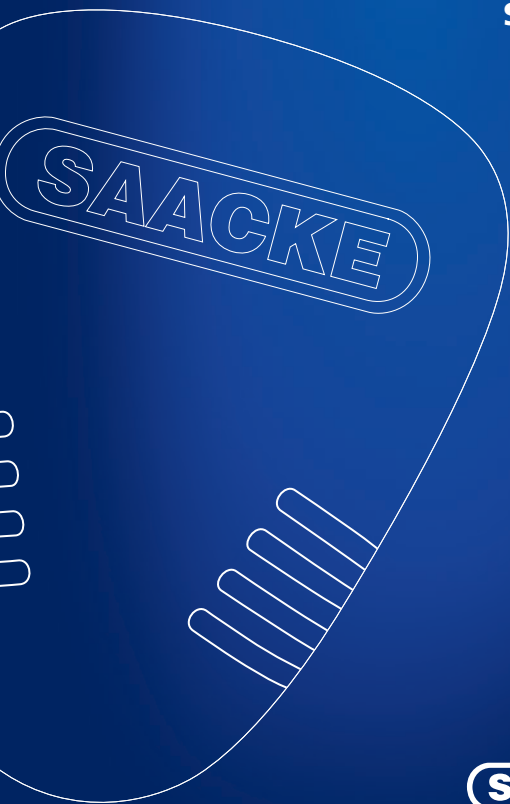


6. Ausgabe

Redaktion: J.P. Arning · W. Peters · B. Rieger ·
T. Schmidt · Dr. N. Schopf · J. Sternberg

Herausgeber: SAACKE GmbH
Südweststraße 13 · 28237 Bremen · Germany
Tel.: +49-421-64 95 0 · Fax: +49-421-64 95 224
www.saacke.com · E-mail: info@saacke.de

Faustformel- sammlung



SAACKE

Das Symbol der Zuverlässigkeit

Die SAACKE Gruppe: Qualität und Fortschritt in der Feuerungstechnologie

Auf der Basis von Serienerzeugnissen und kundenspezifischen Anforderungen projiziert und fertigt SAACKE maßgeschneiderte Feuerungsanlagen, an Land und auf Schiffen. SAACKE-Produkte entsprechen sowohl industriellen Anforderungen als auch hohen ökologischen Standards. Die SAACKE Gruppe ist weltweit mit eigenen Unternehmen, Produktionsstätten, Servicestationen und durch Partnerfirmen vertreten. Rund 1.000 Mitarbeiter sorgen täglich dafür, dass Energie überall in der Welt optimal und umweltbewusst genutzt wird.

Die vorliegende SAACKE-Faustformelsammlung fasst eine Reihe unentbehrlicher Formeln, Berechnungsgrundlagen und Normen aus dem Gebiet der Feuerungstechnik zusammen. Sie kann eine individuelle, kundenspezifische Berechnung nicht ersetzen – bietet aber die Grundlage für Überschlagsrechnungen und eine erste Kenndatenermittlung.

Die aktuelle Ausgabe wurde gründlich durchgesehen und ergänzt. Wir freuen uns über Hinweise, die die Qualität dieser Faustformelsammlung verbessern. Unsere Kontaktadresse finden Sie auf der Umschlagrückseite.

Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle kann SAACKE Fehler nicht völlig ausschließen. Übersehene Druckfehler wie auch inhaltliche Fehler der uns mitgeteilten Formeln sind möglich, so dass wir uns einen Irrtum vorbehalten müssen. Deshalb übernimmt SAACKE keine Haftung für die Richtigkeit der in dieser Publikation gemachten Angaben und steht nicht dafür ein. SAACKE haftet auch nicht für aus der Verwendung dieser Angaben entstehenden Sach-, Personen- oder Vermögensschäden.

1. Allgemeine Formeln und Umrechnungen	Seite
1.1 Zehnerpotenzen	6
1.2 Umrechnungsformeln	7
1.2.1 Heizwerte	7
1.2.2 Temperaturen	7
1.3 Umrechnungstabellen	8
1.3.1 Masse	8
1.3.2 Kraft	8
1.3.3 Druck	8
1.3.4 Energie, Arbeit	8
1.3.5 Leistung	9
1.3.6 Energie-Einheiten	9
1.3.7 Spezifische Energiekosten	9
1.4 Luftdruck, -dichte, und -temperatur (Normal- Atmosphäre) entsprechend der internationalen Höhenformel	10
1.5 Umrechnungstabelle anglo-amerikanische Einheiten	11
1.6 Elektrische Leistungen	12
1.6.1 Gleichstrom und induktionsfreier Wechsel- oder Drehstrom	12
1.6.2 Wechsel- und Drehstrom mit induktivem Lastanteil	13
1.6.3 Stern-Dreieckschaltung bei Dreiphasen- Wechselstrom	14
1.6.4 Stern-Dreieckschaltung eines Drehstrom- motors	15
2. Leistungen, Wirkungsgrade, Dampftabelle	
2.1 Kesselleistung - Dampfmenge	17
2.2 Kesselleistung, Feuerungsleistung und Brennstoffverbrauch	18
2.3 Bestimmung des Brennstoffverbrauchs	18
2.4 Kesselwirkungsgrad	19
2.5 Ermittlung des Kesselwirkungsgrades mithilfe von Abgasmessungen	19
2.6 Zustandsgrößen bei Sättigung von Wasser und Dampf in Abhängigkeit vom Druck	20

2.7	Zustandsgrößen von Wasser und Dampf bei Sättigung in Abhängigkeit von der Temperatur	21
2.8	Enthalpie in kJ/kg von Wasser und überhitztem Dampf	22
2.9	Enthalpie von Wasser unterhalb des Siedezustandes in kJ/kg	23
3.	Brennstoffe, Verbrennungsrechnung	Seite
3.1	Dichte ausgewählter Brennstoffe	25
3.2	Heizwerte ausgewählter Brennstoffe	25
3.3	Wobbeindex	26
3.4	Stöchiometrischer Luftbedarf in m ³ /kg bzw. m ³ /m ³	26
3.5	Eigenschaften von flüssigen Brennstoffen	27
3.6	Viskosität-Temperatur-Diagramm	28
3.7	Eigenschaften verschiedener Versorgungsgase	29
3.8	Stoffdaten wichtiger organischer Verbindungen	31
3.9	Luftüberschuss	33
3.10	Theoretische adiabate Flammentemperatur	34
4.	Übersicht SAACKE-Brenner	36
5.	Anlagenauslegung	
5.1	Leistungsbedarf von Gebläsen	38
	5.1.1 Wellenleistung in kW	38
	5.1.2 Einfluss der Gebläsedrehzahl	38
5.2	Leistungsreihe für Elektromotoren	38
5.3	Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)	39
5.4	Leistungsbedarf von Elektro-Vorwärmern	40
5.5	Ermittlung der Feuerraumwärmebelastung	40
5.6	Abgastemperatur für Kessel ohne Eco	40
5.7	Umrechnung eines Luft- oder Gasstromes vom Normzustand auf den Betriebszustand	40
5.8	Druckverlust eines Flüssigkeits- oder Gasstromes	40
5.9	Heizölleitungen	
	Rohrdurchmesser und Druckverluste	41
5.10	Strömungsgeschwindigkeit in Rohrleitungen	42
5.11	Nahtlose Stahlrohre nach EN 10220, Reihe 1	43
5.12	Auslegung von Sattdampfleitungen	44
5.13	Richtwerte für Economiser	45

	Seite
6. Emissionen, Grenzwerte für Rauchgas und Schall	
6.1 Emissionsgrenzwerte für Feuerungsanlagen	47
6.2 Kontinuierliche Messungen nach TA-Luft	48
6.3 Abschätzung des Feststoffgehaltes im Abgas flüssiger Brennstoffe	48
6.4 Abschätzung des SO _x -Gehaltes im Abgas	48
6.5 Umrechnung von Emissionswerten	49
6.5.1 Umrechnungsgleichung auf Bezugs-O ₂ -Wert	49
6.5.2 Umrechnungsfaktoren von ppm auf mg/m ³	49
6.5.3 Korrektur des Einflusses der Temperatur und der Feuchte der Verbrennungsluft auf die NO _x -Emissionen	50
6.5.4 Korrektur des Einflusses des Stickstoffgehalts im Öl auf die NO _x -Emissionen	50
6.6 Säuretaupunkte und Mindest-Rauchgastemperaturen	51
6.7 Emissionsumrechnung	51
6.8 Addition von Schallpegelwerten mehrerer Schallquellen	52
7. Kaufmännische Faustformeln	
7.1 Investitionsrechnung, statisches Verfahren	54
7.2 Rentabilitätsdiagramm für Feuerungsanlagen mit Sauerstoffregelung	55
7.3 Berechnung des Brutto- und Netto-Wärmepreises	56
8. Übersicht wichtiger Normen und Richtlinien	
8.1 Übersicht wichtiger Normen und Richtlinien	58
8.2 Explosionsschutz - Auswahl und Kennzeichnung von Betriebsmitteln	60
8.2.1 Definition Explosionsschutz zonen	60
8.2.2 Auswahl der Geräte-Kategorie	60
8.2.3 Betriebsmittelkennzeichnung	60
8.2.4 Kennzeichnung der Explosionsgruppe	61
8.2.5 Zündschutzart	61
Formelzeichen und Indizes	62

Allgemeine Formeln und Umrechnungen

1.1 Zehnerpotenzen

Vorsilbe	Zehnerpotenz	Kurzzeichen
Peta-	10^{15}	P
Tera-	10^{12}	T
Giga-	10^9	G
Mega-	10^6	M
Kilo-	10^3	k
Hekto-	10^2	h
Deka-	10	da
Dezi-	10^{-1}	d
Zenti-	10^{-2}	c
Milli-	10^{-3}	m
Mikro-	10^{-6}	μ
Nano-	10^{-9}	n
Piko-	10^{-12}	p
Femto-	10^{-15}	f
Atto-	10^{-18}	a

1.2 Umrechnungsformeln

1.2.1 Heizwerte

$$1 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 3600 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 4,187 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 0,001163 \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

Gilt auch für Heizwerte, die auf Normkubikmeter bezogen sind.

1.2.2 Temperaturen

Umrechnung von Temperaturskalen nach Celsius (°C) und Fahrenheit (°F)

$$^{\circ}\text{C} \leftarrow \frac{5}{9} \cdot (^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$^{\circ}\text{F} \leftarrow 1,8 \cdot ^{\circ}\text{C} + 32$$

$$0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$$

$$100^{\circ}\text{C} = 212^{\circ}\text{F}$$

1.3 Umrechnungstabellen

1.3.1 Masse

		aus				
		kg	mg	t	lb	tn l.
ein	kg	1	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-3}$	2,2	$9,84 \cdot 10^{-4}$
	mg	$1 \cdot 10^{-6}$	1	$1 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$9,84 \cdot 10^{-10}$
	t	1000	$1 \cdot 10^9$	1	2204,6	0,984
	lb	0,454	$4,53 \cdot 10^5$	$4,53 \cdot 10^{-4}$	1	$4,46 \cdot 10^{-4}$
	tn l.	1016,05	$1,016 \cdot 10^9$	1,016	2240	1

lb = pound

tn l. = long ton

1.3.2 Kraft

		N	kN	daN	kp	lbf
ein	N	1	$1 \cdot 10^{-3}$	0,1	0,102	0,225
	kN	1000	1	100	102	225
	daN	10	0,01	1	1,02	2,25
	kp	9,81	$9,81 \cdot 10^{-3}$	0,981	1	2,205
	lbf	4,448	$4,45 \cdot 10^{-3}$	0,445	0,456	1

lbf = pound-force

1.3.3 Druck

		Pa	bar	mbar	mm WS	psi
ein	Pa	1	$1 \cdot 10^{-5}$	0,01	0,102	$1,45 \cdot 10^{-4}$
	bar	$1 \cdot 10^5$	1	$1 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^4$	14,5
	mbar	100	$1 \cdot 10^{-3}$	1	10,2	$1,45 \cdot 10^{-2}$
	mm WS	9,81	$9,81 \cdot 10^{-5}$	$9,81 \cdot 10^{-2}$	1	$1,45 \cdot 10^{-3}$
	psi	6894	$6,89 \cdot 10^{-2}$	68,9	703,5	1

psi = pound-force per square inch

1.3.4 Energie, Arbeit

		kJ	kWh	kcal	PSH	BTU
ein	kJ	1	$2,778 \cdot 10^{-10}$	0,239	$3,776 \cdot 10^{-4}$	0,948
	kWh	$3,59 \cdot 10^9$	1	860	1,36	$3,412 \cdot 10^3$
	kcal	4,184	$1,163 \cdot 10^{-3}$	1	$1,58 \cdot 10^{-3}$	3,97
	PSH	$2,65 \cdot 10^3$	0,74	632	1	$2,51 \cdot 10^3$
	BTU	1,055	$0,293 \cdot 10^{-3}$	0,252	$0,398 \cdot 10^{-3}$	1

BTU = British Thermal Unit

1.3.5 Leistung

		aus				
		kW	MW	kcal/h	PS	BTU/h
ein	kW	1	$1 \cdot 10^{-3}$	860	1,36	$3,412 \cdot 10^3$
	MW	1000	1	$8,6 \cdot 10^5$	1360	$3,412 \cdot 10^6$
	kcal/h	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$	1	$1,57 \cdot 10^{-3}$	3,97
	PS	0,736	$7,36 \cdot 10^{-4}$	632	1	$2,51 \cdot 10^3$
	BTU/h	$0,293 \cdot 10^{-3}$	$0,293 \cdot 10^{-6}$	0,252	$0,398 \cdot 10^{-3}$	1

1.3.6 Energie-Einheiten

		aus			
		MWh	GJ	Gcal	t SKE
ein	MWh	1	3,6	0,8598	0,1228
	GJ	0,2778	1	0,2388	0,03411
	Gcal	1,163	4,187	1	0,1429
	t SKE	8,141	29,31	7	1

SKE = Steinkohleeinheit

1.3.7 Spezifische Energiekosten

		aus				
		€-Cent/kWh	Euro/MWh	Euro/GJ	Euro/Gcal	Euro/t SKE
ein	€-Cent/kWh	1	10	2,778	11,63	81,41
	Euro/MWh	0,1	1	0,2778	1,163	8,141
	Euro/GJ	0,36	3,6	1	4,187	29,31
	Euro/Gcal	0,08598	0,8598	0,2388	1	7
	Euro/t SKE	0,01228	0,1228	0,03411	0,1429	1

1.4 Luftdruck, -dichte, und -temperatur (Normal-Atmosphäre) entsprechend der internationalen Höhenformel

Werte der Normal-Atmosphäre			
Höhe m über NN	Druck mbar	Dichte kg/m ³	Temperatur °C
0	1013	1,226	15,0
250	983	1,196	13,4
500	955	1,168	11,8
1000	899	1,112	8,5
1500	846	1,058	5,3

Werte bei bestimmten Temperaturen				
Höhe m über NN	Druck mbar	Dichte		
		bei 10 °C kg/m ³	bei 25 °C kg/m ³	bei 40 °C kg/m ³
0	1013	1,25	1,18	1,13
250	983	1,21	1,15	1,09
500	955	1,17	1,11	1,06
1000	899	1,1	1,05	1
1500	846	1,03	0,98	0,93

Normdichte von Luft / abweichende Berechnungsgrundlagen

$\rho_N = 1,293 \text{ kg/m}^3$ ist die **Normdichte** bei 0°C und 1013 mbar abs.

$\rho = 1,15 \text{ kg/m}^3$ ist die von **SAACKE** verwendete Luftdichte für Auswahldiagramme und Leistungsdaten von Landanlagen. Sie entspricht 250 m über NN bei 25°C.

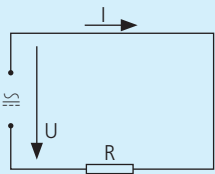
$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ist die von **Gebälseherstellern** üblicherweise zu Grunde gelegte Luftdichte. Sie entspricht 0 m über NN bei 20°C.

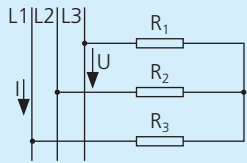
1.5 Umrechnungstabelle anglo-amerikanische Einheiten

Länge	1 Inch (inch, in) = 25,4 mm 1 Fuß (foot, ft) = 12 in = 0,3048 m 1 Yard (yd) = 3 ft = 0,9144 m	1 mm = 0,03937 in 1 m = 3,281 ft 1 m = 1,094 yd
Fläche	1 Quadrat-Inch (square inch, sq.in, in ²) = 6,452 cm ² 1 Quadratfuß (square foot, sq.ft, ft ²) = 144 in ² = 0,0929 m ² 1 Quadratyard (square yard, sq.yd, yd ²) = 9 ft ² = 0,8361 m ² 1 Quadratmeile (sq.mile, mile ²) = 640 acres = 2,59 km ²	1 cm ² = 0,155 in ² 1 m ² = 10,764 ft ² 1 m ² = 1,196 yd ² 1 km ² = 0,386 mile ²
Volumenstrom	1 ft ³ /s = 102 m ³ /h 1 ft ³ /min. = 1,699 m ³ /h Großbritannien 1 Imp.gal/min (Imp.gpm) = 0,0758 l/s = 0,273 m ³ /h U.S. 1 U.S.gal/min (U.S.gpm) = 0,063 l/s = 0,227 m ³ /h	1 m ³ /h = 0,00981 ft ³ /s 1 m ³ /h = 0,5886 ft ³ /min 1 m ³ /h = 3,66 Imp.gal/min 1 m ³ /h = 4,40 U.S.gal/min
Massenstrom	1 lb/s = 0,4536 kg/s = 1,633 t/h 1 short ton/h (sh ton/h) = 907,2 kg/h 1 long ton/h (ton/h) = 1016 kg/h	1 t/h = 0,6124 lb/s 1 kg/s = 2,2046 lb/s 1 kg/h = 1,102 · 10 ⁻³ sh ton/h 1 kg/h = 0,984 · 10 ⁻³ ton/h
Kraft	1 pound-force (lbf) = 4,4482 N 1 ton-force (tonf) = 2240 lbf = 9,964 kN	1 N = 0,2248 lbf 1 kN = 224,8 lbf 1 MN = 100,4 tonf
Druck	1 lbf/in ² (psi) = 6895 Pa = 0,06895 bar 1 lbf/ft ² (psf) = 47,88 Pa = 0,04788 kPa 1 inch of mercury (in. Hg) = 3386 Pa 1 inch of water (in. H ₂ O) = 249,1 Pa	1 bar = 14,5 lbf/in ² 1 kPa = 20,89 lbf/ft ² 1 kPa = 0,2953 in. Hg 1 kPa = 4,015 in. H ₂ O

1.6 Elektrische Leistungen

1.6.1 Gleichstrom und induktionsfreier Wechsel- oder Drehstrom

Gleich- oder Wechselstrom	Leistung bei Gleich- oder Wechselstrom
	$P = U \cdot I$
	$P = I^2 \cdot R$
	$P = \frac{U^2}{R}$

Drehstrom	Leistung bei Drehstrom
	$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$

P = Elektrische Leistung

U = Spannung (Leiterspannung)

I = Stromstärke

R = Widerstand

1. Beispiel:

Glühlampe, $U = 6 \text{ V}$; $I = 5 \text{ A}$; $P = ?$; $R = ?$

$$P = U \cdot I = 6 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = \mathbf{30 \text{ W}}$$

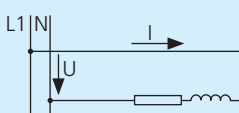
$$R = \frac{U}{I} = \frac{6 \text{ V}}{5 \text{ A}} = \mathbf{1,2 \Omega}$$

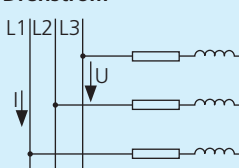
2. Beispiel:

Glühofen, Drehstrom, $U = 400 \text{ V}$; $P = 12 \text{ kW}$; $I = ?$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{12000 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = \mathbf{17,3 \text{ A}}$$

1.6.2 Wechsel- und Drehstrom mit induktivem Lastanteil

Wechselstrom 	Wirkleistung bei Wechselstrom $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$
--	---

Drehstrom 	Wirkleistung bei Drehstrom $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$
---	---

P = Wirkleistung

U = Spannung (Leiterspannung)

I = Stromstärke

$\cos\varphi$ = Leistungsfaktor

η = Motor-Wirkungsgrad

P_w = Mechanische Leistung des Motors

Beispiel:

Drehstrommotor, $U = 400 \text{ V}$; $I = 21,5 \text{ A}$; $\cos\varphi = 0,85$; $P = ?$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{1,732} \cdot 400 \text{ V} \cdot 21,5 \text{ A} \\ = 12660 \text{ W} \approx \mathbf{12,7 \text{ kW}}$$

Die an der Motorwelle abgegebene mechanische Leistung (Wellenleistung) ist geringer als die Wirkleistung.

$$P_w = P \cdot \eta$$

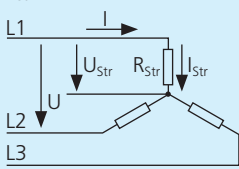
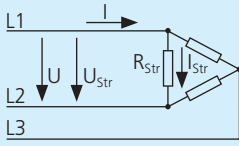
Beispiel:

$\eta = 87 \%$; $P = 12,7 \text{ kW}$

$$P_w = 12,7 \text{ kW} \cdot 0,87 = \mathbf{11,0 \text{ kW}}$$

Berechnung der Stern-Dreieckschaltung Seite 14

1.6.3 Stern-Dreieckschaltung bei Dreiphasen-Wechselstrom (Drehstrom)

<p>Sternschaltung Υ $U_{\text{Str}} = 230 \text{ V}$</p> 	<p>Sternschaltung Υ Leiterstrom $I = I_{\text{Str}}$</p> <p>Leiterspannung $U = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Str}}$</p>
<p>Dreieckschaltung Δ $U_{\text{Str}} = 400 \text{ V}$</p> 	<p>Dreieckschaltung Δ Leiterstrom $I = \sqrt{3} \cdot I_{\text{Str}}$</p> <p>Leiterspannung $U = U_{\text{Str}}$</p>
<p>Stern- oder Dreieckschaltung Strangstrom</p> $I_{\text{Str}} = \frac{U_{\text{Str}}}{R_{\text{Str}}}$	<p>Leistung</p> $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$ $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$

I = Leiterstrom

U = Leiterspannung

I_{Str} = Strangstrom

U_{Str} = Strangspannung

R_{Str} = Strangwiderstand

$\sqrt{3}$ = Verkettungsfaktor

P = Wirkleistung

$\cos\varphi$ = Leistungsfaktor bei induktivem Lastanteil

Beispiel:

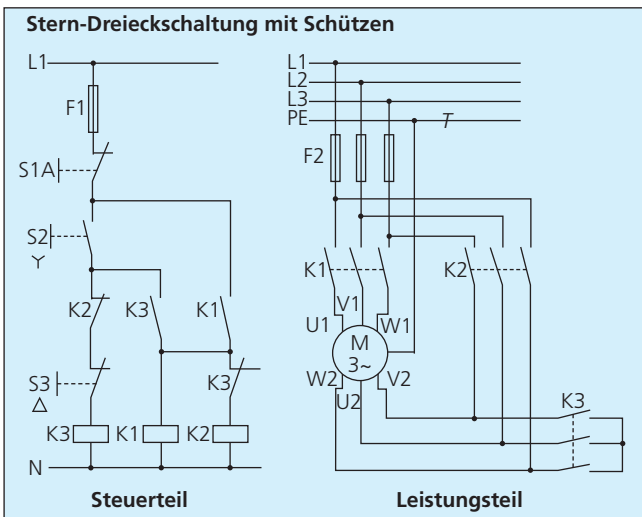
Glühofen, $R_{\text{Str}} = 22 \text{ } \Omega$; $U = 400 \text{ V}$; $P = ?$ bei Dreieckschaltung

$$I_{\text{Str}} = \frac{U_{\text{Str}}}{R_{\text{Str}}} = \frac{400 \text{ V}}{22 \text{ } \Omega} = 18,2 \text{ A}$$

$$I = \sqrt{3} \cdot I_{\text{Str}} = \sqrt{3} \cdot 18,2 \text{ A} = 31,5 \text{ A}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 31,5 \text{ A} = 21824 \text{ W} = \mathbf{21,8 \text{ kW}}$$

1.6.4 Stern-Dreieckschaltung eines Drehstrommotors



K1 Schütz für Netzanschluss

K2 Schütz für Dreieckschaltung

K3 Schütz für Sternschaltung

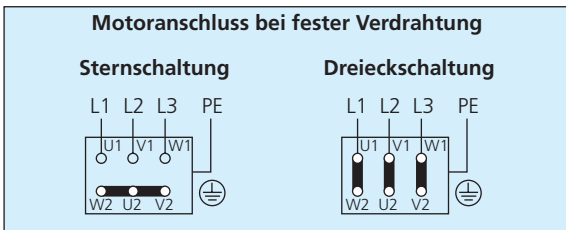
S1A Taster aus


S2 Taster für Sternschaltung

S3 Taster für Dreieckschaltung

F1 Sicherung des Steuerteils

F2 Sicherung des Leistungsteils





**Leistungen,
Wirkungsgrade,
Dampftabelle**

2.1 Kesselleistung – Dampfmenge

1 t/h Satttdampf \approx 0,65 MW Kesselleistung*

**bei 12 bar und 102 °C Speisewasser*

1 kg Öl ergibt ca. 16 kg Dampf

1 kg Öl oder 1 m³ Gas ergibt folgende
Satttdampfmenge in kg:

$$\frac{\text{Heizwert in kJ/kg oder kJ/m}^3 \cdot \text{Wirkungsgrad in \%}}{234.000}$$

Zur Erzeugung von 1t Satttdampf wird folgende
Öl- bzw. Gasmenge benötigt in kg bzw. m³:

$$\frac{2,34 \cdot 10^8}{\text{Heizwert in kJ/kg oder kJ/m}^3 \cdot \text{Wirkungsgrad in \%}}$$

2.2 Kesselleistung, Feuerungsleistung und Brennstoffverbrauch in Abhängigkeit vom Kesselwirkungsgrad

Kesselleistung, erzeugte Sattdampfmenge		Kesselwirkungsgrad	Feuerungsleistung	Menge Heizöl S	Menge Heizöl EL
t/h	MW	%	MW	kg/h	kg/h
1	0,65	85	0,77	67,5	64,5
1	0,65	88	0,74	65,5	62,5
1	0,65	90	0,72	64,0	61,0
1	0,65	92	0,71	62,5	59,5

2.3 Exakte Bestimmung des Brennstoffverbrauchs bei gegebener Dampfleistung und gegebenem Dampfzustand

$$\dot{m}_B \text{ bzw. } \dot{V}_B = \frac{\dot{m}_D \cdot (h - h_{sw}) \cdot 100\%}{H_i \cdot \eta_K}$$

- \dot{m}_B bzw. \dot{V}_B = Brennstoffverbrauch in kg/h bzw. m³/h
 \dot{m}_D = Dampfleistung in kg/h
 h = Enthalpie des Dampfes in kJ/kg
 h_{sw} = Enthalpie des Speisewassers in kJ/kg
 H_i = Unterer Heizwert in kJ/kg bzw. kJ/m³
 η_K = Kesselwirkungsgrad in %

Kann die Dampfleistung \dot{m}_D nicht ermittelt werden, kann sie berechnet werden aus:

$$\dot{m}_D = \dot{m}_{sw} - \dot{m}_{As}$$

- \dot{m}_{sw} = Speisewassermenge in kg/h
 \dot{m}_{As} = Absatzmenge in kg/h

2.4 Kesselwirkungsgrad

$$\eta_K = \frac{(\dot{m}_{SW} - \dot{m}_{AS}) \cdot (h - h_{SW})}{\dot{m}_B \cdot H_i} \cdot 100 \quad \text{in \%}$$

2.5 Ermittlung des Kesselwirkungsgrades mithilfe von Abgasmessungen*

$$\eta_K = 100\% - X_A\% - 2\%_{(max)} \quad \text{in \%}$$

$$\text{Abgasverlust } X_A = \left(\frac{A}{21 - O_{2,tr}} + B \right) \cdot (\vartheta_A - \vartheta_L) \quad \text{in \%}$$

ϑ_A = Abgastemperatur in °C

ϑ_L = Verbrennungslufttemperatur in °C

$O_{2,tr}$ = gemessener O_2 -Wert im trockenen Abgas in Vol.-%

A und B: Konstanten

	Heizöl EL	Heizöl S	Erdgas	Flüssiggas	Stadtgas
A	0,68	0,69	0,66	0,63	0,63
B	0,007	0,007	0,009	0,008	0,011

* Berechnungsgrundlage: 1. BImSchV

2.6 Zustandsgrößen bei Sättigung von Wasser und Dampf in Abhängigkeit vom Druck

Abs. Druck p bar	Temperatur ϑ_s °C	Spez. Volumen		Dichte Dampf ρ'' kg/m ³	Spez. Enthalpie		Verd. Wärme r kJ/kg
		Wasser v' m ³ /t	Dampf v'' m ³ /kg		Wasser h' kJ/kg	Dampf h'' kJ/kg	
0,2	60,07	1,0172	7,650	0,1307	251,45	2609,9	2373,2
0,5	81,35	1,0301	3,240	0,3086	340,56	2646,0	2305,4
1,0	99,63	1,0434	1,694	0,5904	417,51	2675,4	2257,9
1,5	111,37	1,0530	1,159	0,8628	467,13	2693,4	2226,2
2	120,23	1,0608	0,8854	1,129	504,70	2706,3	2201,6
3	133,54	1,0712	0,6056	1,651	561,43	2724,7	2163,2
4	143,62	1,0839	0,4622	2,163	604,67	2737,6	2133,0
5	151,84	1,0928	0,3747	2,669	640,12	2747,5	2107,4
6	158,84	1,1001	0,3155	3,170	670,42	2755,5	2085,0
7	164,94	1,1082	0,2727	3,667	697,06	2762,0	2064,9
8	170,41	1,1150	0,2403	4,162	720,94	2767,5	2046,5
9	175,36	1,1213	0,2148	4,655	742,64	2772,1	2029,5
10	179,88	1,1274	0,1943	5,147	762,61	2776,2	2013,6
12	187,96	1,1386	0,1632	6,127	798,43	2782,7	1984,3
14	195,04	1,1489	0,1407	7,106	830,08	2787,8	1957,7
16	201,37	1,1586	0,1237	8,085	858,56	2791,7	1933,2
18	207,11	1,1678	0,1103	9,065	884,58	2794,8	1910,3
20	212,37	1,1766	0,0995	10,05	908,59	2797,1	1888,6
22	217,24	1,1850	0,0907	11,03	930,95	2799,1	1868,1
24	221,78	1,1932	0,0832	12,02	951,93	2800,4	1848,5
26	226,04	1,2011	0,0769	13,01	971,72	2801,4	1829,6
28	230,05	1,2088	0,0714	14,01	990,48	2802,0	1811,5
30	233,84	1,2136	0,0666	15,03	1108,4	2802,2	1793,9
32	237,45	1,2237	0,0624	16,02	1025,4	2802,3	1776,9
35	242,52	1,2346	0,0571	17,54	1049,7	2801,9	1752,5
40	250,33	1,2521	0,0498	20,10	1087,4	2800,3	1712,9
50	263,91	1,2858	0,0394	25,36	1154,5	2794,2	1639,7
60	275,55	1,3187	0,0324	30,83	1213,7	2785,0	1571,3
80	294,97	1,3842	0,0235	42,51	1317,1	2759,9	1442,8
100	310,96	1,4526	0,0180	55,43	1408,0	2727,7	1319,7

2.7 Zustandsgrößen von Wasser und Dampf bei Sättigung in Abhängigkeit von der Temperatur


Temperatur ϑ °C	Abs. Druck p bar	Spez. Volumen		Dichte Dampf ρ'' kg/m ³	Spez. Enthalpie		Verd. Wärme r kJ/kg
		Wasser v' m ³ /t	Dampf v'' m ³ /kg		Wasser h' kJ/kg	Dampf h'' kJ/kg	
60	0,1992	1,0171	7,679	0,1302	251,09	2609,7	2358,6
65	0,2501	1,0199	6,202	0,1612	272,02	2618,4	2346,3
70	0,3116	1,0228	5,046	0,1982	292,97	2626,9	2334,0
75	0,3855	1,0259	4,134	0,2419	313,94	2635,4	2321,5
80	0,4736	1,0292	3,409	0,2933	334,92	2643,8	2308,8
85	0,5780	1,0326	2,829	0,3535	355,92	2652,0	2296,5
90	0,7011	1,0361	2,361	0,4235	376,94	2660,1	2283,2
95	0,8453	1,0399	1,982	0,5045	397,99	2668,1	2270,2
100	1,0133	1,0437	1,673	0,5977	419,06	2676,0	2256,9
110	1,4327	1,0519	1,210	0,8265	461,32	2691,3	2230,0
120	1,9854	1,0606	0,8915	1,122	503,72	2706,0	2202,2
130	2,7013	1,0700	0,6681	1,497	546,31	2719,9	2173,6
140	3,614	1,0801	0,5085	1,967	589,10	2733,1	2144,0
150	4,760	1,0908	0,3924	2,548	632,15	2745,4	2113,2
160	6,181	1,1022	0,3068	3,260	675,47	2756,7	2081,3
170	7,920	1,1145	0,2426	4,123	719,12	2767,1	2047,9
180	10,027	1,1275	0,1938	5,160	763,12	2776,3	2013,1
190	12,551	1,1415	0,1563	6,397	807,52	2784,3	1976,7
200	15,549	1,1565	0,1272	7,864	852,37	2790,9	1938,6
210	19,077	1,1726	0,1042	9,593	897,74	2796,2	1898,5
220	23,198	1,1900	0,0860	11,62	943,67	2799,9	1856,2
230	27,976	1,2087	0,0715	14,00	990,26	2802,0	1811,7
240	33,478	1,2291	0,0597	16,76	1037,2	2802,2	1764,6
250	39,776	1,2513	0,0500	19,99	1085,8	2800,4	1714,6
260	46,943	1,2756	0,0421	23,73	1134,9	2796,4	1661,5
270	55,058	1,3025	0,0356	28,10	1185,2	2789,9	1604,6
280	64,202	1,3324	0,0301	33,19	1236,8	2780,4	1543,6
290	74,461	1,3659	0,0255	39,16	1290,0	2767,6	1477,6
300	85,927	1,4041	0,02165	46,19	1345,0	2751,0	1406,0
310	98,700	1,4480	0,0183	54,54	1402,4	2730,0	1327,6

2.8 Enthalpie in kJ/kg von Wasser und überhitztem Dampf

Abs. Druck bar	Temperatur °C						
	200	250	300	350	400	450	500
1	2875,4	2974,5	3074,5	3175,6	3278,2	3382,4	3488,1
5	2855,1	2961,1	3064,8	3168,1	3272,1	3377,2	3483,8
10	2826,8	2943,0	3052,1	3158,5	3264,4	3370,8	3478,3
15	2791,3	2921,5	3037,6	3147,7	3255,8	3363,7	3472,2
20	852,6	2902,4	3025,0	3138,6	3248,7	3357,8	3467,3
25	852,8	2879,5	3010,4	3128,2	3240,7	3351,3	3461,7
30	853,0	2854,8	2995,1	3117,5	3232,5	3344,6	3456,2
35	853,2	2828,1	2979,0	3106,5	3224,2	3338,0	3450,6
40	853,4	1085,8	2962,0	3095,1	3215,7	3331,2	3445,0
45	853,6	1085,8	2944,2	3083,3	3207,1	3324,4	3439,3
50	853,8	1085,8	2925,5	3071,2	3198,3	3317,5	3433,7
60	854,2	1085,8	2885,0	3045,8	3180,1	3303,5	3422,2
70	854,6	1085,8	2839,4	3018,7	3161,2	3289,1	3410,6
80	855,1	1085,8	2786,8	2989,9	3141,6	3274,3	3398,8
90	855,5	1085,8	1344,5	2959,0	3121,2	3259,2	3386,8
100	855,9	1085,8	1343,4	2925,8	3099,9	3243,6	3374,6
120	856,8	1085,9	1341,2	2849,7	3054,8	3211,4	3349,6
140	857,7	1086,1	1339,2	2754,2	3005,6	3177,4	3323,8
160	858,6	1086,3	1337,4	2620,8	2951,3	3141,6	3297,1
180	859,5	1086,5	1335,7	1659,8	2890,3	3104,0	3269,6
200	860,4	1086,7	1334,3	1647,2	2820,5	3064,3	3241,1
250	862,8	1087,5	1331,1	1625,1	2582,0	2954,3	3165,9
300	865,2	1088,4	1328,7	1610,0	2161,8	2825,6	3085,0
350	867,7	1089,5	1326,8	1598,7	1993,1	2676,4	2998,3
400	870,2	1090,8	1325,4	1589,7	1934,1	2515,6	2906,8
500	875,4	1093,6	1323,7	1576,4	1877,7	2293,2	2723,0
600	880,8	1096,9	1323,2	1567,1	1847,3	2187,1	2570,6
800	891,9	1104,4	1324,7	1555,9	1814,2	2094,1	2397,4

2.9 Enthalpie von Wasser unterhalb des Siedezustandes in kJ/kg

Abs. Druck bar	Temperatur °C													
	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
2	419,1	503,7												
5	419,4	503,9	589,2											
10	419,7	504,3	589,5	675,7										
20	420,5	505,0	590,2	676,3	763,6	852,6								
40	422,0	506,4	591,5	677,5	764,6	853,4	944,1	1037,7						
60	423,5	507,8	592,8	678,6	765,7	854,2	944,7	1037,9	1134,7					
80	425,0	509,2	594,1	679,8	766,7	855,1	945,3	1038,1	1134,5	1236,0				
100	426,5	510,6	595,4	681,0	767,8	855,9	945,9	1038,4	1134,2	1235,0	1343,4			
120	428,0	512,1	596,7	682,2	768,8	856,8	946,6	1038,7	1134,1	1234,1	1341,2	1460,8		
140	429,5	513,5	598,0	683,4	769,9	857,7	947,2	1039,1	1134,0	1233,3	1339,2	1456,3		
160	431,0	514,9	599,4	684,6	771,0	858,6	947,9	1039,4	1133,9	1232,6	1337,4	1452,4	1588,3	
180	432,5	516,3	600,7	685,9	772,0	859,5	948,6	1039,8	1133,9	1232,0	1335,7	1448,8	1579,7	
200	434,0	517,7	602,0	687,1	773,1	860,4	949,3	1040,3	1134,0	1231,4	1334,3	1445,6	1572,5	1742,9
220	435,6	519,2	603,4	688,2	774,2	861,4	950,0	1040,7	1134,0	1230,9	1332,9	1442,7	1566,2	1722,0
240	437,1	520,6	604,7	689,5	775,3	862,3	950,8	1041,2	1134,1	1230,5	1331,7	1440,1	1560,8	1707,2
260	438,6	522,0	606,0	690,8	776,4	863,3	951,5	1041,7	1134,3	1230,2	1330,6	1437,8	1555,9	1695,6
280	440,1	523,5	607,4	692,0	777,6	864,2	952,3	1042,2	1134,5	1229,9	1329,6	1435,6	1551,6	1686,1
300	441,6	524,9	608,7	693,3	778,7	865,2	953,1	1042,8	1134,7	1229,7	1328,7	1433,6	1547,7	1678,0
400	449,2	532,1	615,5	699,6	784,4	870,2	957,2	1045,8	1136,3	1229,2	1325,4	1425,9	1532,9	1650,5



**Brennstoffe,
Verbrennungs-
rechnung**

3.1 Dichte ausgewählter Brennstoffe

1 Liter Heizöl EL	≈ 0,84 kg bei 15 °C
1 Liter Heizöl S	≈ 0,94 kg bei 90 °C
1 m ³ Erdgas	≈ 0,80 kg (Anhaltswert)
1 m ³ Propan (i.N.)	= 2,01 kg
1 m ³ Butan (i.N.)	= 2,71 kg

3.2 Heizwerte ausgewählter Brennstoffe

Brennstoff	Heizwerte H _i					
	kJ/kg	kJ/m ³	kcal/kg	kcal/m ³	kWh/kg	kWh/m ³
Heizöl S	40.700	–	9.700	–	11,3	–
Heizöl EL	42.700	–	10.200	–	11,9	–
Erdgas L	–	31.800	–	7.600	–	8,83
Erdgas H	–	36.000	–	8.600	–	10
Braunkohlenstaub	21.200	–	5.050	–	5,9	–
Steinkohlenstaub	30.000	–	7.150	–	8,3	–
Propan	46.350	93.200	–	22.350	12,9	25,9
Butan	45.700	123.800	–	29.560	12,7	34,4
Tierfett	36.000	–	8.600	–	10,0	–
Gichtgas	–	3.000	–	717	–	0,83

3.3 Wobbeindex

Der Wobbeindex ist bei konstantem Gasdruck proportional der am Brennermund freiwerdenden Wärmemenge. Unterschiedlich zusammengesetzte Brenngase mit gleichem Wobbeindex ergeben unter gleichem Druck am Brenner annähernd die gleiche Wärmebelastung.

Oberer / unterer Wobbeindex

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{d}} \quad W_i = \frac{H_i}{\sqrt{d}}$$

d = Relative Dichte

ρ_G = Dichte des Gases im Normzustand

ρ_L = Dichte der Luft im Normzustand (1,293 kg/m³)

$$d = \frac{\rho_G}{\rho_L}$$

3.4 Stöchiometrischer Luftbedarf in m³/kg bzw. m³/m³

Überschlagsrechnung

$$V_{L,\text{stö}} \approx \frac{2,6 \cdot H_i^*}{10000} \quad \text{in m}^3 \text{ Luft / kg oder m}^3 \text{ Brennstoff}$$

* in kJ/kg bzw. kJ/m³

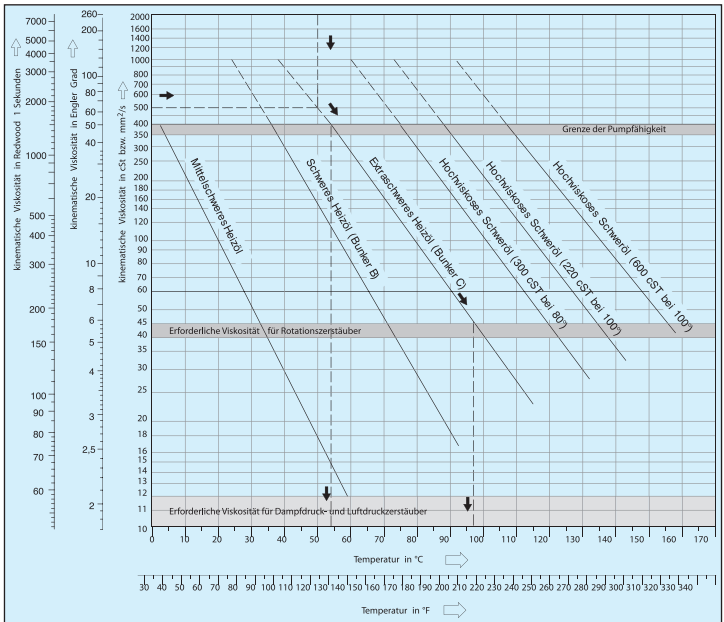
$$V_{L,\text{stö}} \approx 942 \frac{\text{m}^3/\text{h}}{\text{MW}} \quad \text{oder } 0,262 \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{MW}}$$

3.5 Eigenschaften von flüssigen Brennstoffen

(Alle Angaben bezogen auf den physikalischen Normzustand)

Größe	Symbol	Einheit	Heizöl EL	Heizöl S	Methanol	Ethanol	Tierfett (Beispiel)
Heizwert	H _i	MJ/kg	42,7	40,7	19,4	26,5	36
	H _i	kWh/kg	11,86	11,3	5,39	7,36	10
	H _i	Mcal/kg	10,2	9,72	4,63	6,33	8,6
Dichte bei 15 °C	ρ ₁₅	kg/l	0,84	0,96	0,791	0,789	0,91
Flammpunkt	θ _F	°C	70	120	–	11	200
Viskosität bei 20 °C	v	mm ² /s	max. 6	–	–	–	90
	v	mm ² /s	2	max. 50	–	–	max. 40
	v	mm ² /s	–	30	–	–	8
Verbrennungswerte für λ = 1							
Luftbedarf	v _L	m ³ /kg	11,0	10,7	4,93	6,85	9,56
Abgasvolumen trocken	v _{A,tr}	m ³ /kg	10,3	10,0	4,59	6,37	8,97
Abgasvolumen feucht	v _{A,f}	m ³ /kg	11,8	11,4	5,96	7,80	10,32
Wassermenge im Abgas	v _{H₂O}	m ³ /kg	1,5	1,4	1,30	1,43	1,35
Max. Kohlendioxid	CO _{2,max}	Vol.-%	15,5	15,9	15,2	15,1	15,8
Zusammensetzung:							
Kohlenstoff	C	Gew.-%	86	84	37,5	52	76
Wasserstoff	H	Gew.-%	13	12	12,5	13	12
Schwefel	S	Gew.-%	≤ 0,2	≤ 2,8	–	–	0,02
Sauerstoff	O	Gew.-%	0,4	0,5	50	35	11
Stickstoff	N	Gew.-%	0,02	0,3	–	–	0,05
Wasser	H ₂ O	Gew.-%	0,4	0,4	–	–	0,93
Gesamt	Σ	Gew.-%	100	100	100	100	100

3.6 Viskosität-Temperatur-Diagramm



Beispiel:

- Vorhandenes Heizöl S mit einer kinematischen Viskosität von 500 cSt bei 50 °C (Bunker C)
- Erforderliche Temperatur zum Pumpen: >54 °C (durch Tankvorwärmer)
- Erforderliche Temperatur für Drehzerstäuber-Brenner: > 97 °C (durch Vorwärmer)

Umrechnung kinematische / dynamische Viskosität:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

3.7 Eigenschaften verschiedener Versorgungsgase

(Alle Angaben bezogen auf den physikalischen Normzustand)

Größe	Symbol	Einheit	Erdgas L	Erdgas H	Stadtgas
Heizwert	H_i	kWh/m ³	8,83	10,0	4,89
	H_i	MJ/m ³	31,80	36,0	17,59
	H_i	Mcal/m ³	7,59	8,6	4,20
Explosionsgrenzen (Vol.-% Gas in Luft, bei 20°C)					
Untere Zündgrenze	LFL	Vol.-%	5	4	5
Obere Zündgrenze	HFL	Vol.-%	15	16	30
Dichte	ρ	kg/m ³	0,829	0,784	0,513
Relative Dichte	d	–	0,641	0,606	0,397
Verbrennungswerte für $\lambda = 1$					
Luftbedarf	v_L	m ³ /m ³	8,36	9,47	4,33
Abgasvolumen trocken	$v_{A,tr}$	m ³ /m ³	7,64	8,53	3,91
Abgasvolumen feucht	$v_{A,f}$	m ³ /m ³	9,36	10,47	4,98
Max. Kohlendioxid	$CO_{2,max}$	Vol.-%	11,80	12,00	10,03
Wassermenge im Abgas (bez. auf Brenngasmenge)	H_2O_A	m ³ /m ³	1,72	1,94	0,92
Taupunkt (Verbrennungsluft trocken)	ϑ_T	°C	58	58	62
Zusammensetzung:					
Stickstoff	N_2	Vol.-%	14,0	3,1	9,6
Sauerstoff	O_2	Vol.-%	–	–	0,5
Kohlendioxid	CO_2	Vol.-%	0,8	1,0	2,3
Wasserstoff	H_2	Vol.-%	–	–	54,5
Kohlenmonoxid	CO	Vol.-%	–	–	5,5
Methan	CH_4	Vol.-%	81,8	92,3	24,4
Ethan	C_2H_6	Vol.-%	2,8	2,0	2,5
Propan	C_3H_8	Vol.-%	0,4	1,0	0,7
Butan	C_4H_{10}	Vol.-%	0,2	0,6	–
Gesamt	Σ	Vol.-%	100	100	100

Eigenschaften verschiedener Versorgungsgase

(Alle Angaben bezogen auf den physikalischen Normzustand)

Größe	Symbol	Einheit	Klärgas	Wasserstoff H ₂	Methan CH ₄	Propan C ₃ H ₈	Butan C ₄ H ₁₀	Gichtgas (Beispiel)	Kohlenmonoxid CO
Heizwert	H _i	kWh/m ³	6,4	2,99	9,97	25,9	34,4	0,83	3,51
	H _i	MJ/m ³	23,0	10,76	35,9	93,2	123,8	3,0	12,64
Dichte	ρ	kg/m ³	1,158	0,090	0,718	2,011	2,708	1,36	1,25
Relative Dichte	d	–	0,896	0,069	0,555	1,555	2,094	1,05	–
Verbrennungswerte: für λ =1									
Luftbedarf	v _L	m ³ /m ³	6,12	2,38	9,56	24,37	32,37	0,57	2,39
Abgasvolumen trocken	v _{A,tr}	m ³ /m ³	5,84	1,88	8,55	22,81	29,74	1,43	2,88
Abgasvolumen feucht	v _{A,f}	m ³ /m ³	7,05	2,83	10,44	26,16	34,66	1,45	–
Max. Kohlendioxid	CO _{2,max}	Vol.-%	16,85	–	11,65	13,7	14,0	28	34,7
Wassermenge im Abgas (bez. auf Brenngasmenge)	H ₂ O _A	kg/m ³	1,03	0,80	1,61	3,29	4,20	0,02	–
Taupunkt (Verbrennungsluft trocken)	ϑ _T	°C	57	71	58	54	53	–	–
Zusammensetzung:									
Stickstoff	N ₂	Vol.-%	1,2	–	–	–	–	58	–
Sauerstoff	O ₂	Vol.-%	–	–	–	–	–	–	–
Kohlendioxid	CO ₂	Vol.-%	34,6	–	–	–	–	18	–
Wasserstoff	H ₂	Vol.-%	0,2	100	–	–	–	2	–
Kohlenmonoxid	CO	Vol.-%	–	–	–	–	–	22	100
Methan	CH ₄	Vol.-%	64,0	–	100	–	–	–	–
Ethan	C ₂ H ₆	Vol.-%	–	–	–	–	–	–	–
Propan	C ₃ H ₈	Vol.-%	–	–	–	100	–	–	–
Butan	C ₄ H ₁₀	Vol.-%	–	–	–	–	100	–	–
Gesamt	Σ	Vol.-%	100	100	100	100	100	100	100

3.8 Stoffdaten wichtiger organischer Verbindungen

Nr.	Name	Formel	Molare Masse mg/mol	Untere Zündgrenze LFL g/m ³ (i.N.)	Vol.- % %	Obere Zündgrenze HFL g/m ³ (i.N.)	Vol.- % %	Flamm- punkt θ _F °C	Zünd- temp. θ _Z °C	Brennwert H ₂ MJ/kg	Heizwert H _i MJ/kg
1	Methan	CH ₄	16,04	29	4,4	113	17	-	595	55,54	49,85
2	Ethan	C ₂ H ₆	30,07	31	2,4	182	14,3	-	515	51,91	47,48
3	Propan	C ₃ H ₈	44,1	31	1,7	202	10,8	-104	470	50,38	46,34
4	Hexan	C ₆ H ₁₄	86,18	35	1	319	8,9	-20	230	48,2	44,99
5	Dodecan	C ₁₂ H ₂₆	170,34	40	0,6	-	-	74	200	47,55	44,49
6	Cyclohexan	C ₆ H ₁₂	84,16	35	1	326	9,3	-18	260	46,58	43,83
7	Trans-Decalin	C ₁₀ H ₁₈	138,25	50	0,7	280	4,9	54	240	45,48	42,92
8	Ethen (Ethylen)	C ₂ H ₄	28,05	29	2,4	388	32,6	-	440	55,71	52,54
9	Ethin (Acetylen)	C ₂ H ₂	26,04	24	2,3	-	100	-	305	50,23	48,56
10	1,3-Butadien	C ₄ H ₆	54,09	31	1,4	365	16,3	-85	415	47,87	45,44
11	1-Penten	C ₅ H ₁₀	70,13	40	1,4	255	8,7	-51	280	48,02	45,19
12	Benzol	C ₆ H ₆	78,11	39	1,2	280	8,6	-11	555	41,93	40,68
13	Naphtalin	C ₁₀ H ₈	128,17	48	0,9	315	5,9	80	540	40,24	39,46
14	Toluol	C ₇ H ₈	92,14	42	1,1	300	7,8	6	535	42,5	41,04
15	o-Xylol	C ₈ H ₁₂	106,17	43	0,97	335	7,6	30	465	43,13	41,45
16	Styrol	C ₈ H ₈	104,1	42	1	334	7,7	32	490	42,07	40,77
17	Benzin	(Gemisch)	-	32	0,8	310	8,1	-40	320	47	43,56
18	Heizöl EL	(Gemisch)	-	-	0,6	-	6,5	>55	220	45,4	42,6
19	Terpentinöl	(Gemisch)	-	45	0,7	-	6	35	220	-	-
20	Biodiesel (Rapsölmethylester) (nach EN 14214)	(C ₁₆ - und C ₁₆ -C ₁₈ - ungesättigt)	-	-	-	-	-	186	183	40	37,1
21	Rapsöl		-	-	-	-	-	317	410	39,6	36,9
22	Palmöl		-	-	-	-	-	220	>250	39,6	36,9
23	Tierfett	(Gemisch)	-	-	-	-	-	267	-	38,6	36
24	Methanol	CH ₃ OH	32,04	80	6	665	50	9	440	22,69	21,17
25	Ethanol	C ₂ H ₆ O	46,07	-	3,1	-	19	12	400	29,67	27,72
26	1-Propanol	C ₃ H ₇ OH	60,1	52	2,1	480	19,2	15	385	33,37	31,14
27	1-Butanol	C ₄ H ₁₀ O	74,12	52	1,7	350	11,3	35	325	36,05	33,72
28	1-Pentanol	C ₅ H ₁₂ O	88,15	47	1,3	385	10,5	43	320	48,88	45,77
29	Cyclohexanol	C ₆ H ₁₂ O	100,16	62	1,5	460	11,1	61	300	37,22	35,03
30	Phenol	C ₆ H ₆ O	94,11	50	1,3	370	9,5	82	595	32,59	31,9
31	o-Kresol	C ₇ H ₈ O	108,14	58	1,3	-	-	81	555	34,21	33,14
32	1-Naphthol (α-Naphthol)	C ₁₀ H ₈ O	144,17	-	-	-	-	125	510	34,44	33,75
33	Methanal (Formaldehyd)	CH ₂ O	30,03	87	7	910	73	32-61	424	18,7	17,29
34	Acetaldehyd	C ₂ H ₄ O	44,1	73	4	1040	57	<-20	155	26,5	25,09
35	Propenal (Acrolein)	C ₃ H ₄ O	56,06	65	2,8	730	31	-29	215	29,37	28,31
36	Aceton	C ₃ H ₆ O	58,08	60	2,5	345	14,3	<-20	535	31,06	29,34

3.8 Stoffdaten wichtiger organischer Verbindungen

Nr.	Name	Formel	Molare Masse mg/mol	Untere Zündgrenze LFL g/m ³ (i.N.)	Vol %	Oberer Zündgrenze HFL g/m ³ (i.N.)	Vol %	Flamm- punkt ϑ _F °C	Zünd- temp. ϑ _Z °C	Brennwert H ₅ MJ/kg	Heizwert H _i MJ/kg
37	2-Butanon (Ethylmethylketon)	C ₄ H ₈ O	72,11	45	1,5	378	12,6	-10	475	33,82	31,94
38	Cyclohexanon	C ₆ H ₁₀ O	98,15	53	1,3	380	9,4	43	430	–	–
39	Diethylether (Ether)	C ₄ H ₁₀ O	74,12	50	1,7	1100	36	-20	175	36,85	34,23
40	Ethylenoxid	C ₂ H ₄ O	44,05	47	2,6	1820	100	-57	435	28,71	27,47
41	Tetrahydrofuran	C ₄ H ₈ O	72,11	46	1,5	370	12,4	-20	230	–	–
42	1,4-Dioxan	C ₄ H ₈ O ₂	88,11	70	1,9	820	22,5	11	375	26,68	25,04
43	Ethylformiat (Ameisensäureester)	C ₃ H ₆ O ₂	74,08	80	2,7	500	16,5	-20	455	22,16	20,85
44	Methylacetat (Essigsäuremethylester)	C ₃ H ₆ O ₂	74,08	95	3,1	495	16	-13	505	21,54	20,23
45	Ethylacetat (Essigsäureethylester)	C ₄ H ₈ O ₂	88,11	73	2	470	12,8	-4	470	25,61	24
46	Butylacetat (Essigsäurebutylester)	C ₆ H ₁₂ O ₂	116,16	58	1,2	360	7,5	27	390	–	–
47	Vinylacetat (Essigsäurevinylester)	C ₄ H ₆ O ₂	86,09	93	2,6	480	13,4	-8	385	–	–
48	Ameisensäure	CH ₂ O ₂	46,03	190	10	865	45,5	45	520	5,72	5,4
49	Essigsäure	C ₂ H ₄ O ₂	60,05	100	4	430	17	40	485	14,4	13,53
50	Essigsäureanhydrid	C ₄ H ₆ O ₃	102,09	85	2	430	10,2	49	330	17,68	16,9
51	Phthalsäure	C ₈ H ₆ O ₄	166,13	–	–	–	–	168	–	18,41	18,93
52	Methylamin	CH ₅ N	31,06	60	4,9	270	20,7	-58	430	34,48	31,81
53	Diethylamin	C ₅ H ₁₁ N	73,14	50	1,7	305	10,1	-23	310	41,32	38,47
54	Anilin	C ₆ H ₇ N	93,13	48	1,2	425	11	76	630	36,5	35,38
55	Acrylnitril	C ₃ H ₃ N	53,06	61	2,8	620	28	-5	480	–	–
56	Pyridin	C ₅ H ₅ N	79,1	56	1,7	350	10,6	17	550	34,94	34,08
57	Nitrobenzol	C ₆ H ₅ NO ₂	123,11	90	1,8	2048	40	88	480	25,14	24,72
58	m-Dinitrobenzol	C ₆ H ₄ N ₂ O ₄	168,11	–	–	–	–	150	490	–	–
59	Glycerintrinitrat (Nitroglycerin)	C ₃ H ₅ O ₉ N ₃	227,09	–	–	–	–	–	270	6,77	6,55
60	Wasserstoff	H ₂	2,02	3,3	4	65	77	–	560	141,87	120,04
61	Kohlenstoffmonoxid (Kohlenmonoxid)	CO	28,01	131	11,3	901	76	-191	605	10,1	10,1
62	Ammoniak	NH ₃	17,03	108	15,4	240	33,6	–	630	22,5	18,56

3.9 Luftüberschuss

$$\lambda = \frac{v_L}{v_{L, \text{stö}}} \approx \frac{\text{CO}_{2, \text{max}}}{\text{CO}_{2, \text{gem.}}} \approx \frac{21 \%}{21 \% - \text{O}_{2, \text{gem.}}}$$

$$\lambda = 1 + \left(\frac{\text{CO}_{2, \text{max}}}{\text{CO}_{2, \text{gem.}}} - 1 \right) \cdot \frac{v_{\text{tr, stö}}}{v_{L, \text{stö}}}$$

$$\lambda = 1 + \left(\frac{\text{O}_2}{21 - \text{O}_2} \right) \cdot \frac{v_{\text{tr, stö}}}{v_{L, \text{stö}}}$$

Anhaltswerte für $v_{\text{tr, stö}} / v_{L, \text{stö}}$

	Wasser- stoff	Erdgas	Propan	Heizöl EL	Heizöl S	Koks
$\frac{v_{\text{tr, stö}}}{v_{L, \text{stö}}}$	0,79	0,91	0,93	0,93	0,94	1,0

Tatsächliche trockene Abgasmenge

$$v_{\text{tr}} = v_{\text{tr, stö}} + (\lambda - 1) \cdot v_{L, \text{stö}}$$

Tatsächliche feuchte Abgasmenge

$$v_{\text{f}} = v_{\text{f, stö}} + (\lambda - 1) \cdot v_{L, \text{stö}}$$

λ = Luftzahl

v_L = tatsächliche Luftmenge in m^3 (i.N.)/kg

$v_{L, \text{stö}}$ = stöchiometrische Luftmenge in m^3 (i.N.)/kg bzw. m^3 (i.N.)/ m^3 (i.N.)

v_{f} = tatsächliche feuchte Abgasmenge in m^3 (i.N.)/kg

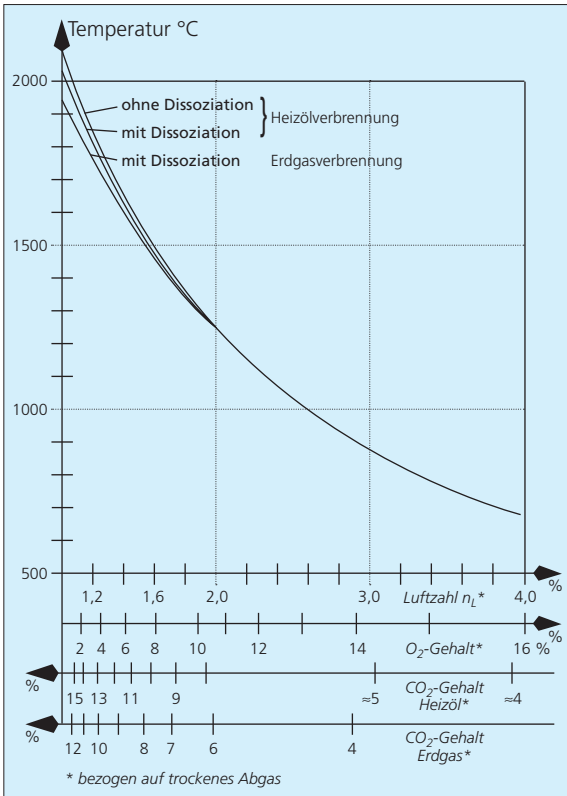
$\text{CO}_{2, \text{max}}$ = max. CO_2 -Gehalt bei stöchiometrischer Verbrennung in Vol.-%

$\text{CO}_{2, \text{gem.}}$ = CO_2 -Gehalt in Vol.-%

$v_{\text{tr, stö}}$ = Abgasvolumen trocken bei stöchiometrischer Verbrennung in m^3 (i.N.)/kg

O_2 = O_2 -Gehalt trocken in Vol.-%

3.10 Theoretische adiabate Flammentemperatur



Übersicht SAACKE-Brenner



4 SAACKE Brenner

Brenner	Brennstoff	Leistungsbereich ca. MW (Richtwerte)													
		bis 2	bis 4	bis 6	bis 8	bis 10	bis 15	bis 20	bis 25	bis 30	bis 40	bis 50	bis 100	bis 134	
SKV	Heizöl S	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SKV-A	Heizöl S			•	•	•	•	•	•	•	•				
SKV	Heizöl EL	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SKV-A	Heizöl EL			•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SG	Gas	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SG-A	Gas			•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SKVG	Heizöl S / Gas	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SKVG-A	Heizöl S / Gas			•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SKVG	Heizöl EL / Gas	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SKVG-A	Heizöl EL / Gas			•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SGD	2 Gase		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SKVGD	Heizöl S / 2 Gase		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SKVGD	Heizöl EL / 2 Gase		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
SKVJ	Heizöl S	•	•	•	•										
SKVJG	Heizöl S / Gas		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
JL	Heizöl EL		•	•	•	•									
JG	Gas		•	•	•	•									
JGL	Heizöl EL / Gas		•	•	•	•									
EUROTHERM HG	Erdgas		•	•	•										
EUROTHERM HL	Heizöl EL	•	•	•											
EUROTHERM HLG	Heizöl EL / Erdgas		•	•											
TEMINOX LS Mono	Heizöl EL		•	•	•	•	•	•	•						
TEMINOX GS Mono	Gas		•	•	•	•	•	•	•						
TEMINOX GLS Mono	Heizöl EL / Gas		•	•	•	•	•	•	•						
TEMINOX LS Duo	Heizöl EL		•	•	•	•	•	•	•	•					
TEMINOX GS Duo	Gas		•	•	•	•	•	•	•						
TEMINOX GLS Duo	Heizöl EL / Gas		•	•	•	•	•	•	•	•					
TEMINOX TL	Heizöl EL		•	•	•	•	•	•							
TEMINOX TG	Gas		•	•	•	•	•								
TEMINOX TGL	Heizöl EL / Gas		•	•	•	•	•								
TF-DDZ	Heizöl EL				•	•	•	•	•	•	•	•			
TF-DDG	Gas				•	•	•	•	•	•	•	•			
TF-DDZG	Heizöl EL / Gas				•	•	•	•	•	•	•	•			
DDZ	Heizöl S				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
DDZ	Heizöl EL				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
DDG	Gas				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
DDZG	Heizöl S / Gas				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
DDZG	Heizöl EL / Gas				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSBS	Heizöl S		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSBG	Gas		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSBGS	Heizöl S / Gas		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSBGL	Heizöl EL / Gas		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSKV	Schwefel	•	•	•	•	•									
SSK	Schwefel		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSB-D	Kohlenstaub		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSBS-D	Kohlenstaub / Heizöl S		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSBL-D	Kohlenstaub / Heizöl EL		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSBG-D	Kohlenstaub / Gas		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
SSB-LCG	Armgas		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	

Anlagenauslegung



5.1 Leistungsbedarf von Gebläsen

5.1.1 Wellenleistung in kW

$$P_w \approx \frac{\dot{V}_N \cdot (p_{sta} + 3) \cdot 4}{10^5} \quad \text{in kW}^*$$

*gültig für ca. 20 °C Lufttemperatur und 75% Gebläsewirkungsgrad

P_w = Wellenleistung in kW

p_{sta} = statische Druckerhöhung in mbar

\dot{V}_N = Volumenstrom in m³/h (i.N.).

Hinweis: Der Antriebsmotor sollte mit angemessener Leistungsreserve ausgelegt werden.

5.1.2 Einfluss der Gebläsedrehzahl

$$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3$$

5.2 Leistungsreihe für Elektromotoren

Leistungsreihe für elektrische Motoren (Normmotor) nach EN 50347		
0,18 kW	4,0 kW	45 kW
0,25 kW	5,5 kW	55 kW
0,37 kW	7,5 kW	75 kW
0,55 kW	11,0 kW	90 kW
0,75 kW	15,0 kW	110 kW
1,1 kW	18,5 kW	132 kW
1,5 kW	22,0 kW	160 kW
2,2 kW	30,0 kW	200 kW
3,0 kW	37,0 kW	

5.3 Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code) nach EN 60529 (IEC 529 / VDE 047 T1)

IP x y

x		y	
0	Kein Berührungsschutz, kein Schutz gegen feste Fremdkörper	0	Kein Wasserschutz
1	Schutz gegen großflächige Berührung mit der Hand, Schutz gegen Fremdkörper mit einem Durchmesser > 50mm	1	Schutz gegen senkrecht fallende Wassertropfen
2	Schutz gegen Berührung mit den Fingern, Schutz gegen Fremdkörper mit einem Durchmesser >12mm	2	Schutz gegen schräg fallende Wassertropfen aus beliebigem Winkel bis zu 15° aus der Senkrechten
3	Schutz gegen Berührung mit Werkzeug, Drähten o.ä. mit einem Durchmesser von >2,5mm, Schutz gegen Fremdkörper mit einem Durchmesser von >2,5mm	3	Schutz gegen schräg fallende Wassertropfen aus beliebigem Winkel bis zu 60° aus der Senkrechten
4	wie 3, jedoch Durchmesser >1mm	4	Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen
5	Schutz gegen Berührung, Schutz gegen Staubablagerungen im Inneren	5	Schutz gegen Wasserstrahl (Düse) aus einem beliebigen Winkel
6	Vollständiger Schutz gegen Berührung, Schutz gegen das Eindringen von Staub	6	Schutz gegen Wassereindringen bei vorübergehender Überflutung
		7	Schutz gegen Wassereindringung bei zeitweiligem Eintauchen
		8	Schutz gegen Wassereindringung bei dauerhaftem Untertauchen

5.4 Leistungsbedarf von Elektro-Vorwärmern

$$P \approx \frac{\dot{m}_B \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{1585} \quad \text{in kW}$$

P = Leistungsbedarf in kW ϑ_2 = Austrittstemperatur in °C
 ϑ_1 = Eintrittstemperatur in °C \dot{m}_B = Ölmenge in kg/h

5.5 Ermittlung der Feuerraumwärmebelastung

$$\dot{q}_{Fr} \approx \frac{\dot{m}_B \text{ (bzw. } \dot{V}_B) \cdot H_i \cdot 3,53}{D_{Fr}^2 \cdot L_{Fr} \cdot 10^7} \quad \text{in MW/m}^3$$

\dot{m}_B bzw. \dot{V}_B = Brennstoffverbrauch in kg/h bzw. m³/h
 H_i = Heizwert in kJ/kg bzw. kJ/m³
 D_{Fr} = Lichter Flammrohrdurchmesser in m
 L_{Fr} = Flammrohrlänge ohne Wendekammer in m

5.6 Abgastemperatur für Kessel ohne Economiser

$$\vartheta_A \approx \text{Sattdampf- bzw. Heißwassertemperatur} + 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

5.7 Umrechnung eines Luft- oder Gastromes vom Normzustand auf den Betriebszustand

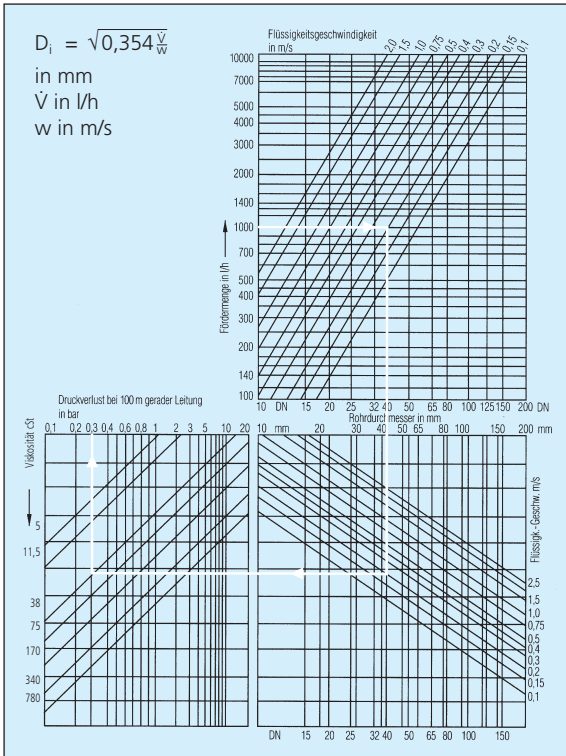
$$\dot{V}_{(i.B.)} = \dot{V}_{(i.N.)} \cdot \frac{1013}{1013 + p} \cdot \frac{273 + \vartheta}{273} \quad \begin{array}{l} \dot{V} \text{ in m}^3/\text{h} \\ p \text{ in mbar} \\ \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C} \end{array}$$

5.8 Druckverlust eines Flüssigkeits- oder Gastromes

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot \frac{1}{100} \quad \text{in mbar}$$

Δp = Druckverlust
 ζ = Widerstandsbeiwert (wenn nicht bekannt: 1 einsetzen)
 ρ = Dichte
 w = Strömungsgeschwindigkeit

5.9 Heizölleitungen Rohrdurchmesser und Druckverluste



Beispiel:

Fördermenge:	1000 l/h
Rohr:	DN 40
Flüssigkeitsgeschwindigkeit:	0,2 m/s
Viskosität:	38 cSt
Druckverlust:	0,3 bar pro 100 m gerade Leitung

5.10 Strömungsgeschwindigkeit in Rohrleitungen

Fluid (Medium)	Art der Rohrleitung	m/s
Wasser	Trink- und Brauchwasser – Hauptleitungen	1 – 2
	“ “ – Fernleitungen	bis 3
	“ “ – Ortsnetze	0,6 – 0,7
	“ “ – Hausleitungen	2
	Druckwasserleitungen (je nach Länge)	15 – 30
	Speisewasser – Saugleitungen	0,5 – 1
	Speisewasser – Druckleitungen	1,5 – 2,5
	Kondensatleitungen vor Kondensatableiter	1 – 2
Dampf	Dampfleitungen < 10 bar	15 – 20
	“ 10 – 40 bar	20 – 40
	“ 40 – 125 bar	30 – 60
	Abdampfleitungen	15 – 25
Luft	Druckleitungen	15 – 25
Gas	Gasfernleitungen bis 2 bar	4 – 20
	“ bis 5 bar	11 – 35
	“ über 5 bar	15 – 40
Heizöl EL	Saugleitungen	1
	Druckleitungen	1,5 – 2
Heizöl S	Saugleitungen	0,1 – 0,5
	Druckleitungen	0,5 – 1

5.11 Nahtlose Stahlrohre nach EN 10220, Reihe 1

Nennweite	geeignet für Rohrgewinde BSPT	Durchmesser außen	Wandstärke	Durchmesser innen	Querschnitt innen	Rohrgewicht	Volumen- strom bei 1 m/s
DN in mm	R in Zoll	D _a in mm	d in mm	D _i in mm	A in cm ²	G ₁ in kg/m	\dot{V} in m ³ /h
10	3/8	17,2	1,8	13,6	1,45	0,684	0,52
15	1/2	21,3	2,0	17,3	2,35	0,952	0,85
20	3/4	26,9	2,3	22,3	3,90	1,40	1,40
25	1	33,7	2,6	28,5	6,37	1,99	2,30
32	1 1/4	42,4	2,6	37,2	10,9	2,55	3,92
40	1 1/2	48,3	2,6	43,1	14,6	2,93	5,25
50	2	60,3	2,9	54,5	23,3	4,11	8,40
65	2 1/2	76,1	2,9	70,3	38,8	5,24	14,0
80	3	88,9	3,2	82,5	53,5	6,76	19,3
100	4	114,3	3,6	107,1	90,0	9,83	32,4
125	5	139,7	4,0	131,7	136,0	13,4	49,0
150	–	168,3	4,5	159,3	199,0	18,2	71,8
200	–	219,1	6,3	206,5	334,0	33,1	122,0
250	–	273,0	6,3	260,4	532,0	41,4	192,0
300	–	323,9	7,1	309,7	753,0	55,5	270,0
350	–	355,6	8,0	339,6	906,0	68,6	327,0
400	–	406,4	8,8	388,8	1180,0	86,3	426,0

\dot{V} = Volumenstrom in l/h

w = Geschwindigkeit in m/s

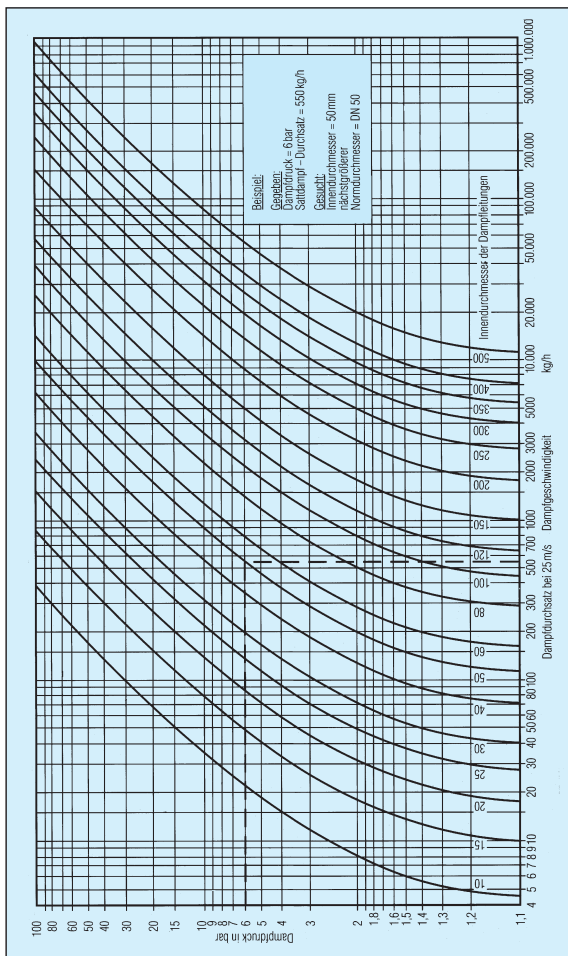
Beispiel:

$$\dot{V} = 5,25 \text{ m}^3/\text{h} = 5250 \text{ l/h}$$

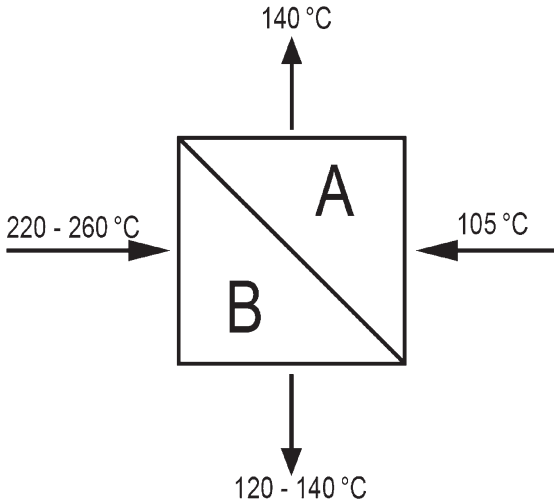
$$w = 1 \text{ m/s}$$

$$D_i = \sqrt{0,354 \frac{\dot{V}}{w}} = 43,1 \text{ mm} \hat{=} \text{DN } 40$$

5.12 Auslegung von Satttdampfleitungen



5.13 Richtwerte für Economiser



A = Rücklauf / Speisewasser

B = Rauchgas

Richtwert

Eine Absenkung der Rauchgastemperatur um 30 °C verbessert den Wirkungsgrad um ca. 1%. Durch Einsatz eines Economisers erhöht sich der Wirkungsgrad des Kessels um ca. 4 - 5%


Grenzwerte der Rauchgastemperatur

Heißwasserkessel

Mindest-Rücklauf­temperatur im Gasbetrieb > 60 °C

Mindest-Rücklauf­temperatur im Öl­betrieb > 65 °C

Bei Dampfkesseln muss die Rauchgastemperatur ca. 60 - 80 °C über der Dampf­temperatur liegen.



**Emissionen,
Grenzwerte für
Rauchgas und
Schall**

6.1 Emissionsgrenzwerte für Feuerungsanlagen

Heizöl EL / Flüssige Brennstoffe								
		NO _x mg/m ³	NO _x mg/kWh	CO mg/m ³	SO ₂ mg/m ³	Staub mg/m ³	Ruß- zahl	Bemerkungen
1. BImSchV Stand vom 14.08.2003	≤ 120 kW	–	120 ²⁾	–	–	–	1	
	> 120 kW – < 10 MW	1 ¹⁾	–	–	–	–	1	
	≥ 10 – < 20 MW	180	–	80	–	–	1	Betriebstemp. < 110 °C
		200	–	80	–	–	1	Betriebstemp. 110 – 210 °C
4. BImSchV Stand vom 14.08.2003 (TA Luft)	≥ 20 – < 50 MW	0,18 g/m ^{3 2)}	–	80	–	–	1	Betriebstemp. < 110 °C
		0,20 g/m ^{3 2)}	–	80	–	–	1	Betriebstemp. 110 – 210 °C
	≥ 1 (5) – < 50 MW	0,25 g/m ^{3 2)}	–	80	–	–	1	Betriebstemp. > 210 °C
		0,35 g/m ^{3 2)}	–	80	0,85 g/m ^{3 3)}	50	–	alle Heizöle außer Heizöl EL
13. BImSchV Stand vom 20.07.2004	≥ 50 – 100 MW	200	–	80	–	20	–	Heizöl EL, Qualität gemäß 3. BImSchV
	> 100 MW	200	–	80	–	20	–	
	≥ 50 – 100 MW	350	–	80	850	20	–	alle Heizöle außer Heizöl EL
	> 100 – 300 MW	200	–	80	400-200 ⁴⁾	20	–	gemäß 3. BImSchV
> 300 MW	150	–	80	200	10	–		

1) nach dem „Stand der Technik“

2) Die NO_x-Emissionen für Heizöl EL beziehen sich auf einen Brennstoff-Stickstoffgehalt von 140 mg/kg nach EN 267.

3) Bei einer Feuerungsleistung bis 5 MW dürfen die SO₂-Emissionen nicht höher als bei Heizöl EL sein.

4) Lineare Abnahme

Die angegebenen Emissionsgrenzwerte beziehen sich auf einen Restsauerstoffgehalt im Abgas von 3% O_{2,Tr}

Erdgas / Sonstige gasförmige Brennstoffe								
		NO _x mg/m ³	NO _x mg/kWh	CO mg/m ³	SO ₂ mg/m ³	Staub mg/m ³	Ruß- zahl	Bemerkungen
1. BImSchV Stand vom 14.08.2003	≤ 120 kW	–	80	–	–	–	0	
	> 120 kW – < 10 MW	1 ¹⁾	–	–	–	–	0	
	≥ 10 – < 20 MW	100	–	50	–	–	0	Betriebstemp. < 110 °C
		110	–	50	–	–	0	Betriebstemp. 110 – 210 °C
150		–	50	–	–	0	Betriebstemp. > 210 °C	
4. BImSchV Stand vom 14.08.2003 (TA Luft)	≥ 20 – < 50 MW	0,10 g/m ³	–	50	10	5	0	Betriebstemp. < 110 °C
		0,11 g/m ³	–	50	10	5	0	Betriebstemp. 110 – 210 °C
		0,15 g/m ³	–	50	10	5	0	Betriebstemp. > 210 °C
13. BImSchV Stand vom 20.07.2004	≥ 50 – 300 MW	100 ²⁾	–	50 ³⁾	35 ⁴⁾	5 ⁵⁾	–	Betriebstemp. < 110 °C
		110 ²⁾	–	50 ³⁾	35 ⁴⁾	5 ⁵⁾	–	Betriebstemp. 110 – 210 °C
		150 ²⁾	–	50 ³⁾	35 ⁴⁾	5 ⁵⁾	–	Betriebstemp. > 210 °C
	> 300 MW	100	–	50 ³⁾	35 ⁴⁾	5 ⁵⁾	–	

1) nach dem „Stand der Technik“

2) 200 mg/m³ bei sonstigen gasförmigen Brennstoffen.

3) 80 mg/m³ bei sonstigen gasförmigen Brennstoffen; 100 mg/m³ bei Hochofengas oder Koksfas.

4) 5 mg/m³ bei Einsatz von Flüssiggas; 200 mg/m³ bei Hochofengas mit niedrigem Heizwert; 350 mg/m³ bei Koksfas mit niedrigem Heizwert.

5) 10 mg/m³ bei Einsatz von Hochofengas oder Koksfas.

Die angegebenen Emissionsgrenzwerte beziehen sich auf einen Restsauerstoffgehalt im Abgas von 3% O_{2,Tr}

Feste oder flüssige Abfälle								
		NO _x mg/m ³	NO _x mg/kWh	CO mg/m ³	SO ₂ mg/m ³	Staub mg/m ³	CxHy	Bemerkungen
17. BImSchV Stand vom 14.08.2003		200	–	50	50	10	10	Tagesmittelwert
		400	–	100	200	30	20	Halbstundenmittelwert °C

Die angegebenen Emissionsgrenzwerte beziehen sich auf einen Restsauerstoffgehalt im Abgas von 11% O_{2,Tr}

6.2 Kontinuierliche Messungen nach TA-Luft

	flüssige Brennstoffe ¹⁾	gasförmige Brennstoffe ¹⁾
Abgastrübung	5 bis 25 MW ≥ 5 MW Heizöl EL	
Staub	> 25 MW ausgenommen Heizöl EL	
CO	> 25 MW	> 50 MW
SO ₂	²⁾	
NO _x		
1) Leistungsangaben: Wärmeleistung der Einzelfeuerungen. 2) Bei Einsatz von Brennstoffen außer Heizöl EL ist ein Nachweis über den Schwefelgehalt zu führen.		

6.3 Abschätzung des Feststoffgehaltes im Abgas flüssiger Brennstoffe

$$\text{Feststoffgehalt} = \text{Aschegehalt} \cdot 830 + X \quad \text{in mg/m}^3$$

Feststoffgehalt in mg/m³ trockenes Abgas

Aschegehalt in %

X = anlagenabhängig: von 10 bis 40 in mg/m³

6.4 Abschätzung des SO_x-Gehaltes im Abgas

$$\text{SO}_x\text{-Gehalt in mg/m}^3 = \text{Brennstoff-Schwefelgehalt in Gew.-%} \cdot 1700$$

Brennstoff-Schwefelgehalt:

Heizöl S ca. 0,3 Gew.% \triangleq 3000 mg/kg

Heizöl EL ca. 0,015 Gew.% \triangleq 150 mg/kg

6.5 Umrechnung von Emissionswerten

Die Emissionswerte beziehen sich je nach Brennstoff- und Feuerungsart auf eine bestimmte Sauerstoffkonzentration im trockenen Abgas ($O_{2, tr}$ in Vol.-%).

Die Umrechnung von ppm in mg/m^3 , bezogen auf den vorgegebenen O_2 -Wert, erfolgt in zwei Schritten:

6.5.1 Umrechnungsgleichung auf Bezugs- O_2 -Wert

$$E = \frac{21 - X}{21 - O_{2, gem}} \cdot E_{gem}$$

$E \triangleq$ Emission, bezogen auf X% O_2 , z.B. NO , SO_2 , CO
 X = Bezugs- O_2 -Wert in Volumenprozenten

6.5.2 Umrechnungsfaktoren von ppm auf mg/m^3

$$\begin{aligned} 1 \text{ ppm CO} &= 1,25 \text{ mg CO/m}^3 \\ 1 \text{ ppm NO} &\Downarrow 2,05 \text{ mg NO}_2/\text{m}^3 * \\ 1 \text{ ppm NO} &= 1,34 \text{ mg NO/m}^3 \\ 1 \text{ ppm SO}_2 &= 2,93 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3 \end{aligned}$$

**Unter Stickoxiden NO_x wird das Gemisch aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) verstanden. Die NO_x -Konzentration wird in $mg NO_2/m^3$ gerechnet.*

6.5.3 Korrektur des Einflusses der Temperatur und der Feuchte der Verbrennungsluft auf die NO_x-Emissionen*

$$NO_{x,ref} = NO_{x,gem} + \left[\frac{0,02 \cdot NO_{x,gem} - 0,34}{1 - 0,02 \cdot (h_{gem} - 10)} \right] (h_{gem} - 10) + [0,85 \cdot (20 - \vartheta_{gem})]$$

NO_{x,gem} = NO_x-Wert in mg/kWh, gemessen bei h_{gem} und ϑ_{gem} im Bereich von 50 mg/kWh bis 300 mg/kWh

h_{gem} = Feuchte bei der Messung von NO_{x,gem} in g/kg, im Bereich von 5 g/kg bis 15 g/kg

ϑ_{gem} = Temperatur in °C bei der Messung von NO_{x,gem}

NO_{x,ref} = Korrigierter NO_x-Wert in mg/kWh bei einer Feuchte von 10g/kg und einer Temperatur von 20°C (Referenzbedingungen).

Die Temperatur ϑ_{gem} muss bei dieser Berechnung innerhalb enger Grenzen liegen:

- Für Heizöl EL zwischen 15 und 30°C

- Für Gase öffentlicher Gasversorger zwischen 15 und 25°C.

6.5.4. Korrektur des Einflusses des Stickstoffgehalts im Öl auf die NO_x-Emissionen*

Für eine Korrektur des NO_x-Wertes muss der tatsächliche Stickstoffgehalt N_{gem} des Öls (z.B. durch eine Analyse) bekannt sein.

$$NO_{x(EN267)} = NO_{x,ref} - (N_{gem} - N_{ref}) \cdot 0,2$$

NO_{x(EN267)} = Auf den Bezugswert für Stickstoff im Öl (140 mg/kg) korrigierter NO_x-Wert in mg/kWh

NO_{x,ref} = Nach [6.5.3] berechneter NO_x-Wert in mg/kWh

N_{gem} = Gemessener Stickstoffgehalt des Öls in mg/kg

N_{ref} = Bezugswert für den Stickstoffgehalt im Öl (140 mg/kg)

*Nach EN 267. Formelzeichen angepasst

6.6 Säuretaupunkte und Mindestrauchgastemperaturen

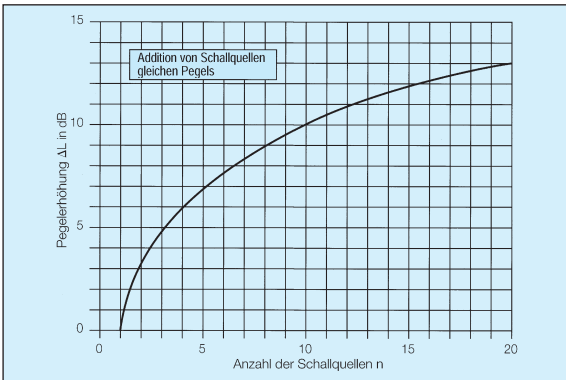
	Säuretaupunkt	Rauchgastemperatur min.
Erdgas	ca. 55 °C	> 100 °C
Heizöl EL	ca. 120 °C	> 150 °C
Heizöl S*	ca. 155 °C	> 180 °C

*Schwefelgehalt 1%

6.7 Emissionsumrechnung

	ppmv 0% O ₂ , trocken	ppmv 3% O ₂ , trocken	mg NO _x /kg Brennstoff	mg NO _x /m ³ (i.N.) Brennstoff	mg NO _x /m ³ (i.N.) Abgas 3% O ₂ , trocken	mg NO _x /MJ (H ₂)	mg NO _x /kWh oder g NO _x /MWh
ppmv 0% O ₂ , trocken	1	0,87	23,39	19,84	1,78	0,49	1,76
ppmv 3% O ₂ , trocken	1,15	1	27,29	23,15	2,05	0,57	2,05
mg NO _x /kg Brennstoff	0,043	0,037	1	0,85	13,29	0,021	0,075
mg NO _x /m ³ (i.N.) Brennstoff	0,050	0,043	1,18	1	0,089	0,025	0,089
mg NO _x /m ³ (i.N.) Abgas 3% O ₂ , trocken	0,562	0,488	0,075	11,24	1	0,28	1,0
mg NO _x /MJ (H ₂)	2,045	1,754	47,62	40,00	3,6	1	3,6
mg NO _x /kWh oder g NO _x /MWh	0,568	0,487	13,30	11,20	1	0,28	1

6.8 Addition von Schallpegelwerten mehrerer Schallquellen

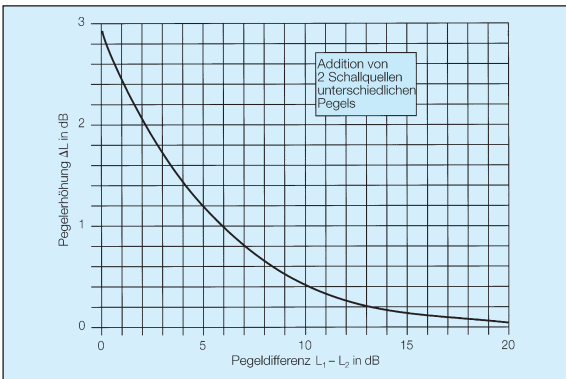


Beispiel:

2 Schallquellen mit jeweils 80 dB

Pegelerhöhung: 3 dB

Gesamtpegel: 83 dB



Beispiel:

Schallquelle 1: 80 dB

Schallquelle 2: 75 dB

Pegeldifferenz: 5 dB

Pegelerhöhung: 1,2 dB

Gesamtpegel: 81,2 dB

Kaufmännische Faustformeln

7.1 Investitionsrechnung, statisches Verfahren

Für die Kostenabschätzung einer Investition (z.B. einer Anlagenmodernisierung) können Sie eine Reihe von Kennzahlen berechnen. Die nachfolgende Berechnung ist vereinfacht, aber für eine grobe Abschätzung hinreichend genau. Gehen Sie Schritt für Schritt vor:

1. Ermittlung der Rahmendaten
 - 1a. Ermitteln Sie die bisherigen Brennstoffkosten pro Jahr.
 - 1b. Ermitteln Sie die zu erwartenden Brennstoffkosten pro Jahr.
 - 1c. Berechnen Sie die Brennstoffkosteneinsparung [B] pro Jahr.
 - 1d. Schätzen Sie die Anlagen-Investitionen [K] grob ab.
2. Berechnung des Kapitaldienstes [KD] der Investition [K]* - (angenommener Zinssatz: 10%)

**Vereinfacht gerechnet auf durchschnittlichen Kapitaleinsatz*

$$KD = \frac{K}{2} \cdot \frac{10\%}{100\%}$$

3. Berechnung der Abschreibungen [AfA] der Investition [K] auf die Nutzungsdauer (Beispiel: 10 Jahre)

$$AfA = \frac{K}{10}$$

4. Berechnung der jährlichen Kosteneinsparung [S]

$$S = B + KD + AfA$$

5. Berechnung des jährlichen Kapitalrückflusses [KR] (der Wiedergewinnung / des Cash-Flow)

$$KR = S + AfA$$

6. Berechnung der Amortisation / der Kapitalrückflusszeit / des Pay-off / des Pay-back [PB]

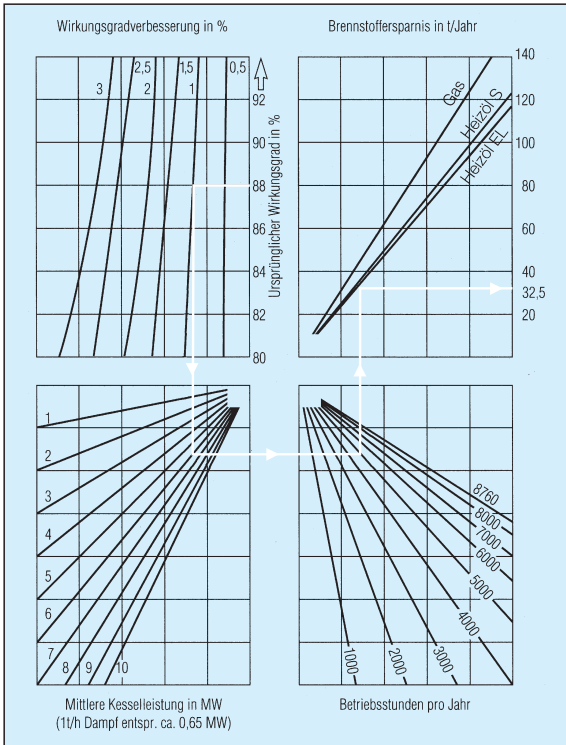
$$PB = \frac{K}{KR}$$

7. Berechnung der Kennzahl des Return on Investment [ROI] / der Rendite*

**Für K kann auch $\frac{K}{2}$ eingesetzt werden*

$$ROI = \frac{S}{K}$$

7.2 Rentabilitätsdiagramm für Feuerungsanlagen mit Sauerstoffregelung



Beispiel:

Ursprünglicher Wirkungsgrad	88 %
Wirkungsgradverbesserung durch O ₂ -Regelung	1 %
Mittlere Kesselleistung	6 MW
Betriebsstunden pro Jahr	5000

Einsparung von 32,5 Tonnen Heizöl EL im Jahr.

7.3 Berechnung des Brutto- und Netto-Wärmepreises

$$\text{Bruttowärmepreis [EURO/GJ]} = \frac{\text{Preis der Brennstoffmassen(volumen)einheit [EURO/100 l] bzw. [EURO/m}^3]}{\text{Heizwert der Brennstoffmassen(volumen)einheit } H_i \text{ [kJ/kg] bzw. [kJ/m}^3]}$$

$$\text{Nettowärmepreis [EURO/GJ]} = \frac{\text{Bruttowärmepreis [EURO/GJ]} \cdot 100\%}{\text{Jahresbetriebswirkungsgrad \%}}$$

Mittlere Jahresbetriebswirkungsgrade*

bei Heizöl EL 82 %

bei Heizöl S 81 %

bei Erdgas und Flüssiggas 83 %

**Voraussetzung ist ein optimaler feuerungstechnischer Wirkungsgrad*

Rechenbeispiel:


Brennstoff: Heizöl EL, $H_i = 42.700 \text{ kJ/kg}$

Preis: 85 EURO/100 l

Dichte: 0,83 kg/l

$$\text{Bruttowärmepreis} = \frac{85 \text{ EURO/100 l} \cdot 10^6 \text{ kJ/GJ}}{42.700 \text{ kJ/kg} \cdot 83 \text{ kg/100 l}} = 23,98 \text{ EURO/GJ}$$

$$\text{Nettowärmepreis} = \frac{23,98 \text{ EURO/GJ}}{0,82} = 29,24 \text{ EURO/GJ}$$

A large, white, stylized number '8' is centered on a light blue background. The number is composed of two thick, rounded loops that meet at a central point. The top loop is positioned higher than the bottom loop, creating an asymmetrical shape. The text is located within the upper loop of the '8'.

Übersicht wichtiger Normen und Richtlinien

8.1 Übersicht wichtiger Normen und Richtlinien*

EN 267	Ölbrenner mit Gebläse
EN 676	Automatische Brenner mit Gebläse für gasförmige Brennstoffe
EN 230	Feuerungsautomaten für Ölbrenner
EN 298	Feuerungsautomaten für Gasbrenner und Gasgeräte mit und ohne Gebläse
EN 50156	Elektrische Ausrüstung von Feuerungsanlagen
EN 12952	Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten
EN 12953	Großwasserraumkessel
EN 746-2	Industrielle Thermoprozessanlagen - Teil 2: Sicherheitsanforderungen an Feuerungen und Brennstoffführungssysteme
EN 60529	(IEC 529 / VDE 047 T1) Schutzarten durch Gehäuse
Richtlinie 94/9/EG	der Europäischen Gemeinschaft über Geräte und Schutzsysteme zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen
Richtlinie 1999/92 EG	über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können
Richtlinie 2006/42/EG	des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17.Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (" Maschinenrichtlinie ", MRL)

Richtlinie 97/23/EG	des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29.Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte (" Druckgeräterichtlinie ", DGRL)
Richtlinie 90/396/EWG	des Rates vom 29.Juni 1990 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Gasverbrauchseinrichtungen (" Gasgeräterichtlinie ")
Richtlinie 2006/95/EG	des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12.Dezember 2006 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen (" Niederspannungsrichtlinie ")

**Das Regelwerk "Technische Regeln für Dampfkessel (TRD)" ist veraltet und hier nicht mehr aufgeführt.*

8.2 Explosionsschutz - Auswahl und Kennzeichnung von Betriebsmitteln

8.2.1 Definition Explosionsschutzzonen


Explosibles Gemisch vorhanden:	Zone für Gase	Zone für Stäube
Ständig, über lange Zeiträume oder häufig	Zone 0	Zone 20
Im Normalbetrieb gelegentlich	Zone 1	Zone 21
Normalerweise nicht oder nur kurzzeitig	Zone 2	Zone 22

8.2.2 Auswahl der Geräte-Kategorie

Explosionsschutz für Gase		Explosionsschutz für Stäube	
Zone	Kategorie	Zone	Kategorie
0	1G	20	1D
1	1G oder 2G	21	1D oder 2D
2	1G, 2G oder 3G	22	1D, 2D oder 3D

8.2.3 Betriebsmittelkennzeichnung

(Mindestanforderung gem. 94/9/EG)

Allgemeine Herstellerangaben	Name, Anschrift des Herstellers, Serie, Typ, Seriennummer, Baujahr
CE-Kennzeichen	CE mit der Nummer der benannten Stelle
EX-Kennzeichen	
Gerätegruppe	I Bergwerke (Methan, Stäube) II alle übrigen Ex-Bereiche
Kategorie	1G, 2G, 3G oder 1D, 2D, 3D jeweils für die Zonen 0, 1, 2 oder die Zonen 20, 21, 22

8.2.4 Kennzeichnung der Explosionsgruppe

Explosionsgruppe	Stoff-Beispiel	Grenzspaltweite
I	Methan	> 1,1 mm
IIA	Propan	> 0,9 mm
IIB	Ethylen	> 0,5 mm
IIC	Wasserstoff	< 0,5 mm

8.2.5 Zündschutzart

Kennzeichnung	Zündschutzart	Einsatz-Beispiel
EEx p	Überdruckkapselung	Belüfteter Schaltschrank
EEx c	Konstruktive Sicherheit	Neu, für nichtelektrische Geräte
EEx d	Druckfeste Kapselung	Insbesondere für Motoren
EEx de	Druckfeste Kapselung mit erhöhter Anschlusssicherheit	Vor-Ort-Schaltkasten
EEx ia	Eigensicher für Zone 0	Instrumentierung
EEx ib	Eigensicher für Zonen 1 und 2	Instrumentierung
EEx em	Erhöhte Sicherheit	Pilotventile
EEx b	Zündquellenüberwachung	Neu, für nichtelektrische Geräte
EEx k	Flüssigkeitskapselung	Transformatoren
EEx nA	Konstruktive Sicherheit an Elektromotoren	Elektromotoren

Formelzeichen und Indizes

Konventionen

Heizöl EL	Leichtes Heizöl nach DIN 51603-1
Heizöl S	Schweres Heizöl nach DIN 51603-3

Abkürzungen und Formelzeichen

A	Fläche
cos φ	Elektrischer Leistungsfaktor
d	Relative Dichte
d	Wandstärke, Dicke
D	Durchmesser
DN	Nennweite
E	Emission
G	Gewicht
h	Enthalpie
h	Feuchte
H	Heizwert / Brennwert, wobei H_1 = Heizwert und H_3 = Brennwert
HFL	Obere Zündgrenze
I	Elektrische Stromstärke
(i.B.)	Im Betriebszustand
(i.N.)	Im Normzustand
L	Länge
LFL	Untere Zündgrenze
\dot{m}	Massenstrom, Verbrauch
n	Zahl, Anzahl
n	Drehzahl
NN	Normalnull
p	Druck
P	Elektrische Leistung
q	Wärmebelastung
Q	Feuerungsleistung
r	Verdampfungswärme
R	Rohrgewinde
R	Elektrischer Widerstand
U	Elektrische Spannung
V	Volumen
v	spezifisches Volumen
\dot{V}	Volumenstrom, Verbrauch
w	Geschwindigkeit, Strömungs- geschwindigkeit
X	Ein beliebiger Wert / Ergebnis einer Berechnung

Griechische Buchstaben

η	Dynamische Viskosität
η	Wirkungsgrad
Δ	Differenz
λ	Luftzahl
ν	Kinematische Viskosität
ρ	Dichte
ϑ	Temperatur in °C
ζ	Widerstandsbeiwert

Indizes

A	Abgas
a	außen
abs	absolut
As	Absatz-...
B	Brennstoff
D	Dampf
dyn	Dynamisch
eff	Effektiv-...
f	feucht
F	Feuerung-... / Flamm-...
Fr	Feuerraum-... / Flammrohr-...
G	Gas
gem	gemessen
i	inferior (unter, unterer)
K	Kessel
L	Luft
L	Lautstärke (-pegel)
max	Maximalwert
min	Minimalwert
N	Norm-...
ref	Referenz-...
s	superior (ober, oberer)
S	Sättigung
Sw	Speisewasser
sta	Statisch
Str	Strang-... (z.B. Strangsspannung)
stö	stöchiometrisch
T	Tau-...
tr	trocken
W	Wellen-...
z	Zünd-...

