

2 Thermodynamische Grundlagen

- 2.1 Verbrennung und Kraftstoffe
- 2.2 Kreisprozesse
 - 2.2.1 Carnot-Prozess
 - 2.2.2 Gleichraumprozess
 - 2.2.3 Gleichdruckprozess
 - 2.2.4 Seiligerprozess
- 2.3 Prozess des vollkommenen Motors
- 2.4 Brennverlauf
- 2.5 Wärmestrom im Verbrennungsmotor

2.1 Verbrennung und Kraftstoffe

- Kraftstoffe für Otto- und Dieselmotoren werden überwiegend aus Destillation von Mineralöl gewonnen.
- Diese Kraftstoffe bestehen aus über 200 verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen, deren einzelne Anteile wesentlich die Kraftstoffeigenschaften bestimmen.

Einteilung von einfachen Kohlenwasserstoffverbindungen

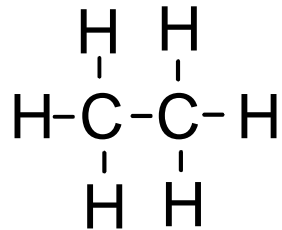
- Alkane (früher: Paraffine)
 - Normal-Paraffine
 - Iso-Paraffine
- Alkene (früher: Olefine)
 - Alkene (Monoolefine)
 - Alkadiene (Dioline)
- Alkine (früher: Acetylene)
- Zyκλο-Alkane (früher Naphtene)
- Aromaten
- Sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffverbindungen
 - Alkohole, R-OH
 - Ether, R1-O-R2
 - Ketone, R1-CO-R2
 - Aldehyde, R-CHO

Alkane

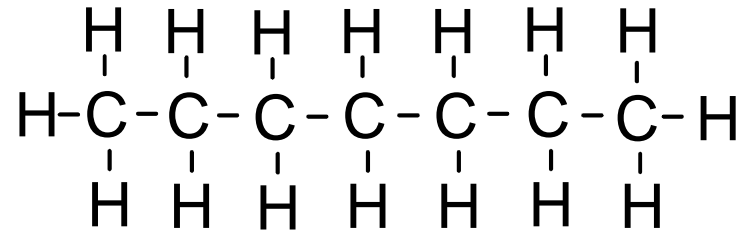
Alkane C_nH_{2n+2} (Paraffine)

Kettenförmig aufgebaute Kohlenwasserstoffe mit nur Einfachbindungen

Normal-Paraffine (grade kettenförmig)

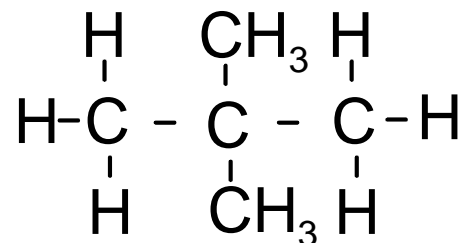


Ethan C_2H_6



n-Heptan C_7H_{16}

Iso-Paraffine (verzweigt kettenförmig)



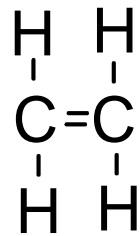
2,2 Dimethylpropan (iso Pentan) C_5H_{12}

Alkene

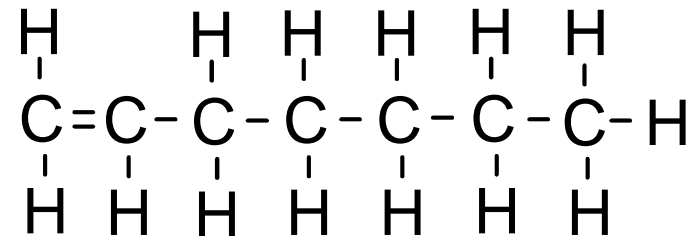
Alkene (Olefine)

Kettenförmig aufgebaute Kohlenwasserstoffe mit Doppelbindungen

Alkene C_nH_{2n} (Monoolefine, eine Doppelbindung)

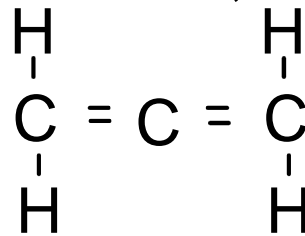


Ethen C_2H_4



1-Hexen C_7H_{14}

Alkadiene C_nH_{2n-2} (Diolefine, zwei Doppelbindungen)

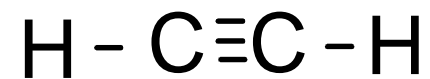


Propadien C_3H_4

Alkine

Alkine $C_n H_{2n-2}$ (Acetylene)

Kettenförmig aufgebaute Kohlenwasserstoffe mit einer Dreifachbindung

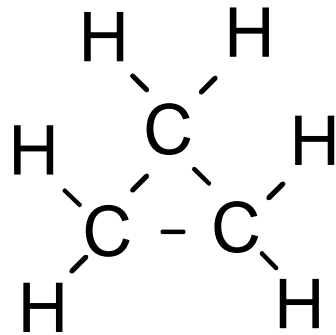


Ethin C_2H_2

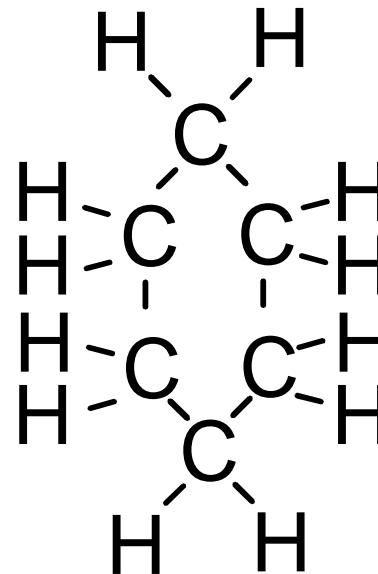
Zykloalkane

Zykloalkane C_nH_{2n} (Naphtene)

Ringförmig aufgebaute Kohlenwasserstoffe mit Einfachbindungen



Zyklopropan C_3H_6

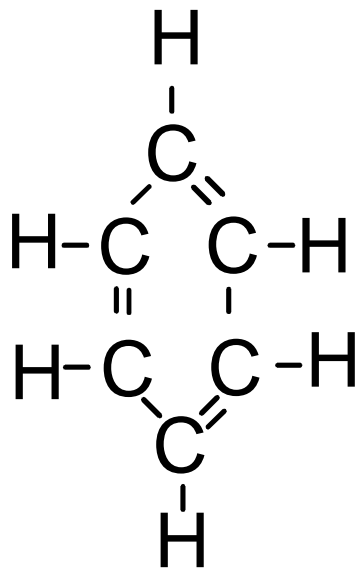


Zyklohexan C_6H_{12}

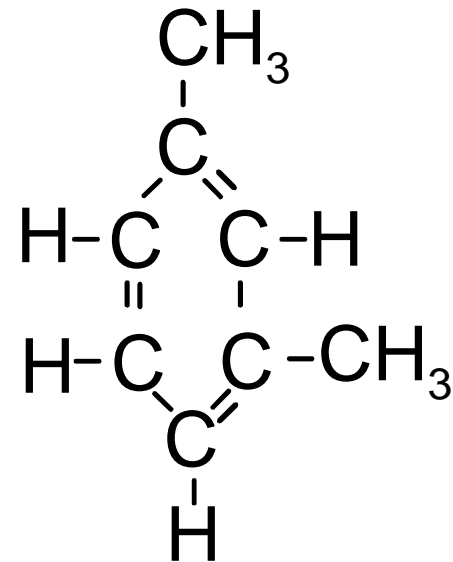
Aromaten

Aromaten

Ringförmig aufgebaute Kohlenwasserstoffe mit Doppelbindungen
Grundbaustein ist der Benzolring



Benzol

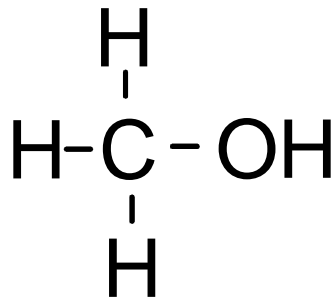


1,3-Dimethylbenzol

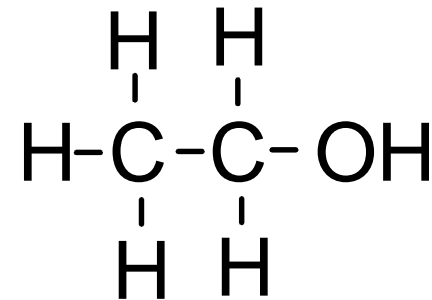
Alkohole

Alkohole, R-OH

enthalten eine Hydroxylgruppe -OH



Methanol CH_3OH



Ethanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

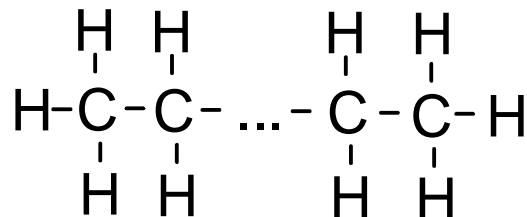
Zündverhalten von Kraftstoffen

- Zündwilligkeit
 - Dieselkraftstoffe müssen im Gegensatz zu Ottokraftstoffen eine hohe Zündwilligkeit besitzen
 - Die Zündwilligkeit steht in enger Beziehung zur Zündverzugszeit (Zeit zwischen Einspritzbeginn und Druckanstieg infolge Verbrennung)
 - Das Maß für die Zündwilligkeit ist die Cetanzahl (CZ)
- Klopfestigkeit
 - Ottokraftstoffe sollen geringe Zündwilligkeit besitzen
 - Selbstzündende Gemischreste führen im Zylinder zu starken Gasdruckschwingungen (Klopfen)
 - Das Maß für die Klopfestigkeit ist die Oktanzahl

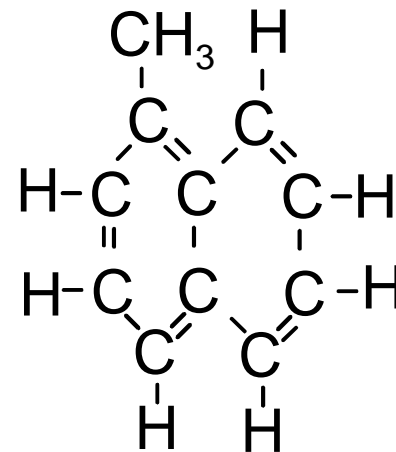
Cetanzahl (CZ)

Zur Bestimmung der Cetanzahl wird das Zündverhalten eines Kraftstoffes in einem 1-Zylinder Prüfdieselmotor (z.B. BASF DIN 51773) untersucht. Das Zündverhalten wird mit einem Zweikomponenten-Ersatzbrennstoff bestehend aus α -Methyl-Naphtalin (CZ=0) und Cetan (CZ=100) verglichen. Die Cetanzahl ergibt sich entsprechend des Volumenanteils Cetan des Ersatzbrennstoffes.

Cetan $C_{16}H_{34}$ (CZ=100)



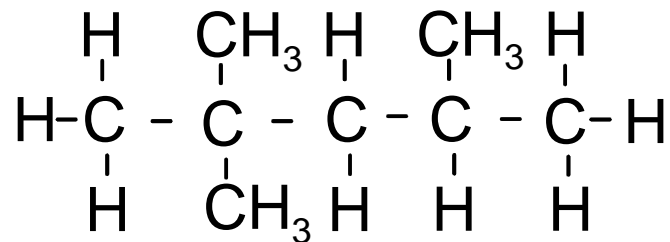
α -Methylnaphthalin $C_{11}H_{10}$ (CZ=0)



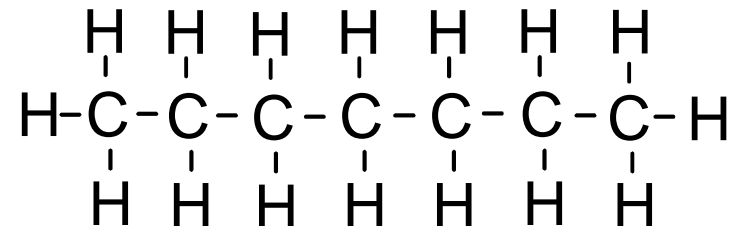
Oktanzahl (OZ)

Zur Bestimmung der Oktanzahl wird das Klopfverhalten eines Kraftstoffes in einem 1-Zylinder Prüfmotor untersucht. Das Klopfverhalten wird mit einem Zweikomponenten-Ersatzbrennstoff bestehend aus n-Heptan (OZ=0) und Iso-Oktan (OZ=100) verglichen. Die Oktanzahl ergibt sich entsprechend des Volumenanteils von Iso-Oktan des Ersatzbrennstoffes.

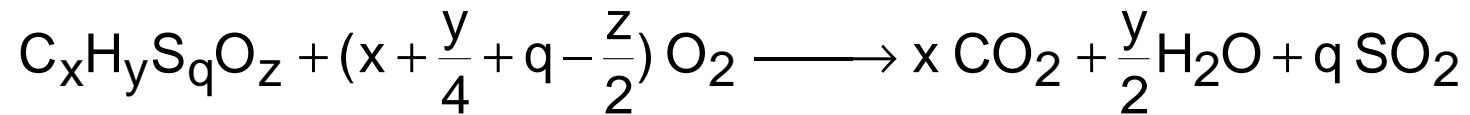
Iso-Oktan C_8H_{18} (OZ=100)



n-Heptan C_7H_{16} (OZ=0)



Verbrennung eines hypothetischen Brennstoffs mit der Zusammensetzung $C_xH_yS_qO_z$



mit den stöchiometrischen Koeffizienten

$$x = \frac{M_B}{M_C} c, \quad y = \frac{M_B}{M_H} h, \quad q = \frac{M_B}{M_S} s, \quad z = \frac{M_B}{M_O} o$$

M_B, M_C, M_H, M_S, M_O Molmassen von Brennstoff, Kohlenstoff,
Wasserstoff, Schwefel und Sauerstoff

c, h, s, o Massenanteile von Kohlenstoff, Wasser-
stoff, Schwefel und Sauerstoff

Stöchiometrischer Luftbedarf

Stöchiometrischer Luftbedarf $L_{St} = m_{Lst} / m_B$

m_{Lst} = Luftmasse, die zu vollständigen
Verbrennung benötigt wird

m_B = Brennstoffmasse

Berechnung des stöchiometrischen Luftbedarfs

Massenanteil Sauerstoff in Luft $\xi_{L,O_2} = \frac{m_{O_2}}{m_L} = 0,232$

$$L_{st} = \frac{1}{\xi_{L,O_2}} \cdot \frac{m_{O_2,st}}{m_B} = \frac{1}{\xi_{L,O_2}} \cdot \frac{M_{O_2}}{M_B} \cdot \frac{n_{O_2,st}}{n_B}$$

M_{O_2}, M_B Molmassen von O_2 bzw. vom Brennstoff

$n_{O_2,st}, n_B$ Anzahl der einzelnen Atome bzw. Moleküle (Stoffmengen)

mit $n_{O_2,st} = x + \frac{y}{4} + q - \frac{z}{2}$ und $n_B = 1$ ergibt sich:

$$L_{st} = \frac{1}{\xi_{L,O_2}} \cdot \frac{M_{O_2}}{M_B} \cdot \left(x + \frac{y}{4} + q - \frac{z}{2}\right)$$

Stöchiometrischer Luftbedarf in Abhängigkeit der Massenanteile

$$L_{\text{st}} = \frac{1}{\xi_{\text{L},\text{O}_2}} \cdot \left(\frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{C}}} c + \frac{1}{4} \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{H}}} h + \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{S}}} s - o \right)$$

oder als Zahlenwertgleichung

$$L_{\text{st}} = \frac{1}{0,232} \cdot (2,664 c + 7,937 h + 0,998 s - o)$$

Übungsaufgabe

Berechnen Sie den stöchiometrischen Luftbedarf von Ethanol (C_2H_5OH).

Molmasse C: 12 g/mol

Molmasse H: 1 g/mol

Molmasse O: 16 g/mol

Heizwert

Definition:

Der Heizwert ist die bei einer Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, bei der es nicht zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wassers kommt. Der Heizwert wird auf die Masse des eingesetzten Brennstoffs bezogen.

Kraftstoffeigenschaften

	Benzin	Diesel	Methanol	Ethanol	Pflanzenöl	Flüssiggas	Methan	Biogas	Wasserstoff
Heizwert in kJ/kg	41500	43000	19700	26800	37100	45840	50000	17500	120000
L _{St}	14,7	14,5	6,46	9,0	12,7	15,5	17,2	6,1	34
Dichte in kg/m ³	750	830	795	789	930	540 flüssig 2,06 gasf.	540 flüssig 2,06 gasf.	1,20 gasf.	71 flüssig 0,09 gasf.
Dampfdruck in bar	0,45... 0,90		0,37	0,21					
Verdampfungswärme in kJ/kg	420	300	1119	904		353	510		450

Luftverhältnis λ

$$\text{Luftverhältnis } \lambda = \frac{m_L}{m_{Lst}}$$

m_L = angesaugte Luftmenge

m_{Lst} = Luftmasse, die zu einer stöchiometrischen Verbrennung notwendig wäre

Gemischheizwert Ottomotoren

$$\text{Gemischheizwert } H_G = \frac{m_B \cdot H_u}{V_G}$$

H_u = Heizwert

V_G = Gemischvolumen

$$V_G = \frac{m_G}{\rho_G} = \frac{1}{\rho_G} (m_L + m_B) = \frac{m_B}{\rho_G} (L_{st} \cdot \lambda + 1)$$

ρ_G = Dichte des Gemisches

m_G = Masse des Gemisches

$$H_G = \frac{H_u \cdot \rho_G}{\lambda \cdot L_{st} + 1}$$

Gemischheizwert Diesel- bzw. direkteinspritzende Ottomotoren

$$\text{Gemischheizwert } \bar{H}_G = \frac{m_B \cdot H_u}{V_L}$$

H_u = Heizwert

V_L = Luftvolumen

$$V_L = \frac{m_B \cdot L_{st} \cdot \lambda}{\rho_L}$$

ρ_L = Dichte der Luft

$$\bar{H}_G = \frac{H_u \cdot \rho_L}{\lambda \cdot L_{st}}$$

Übungsaufgabe

Berechnen Sie den Gemischheizwert für einen mit Benzin betriebenen Ottomotor mit Saugrohrein-spritzung sowie für einen Ottomotor mit Direktein-spritzung. Gehen Sie von einer Luftdichte von $1,2 \text{ kg/m}^3$ und einem Lambdawert von $0,88$ aus.

Gemischheizwert verschiedener Kraftstoffe

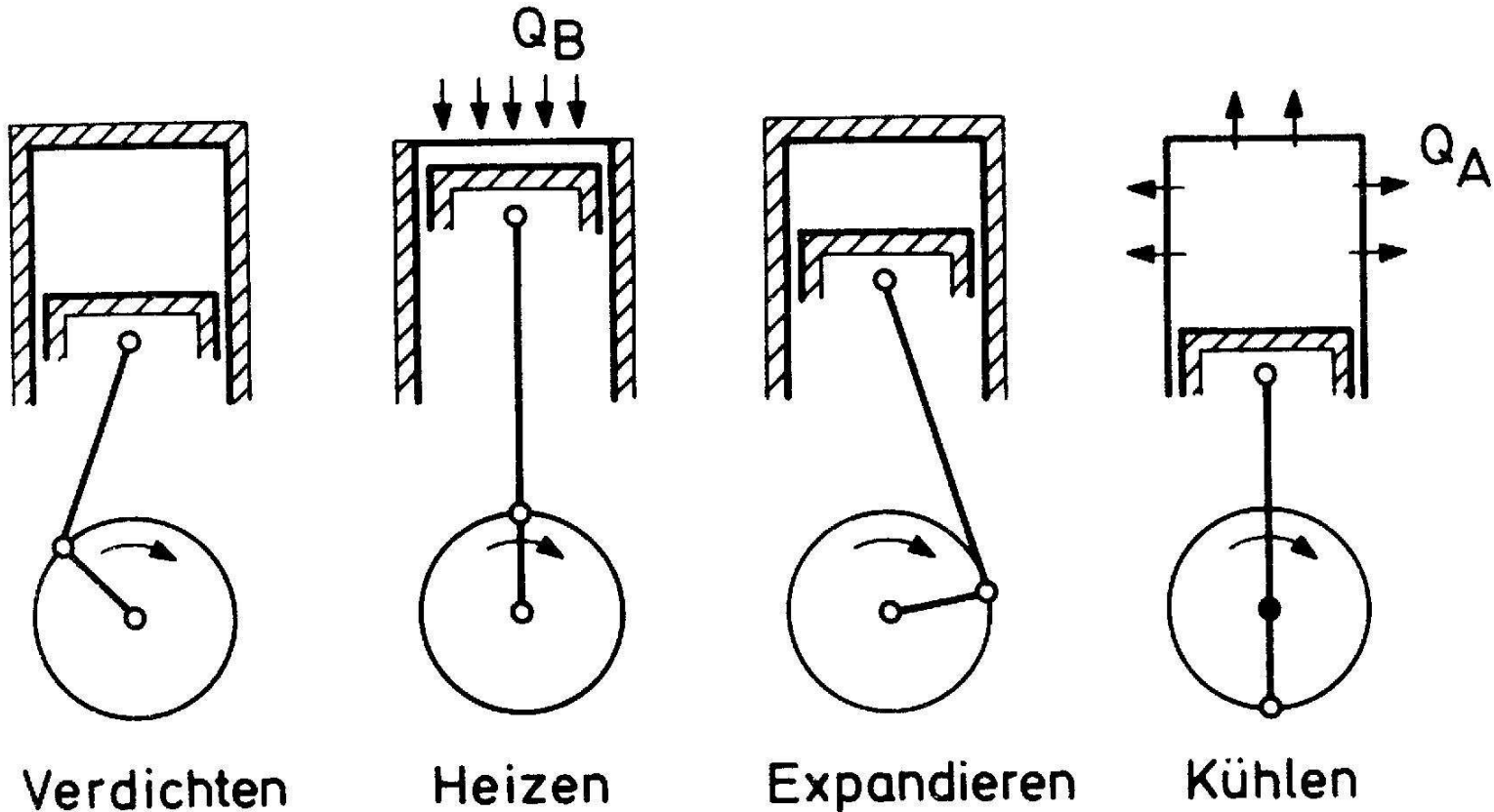
	Benzin	Diesel	Methanol	Ethanol	Pflanzenöl	Flüssiggas	Methan	Biogas	Wasserstoff
Gemisch-Heizwert in kJ/m ³	3750	3865	3438	3474	3504	3725	3223	3210	2973

2.2 Kreisprozesse

Die einfachsten Modelle, um einen Motorprozess zu beschreiben, sind innerlich reversible Kreisprozesse. Dabei wird von folgenden Vereinfachungen ausgegangen:

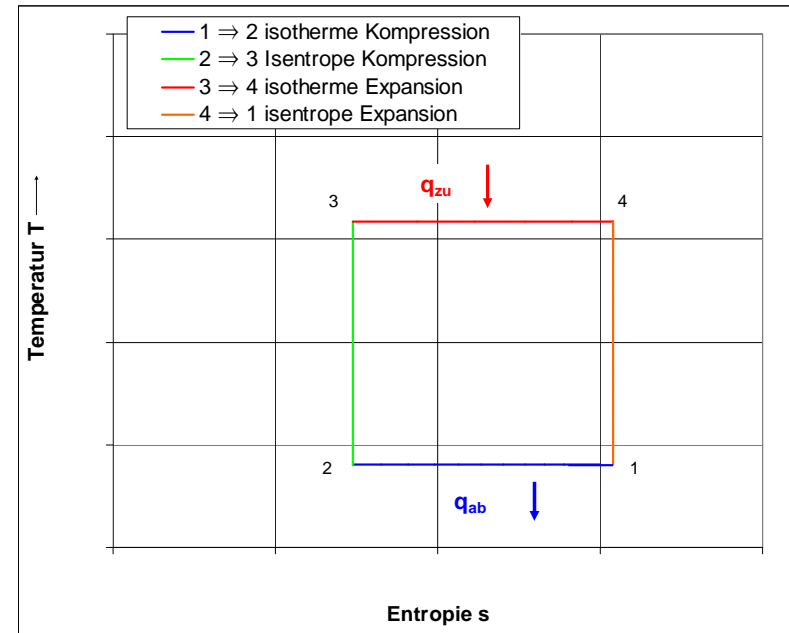
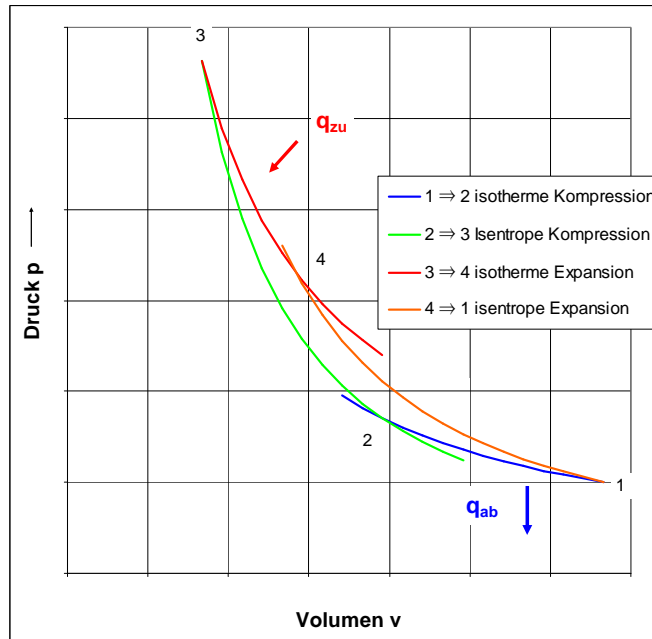
- Vernachlässigung der stofflichen Umwandlung des Arbeitsmediums
- Verbrennungsvorgang wird durch Wärmezufuhr beschrieben
- Ladungswechsel wird durch Wärmeabfuhr beschrieben
- Als Arbeitsmedium wird Luft als ideales Gas angenommen

Kreisprozess eines Hubkolbenmotors



Quelle: Pischinger

2.2.1 Carnot-Prozess

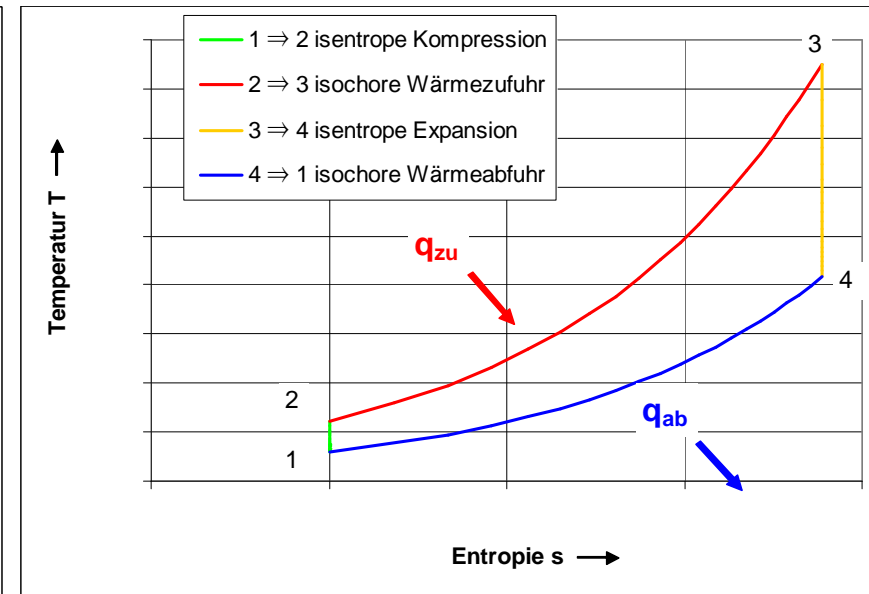
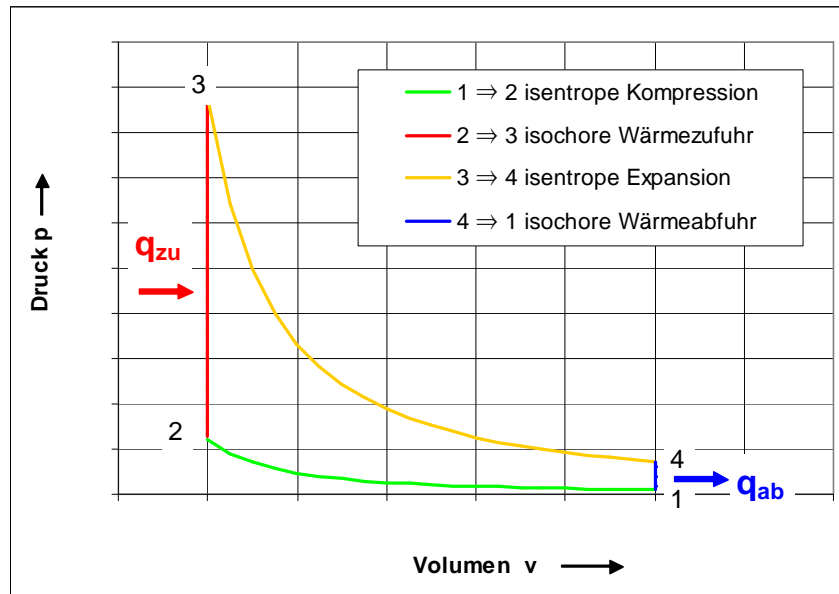


- Der Carnot-Prozess ist in Bezug auf seinen Wirkungsgrad der ideale Wärmekraftprozess.
- Allerdings lässt sich dieser Prozess praktisch nicht realisieren, da das erforderliche Verdichtungsverhältnis sowie die isotherm zu führende Verbrennung nicht umsetzbar sind.

Carnot-Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{th,C}} = \frac{T_3 - T_1}{T_3}$$

2.2.2 Gleichraumprozess



- Der Gleichraumprozess ist der Thermodynamisch günstigste Prozess, der sich technisch verwirklichen lässt.
- Die kritischen Punkte des Carnot-Prozess (isotherme Kompression und Expansion, nicht realisierbares Verdichtungsverhältnis) werden vermieden.

Thermischer Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses

$$\eta_{th,v} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = 1 - \frac{q_{ab}}{q_{zu}} = 1 - \frac{c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_v \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}$$

c_v = spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen

Für die Isentropen 1-2 und 3-4 gilt:

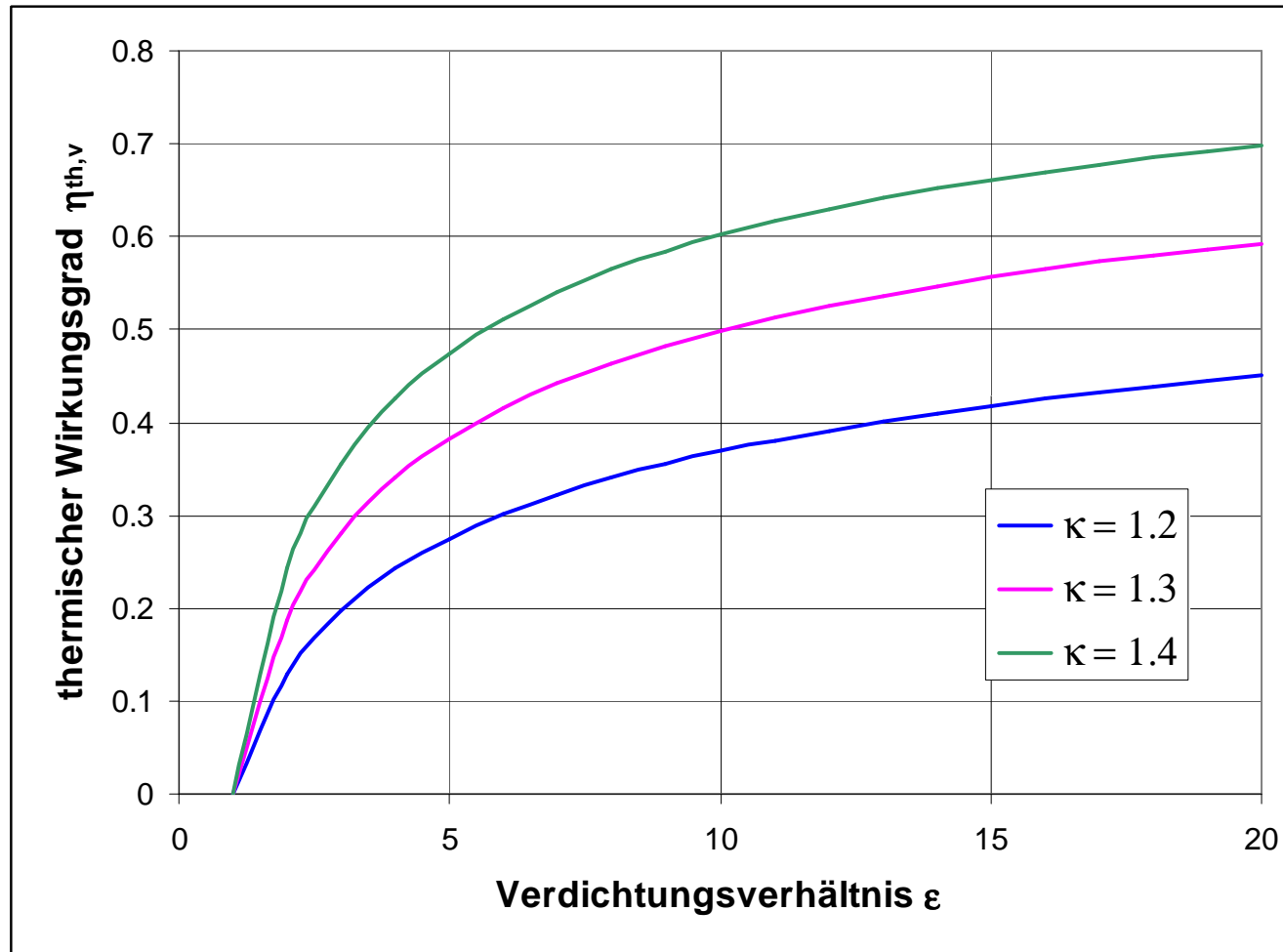
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

Somit ergibt sich für den Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses:

$$\eta_{th,v} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = \underline{\underline{1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}}}$$

ε = Verdichtungsverhältnis v_1/v_2

Thermischer Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses in Abhängigkeit von Verdichtungsverhältnis und Isentropenexponent



Übungsaufgabe

Gegeben sind die technischen Daten eines 4-Takt Ottomotors (Ducati). Mit Hilfe des Gleichraumprozesses soll das innermotorische Verhalten des Motors untersucht werden. Für die Berechnungen der Zustandsänderungen soll von Luft als idealem Gas ausgegangen werden.

- Berechnen Sie ausgehend von einem Umgebungsdruck von 1 bar und einer Luftdichte von $1,2 \text{ kg/m}^3$ den Druck und die Temperatur nach der isentropen Verdichtung.
- Nach der isentropen Verdichtung wird isochor eine Wärmemenge von 1,9 kJ zugeführt. Berechnen Sie Druck und Temperatur nachdem die Wärme zugeführt worden ist.
- Berechnen Sie Druck und Temperatur nach der isentropen Expansion.
- Berechnen Sie die Wärmemenge, die nach der isentropen Expansion isochor abgeführt wird.
- Skizzieren Sie den Vorgang im p-v Diagramm.
- Welcher Wirkungsgrad ergibt sich für diesen Vergleichsprozess?
- Welche Leistung würde sich ergeben, wenn dieser Vergleichsprozess mit einer Drehzahl von 6000 U/min ablaufen würde?
- Welche Leistungssteigerung ist zu erwarten, wenn das Verdichtungsverhältnis auf 12 erhöht wird?

Motordaten:

Hubraum

$$V_H = 1,078 \text{ l}$$

Verdichtungsverhältnis

$$\varepsilon = 10,5$$

Stoffdaten:

spez. Wärmekapazität der Luft bei konstantem Volumen

$$c_v = 0,7170 \text{ kJ / (kg K)}$$

spez. Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck

$$c_p = 1,0038 \text{ kJ / (kg K)}$$

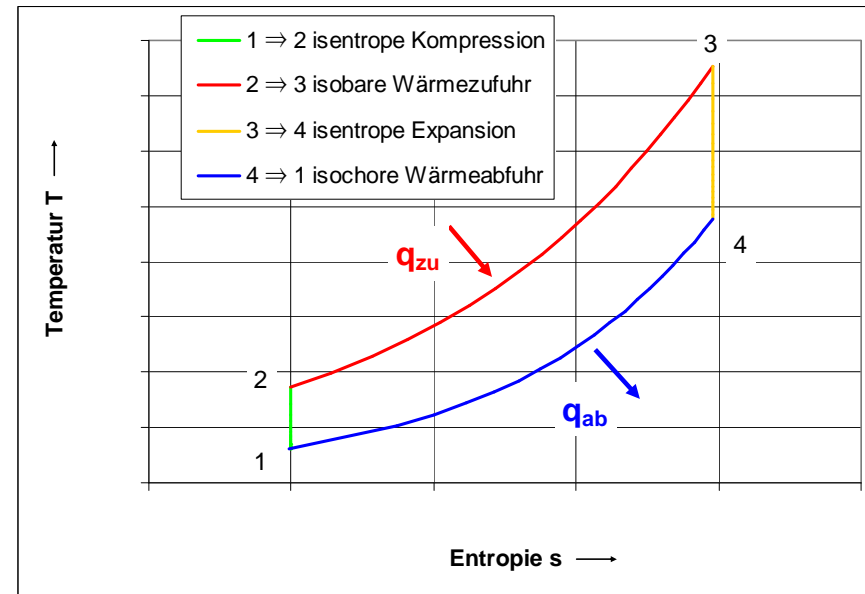
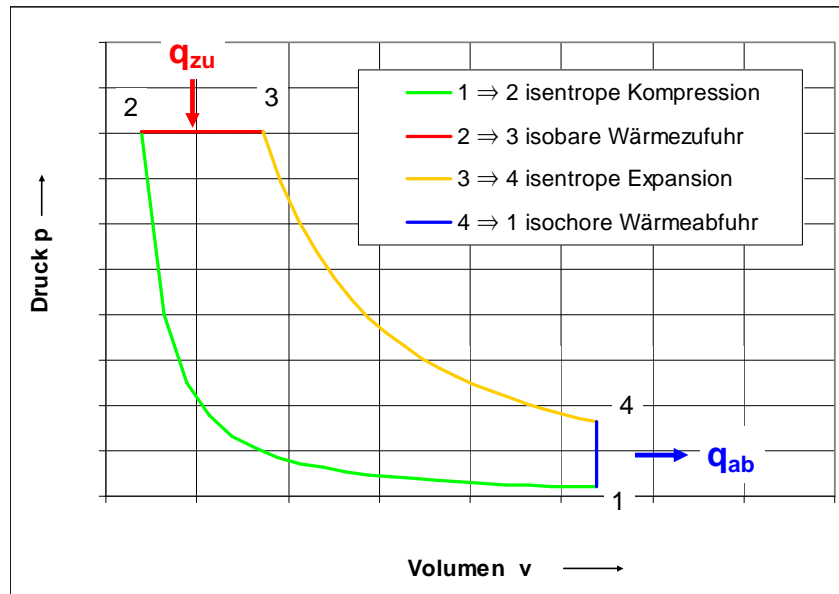
Isentropenexponent

$$\kappa = c_p / c_v$$

Gaskonstante

$$R = c_p - c_v$$

2.2.3 Gleichdruckprozess



- Der Gleichdruckprozess wird herangezogen, wenn aus Gründen der Bauteilbelastung eine Begrenzung des maximalen Druckes notwendig ist.
- Dieser Modellprozess wird häufig für Dieselmotoren verwendet, da hier das Verdichtungsverhältnis sehr hoch ist.

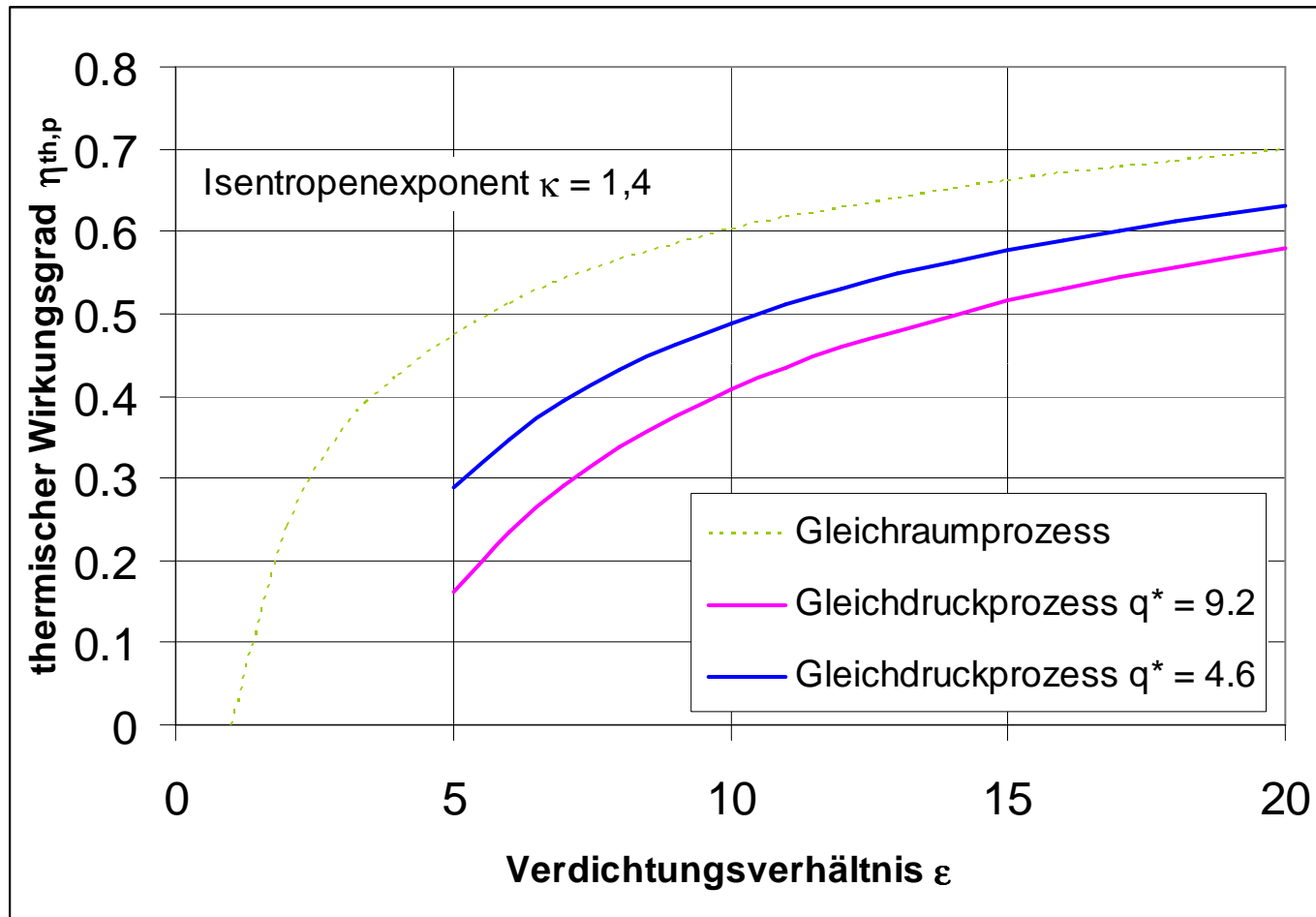
Thermischer Wirkungsgrad des Gleichdruckprozesses

$$\eta_{th,p} = 1 - \frac{1}{\kappa \cdot q^*} \cdot \left[\left(\frac{q^*}{\varepsilon^{\kappa-1}} + 1 \right)^\kappa - 1 \right]$$

mit der dimensionslosen Größe q^* als Maß für die Wärmezufuhr

$$q^* = \frac{q_{zu}}{c_p \cdot T_1}$$

Thermischer Wirkungsgrad des Gleichdruckprozesse in Abhängigkeit von Verdichtungsverhältnis und zugeführter Wärmemenge



Übungsaufgabe

Gegeben sind die technischen Daten eines turboaufgeladenen 4-Takt Dieselmotors. Mit Hilfe des Gleichdruckprozesses soll das innermotorische Verhalten des Motors untersucht werden. Für die Berechnungen der Zustandsänderungen soll von Luft als idealem Gas ausgegangen werden.

- Die Ladelufttemperatur beträgt 310 K und der Ladedruck liegt um 0,6 bar über dem atmosphärischen Druck. Berechnen Sie das spezifische Volumen v_1 des Vergleichsprozesses und die Luftmasse.
- Berechnen Sie Druck und Temperatur nach der isentropen Verdichtung.
- Nach der isentropen Verdichtung wird isobar eine Wärmemenge von 4,0 kJ zugeführt. Berechnen Sie Druck, Temperatur und Volumen nachdem die Wärme zugeführt worden ist.
- Berechnen Sie Druck und Temperatur nach der isentropen Expansion.
- Berechnen Sie die Wärmemenge, die nach der isentropen Expansion isochor abgeführt wird.
- Skizzieren Sie den Vorgang im p-v Diagramm.
- Welcher Wirkungsgrad ergibt sich für diesen Vergleichsprozess?
- Welche Leistung würde sich ergeben, wenn dieser Vergleichsprozess mit einer Drehzahl von 4000 U/min ablaufen würde?
- Welche Leistung und welcher Wirkungsgrad ergeben sich, wenn die zugeführte Wärmemenge auf 4,4 kJ erhöht wird?

Motordaten:

Hubraum

$$V_H = 1,56 \text{ l}$$

Verdichtungsverhältnis

$$\varepsilon = 18,3$$

Ladedruck

$$p_L = 0,6 \text{ bar}$$

Stoffdaten:

spez. Wärmekapazität der Luft bei konstantem Volumen

$$c_v = 0,7170 \text{ kJ / (kg K)}$$

spez. Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck

$$c_p = 1,0038 \text{ kJ / (kg K)}$$

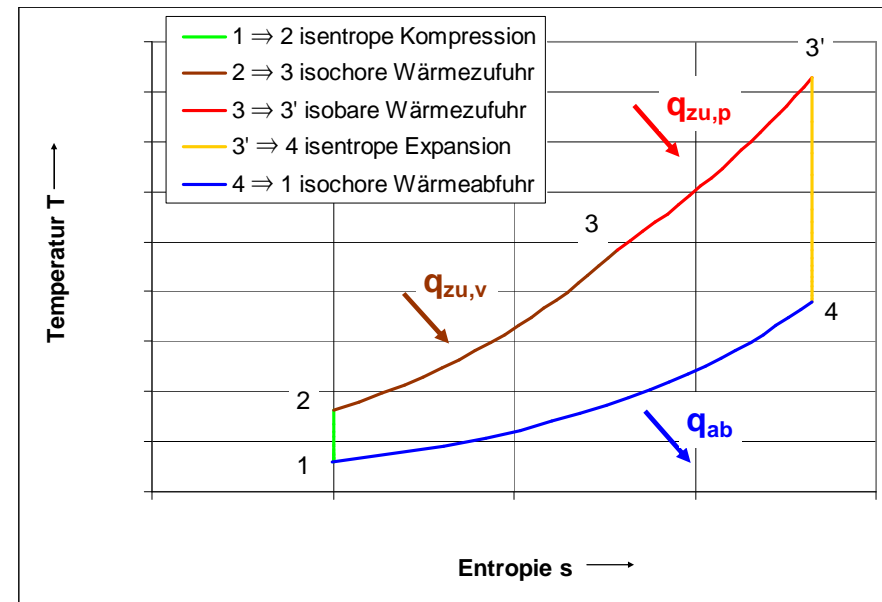
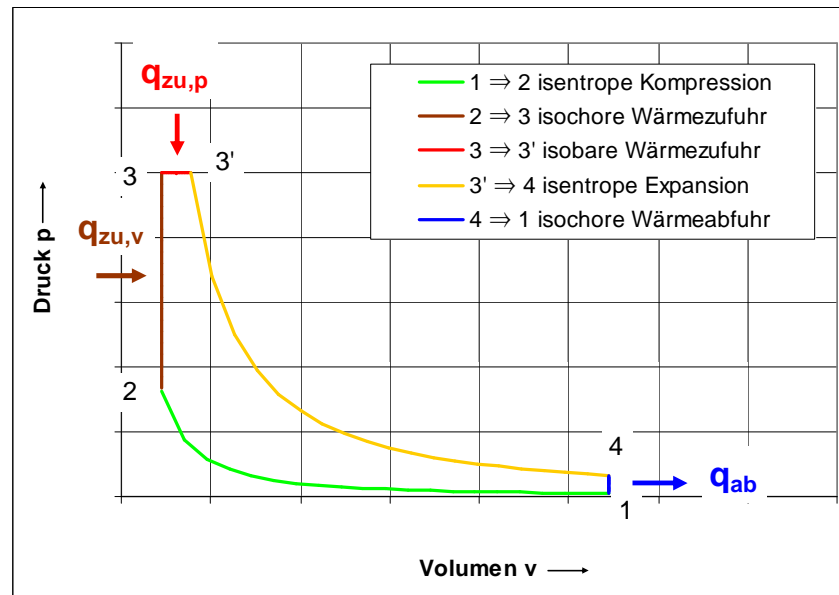
Isentropenexponent

$$\kappa = c_p / c_v$$

Gaskonstante

$$R = c_p - c_v$$

2.2.4 Seiliger-Prozess

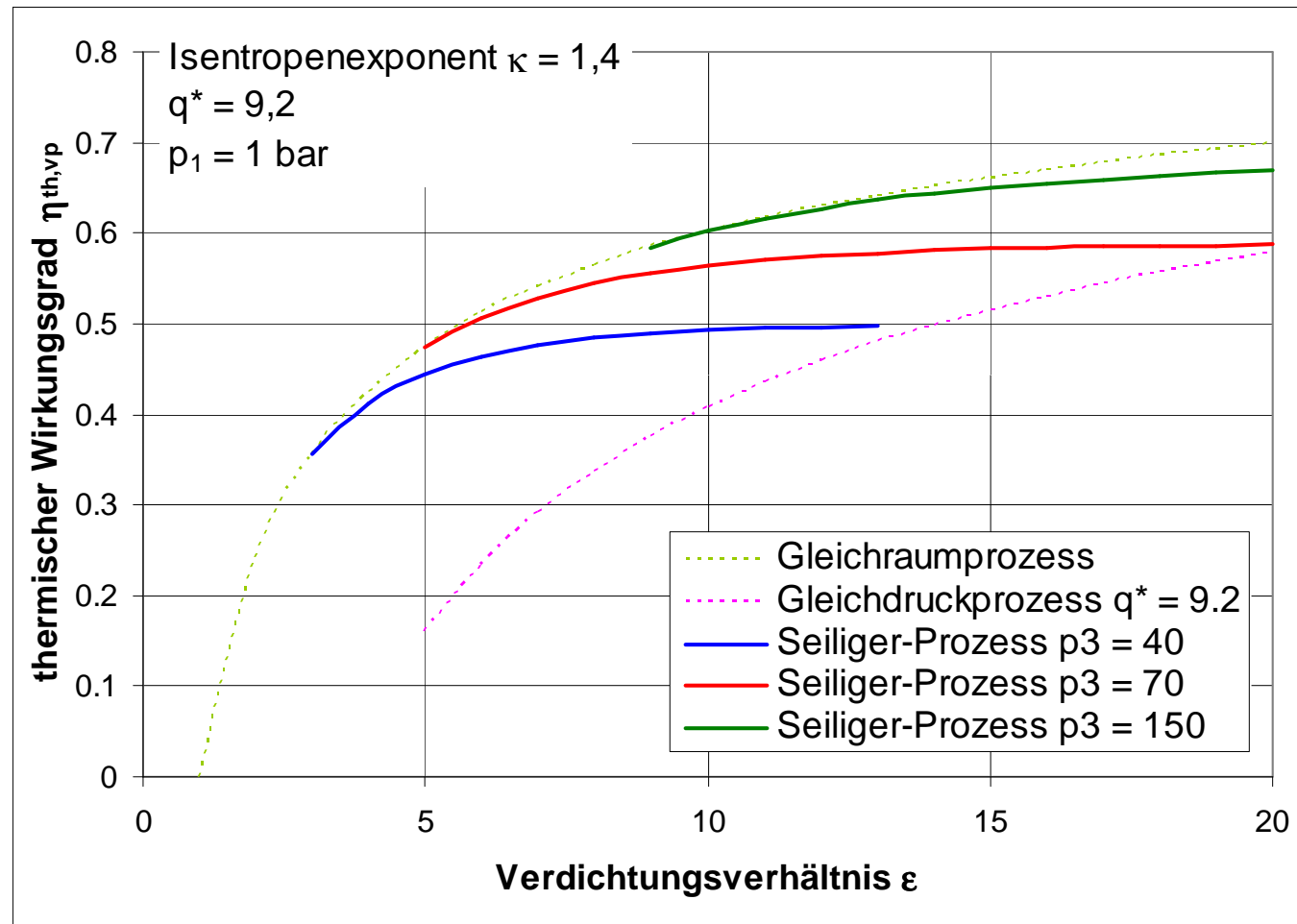


- Der Seiliger-Prozess ist eine Kombination aus Gleichraum- und Gleichdruckprozess.
- Dieser Modellprozess wird verwendet, wenn der Höchstdruck begrenzt werden muss.

Thermischer Wirkungsgrad des Seiliger-Prozesses

$$\eta_{th, vp} = 1 - \frac{\left[q^* - \frac{1}{\kappa \cdot \varepsilon} \left(\frac{p_3}{p_1} - \varepsilon^\kappa \right) + \frac{p_3}{p_1 \cdot \varepsilon} \right]^\kappa \cdot \left(\frac{p_1}{p_3} \right)^{\kappa-1} - 1}{\kappa \cdot q^*}$$

Thermischer Wirkungsgrad des Seiliger-Prozesses in Abhängigkeit von Verdichtungsverhältnis und Maximaldruck



Übungsaufgabe

Durch eine Kreisprozessrechnung mit Luft als idealem Gas soll für einen Dieselmotor anhand zweier unterschiedlicher Lastpunkte eine Aussage über das Wirkungsgradverhalten getroffen werden. Folgenden Daten sind gegeben:

Zugeführte spezifische Wärme bei Volllast und $\lambda = 1,35$
Verdichtungsverhältnis
Prozessanfangstemperatur
Prozessanfangsdruck
Maximal zulässiger Spitzendruck
spez. Wärmekapazität der Luft bei konstantem Volumen
spez. Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck
Isentropenexponent
Gaskonstante

$$\begin{aligned}q_{zu} &= 2275 \text{ kJ / kg} \\ \varepsilon &= 20 \\ T_1 &= 297 \text{ K} \\ p_1 &= 1 \text{ bar} \\ p_{\max} &= 85 \text{ bar} \\ c_v &= 0.7170 \text{ kJ / (kg K)} \\ c_p &= 1,0038 \text{ kJ / (kg K)} \\ \kappa &= c_p / c_v \\ R &= c_p - c_v\end{aligned}$$

- Welcher Vergleichsprozess ist bei den oben angegebenen Daten für die Vergleichsrechnung heranzuziehen?
- Berechnen Sie jeweils Druck und Temperatur zum Ende der Verdichtung, der Wärmezufuhr und der Expansion.
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad.
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad im Teillastbetrieb bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 2,0$.
- Zeichnen Sie qualitativ den Prozessverlauf für Volllast und den Teillastbetriebspunkt in ein p - v Diagramm.

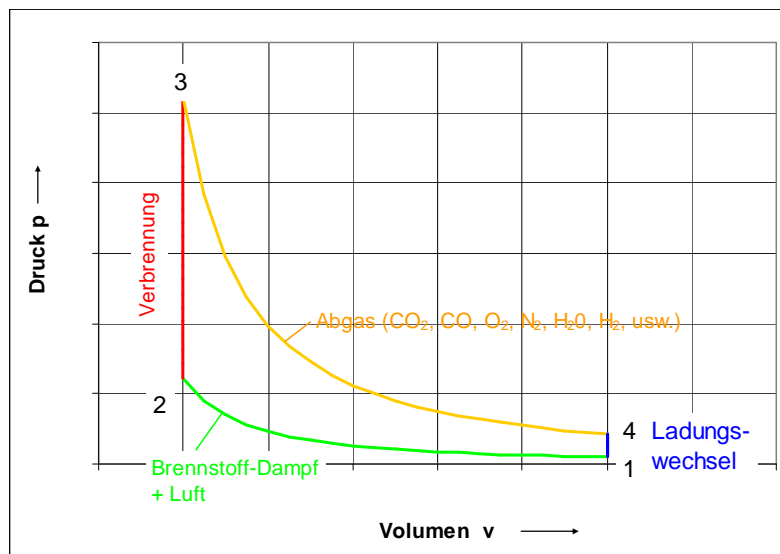
2.3 Prozess des vollkommenen Motors

Mit Hilfe der Kreisprozesse können bei weitem nicht alle Fragen zur Prozessführung von Verbrennungsmotoren behandelt werden. Häufig wird deshalb der Prozess des vollkommenen Motors mit folgenden Randbedingungen herangezogen:

- offener Prozess
- Luft-Kraftstoff-Verhältnis gleich dem des wirklichen Motors
- Isentrope Kompression und Expansion mit $c_p, c_v = f(T)$
- Verbrennung nach vorgegebener Gesetzmäßigkeit
- Verbrennungsprodukte im chemischen Gleichgewicht
- verlustfreier Ladungswechsel im unteren Totpunkt
- Wärmedichte Wandungen

Wirkungsgrad des vollkommen Motors

Vollkommener Motor mit
Gleichraumverbrennung



1. Hauptsatz der Thermodynamik

$$-W_{KA} + Q = U_4 - U_1$$

W_{KA} = pro Arbeitsspiel an den
Kolben abgegebene Arbeit

Q = Wärme

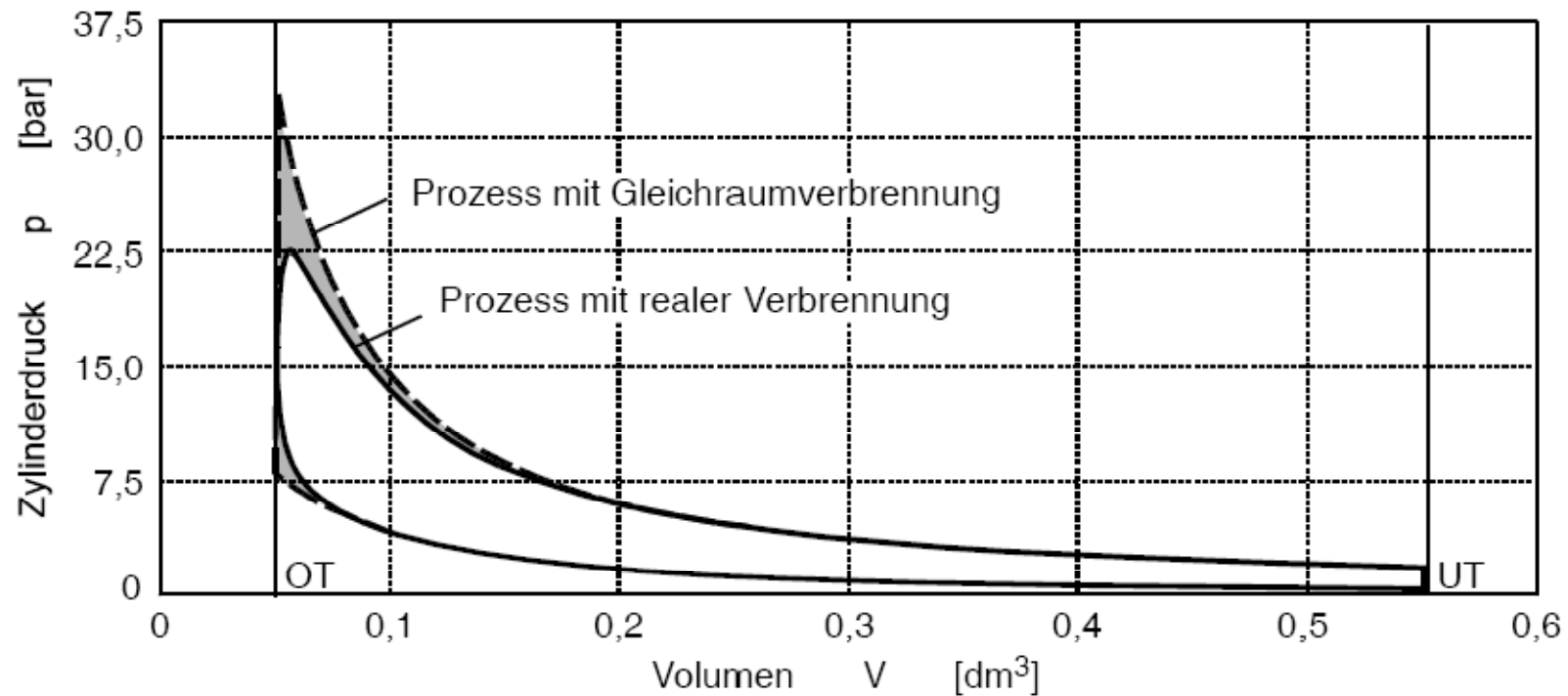
U = innere Energie

Mit $Q = 0$ (wärmedichte Wandungen)
ergibt sich der innere Wirkungsgrad des
Motors:

$$\eta_V = \frac{W_{KA}}{m_B \cdot H_u} = \frac{U_1 - U_4}{m_B \cdot H_u}$$

- Zur Ermittlung der inneren Energie U_4 müssen vom bekannten Zustand 1 ausgehend erst die Zustände 2, 3 und 4 berechnet werden.

Vergleich des Prozesses des vollkommenen Motors mit Gleichraumverbrennung mit einem realen Motor



Quelle: Wimmer

Wirkungsgrad des realen Motors

innerer Wirkungsgrad η_i

$$\eta_e = \overbrace{\eta_V - \Delta\eta_{BV} - \Delta\eta_U - \Delta\eta_K - \Delta\eta_{LW}} - \Delta\eta_R$$

$\Delta\eta_{BV}$ = Wirkungsgradverlust aufgrund des realen
Brennverlaufs

$\Delta\eta_U$ = Wirkungsgradverlust aufgrund von Undichtigkeiten
(Blow-by)

$\Delta\eta_K$ = Wirkungsgradverlust aufgrund von Wärmeverlusten

$\Delta\eta_{LW}$ = Wirkungsgradverlust aufgrund des Ladungswechsels

$\Delta\eta_R$ = Wirkungsgradverlust aufgrund von Reibungsverlusten

2.4 Brennverlauf

- Im Gegensatz zum Gleichraumprozess oder Prozess des vollkommenen Motors mit Gleichraumverbrennung erfolgt die Verbrennung bei einem realen Motor in einem gewissen Zeitrahmen.
- Der zeitliche Verlauf der Verbrennung beeinflusst in hohem Maß den Wirkungsgrad des Motors.
- Zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Verbrennung werden unterschiedliche Verbrennungsmodelle eingesetzt.
- Ein häufig verwendetes halbempirisches Modell ist das Vibe-Brenngesetz.

Vibe-Durchbrennfunktion

Die bei der Verbrennung entstehende Wärmemenge Q_B in Abhängigkeit der Zeit bzw. des Kurbelwinkels φ kann durch folgende Funktion angenähert werden:

$$Q_B = Q_{B,ges} \cdot \left(1 - e^{-6.91 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{BD}} \right)^{m_v + 1}} \right)$$

$$Q_{B,ges} = m_B \cdot H_u$$

φ_{BD} = Kurbelwinkeldifferenz, die für die komplette Brenndauer benötigt wird.

m_v = Kennwert ($m_v = 0,25-1,6$ für Otto- und Dieselmotoren)

Die Brenngeschwindigkeit nimmt mit der Drehzahl zu, so dass die Gleichung drehzahlunabhängig in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel formuliert wird.

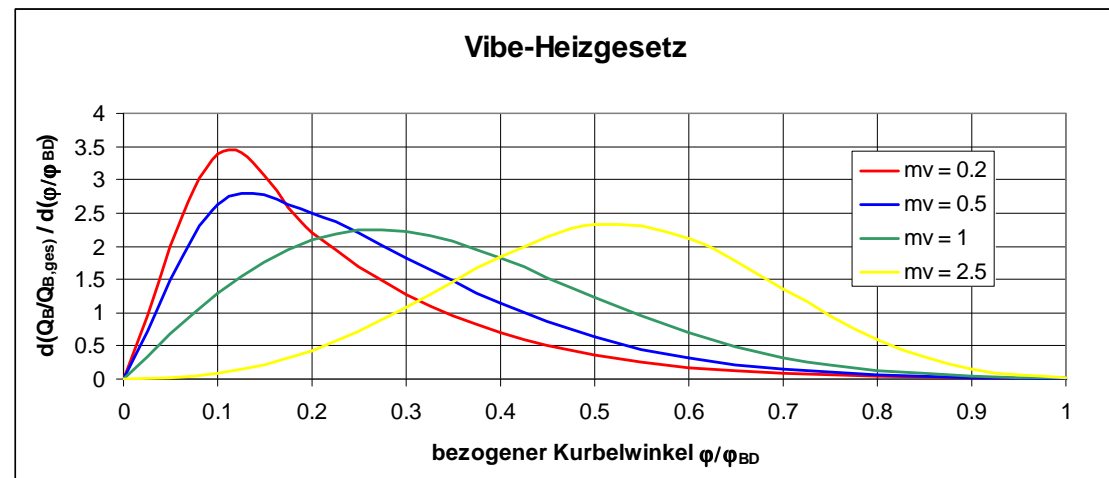
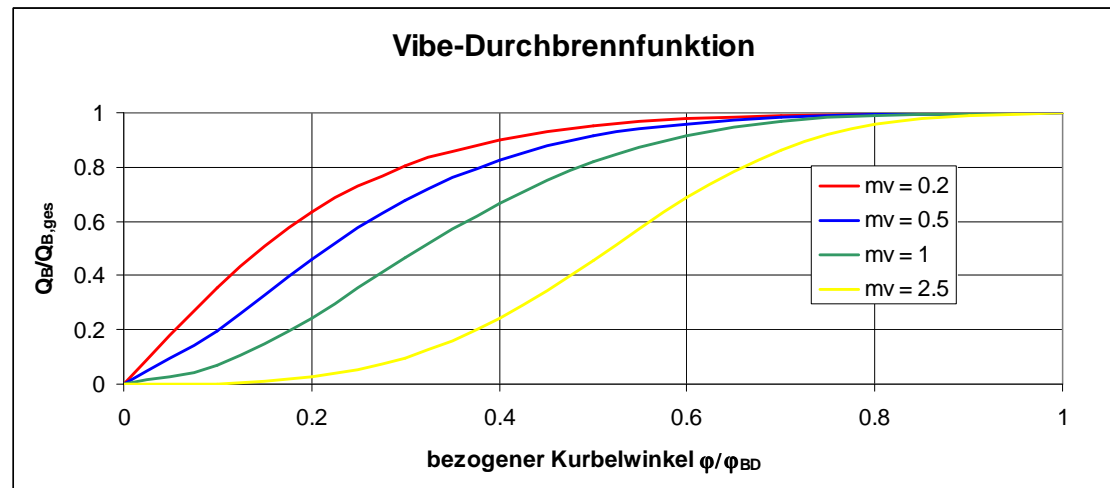
Vibe-Heizgesetz

Um eine schrittweise Berechnung des Brennverlaufs durchführen zu können, wird die Ableitung der Brennfunktion nach dem Kurbelwinkel benötigt.

Vibe-Heizgesetz:

$$\frac{dQ_B}{d\varphi} = Q_{B,ges} \cdot 6,91 \cdot (m_V + 1) \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_{BD}} \right)^{m_V} \cdot e^{-6,91 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{BD}} \right)^{m_V + 1}}$$

Vibe-Brenngesetz



2.5 Wärmestrom im Verbrennungsmotor

- Wärmeleitung
 - Der Wärmestrom in den Brennraumwänden erfolgt durch Wärmeleitung.
- Konvektion
 - Konvektion ist der Wärmetransport in einem strömenden Fluid. Beim Verbrennungsmotor erfolgt Wärmeaustausch zwischen Verbrennungsgas und Brennraumwänden sowie zwischen den Brennraumwänden und dem Kühlwasser durch Konvektion.
- Strahlung
 - Der Wärmetransport durch Strahlung erfolgt in Form elektromagnetischer Wellen. Beim Verbrennungsmotor ist Strahlung nur im Brennraum und auch nur während des kurzen Zeitanschnittes hoher Temperaturen relevant.

Wärmeübergang vom Verbrennungsgas an die Brennraumwände

$$Q = \alpha_i \cdot A \cdot (T_i - T_{Wi})$$

α_i = Wärmeübergangskoeffizient vom heißen Gas zur
Brennraumwand

A = vom Verbrennungsgas beaufschlagte
Brennraumoberfläche

T_i = Massenmitteltemperatur des Verbrennungsgases

T_{Wi} = Wandinnentemperatur

Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten nach Woschni

$$\alpha_i = 0,013 \cdot D^{-0,2} \cdot p^{0,8} \cdot T^{-0,53} \cdot \left(C_1 \cdot c_m + C_2 \frac{V_h \cdot T_1}{p_1 \cdot V_1} (p - p_0) \right)^{0,8}$$

Ladungswechsel: $C_1 = 6,18 + 0,417 \cdot c_u / c_m$

Verdichtung und Expansion: $C_1 = 2,28 + 0,308 \cdot c_u / c_m$

Otto und Diesel D.E.: $C_2 = 3,24 \cdot 10^{-3} \text{ m/(sK)}$

Vorkammerdiesel: $C_2 = 6,22 \cdot 10^{-3} \text{ m/(sK)}$

D = Zylinderbohrungsdurchmesser

p = Druck im Brennraum

T = Temperatur im Brennraum

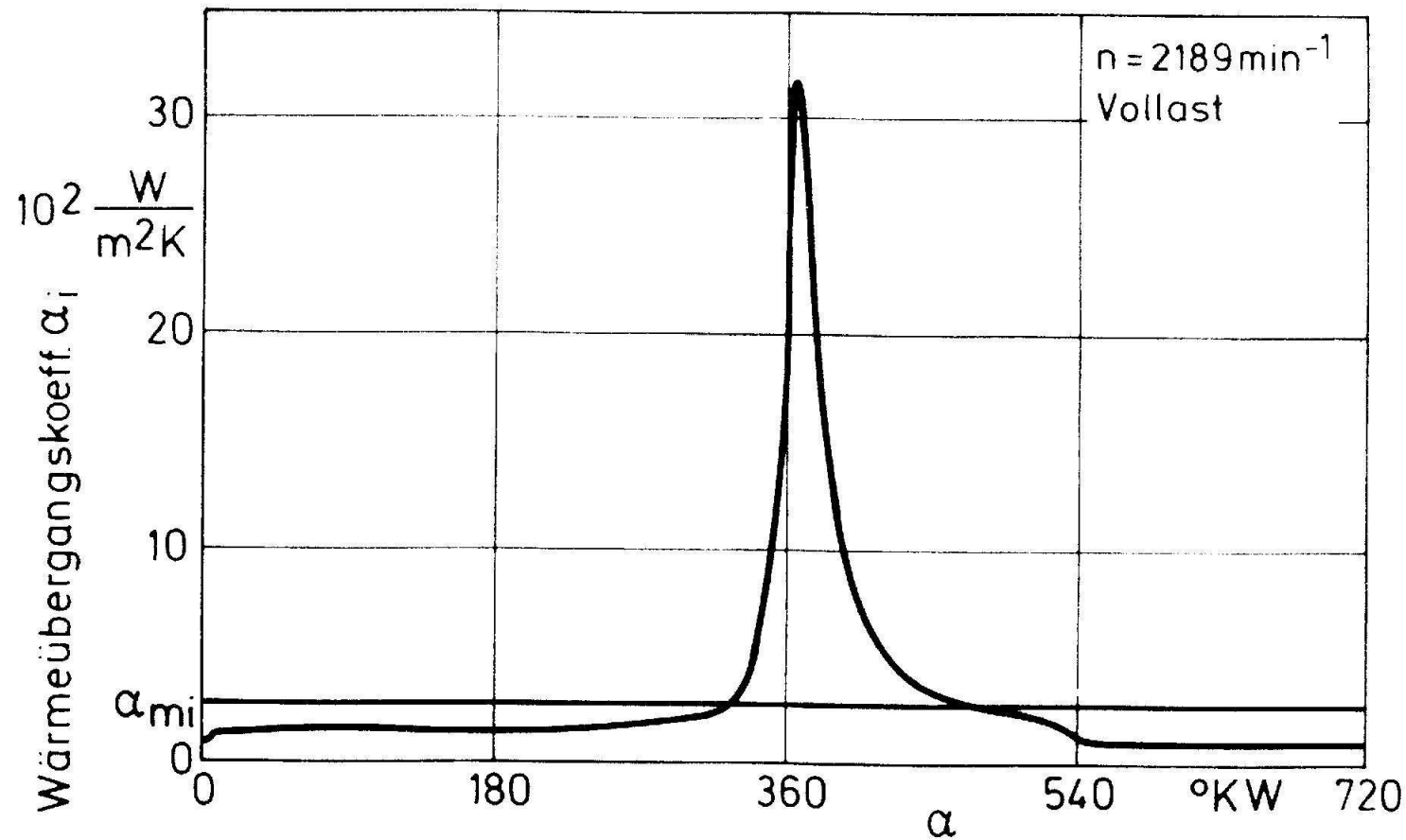
p₀ = Druck im Zylinder ohne Verbrennung

c_m = mittlere Kolbengeschwindigkeit

c_u = Umfangsgeschwindigkeit der Luft im Zylinder

V_h = Hubvolumen

Wärmeübergangskoeffizient eines 4-Takt-Ottomotors



Quelle: Pischinger