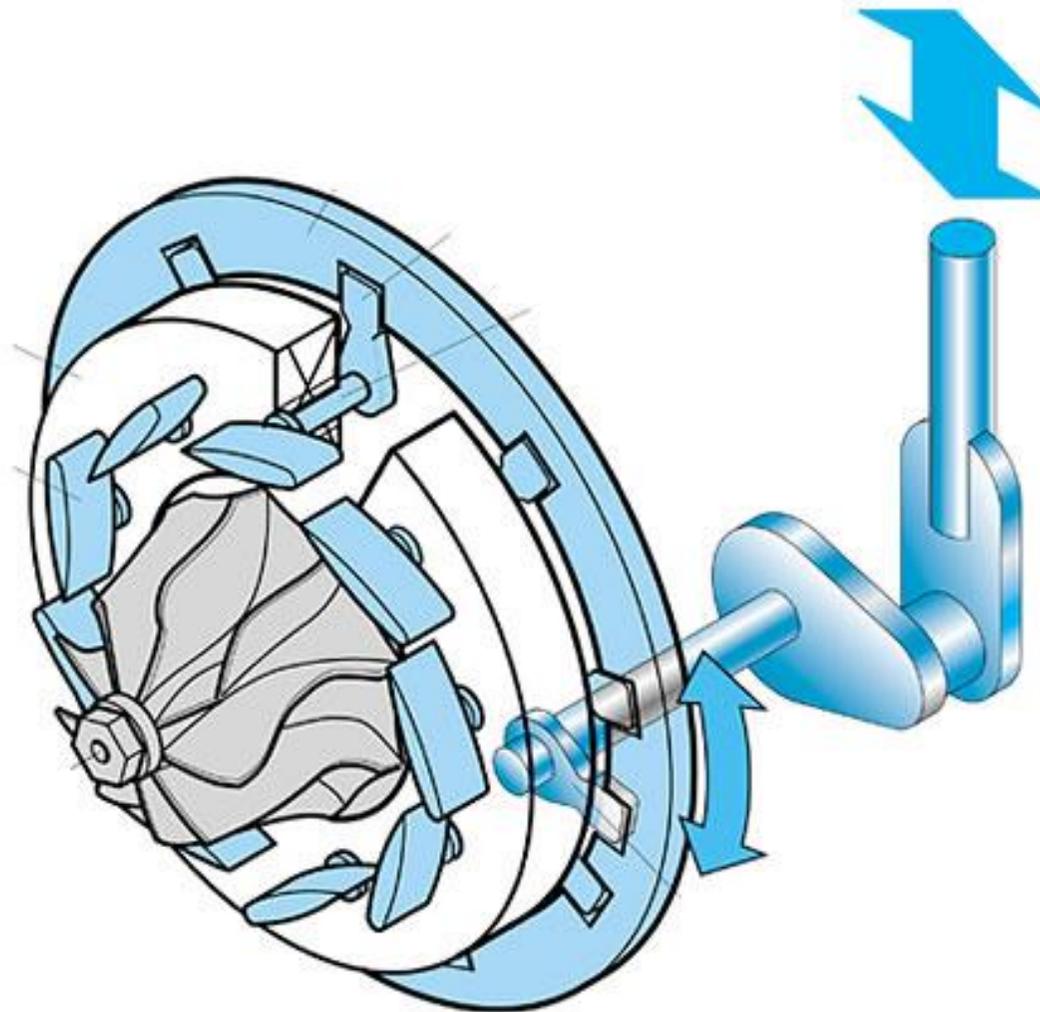
8 Aufladung

ATL – Konstruktiver Aufbau, variable Geometrie



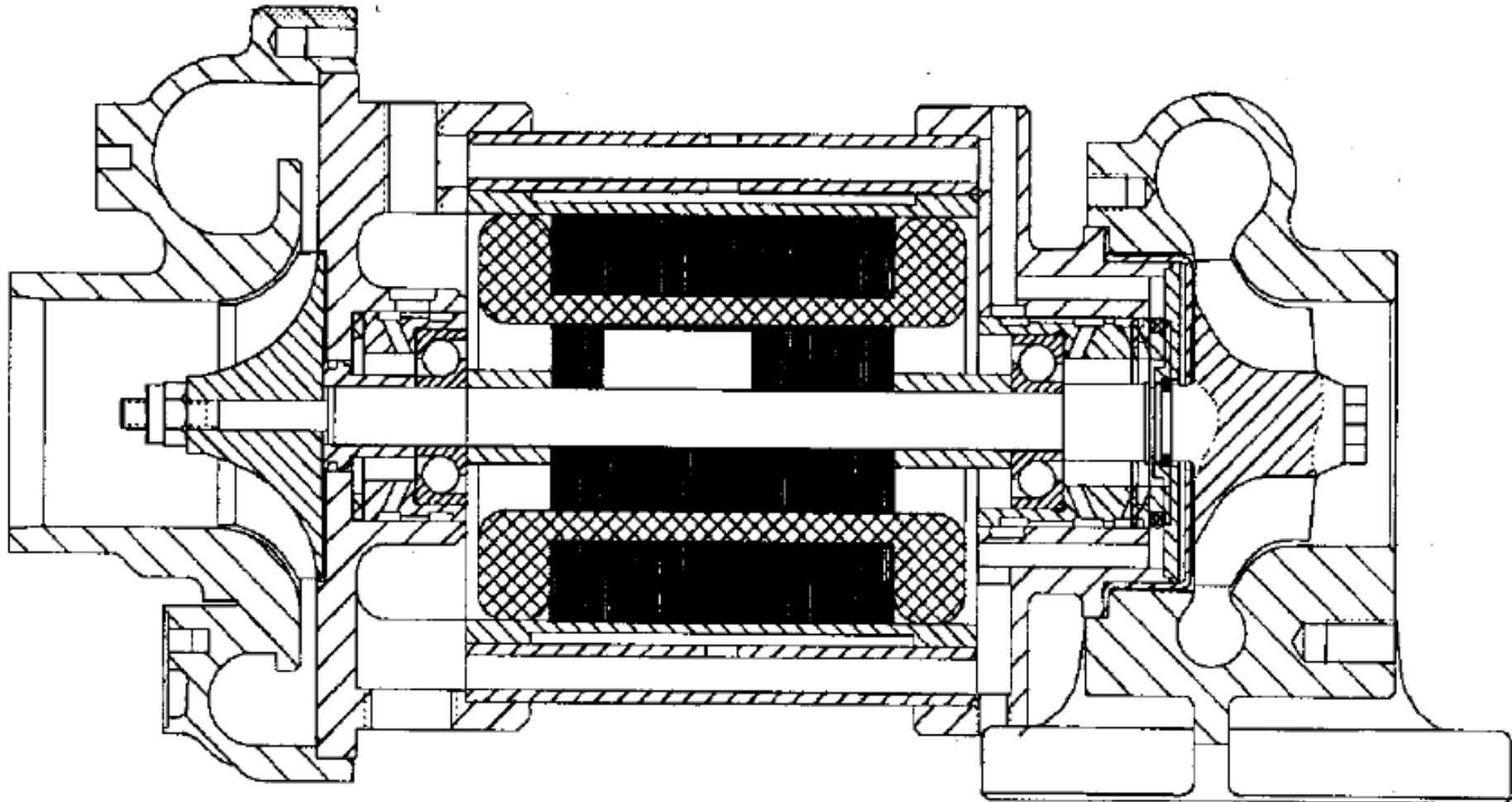
8 Aufladung

ATL – Konstruktiver Aufbau, Verstellung der Leitschaufel



8 Aufladung

Abgasturboaufladung – elektr. unterstützter ATL



8 Aufladung

Beispiel : Audi Motor

Audi V6 2,7 l - 5V Biturbo



Daten:

V_H	=	2,67 dm ³
$P_{e \max}$	=	195 kW
$n_{P_{e \max}}$	=	5800 min ⁻¹
$p_{me \max}$	=	18,8 bar
$n_{p_{me \max}}$	=	1850 - 3600 min ⁻¹
ε	=	9,3

8 Aufladung

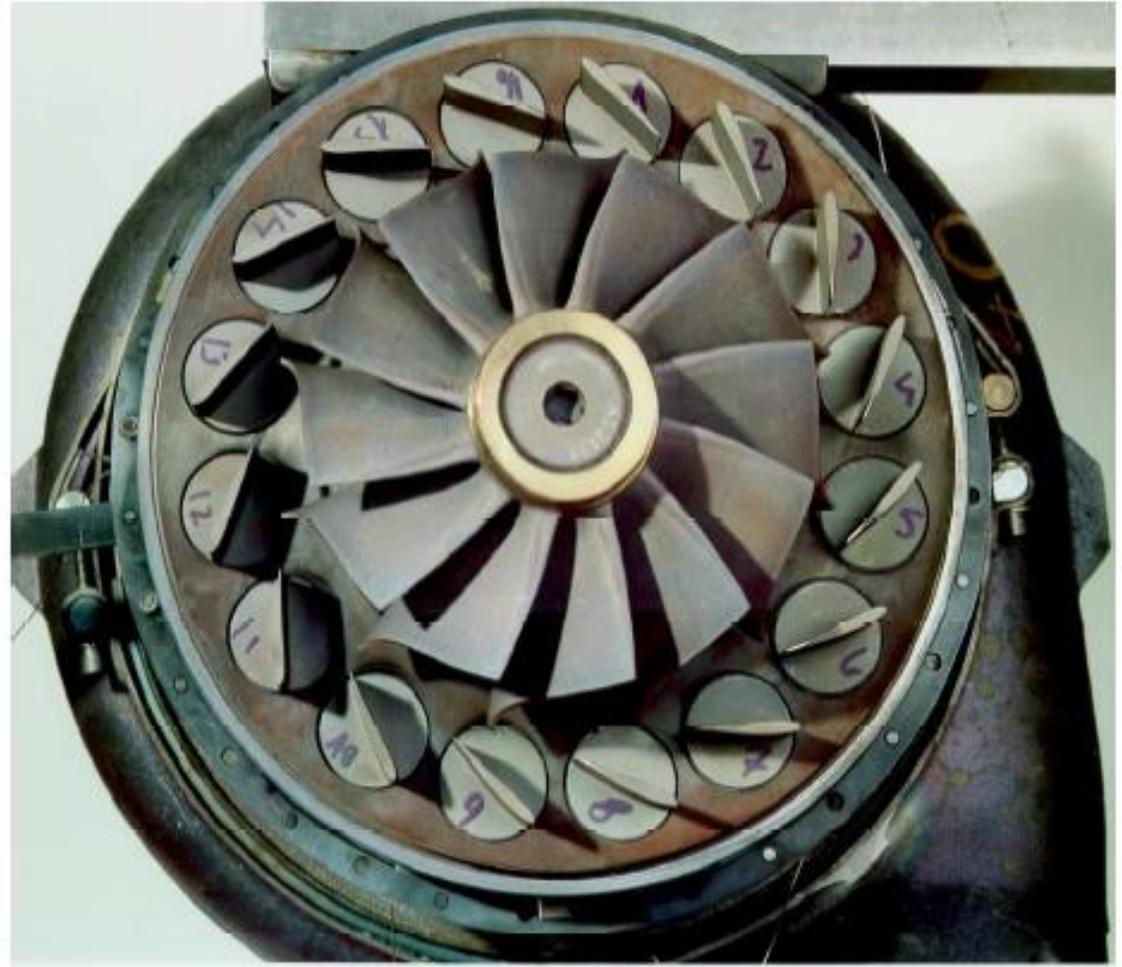
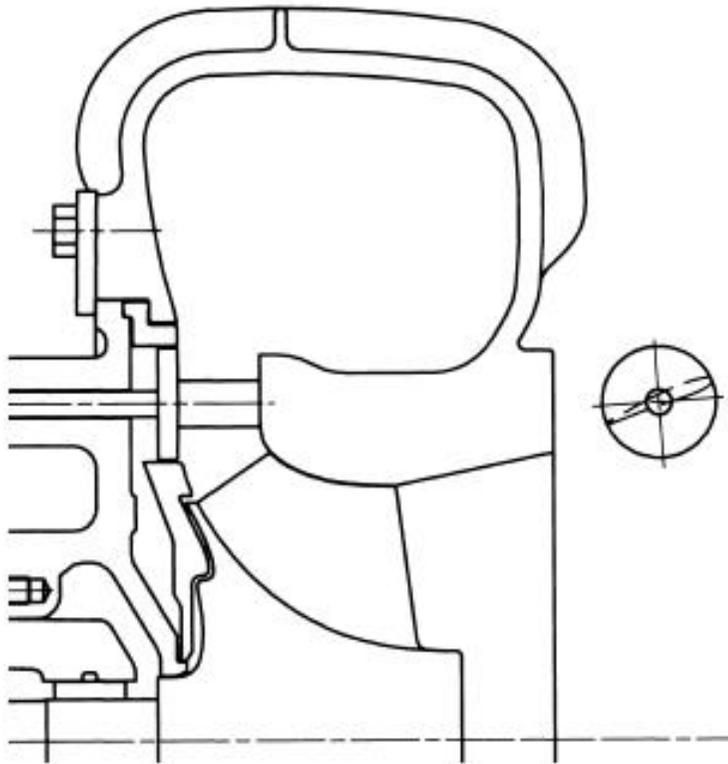
Abgasturboaufladung : Verdichterlaufrad



8 Aufladung

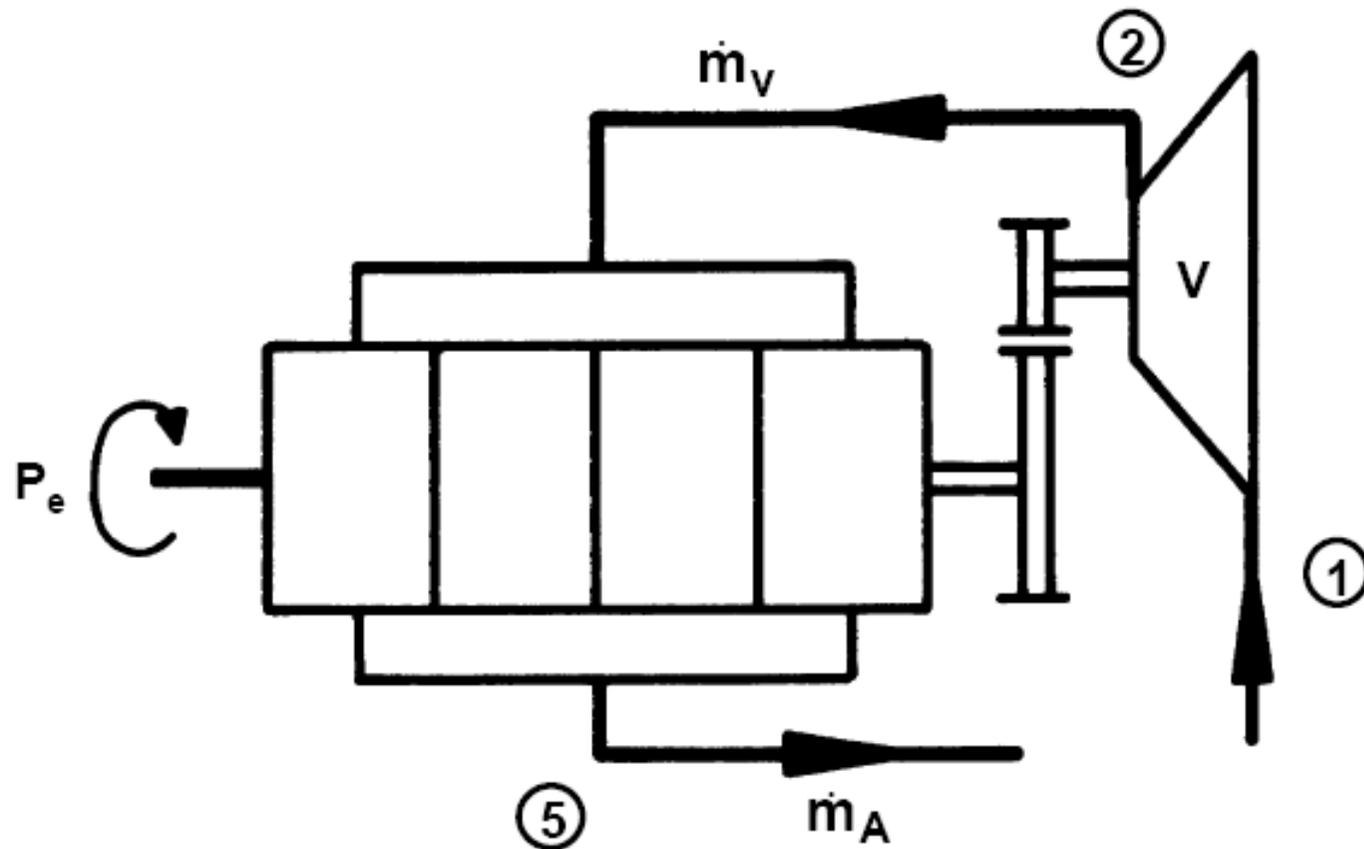
Abgasturboaufladung : Variable Turbinengeometrie

TPS57-VTG



8 Aufladung

Mechanische Aufladung



8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Motorleistung

$$P_e = P_i \eta_{mM} - P_V \frac{1}{\eta_G}$$

\downarrow \downarrow
Motor **Verdichter**

$$P_i = i n p_{mi} V_H; p_{mi} = f(p_E, T_E)$$

$$P_V = \dot{m}_V \cdot w_{sV} \cdot \frac{1}{\eta_{siV} \cdot \eta_{mV}}$$

$$c_1 = c_2; \kappa_V = \text{konst.}:$$

$$w_{sV} = \Delta h_{sV} = c_{pV} T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa_V - 1}{\kappa_V}} - 1 \right]$$

$$\text{meist: } p_2 \approx p_E; p_1 = p_u$$

$$\eta_{siV} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}; \quad \frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa_V - 1}{\kappa_V}}$$

$$T_2 = T_E = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{siV}} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa_V - 1}{\kappa_V}} - 1 \right] \right\}$$

8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Betriebsverhalten

a) Motorschlucklinie $\dot{m}_M = f\left(\frac{p_2}{p_1}, n, < \text{Last}\right)$

$$\dot{m}_M = i \cdot n \cdot z \cdot \underbrace{V_h \cdot \rho_E \cdot \lambda_a}_{= m_L}$$
$$= i \cdot n \cdot z \cdot \left(\underbrace{V_h \cdot \rho_E \cdot \lambda_{L_1}}_{= m_{ZL}} + m_{sp} \right)$$

→ überspülte Frischladung
→ $f(n, T_E)$

b) Verdichter kennfeld

$$\frac{p_2}{p_1} = f(\dot{m}_V, n)$$

→ Parameter

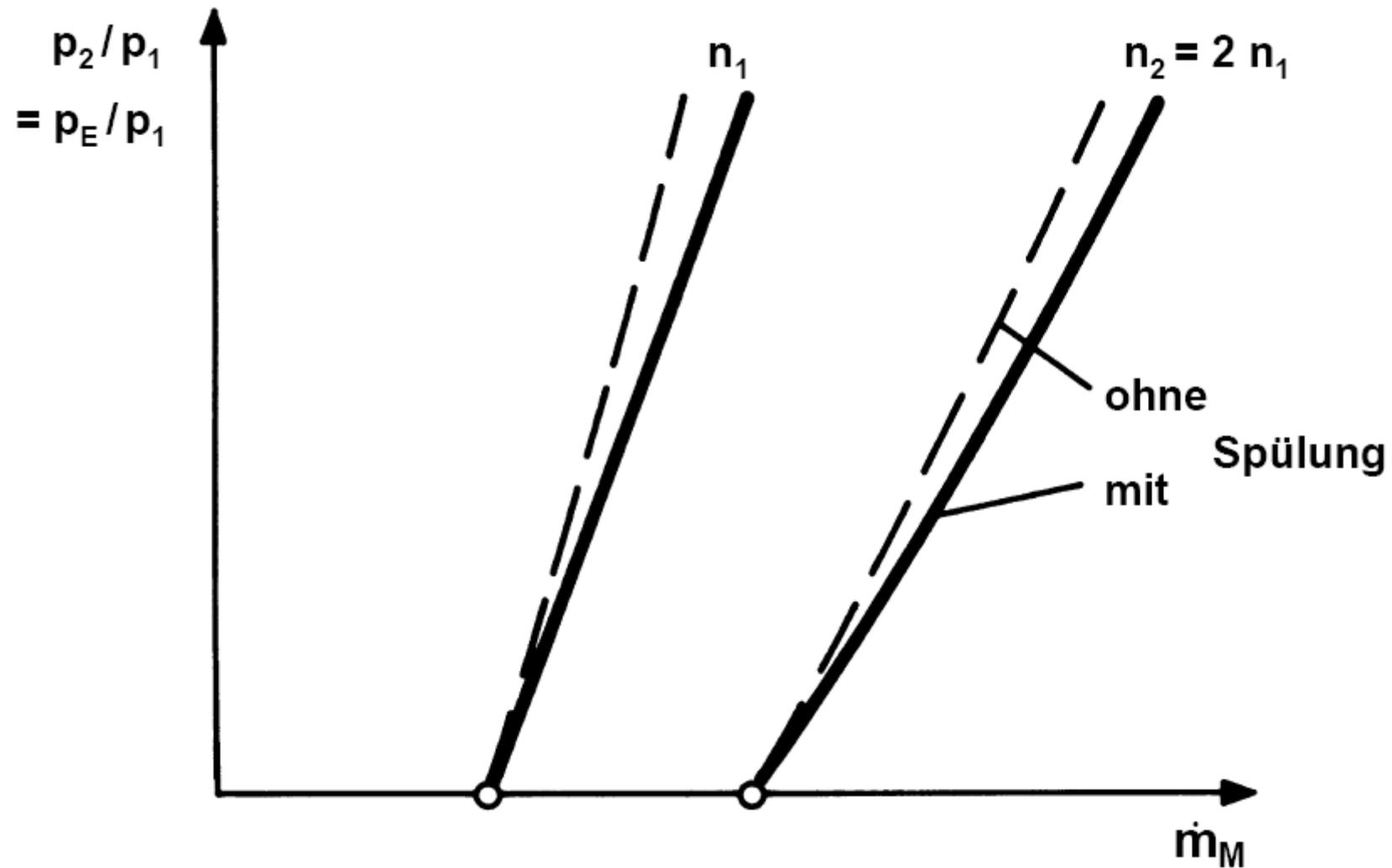
c) Betriebslinie

$$\dot{m}_M = \dot{m}_V; n_V = \ddot{u}_V \cdot n_M$$

$$\text{a) + b) + c) } \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = f(\dot{m}_M)$$

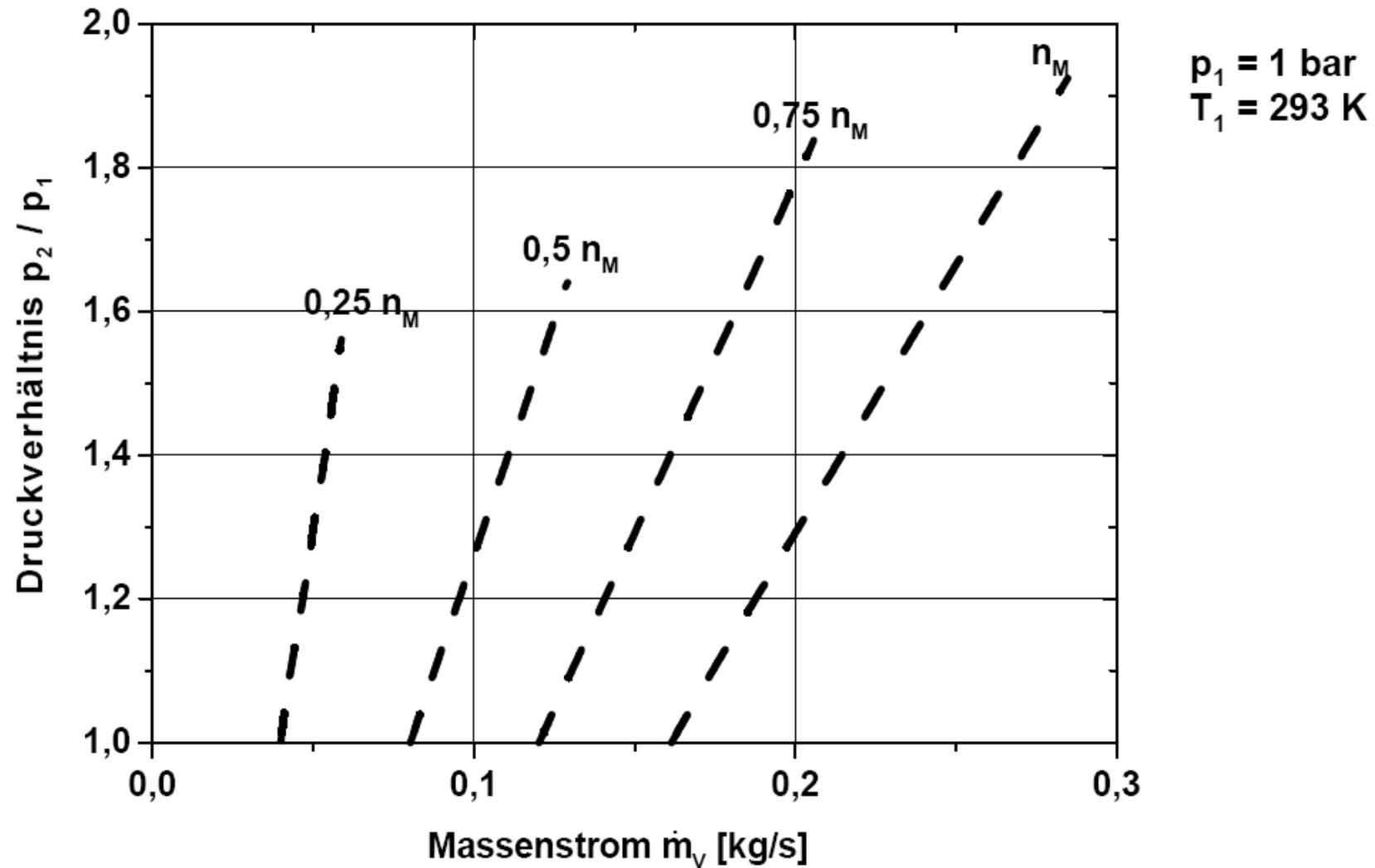
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Motorschlucklinie



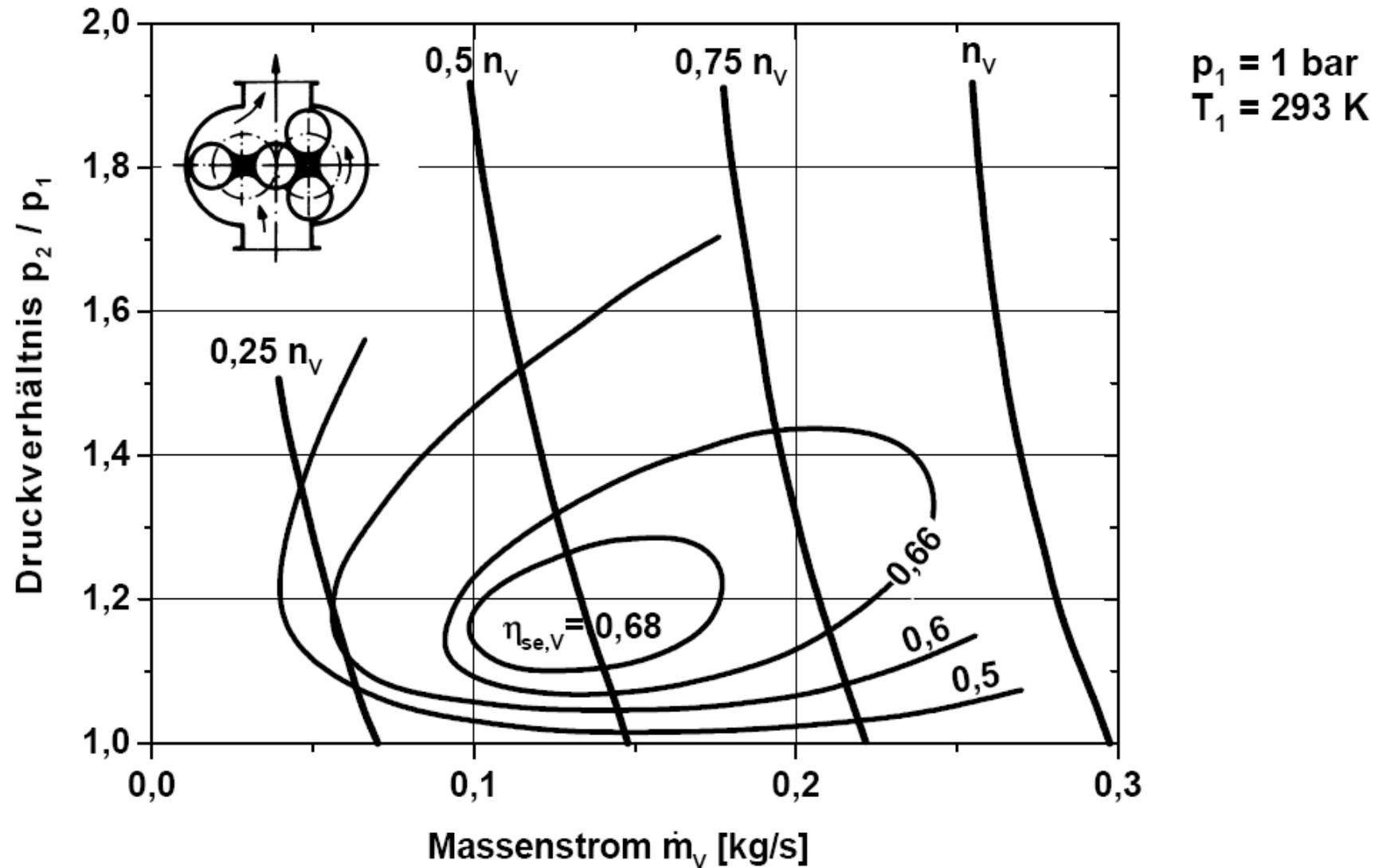
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Motorschlucklinie



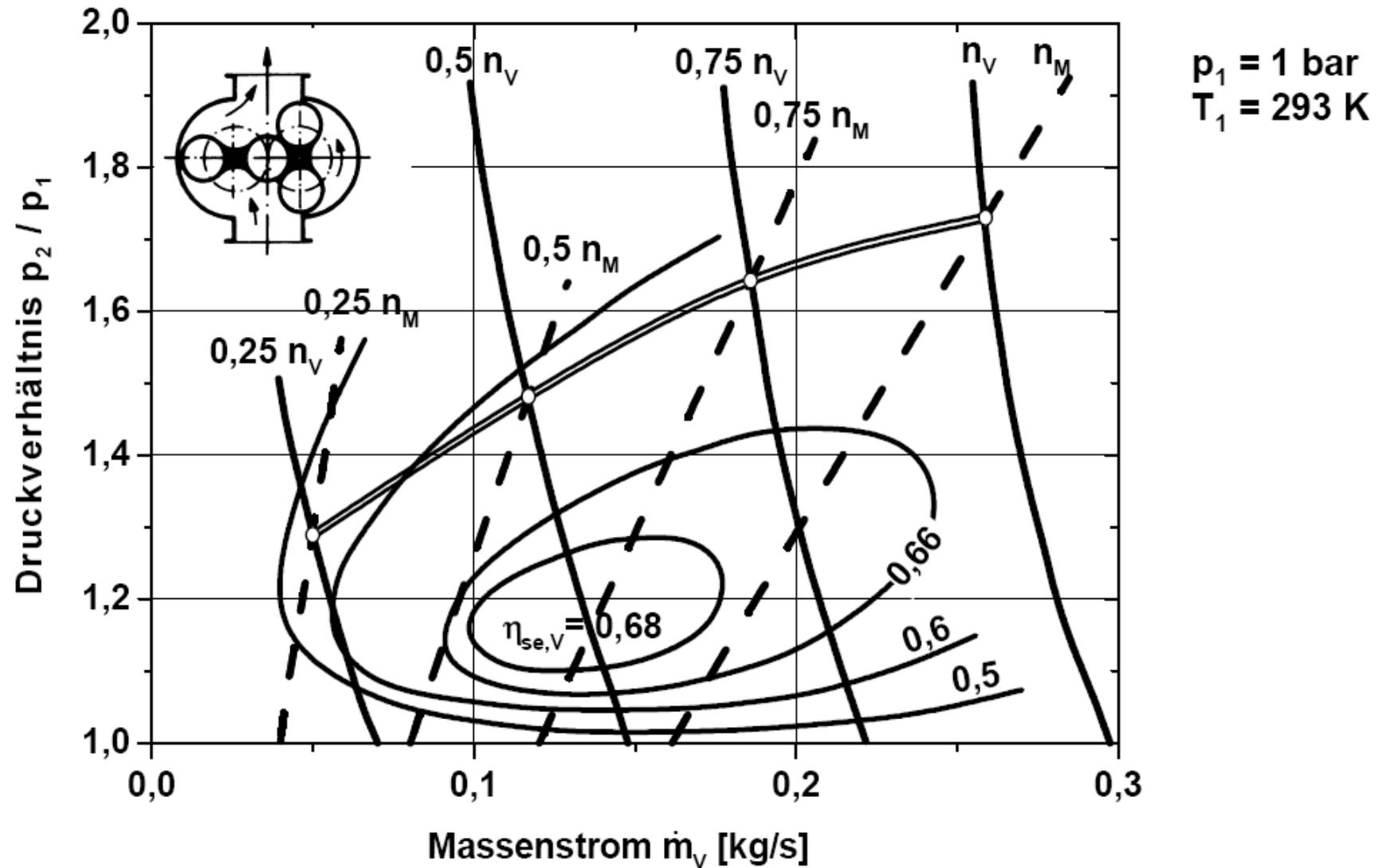
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Kennfeld eines Rootsverdichters



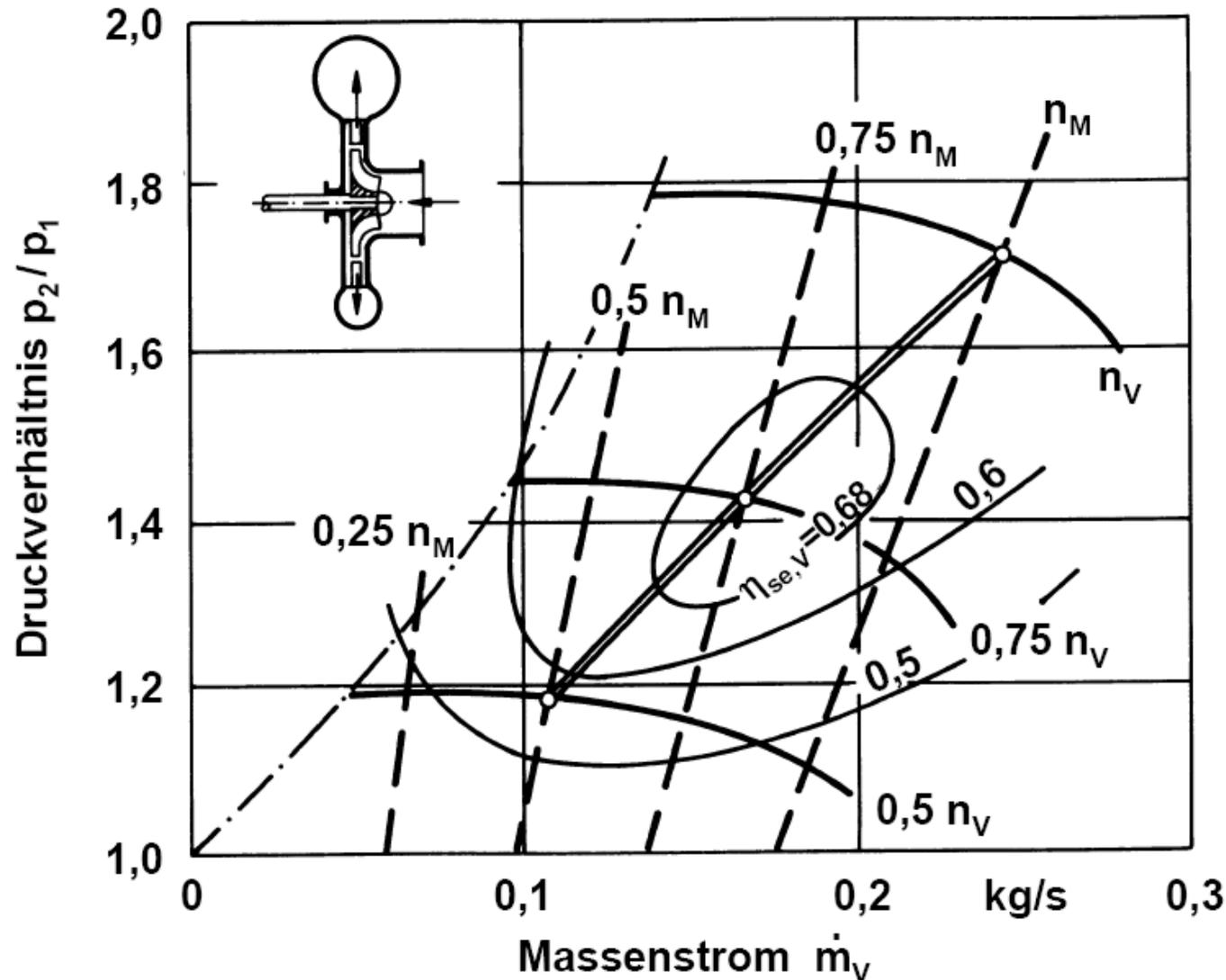
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Betriebskennlinie Motor-Lader



8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Kennlinie Motor-Kreisellader



$p_1 = 1 \text{ bar}$
 $T_1 = 293 \text{ K}$

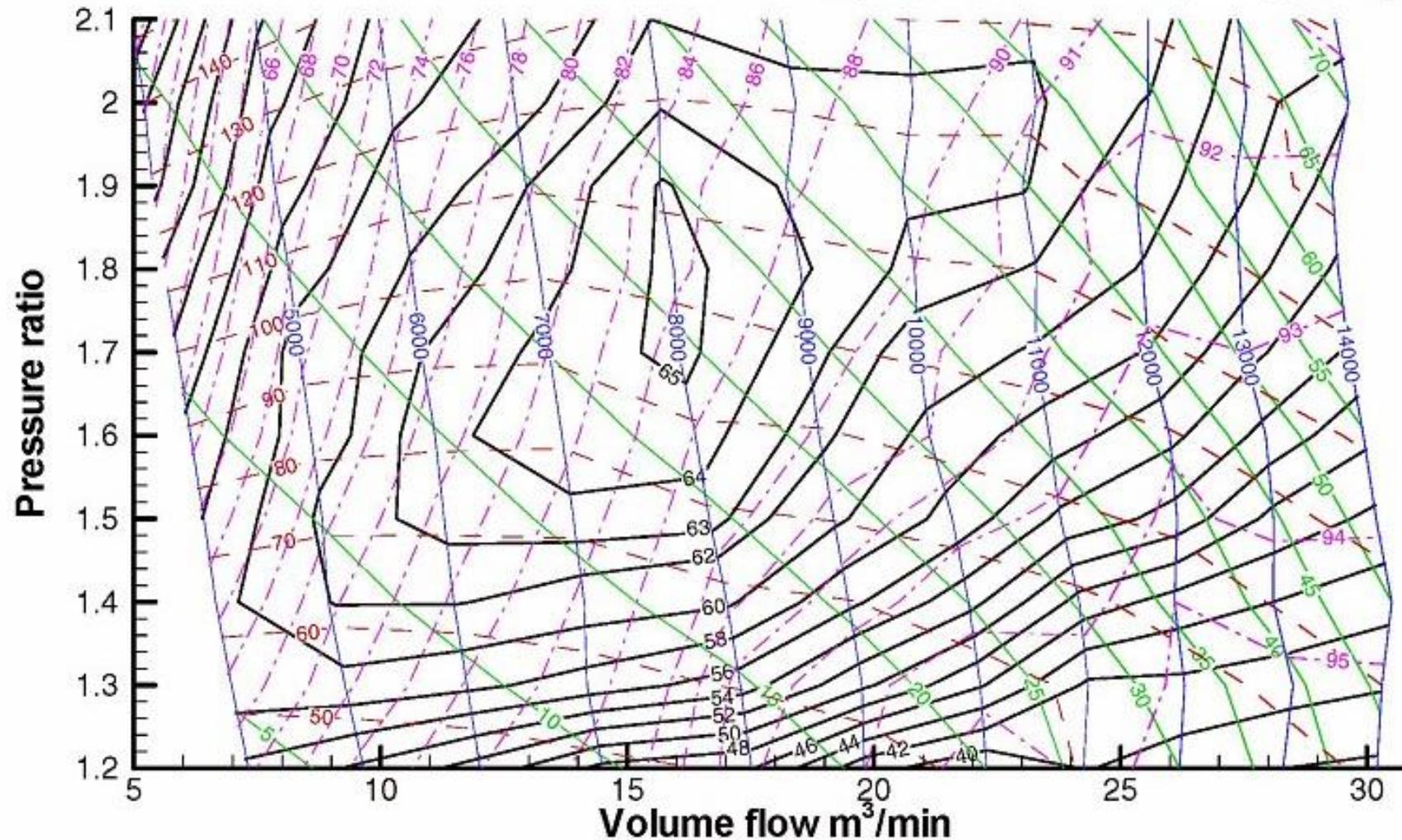
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Kennfeld

Full load performance characteristics for
Lysholm supercharger LYS 2300 AX

Inlet temperature = 20 C
Displacement = 2.3 l/rev
Built in volume ratio = 1.35
Max rpm = 13 500
Max pressure ratio = 2.2

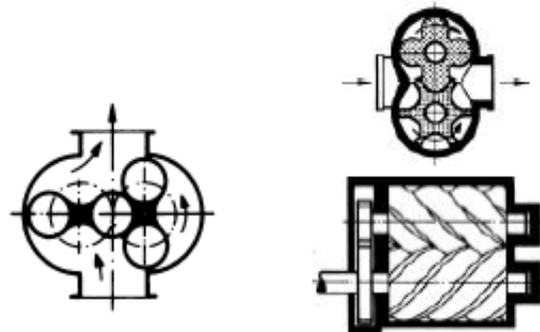
Black curves = adiabatic efficiency (%)
Red curves = discharge temperature (C)
Blue curves = input speed (RPM)
Green curves = Power (kW)
Purple lines = Volumetric efficiency %



8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Bauarten

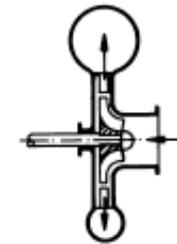
Rotationskolbenlader



Spirallader



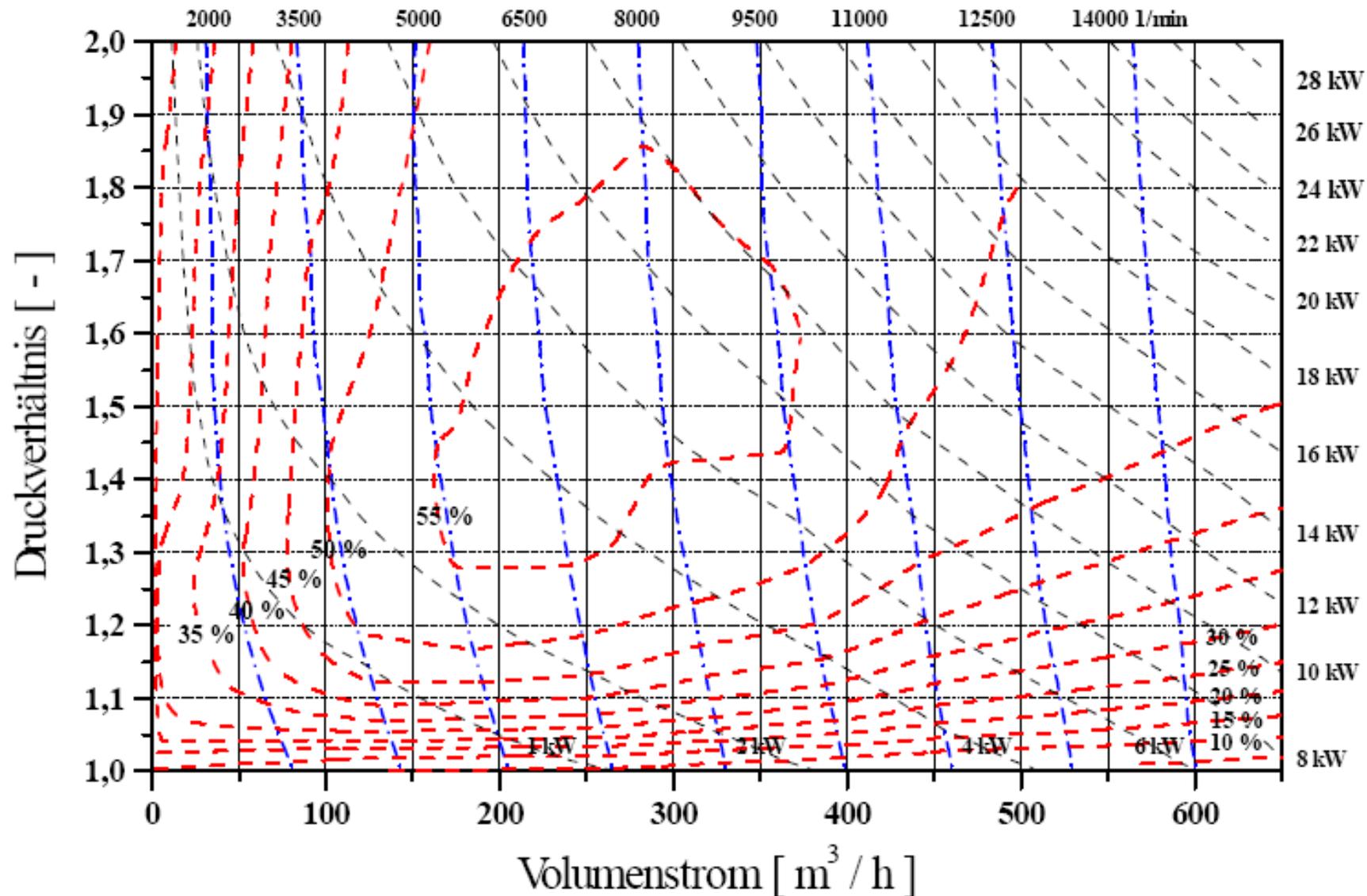
Strömungs-
maschine



	Rootslader (auch verschränkt)	Schraubenlader	Wankel (Ro-Lader)	Spirallader (G-Lader)	Radialverdichter
Innere Verdichtung	ohne	mit	mit	mit	mit
Komplexität des Aufbaus	+	0	-	--	+
Wirkungsgrad	0	+	(+)	0	++
Geräusch	0	-	-	(+)	+
Druckverhältnis	0	+(+)	+	+	+(+)

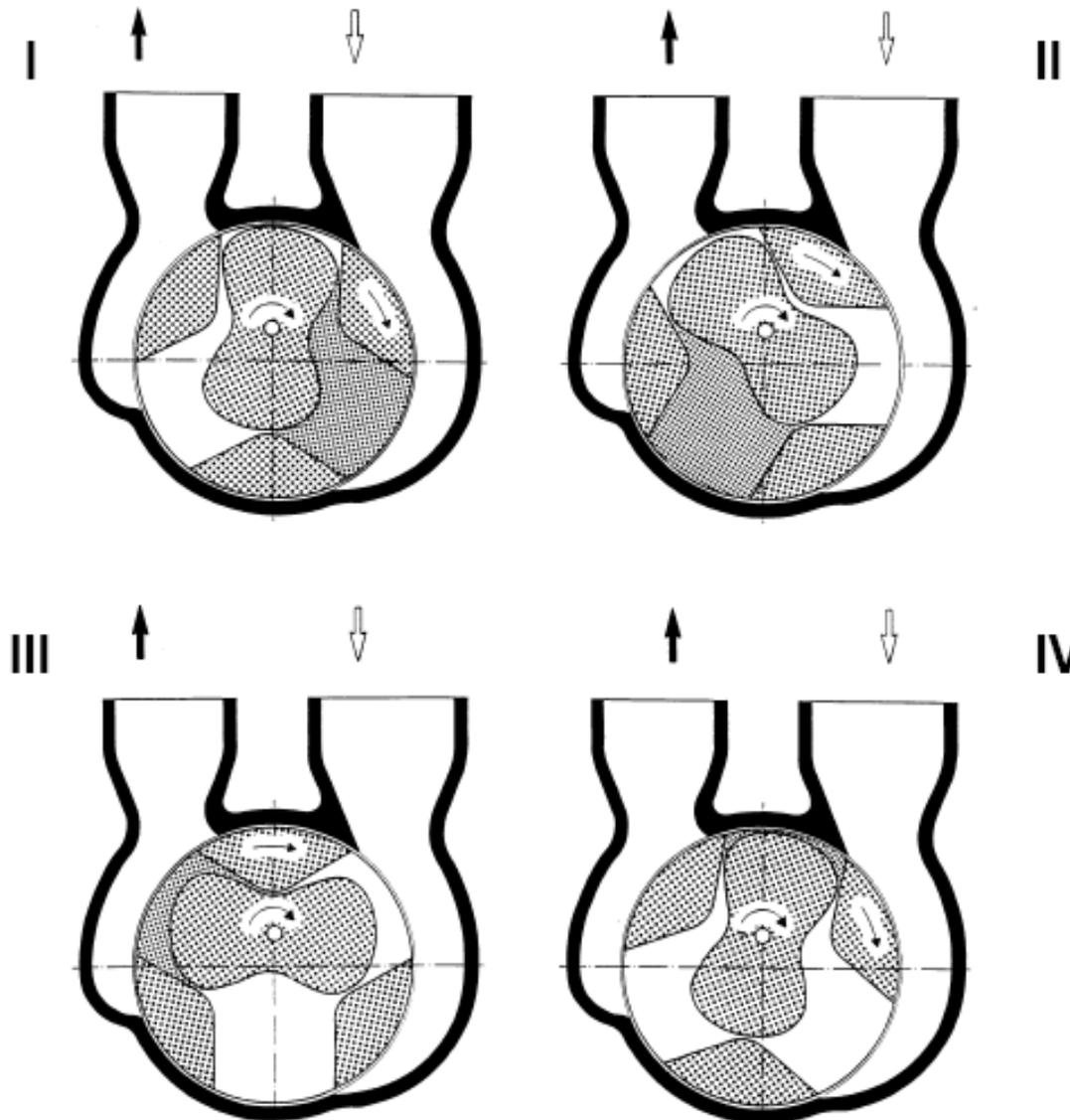
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Verdichterwirkungsgrad



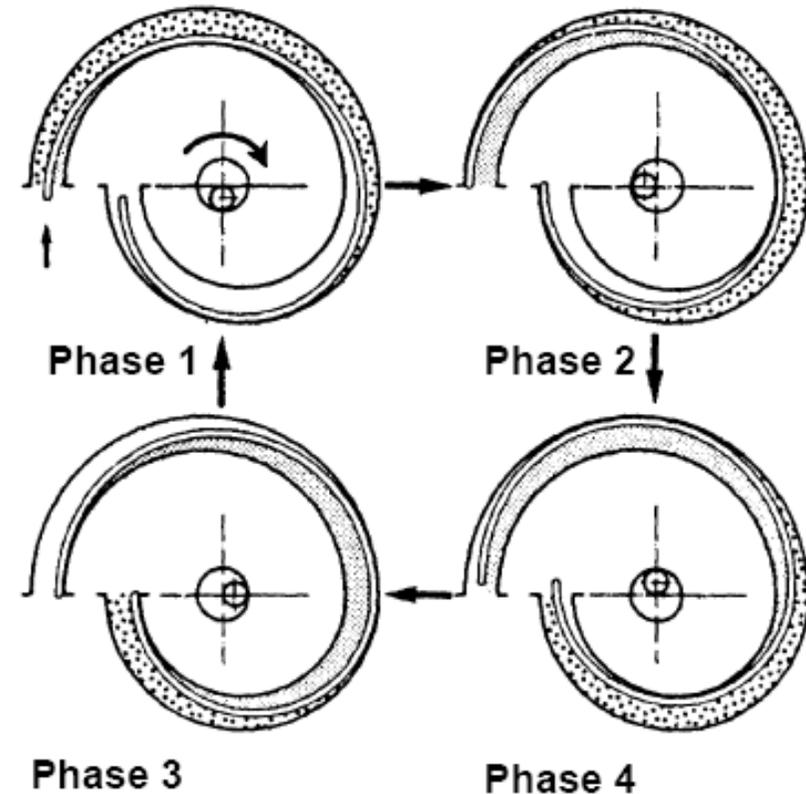
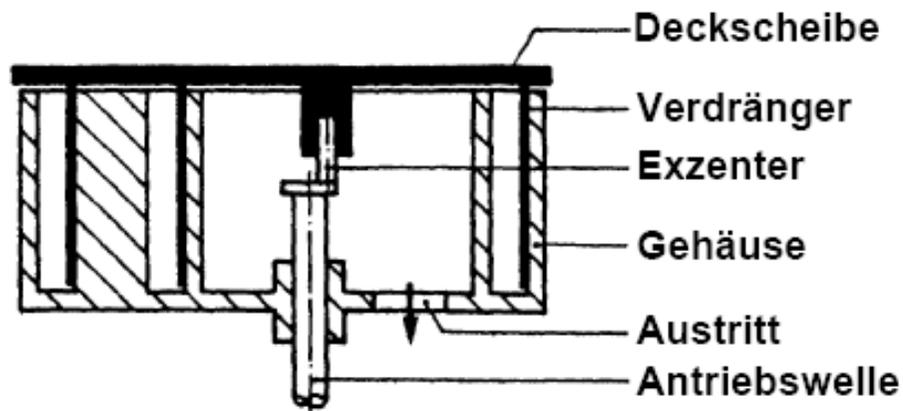
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Ro-Lader, Funktionsweise



8 Aufladung

Mechanische Aufladung – G-Lader, Funktionsweise

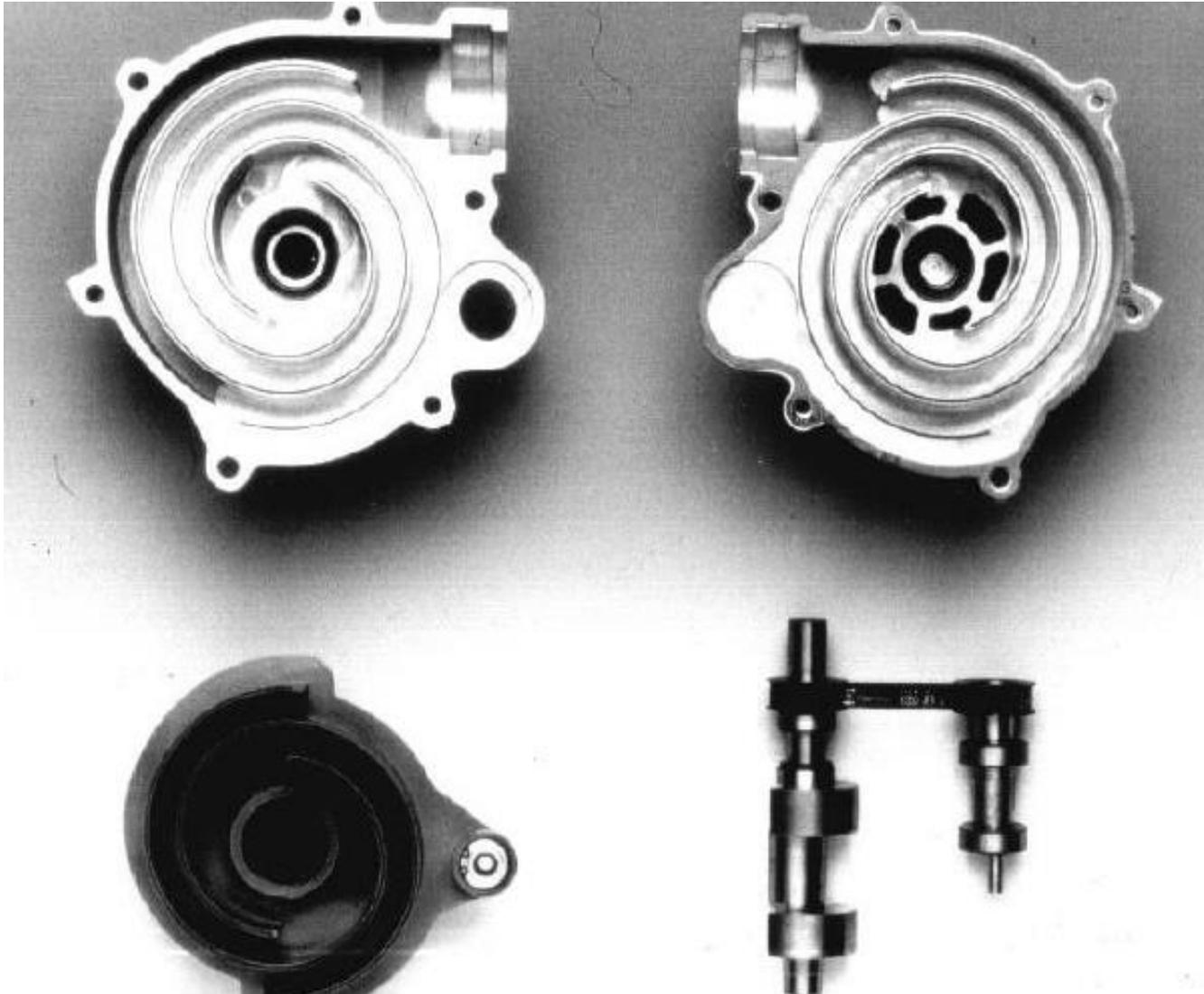


Problem : seitliche Dichtungen

außen 
innen 

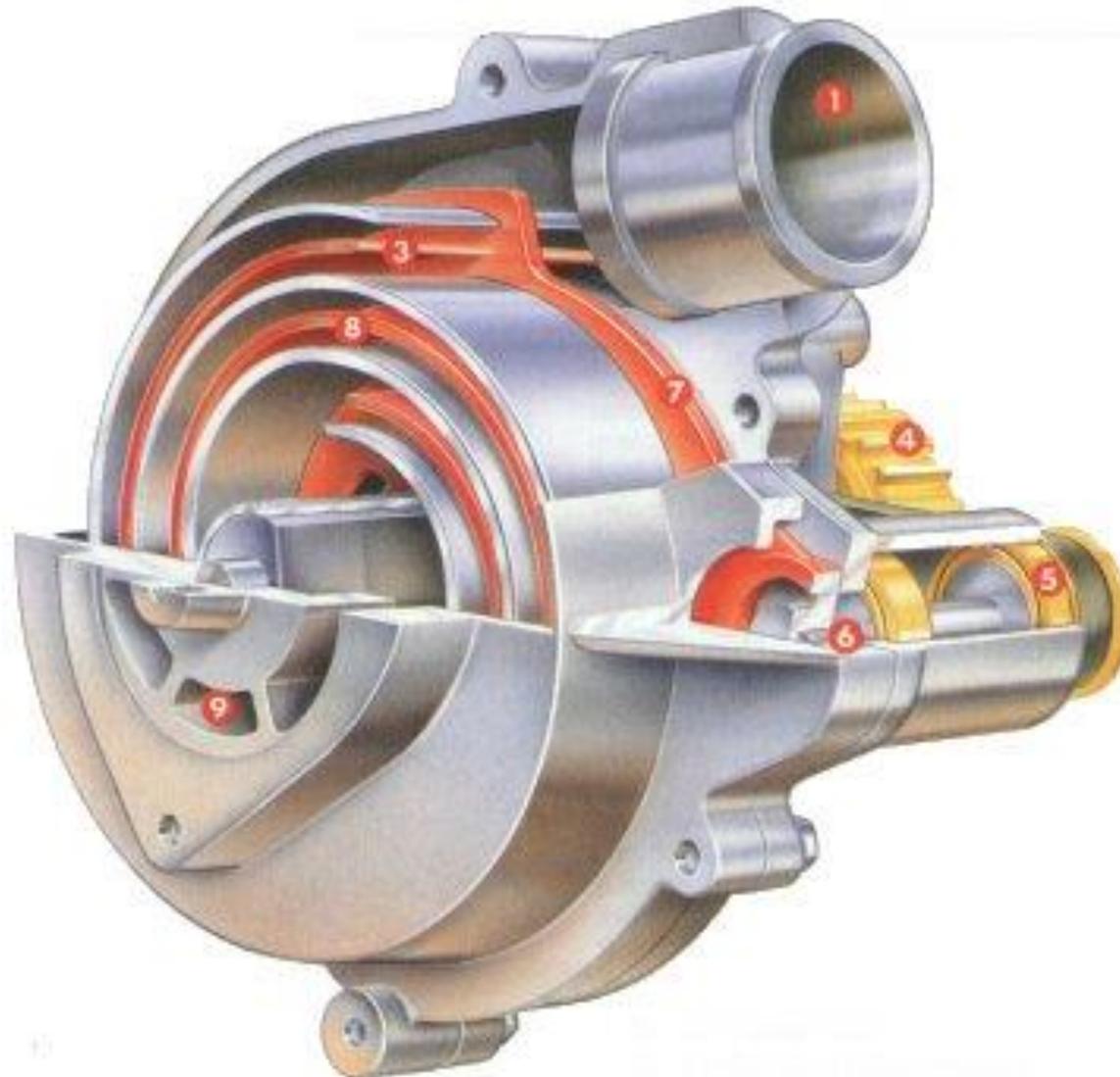
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – G-Lader, Bauteile



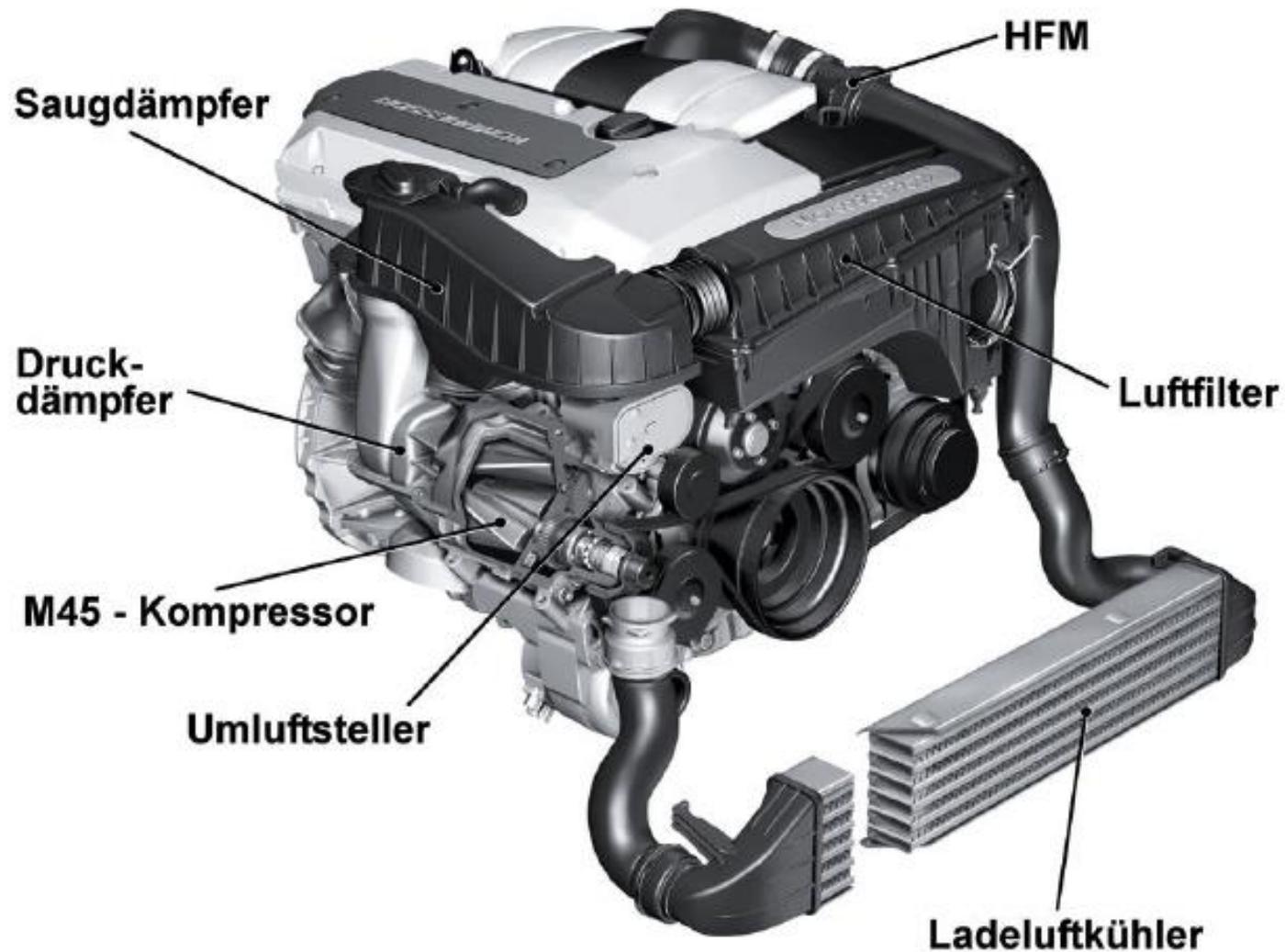
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – G-Lader, Bauteile



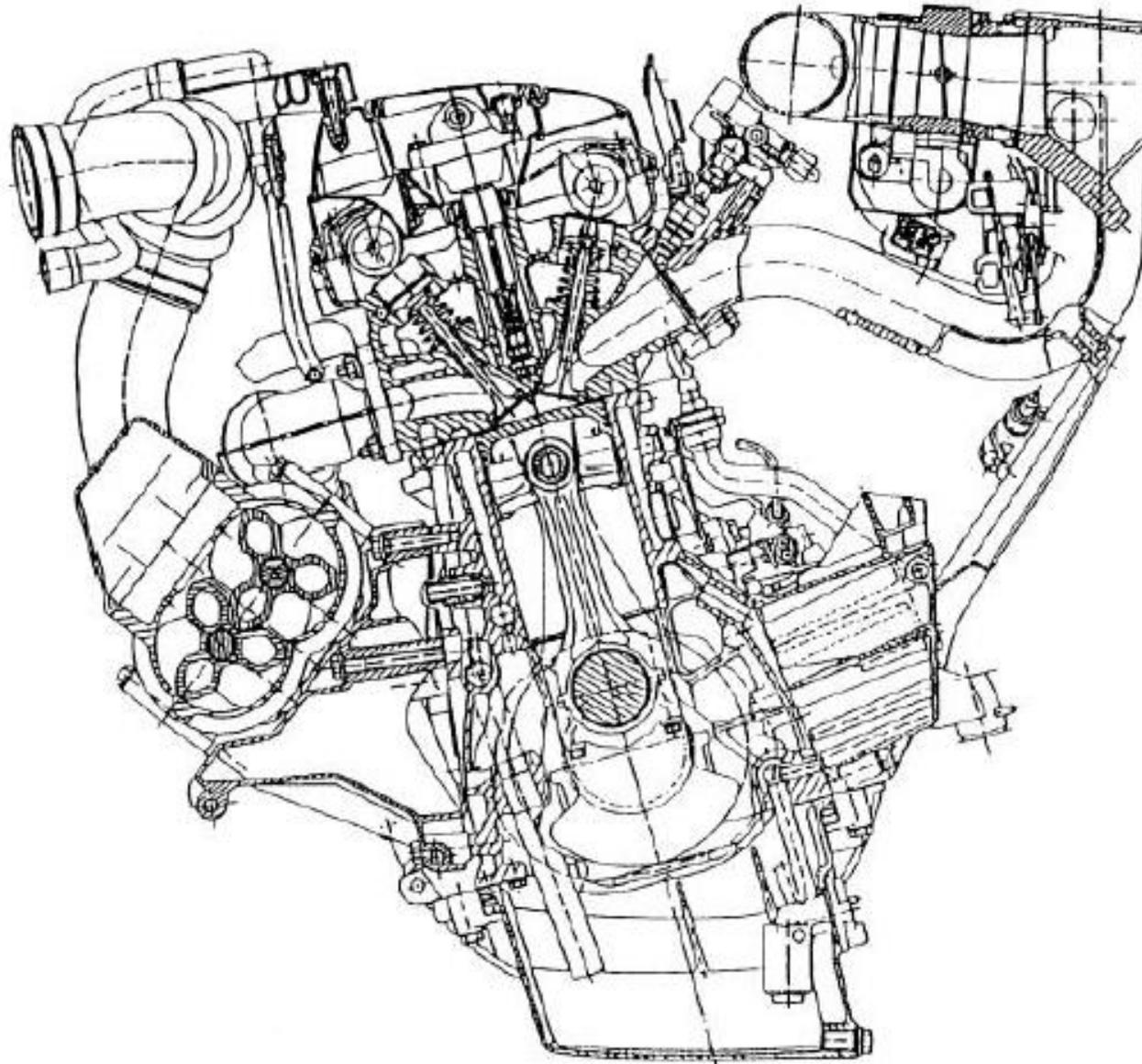
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – MB M111



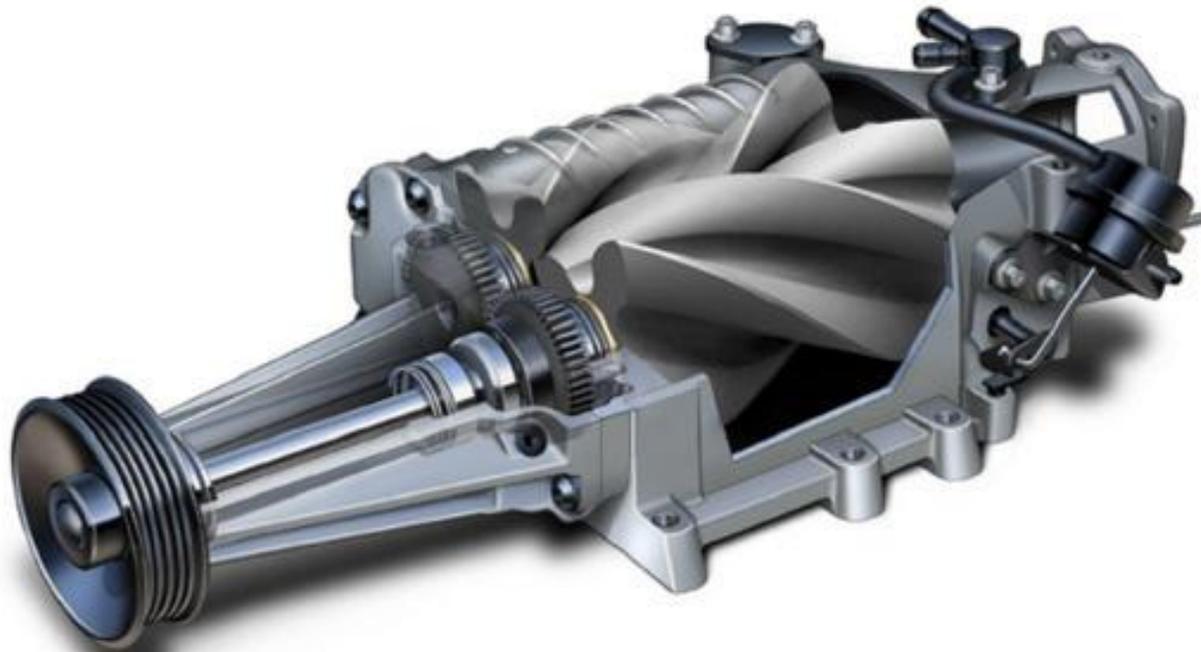
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – MB C230 Kompressor



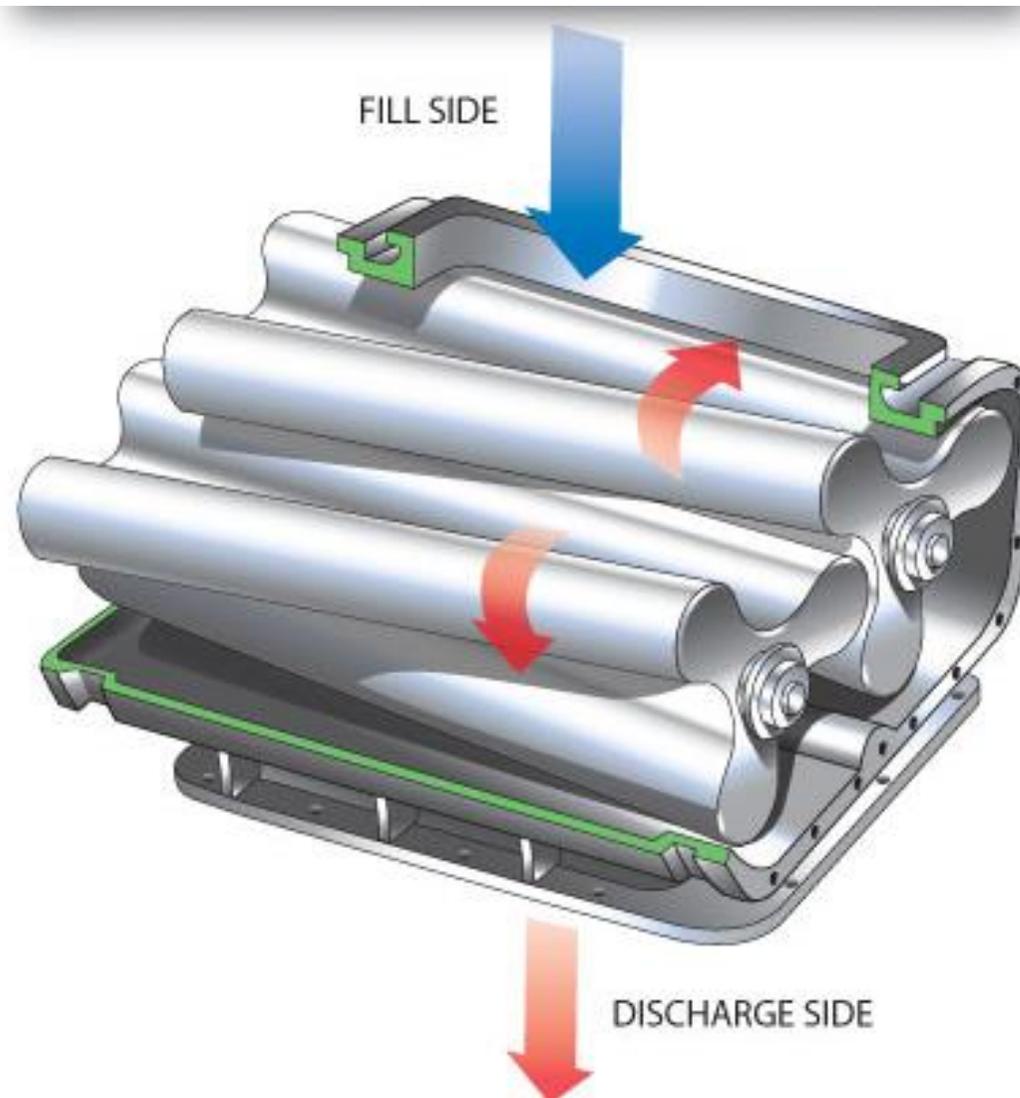
8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Eaton Lader



8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Eaton Lader



8 Aufladung

Mechanische Aufladung – Kreiselmachine

