

WINFLOW 2.5

Berechnungs- und Auslegungsprogramm für ITABAR-Durchfluß-Sonden



MESS- UND REGELINSTRUMENTE

Intra-Automation GmbH stellt Ihnen mit WinFlow 2.5x ein Programm zur Verfügung, welches Ihnen folgende Werte für ITABAR-Durchfluß-Sonden automatisch berechnet:

1. Differenzdruck
2. Bleibender Druckverlust
3. Eigenschwingfrequenz
4. Sensorfrequenz bei Betriebsbedingungen (Hz)
5. Max. zulässiger Differenzdruck
6. Max. Durchflußmenge beim ausgewählten Sensortyp
7. Durchflußgeschwindigkeit

Weiterhin berechnet WinFlow 2.5x automatisch die Viskosität und Dichte für folgende Medien:

1. Wasser
2. Luft
3. Ammoniak
4. Sauerstoff
5. Kohlendioxid
6. Schwefeldioxid
7. Wasserstoff
8. Propan

Selbstverständlich können auch andere Flüssigkeiten und Gase berechnet werden, wobei die Dichte und Viskosität dann von Hand eingegeben werden müssen.

Welche Druckeinheiten sind in WinFlow 2.5x enthalten:

| | |
|-----------------|------------------|
| bar (abs) | bar (über) |
| mbar (abs) | mbar (über) |
| Pa (abs) | Pa (über) |
| kPa (abs) | kPa (über) |
| PSI (abs) | PSI (über) |
| mmWs 20°C (abs) | mmWs 20°C (über) |
| kg/cm2 (abs) | kg/cm2 (über) |
| kg/m2 (abs) | kg/m2 (über) |
| lb/in2 (abs) | lb/in2 (über) |
| lb/ft2 (abs) | lb/ft2 (über) |

Dichteeinheiten, nur bei anderen Gasen / Flüssigkeiten kann die Einheit geändert werden

| | | | |
|--------|-------|--------|--------|
| kg/dm3 | kg/m3 | lb/in3 | lb/ft3 |
|--------|-------|--------|--------|

Einheiten der Durchflußmenge:

| | | |
|----------------------|-----------------------|---------------------|
| m3 /h | m3 /min | m3 /s |
| kg/h | kg/min | kg/s |
| cf/h | cf/min | cf/s |
| pints/h (U.S. liq.) | pints/min (U.S. liq.) | pints/s (U.S. liq.) |
| t/h | t/min | t/s |
| gal/h (U.S.) | gal/min (U.S.) | gal/s (U.S.) |
| gal/h (brit.) | gal/min (brit.) | gal/s (brit.) |

Einheiten für den Rohrrinnendurchmesser

| | | | | | |
|----|----|---|------|--------|--------------|
| mm | cm | m | feet | inches | ANSI B 36.10 |
|----|----|---|------|--------|--------------|

Systemvoraussetzung:

Mindestens DX486-66Mhz, 8MB RAM, 10 MB freier Speicherplatz auf der Festplatte. Windows 3.1x oder Windows 95

Installation:

Legen Sie die Diskette mit der Aufschrift ¼ in das Laufwerk (A) und rufen Sie über den Programm-Manager (Datei/Ausführen) die Datei Setup.Exe auf. Folgen Sie dann den Anweisungen des Installationsprogrammes.

Progammbedienung

Sie können einzelne Felder oder Optionen mit der Maus oder mit der Tab-Taste ansteuern. Wenn Sie zum Beispiel in der Differenzdruckberechnung die Eingaben QNorm/QMin aktivieren wollen, so besteht die Möglichkeit, dieses mit der Tastenkombination [Alt] + [Q] oder mit der Maus durchzuführen. Bei erneuten Drücken der Tasten [Alt]+[Q] werden die Felder wieder deaktiviert.

Alle Buchstaben, die unterstrichen sind, können in Kombination mit der [Alt]- Taste ausgeführt werden.

Zeilenmenüs können Sie auch mit [Alt]-Taste ansteuern und sich mit den Pfeiltasten (←↑→↓) bewegen, zum Aktivieren einzelner Optionen drücken Sie Enter/Return.

Beispiel: Differenzdruckberechnung, Luft

Medium : Luft
Temperatur: 45°C
Druck: 5 bar/über
Durchfluß: QMaximal =12500 m³/h, QNormal=10000, QMinimal=8000
Rohrinnendurchmesser: 354 mm
Wandstärke : 6,4 mm
Rohrleitungsverlauf : vertikal

1. Wählen Sie in der Listbox die Option [Volumenstrom Gas (Betriebsbedingung)]. Um die Listbox zu öffnen, klicken Sie den Pfeil [↓] auf der rechten Seite an.

Wählen Sie als Medium „Luft“ aus. Um die Listbox zu öffnen, klicken Sie den Pfeil [↓] auf der rechten Seite an.

Tragen Sie im Feld Druck die Zahl 5 ein. Wählen Sie in der Listbox die Einheit „bar/über“ aus.

Die Felder Dichte und Viskosität sind gesperrt, da die Dichte sowie die Viskosität selbständig errechnet werden.

Wählen Sie die Sonde, Typ und den Werkstoff aus.

| Parameter | Value |
|----------------------|--------------------------------------|
| Beschreibung | Volumenstrom Gas (Betriebsbedingung) |
| Medium | Luft |
| Druck | 5,00 bar (abr) |
| Temperatur | 45,00 °C |
| Dichte | 0,0001 kg/m ³ |
| Viskosität | 0,0001 mPa s |
| QMax | 12.500,00 m ³ /h |
| QNorm | 10.000,00 |
| QMin | 2.500,00 |
| Rohrinnendurchmesser | 354,000 mm |
| Wandstärke | 6,4 mm |
| Kanalforn | rund |
| Rohrleitungsverlauf | vertikal |
| Typ | 25 |
| Sensor | IBH |
| Material | 1.4571 / 316 C/NiMoTi 17 12 2 |

Geben Sie in das Feld QMax den Wert 12500 ein.

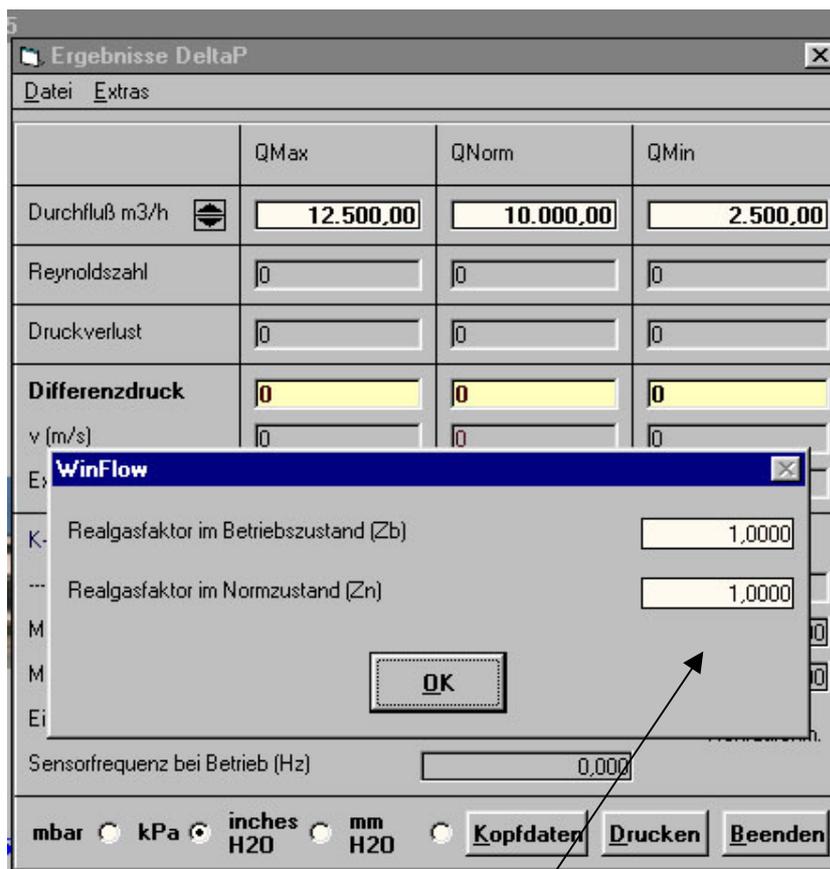
Geben Sie im Feld Rohrinnendurchmesser 354 ein, die Einheit hat schon die

Im nächsten Feld tragen Sie die Wandstärke in der gleichen Einheit wie den Rohrinnendurchmesser ein.

Differenzdruck berechnen / Realgasfaktor



Sind alle Daten korrekt eingegeben, dann klicken Sie mit der Maus auf Bearbeiten / Calc DeltaP



Wenn es notwendig ist, geben Sie den Realgasfaktor im Betriebs-/ Normzustand ein, siehe Anhang B .

Kopfdaten eingeben

The screenshot shows the 'Ergebnisse DeltaP' window with the following data:

| | QMax | QNom | QMin |
|----------------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| Durchfluß m³/h | 12500,00 | 10.000,00 | 2.500,00 |
| Reynoldszahl | 3526514 | 2821211 | 706303 |
| Druckverlust | 0,67 | 0,43 | 0,03 |
| Differenzdruck | 8,622 | 5,510 | 0,344 |
| v [m/s] | 35,28 | 28,22 | 7,06 |
| Expansionszahl | 0,99797 | 0,99870 | 0,99932 |
| K-Faktor | 0,62248 | | |
| Kin. Viskosität | 15,0039 | | Betriebsdichte 5,479 |
| Max Differenzdruck | 13,040 | | QMax 15.403,400 |
| Max. DeltaP FloTap, bei Einschub | 0,000 | | QMax 0,000 |
| Eigenschwingfrequenz Sensor (Hz) | | 137,850 | Rohrdurchm. |
| Sensortfrequenz bei Betrieb (Hz) | | 4.840 | |

At the bottom, there are radio buttons for units: mbar, kPa (selected), inches H2O, mm H2O. There are also buttons for 'Kopfdaten', 'Drucken', and 'Beenden'.

Klicken Sie mit der Maus den Schalter [Kopfdaten] an.
Tragen Sie die Kundenadresse, Ansprechpartner usw. ein.

The 'Kopfdaten' window contains the following fields and data:

- Datum: 02.03.1999 (Note: Datum wird nicht ausgedruckt)
- Temperatur: 5,00 bar (abs)
- Druck: 45,00 °C
- Dichte: 1,2500 kg/m³
- Viskosität: 8,0134 mPa·s
- QMax: 12.500,00 m³/h
- Rohrinnendurchmesser: 354,000 mm
- Wandstärke: 6,400 mm
- Bei Rechteckkanal (A/B): 0x0
- Rohr-Typ: 188R-25
- Werkstoff: 1.4571 / X06 CrNiMoTi 17 12
- Differenzdruck: 8,622

Buttons at the bottom include 'Kundendaten vom Netz holen', 'OK', 'Abbrechen', and 'Kundeninfo'.

Drucken der Berechnung

The screenshot shows a software window titled 'Ergebnisse DeltaP' with a menu bar containing 'Datei' and 'Extras'. The main area is a table with three columns: QMax, QNorm, and QMin. The 'Differenzdruck' row is highlighted in yellow. Below the table are various input fields for parameters like K-Faktor, Kin, Viskosität, Max Differenzdruck, etc. At the bottom, there are radio buttons for units (mbar, kPa, inches H2O, mm H2O) and three buttons: 'Kopfdaten', 'Drucken', and 'Beenden'. An arrow points to the 'Drucken' button.

| | QMax | QNorm | QMin |
|----------------------------------|--------------|----------------|--------------|
| Durchfluß m³/h | 12500,00 | 10.000,00 | 2.500,00 |
| Reynoldszahl | 3526514 | 2821211 | 705303 |
| Druckverlust | 0,67 | 0,43 | 0,03 |
| Differenzdruck | 8,622 | 5,510 | 0,344 |
| v (m/s) | 35,28 | 28,22 | 7,06 |
| Expansionszahl | 0,99797 | 0,99870 | 0,99992 |
| K-Faktor | 0,62248 | | |
| Kin, Viskosität | 15,0039 | Betriebsdichte | 5,479 |
| Max Differenzdruck | 13,040 | QMax | 15.403,400 |
| Max. DeltaP FloTap, bei Einschub | 0,000 | QMax | 0,000 |
| Eigenschwingfrequenz Sensor (Hz) | | 137,850 | Rohrdurchm. |
| Sensortfrequenz bei Betrieb (Hz) | | 4,840 | |

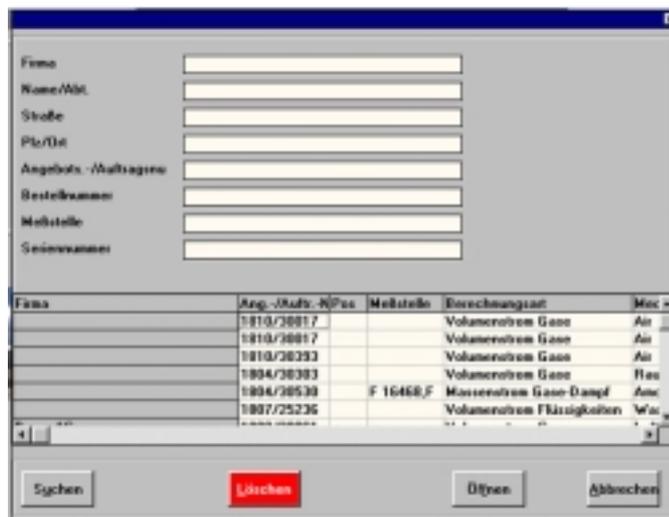
mbar kPa inches H2O mm H2O **Kopfdaten** **Drucken** **Beenden**

Um die Berechnung auf Ihrem Standarddrucker auszugeben, aktivieren Sie den Schalter [Drucken]. Den Drucker bestimmen Sie im Menü Datei/Druckereinrichtung. Beispiel siehe Anhang A .

Daten sichern / Berechnung laden



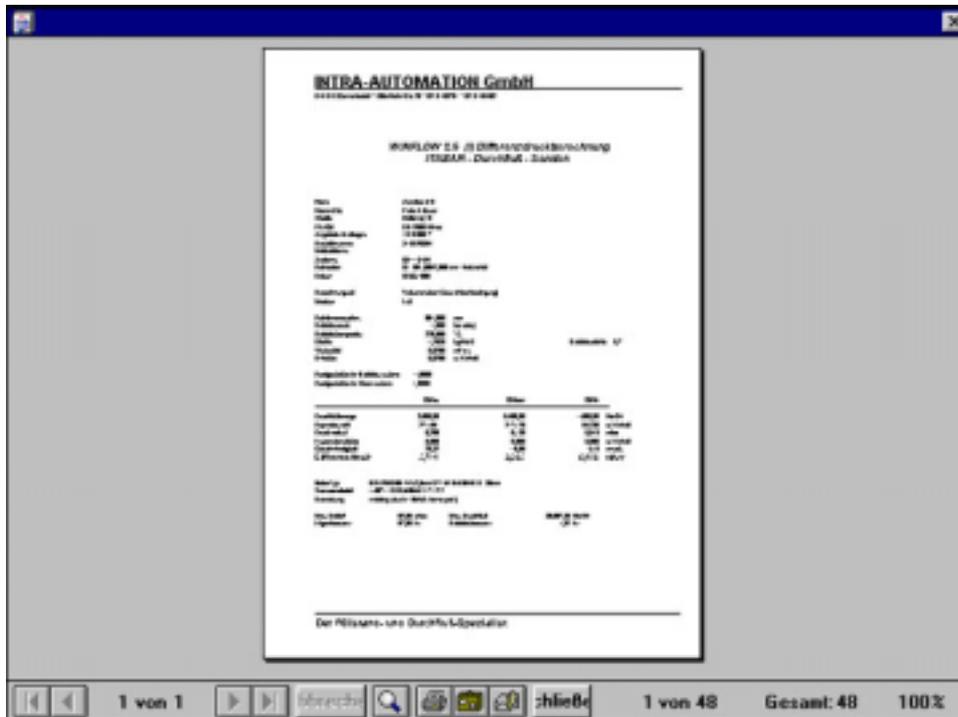
Wenn Sie die Berechnung speichern wollen, klicken Sie in der Menüzeile Datei / Speichern.



Soll eine gespeicherte Berechnung geöffnet werden, klicken Sie in der Menüzeile Datei / Öffnen. Geben Sie den Suchbegriff ein und aktivieren Sie den Schalter [Suchen]. Klicken Sie die Berechnung an die Sie öffnen wollen, und aktivieren Sie den Schalter [Öffnen].

Daten Exportieren

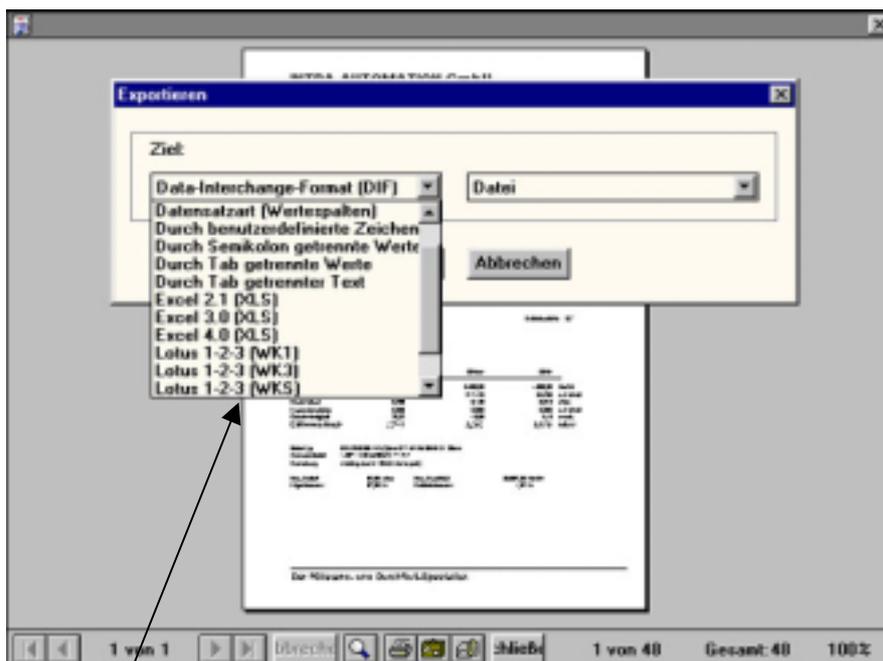
Rufen Sie in der Menüzzeile Datei / Exportieren auf.



Lupenfunktion

Druckerausgabe

Exportfunktion



Wählen Sie das Dateiformat aus und klicken Sie auf [OK]

Beispiel: Differenzdruckberechnung, Argon

Medium : Argon

Temperatur: 55°C

Druck: 8 bar/abs

Durchfluß: QMaximal =12500 m³/h, QNormal=10000, QMinimal=8000

Rohrinnendurchmesser: 354 mm

Wandstärke : 6 mm

Rohrleitungsverlauf : vertikal

1. Wählen Sie als Berechnungsart Volumenstrom Gase (Betriebsbedingung).
2. Als Medium wählen Sie andere Gase.
3. Geben Sie die Werte für Druck und Temperatur ein.
4. Entnehmen Sie die Normdichte aus der Tabelle Seite 11 (1,784).
5. Berechnen Sie Viskosität wie auf Seite 12 beschrieben.
6. Gehen Sie die fehlenden Daten ein, und klicken Sie in der Menüzeile Bearbeiten/ Calc! DeltaP
7. Falls notwendig, geben Sie den Realgasfaktor ein.
8. Geben Sie als Gasexpansionsfaktor 1,65 (Seite 11) ein. Klicken Sie auf [OK].

Gasexpansionsfaktor

Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten

Bei der Berechnung Massestrom Gase + Dampf, Volumenstrom Gase (Normbedingung) und Volumenstrom Gase (Betriebsbedingung) wird der Gasexpansionsfaktor ermittelt. Wenn Sie als Medium „andere Gase“ wählen, müssen Sie das spez. Wärmeverhältnis eingeben.

Tabelle 1 Stoffwerte von technischen Gasen

| Gas | M _n ³⁾ Molare Masse kg/kmol | ³⁾ Normdichte (0°C / 101,3 kPa) kg/m ³ | ⁴⁾ Verhältnis der spezi- fischen Wärmekapazitäten bei 20°C | C Shuterland Konstante |
|---------------------|---|--|--|------------------------------|
| Acetylene | 26.038 | 1.1715 | 1.23 | 215 |
| Ammoniak | 17.031 | 0.7718 | 1.31 | 503 |
| Argon | 39.948 | 1.784 | 1.65 | 142 |
| Butan-n | 58.123 | 2.708 | 1.66 | 358 |
| Chlor | 70.906 | 3.210 | 1.35 | 350 |
| Chlorwasserstoff | 36.461 | 1.6422 | 1.39 | 360 |
| Ethan | 30.069 | 1.355 | 1.19 | 252 |
| Ethylen | 28.054 | 1.2611 | 1.24 | 225 |
| Kohlenoxid | 28.010 | 1.2505 | 1.40 | 100 |
| Luft (trocken) | 28.963 | 1.293 | 1.40 | 113 |
| Methan | 16.043 | 0.7175 | 1.31 | 164 |
| Neon | 20.179 | 0.8999 | 1.64 | 56 |
| Propan | 44.096 | 2.0109 | 1.13 | 278 |
| Sauerstoff | 31.999 | 1.4290 | 1.40 | 125 |
| Schwefeldioxid | 64.059 | 2.9310 | 1.27 | 306 |
| Schwefelwasserstoff | 34.076 | 1.5355 | 1.31 | 331 |
| Stickoxid | 30.006 | 1.3402 | 1.39 | 128 |
| Stickoxidul | 44.019 | 1.9780 | 1.28 | 260 |
| Stickstoff | 28.013 | 1.2504 | 1.40 | 104 |
| Wasserstoff | 2.0158 | 0.08988 | 1.41 | 77 |

³⁾Werte aus DIN 1871 (1980)

⁴⁾ Das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten $\gamma = C_p / C_v$ für ideale Gase kann nach DIN 1952 Abschnitt 2.4.3 benutzt werden, falls der Isentropenexponent κ nicht bekannt ist. Die Isentropenexponenten einiger Gase sind in VDI/VDE 2040 Bl. 4 dargestellt.

Dynamische Viskosität reiner Gase

Die Einheit der dynamischen Viskosität η ist Pa s. Benutzt man die Einheit mPa s, dann sind die Zahlenwerte dieselben wie bei der alten Einheit cP (Centipoise).

Die dynamischen Viskositäten der meisten Flüssigkeiten nehmen bei steigender Temperatur stark ab.

Bei idealen Gasen ist die Viskosität nur von der Temperatur abhängig, wenn der Druck etwa 1 bar beträgt. Die η Viskosität kann entweder den Tabellen nach VDI / VDE 2040 Bl. 4 entnommen werden oder man berechnet sie mit der Formel nach Shuterland.

$$\eta_{(t)} = \eta_n * \sqrt{\frac{T}{T_n}} * \frac{1 + \frac{C}{T_n}}{1 + \frac{C}{T}}$$

- $\eta_{(t)}$ = Dynamische Viskosität bei Betriebsbedingung in mPa *s
- η^n = Dynamische Viskosität bei 273.15 Kelvin und 101,3 kPa
- T = Betriebstemperatur in Kelvin
- C = Shuterland Konstante (s. Seite 11)
- Tn = Temperatur, 273.15 Kelvin

Beispiel: Dynamische Viskosität bei Luft, 100°C

- η^n = 0.0172 mPa *s
- T = 373.15 Kelvin
- Tn = 273.15 Kelvin
- C = 113

- 1) $373.15 / 273.15$ = 1,366099212 T / Tn
- 2) $\sqrt{1.366099212}$ = 1.1688025 $\sqrt{(T / Tn)}$
- 3) $1 + (113 / 273.15)$ = 1.413692 $1 + (C / Tn)$
- 4) $1 + (113 / 373.15)$ = 1.302837 $1 + (C / T)$
- 5) $1.413692 / 1.302837$ = 1.085095 $(1 + (C / Tn)) / (1 + (C / T))$
- 6) $1.085095 * 1.1688025 = 1.2682593$ $(\sqrt{(T/Tn)} * ((1 + (C / Tn)) / (1 + (C / T))))$
- 7) $1,2682593 * 0.0172$ = 0,0218 $(\sqrt{(T/Tn)} * ((1 + (C / Tn)) / (1 + (C / T)))) * \eta^n$

Dynamische Viskosität = 0,0218 mPa * s

Anhang A

INTRA-AUTOMATION GmbH

D-41515 Grevenbroich * Otto-Hahn-Str. 20 * 02181-68761 * 02181-64492

WINFLOW 2.5 (I) Differenzdruckberechnung ITABAR - Durchfluß - Sonden

Firma:
Name/Abt.:
Straße:
Plz/Ort:
Angebots-/Auftragnr.:
Bestellnummer
Meßstellennr.:
Seriennr.:
Rohrdaten
Datum: 02.03.1999

Berechnungsart: Volumenstrom Gase (Betriebsbedingung)
Medium: Luft

Rohrinnendurchm.: 354,000 mm
Betriebsdruck: 5,000 bar (über)
Betriebstemperatur: 45,000 °C
Dichte: 1,2930 kg/Nm³ Betriebsdichte: 6,59
Viskosität: 0,0194 mPa s
K-Faktor: 0,6224 o. Einheit

Realgasfaktor im Betriebszustand : 1,0000
Realgasfaktor im Normzustand : 1,0000

| | QMax | QNorm | QMin | |
|------------------|-----------|-----------|----------|-------------------|
| Durchflußmenge | 12.500,00 | 10.000,00 | 2.500,00 | m ³ /h |
| Reynoldszahl | 4.241.162 | 3.392.930 | 848.232 | o. Einheit |
| Druckverlust | 0,800 | 0,510 | 0,030 | kPa |
| Expansionsfaktor | 0,997 | 0,998 | 0,999 | o. Einheit |
| Geschwindigkeit | 35,28 | 28,22 | 7,06 | m/sek. |
| Differenzdruck | 10,370 | 6,627 | 0,413 | kPa |

Itabar-Typ:
Sensormaterial:
Bemerkung:

Max. DeltaP 13,04 kPa Max. Durchfluß 14.045,81 m³/h
Eigenfrequenz: 137,85 hz Betriebsfrequenz 5,26 hz

INTRA-AUTOMATION GmbH

D-41515 Grevenbroich * Otto-Hahn-Str. 20 * 02181-68761 * 02181-64492

WINFLOW 2.5 (I) Differenzdruckberechnung ITABAR - Durchfluß - Sonden

Firma:
Name/Abt.:
Straße:
Plz/Ort:
Angebots-/Auftragnr.:
Bestellnummer
Meßstellennr.:
Seriennr.:
Rohrdaten
Datum: 02.03.1999

Berechnungsart: Volumenstrom Gase (Betriebsbedingung)
Medium: Argon

Rohrinnendurchm.: 354,000 mm
Betriebsdruck: 8,000 bar (abs)
Betriebstemperatur: 55,000 °C
Dichte: 1,7840 kg/Nm³ Betriebsdichte: 11,727
Viskosität: 0,0211 mPa s
K-Faktor: 0,6224 o. Einheit

Realgasfaktor im Betriebszustand : 1,0000
Realgasfaktor im Normzustand : 1,0000

| | QMax | QNorm | QMin | |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| Durchflußmenge | 12.500,00 | 10.000,00 | 2.500,00 | m ³ /h |
| Reynoldszahl | 6.906.966 | 5.525.573 | 1.381.393 | o. Einheit |
| Druckverlust | 1,429 | 0,910 | 0,060 | kPa |
| Expansionsfaktor | 0,997 | 0,998 | 0,999 | o. Einheit |
| Geschwindigkeit | 35,28 | 28,22 | 7,06 | m/sek. |
| Differenzdruck | 18,487 | 11,807 | 0,735 | kPa |

Itabar-Typ: IBR-26
Sensormaterial:
Bemerkung:

Max. DeltaP 59,60 kPa Max. Durchfluß 22.509,35 m³/h
Eigenfrequenz: 138,12 hz Betriebsfrequenz 6,88 hz

Anhang B

1. Stoffwerte technischer Gase

| Gas | | M_r Relative Molekül- masse | ρ_n Normdichte kg/m^3_n | R Individuelle Gas- konstante $\frac{\text{kp} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ | Z_n Realgas- faktor im Normzustand | Isen- tropa- exponent k für $\frac{p \rightarrow 0}{T = 273^\circ\text{K}}$ | T_{kr} Krit. Temp. $^\circ\text{K}$ | p_{kr} Krit. Druck kp/cm^2_1 | $\sqrt{M_r T_{kr}}$ $^\circ\text{K}^{1/2}$ | C Sutherland- Konstante |
|---------------------|---------------------------|--|---|---|---|---|--|--|---|---------------------------------|
| Acetylen | C_2H_2 | 26,078 | 1,1717 | 32,510 | 0,9930 | 1,23 | 309,09 | 63,6 | 89,8 | 215 |
| Ammoniak | NH_3 | 17,032 | 0,7714 | 49,777 | 0,9851 | 1,31 | 405,6 | 115,2 | 83,2 | 503 |
| Argon | Ar | 39,944 | 1,7836 | 21,225 | 0,9992 | 1,65 | 150,8 | 49,6 | 77,6 | 142 |
| Aethan | C_2H_6 | 30,070 | 1,357 | 28,154 | 0,9887 | 1,20 | 305,42 | 49,8 | 95,8 | 252 |
| Aethylen | C_2H_4 | 28,054 | 1,2604 | 30,220 | 0,9931 | 1,25 | 282,4 | 51,7 | 89,0 | 225 |
| Benzol | C_6H_6 | 78,108 | 3,485 ²⁾ | 10,854 | — | — | 561,8 | 49,5 | 208,2 | 448 |
| Butan-n | C_4H_{10} | 58,124 | 2,7320 | 14,566 | 0,9492 | — | 425,2 | 35,75 | 154,0 | 358 |
| Butan-i | C_4H_{10} | 58,124 | 2,6467 | 14,566 | 0,9798 | — | 408,13 | 37,2 | 157,2 | 330 |
| Butylen | C_4H_8 | 56,108 | 2,503 | 15,110 | — | — | 419,55 | 40,03 | 153,3 | — |
| Chlor | Cl_2 | 70,914 | 3,214 | 11,955 | 0,9844 | 1,34 | 417,2 | 78,5 | 171,8 | 350 |
| Chlorwasserstoff | HCl | 36,465 | 1,6392 | 23,250 | 0,9925 | 1,39 | 324,7 | 84,7 | 108,9 | 360 |
| Cyanwasserstoff | HCN | 27,027 | 1,2246 | 31,369 | 0,9847 | — | 456,7 | 55,0 | 111,1 | — |
| Dicyan | C_2N_2 | 52,038 | 2,3493 | 16,292 | 0,9883 | — | 399,7 | 60,1 | 144,2 | — |
| Helium | He | 4,003 | 0,17847 | 211,79 | 1,0007 | 1,63 | 5,2 | 2,336 | 4,56 | 0 |
| Kohlenoxid | CO | 28,011 | 1,2500 | 30,267 | 0,9998 | 1,40 | 133,0 | 35,6 | 61,1 | 100 |
| Kohlendioxid | CO_2 | 44,011 | 1,9769 | 19,263 | 0,9933 | 1,30 | 304,2 | 75,3 | 115,7 | 273 |
| Kohlenoxidsulfid | COS | 60,077 | 2,721 | 14,112 | 0,9851 | — | 375,35 | 63,0 | 150,1 | — |
| Luft | — | 28,96 ¹⁾ | 1,2928 | 29,275 | 0,9955 | 1,40 | 132,4 | 38,5 | 61,9 | 113 |
| Methan | CH_4 | 16,043 | 0,7168 | 52,845 | 0,9986 | 1,31 | 190,7 | 47,2 | 55,3 | 164 |
| Methylchlorid | CH_3Cl | 50,491 | 2,3075 | 16,791 | 0,9763 | — | 416,2 | 68,0 | 145,0 | 454 |
| Neon | Ne | 20,183 | 0,9000 | 42,006 | 1,0006 | 1,64 | 44,4 | 27,06 | 94,6 | 56 |
| Propan | C_3H_8 | 44,097 | 2,0096 | 19,226 | 0,9790 | — | 370,0 | 43,4 | 127,6 | 278 |
| Propylen | C_3H_6 | 42,081 | 1,915 | 20,146 | 0,9804 | — | 364,91 | 47,12 | 123,9 | 362 |
| Sauerstoff | O_2 | 32,000 | 1,4290 | 26,454 | 0,9991 | 1,40 | 154,77 | 51,8 | 70,4 | 125 |
| Schwefeldioxid | SO_2 | 64,066 | 2,9262 | 13,233 | 0,9768 | 1,28 | 430,7 | 80,4 | 165,9 | 306 |
| Schwefelkohlenstoff | CS_2 | 76,142 | 3,4752 | 11,134 | 0,9776 | — | 546,3 | 75,2 | 203,8 | 500 |
| Schwefelwasserstoff | H_2S | 34,082 | 1,5362 | 24,875 | 0,9899 | 1,33 | 373,53 | 91,9 | 112,9 | 331 |
| Stickoxid | NO | 30,008 | 1,3402 | 28,252 | 0,9990 | 1,39 | 180,2 | 66,7 | 73,5 | 128 |
| Stickoxidul | N_2O | 44,016 | 1,9804 | 19,261 | 0,9916 | 1,28 | 309,7 | 74,1 | 116,7 | 260 |
| Stickstoff (rein) | N_2 | 28,016 | 1,2505 | 30,261 | 0,9996 | 1,40 | 126,3 | 34,5 | 59,5 | 104 |
| Luftstickstoff | — | 28,16 | 1,2571 | 30,107 | 0,9955 | 1,40 | — | — | — | — |
| Toluol | C_7H_8 | 92,134 | 4,111 | 9,202 | — | — | 593,8 | 42,9 | 233,8 | — |
| Wasserdampf | H_2O | 18,016 | 0,8038 | 47,058 | — | 1,33 ³⁾ | 647,3 | 225,65 | 107,9 | 650 |
| Wasserstoff | H_2 | 2,016 | 0,0899 | 47,54 | 1,0005 | 1,41 | 33,3 | 13,2 | 8,19 | 71,7 |
| Xylol | C_8H_{10} | 106,16 | 4,737 | 7,566 | — | — | — | — | — | — |

1) $1 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ at} = 0,98067 \text{ bar}$ 2) nur Rechnungswert (für $Z_n = 1$)3) bei 100°C

$$1 \frac{\text{kp} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 9,8067 \frac{\text{Nm}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

2. Dichte des Wassers

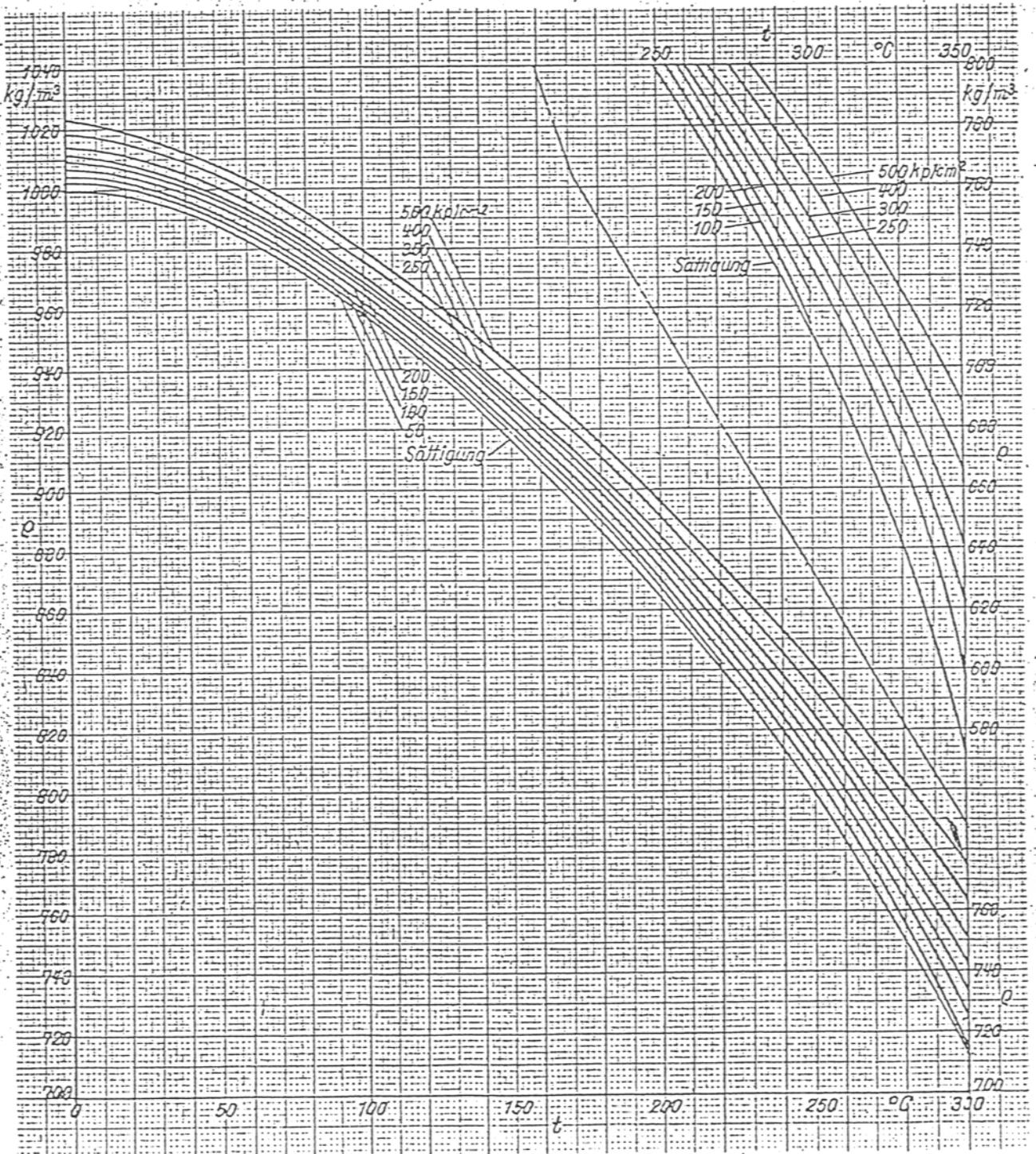


Bild 1. Dichte ρ des Wassers

$1 \text{ kp/cm}^2 = 0,98067 \text{ bar}$

3. Realgasfaktoren

In Richtlinie VDI 2040 E Bl. 2 (Ausg. Sept. 1966), Abschn. 3.2.2 bis 3.2.4 wird der Realgasfaktor⁴⁾ behandelt, der zur Berechnung der Dichte realer Gase notwendig ist.

Bild 2 bis 23⁵⁾ zeigt für eine Reihe technischer Gase und einige Gasgemische den Realgasfaktor Z in Abhängigkeit von Druck⁶⁾ und Temperatur.

Die Unsicherheit τ_Z des Realgasfaktors Z geht als Bestimmungsgröße in das Meßspiel τ_q des Durch-

flusses realer Gase ein (dies soll in VDI 2040 E Bl. 5 behandelt werden, das in Vorbereitung ist). τ_Z hängt entweder von Z selbst oder vom Druck p oder der Temperatur t oder von mehreren dieser Größen gemeinsam ab. Über diese Abhängigkeit gibt die zu jedem Diagramm gehörende Tabelle Auskunft, mit der Einschränkung, daß für Realgasfaktoren Z in Nähe der Sattdampflinie keine Unsicherheiten angegeben werden können.

Der Bereich, für den keine Unsicherheiten τ_Z angegeben werden können, ist bestimmt aus Sattdampfdruck $\pm \Delta p$. Es gelten folgende Δp -Werte:

⁴⁾ Der Realgasfaktor wird in britischen und amerikanischen Normen „compressibility factor“ genannt.

⁵⁾ Die Realgasfaktoren wurden im wesentlichen aus den in der BASF Ludwigshafen zusammengestellten Meßwerten gewonnen. Die Meßwerte stammen vorwiegend aus: Landolt-Börnstein, Physikalisch-Chemische Tabellen, Hauptwerk und 1. bis 3. Ergänzungsband, Berlin: Springer 1936.

Folgende Quellen wurden zum Vergleich herangezogen:

D'Ans, J., u. E. Lax: Taschenbuch für Chemiker und Physiker, 2. Aufl. 1949, S. 827 ff.

Clark, W.J., u. B.G. White: Gas Law Deviation Coefficients, National Engineering Laboratory, East Kilbride, 1959.

⁶⁾ Als Einheit des Druckes wird $1 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ at} = 0,98067 \text{ bar}$ benutzt.

| Bild | Gas | Δp in kp/cm^2 |
|------|-----------------------------|--------------------------------|
| 3 | C_2H_6 | 2,5 |
| 4 | C_2H_4 | 5,0 |
| 7 | $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ | 1,0 |
| 8 | $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ | 1,0 |
| 9 | Cl_2 | 1,0 |
| 12 | CO_2 | 5,0 |
| 15 | C_3H_8 | 5,0 |
| 16 | C_3H_6 | 5,0 |
| 18 | N_2O | 1,0 |

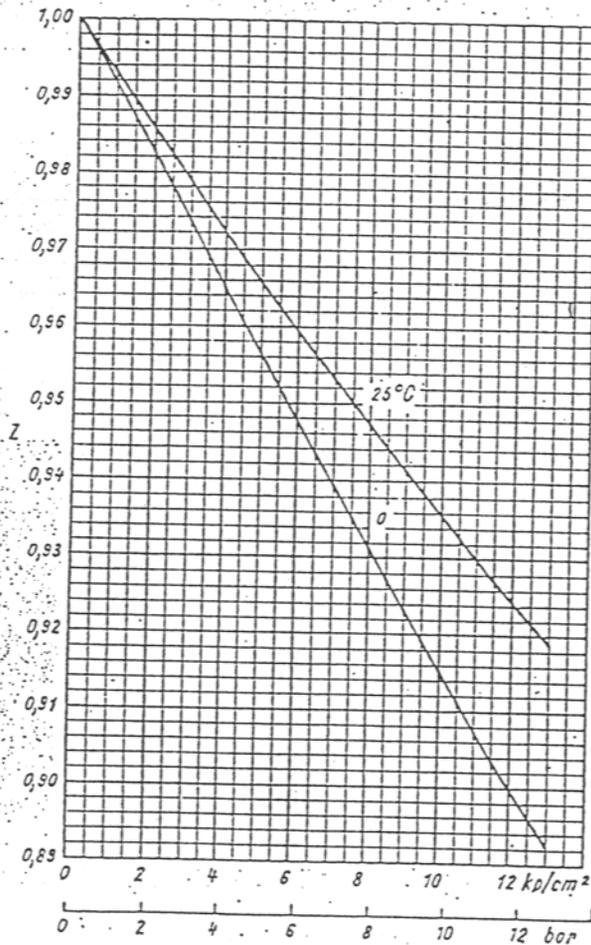


Bild 2. Realgasfaktor Z von Acetylen (C_2H_2)

| Z | τ_Z |
|-----------|---------------------|
| $< 0,995$ | $\pm 0,5\%$ |
| $> 0,995$ | $\pm 100 (Z - 1)\%$ |

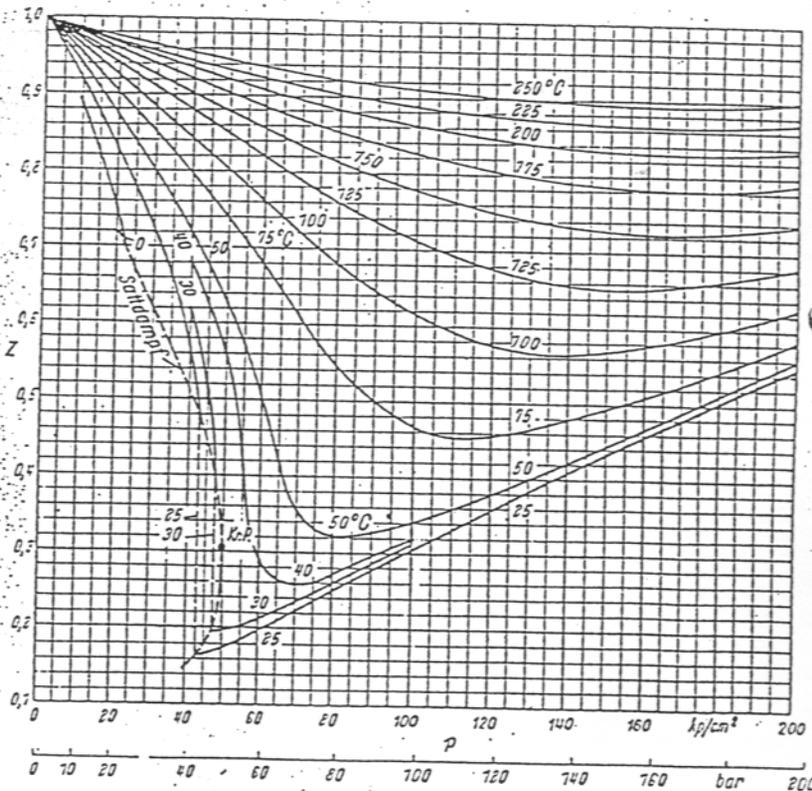


Bild 3. Realgasfaktor Z von Ethan (C_2H_6)

| t $^\circ\text{C}$ | p kp/cm^2 | τ_Z |
|-------------------------|-------------------------|-------------|
| < 100 | ≤ 20 | $\pm 1,0\%$ |
| < 100 | > 20 | $\pm 2,0\%$ |
| 100 bis 250 | < 100 | $\pm 0,5\%$ |
| 100 bis 250 | > 100 | $\pm 1,0\%$ |

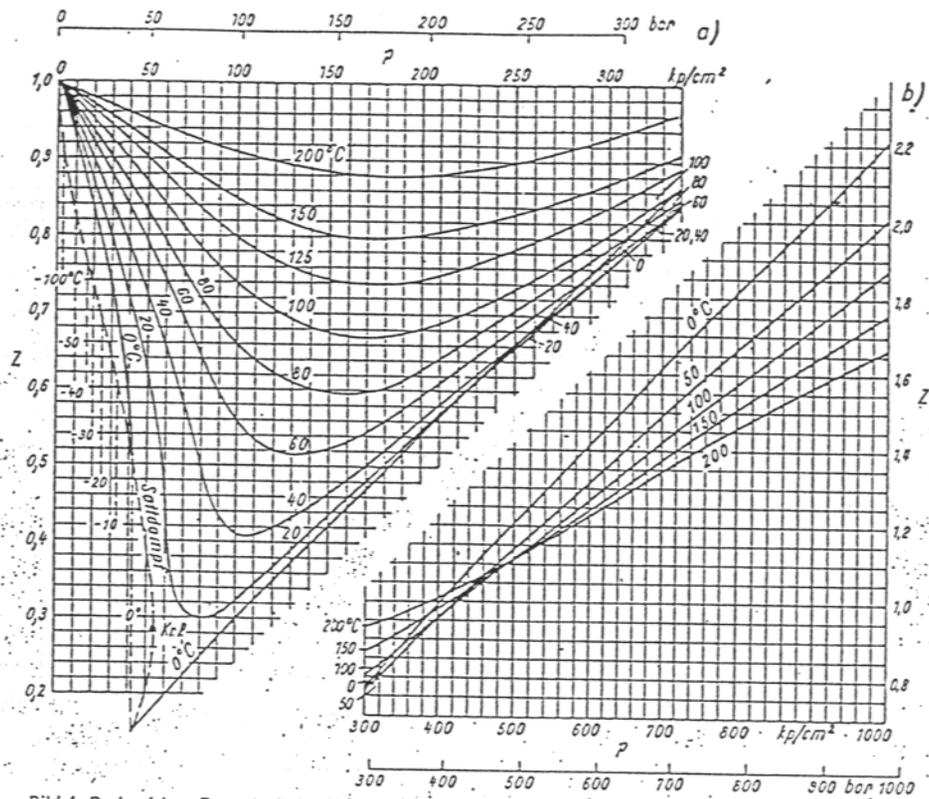


Bild 4. Realgasfaktor Z von Äthylen (C_2H_4)

- a) für Drücke bis 300 kp/cm^2
- b) für Drücke von 300 bis 1000 kp/cm^2

| Z | t °C | p kp/cm^2 | τ_z |
|------------|------------|-------------|--------------------|
| > 0,995 | alle Werte | < 10 | $\pm 100 (Z-1) \%$ |
| alle Werte | ≥ 0 | < 20 | $\pm 0,5 \%$ |
| | < 60 | 20 bis 300 | $\pm 2,0 \%$ |
| | 60 bis 200 | 20 bis 300 | $\pm 1,0 \%$ |
| | alle Werte | > 300 | $\pm 2,0 \%$ |

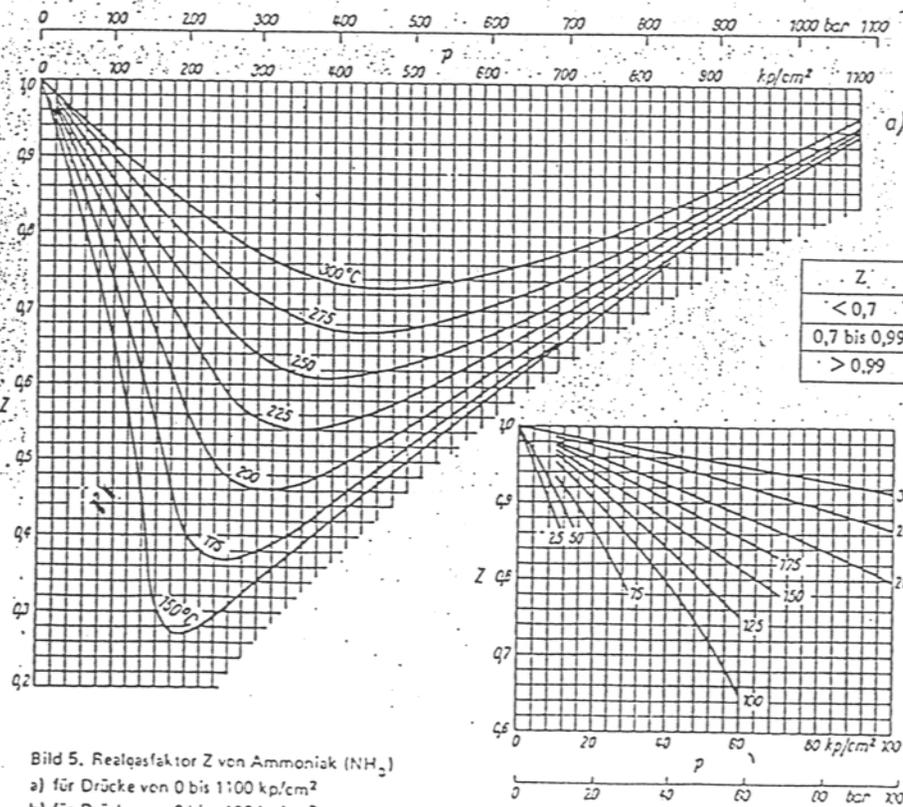
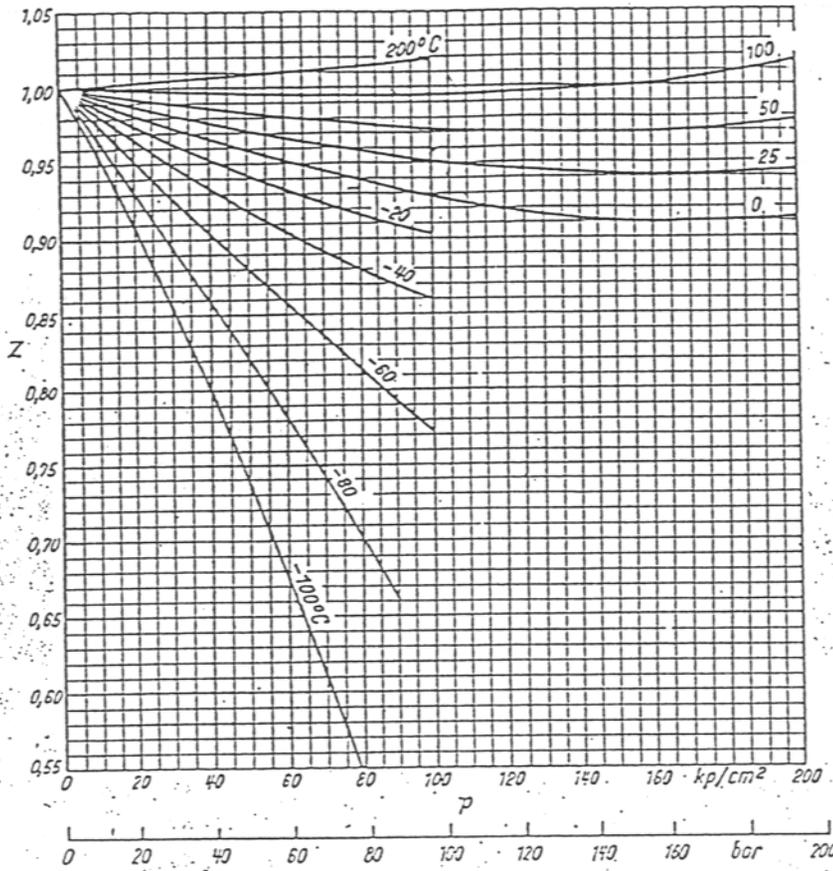


Bild 5. Realgasfaktor Z von Ammoniak (NH_3)

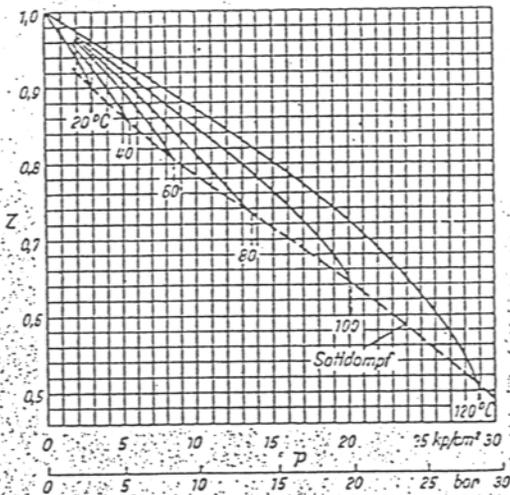
- a) für Drücke von 0 bis 1100 kp/cm^2
- b) für Drücke von 0 bis 100 kp/cm^2

| Z | τ_z |
|--------------|--------------------|
| < 0,7 | $\pm 5 (0,9-Z) \%$ |
| 0,7 bis 0,99 | $\pm 1,0 \%$ |
| > 0,99 | $\pm 100 (Z-1) \%$ |



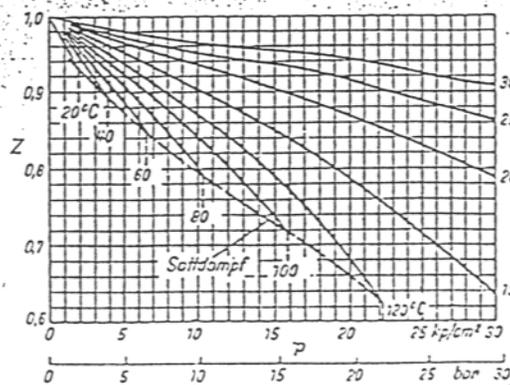
| Z | t °C | τ_z |
|-----------------|------------|----------------------|
| 0,995 bis 1,005 | alle Werte | $\pm 100 (Z - 1) \%$ |
| < 0,995 | < 0 | $\pm 1,0 \%$ |
| oder > 1,005 | 0 bis 200 | $\pm 0,5 \%$ |

Bild 6 Realgasfaktor Z von Argon (Ar)



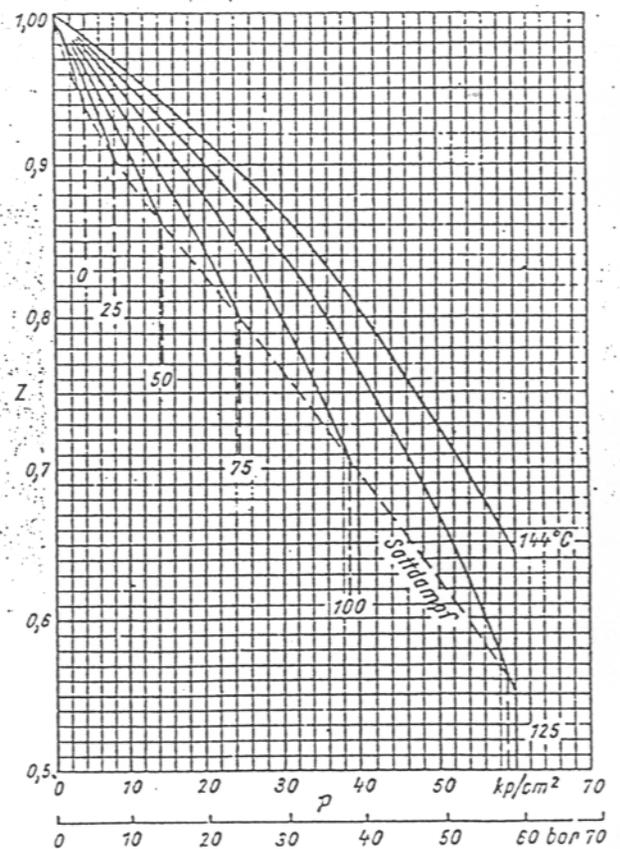
| Z | τ_z |
|------------|--------------|
| < 0,8 | $\pm 1,5 \%$ |
| $\geq 0,8$ | $\pm 1,0 \%$ |

Bild 7. Realgasfaktor Z von i-Butan ($i-C_4H_{10}$)



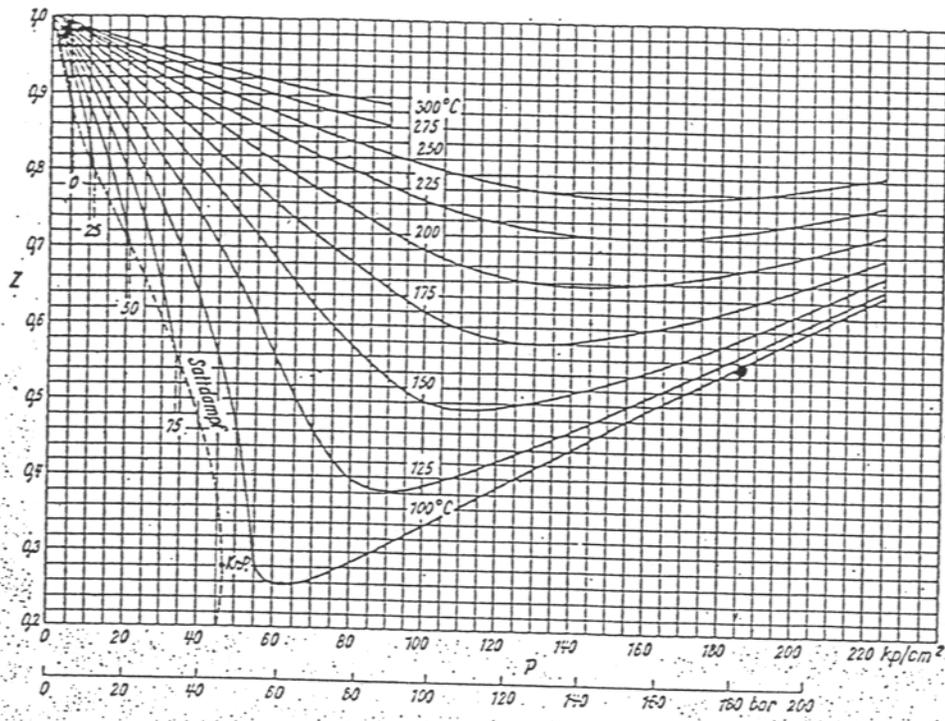
| Z | τ_z |
|------------|--------------|
| < 0,8 | $\pm 1,5 \%$ |
| $\geq 0,8$ | $\pm 1,0 \%$ |

Bild 8. Realgasfaktor Z von n-Butan ($n-C_4H_{10}$)



| Z | τ_z |
|------------|--------------|
| < 0,8 | $\pm 1,5 \%$ |
| $\geq 0,8$ | $\pm 1,0 \%$ |

Bild 9. Realgasfaktor Z von Chlor (Cl_2)



| t °C | p kp/cm² | τ_z |
|-------------|-----------|----------|
| < 150 | < 40 | ± 2,0% |
| < 150 | 40 bis 80 | ± 3,0% |
| < 150 | > 80 | ± 2,0% |
| 150 bis 300 | ≤ 80 | ± 1,0% |
| 150 bis 300 | > 80 | ± 1,5% |

Bild 16. Realgasfaktor Z für Propylen (C₃H₆)

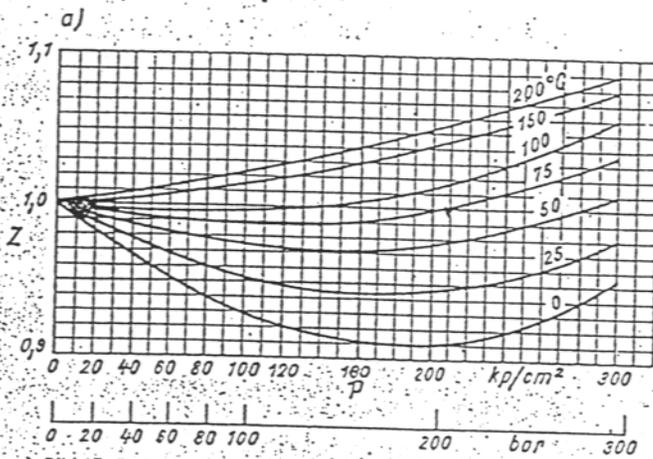


Bild 17. Realgasfaktor Z von Sauerstoff (O₂)

- a) für Drücke bis 300 kp/cm²
- b) für Drücke von 300 bis 1000 kp/cm²

| Z | t °C | p kp/cm² | τ_z |
|----------------------------|------------|-------------|-------------------|
| < 0,995 oder ≥ 1,005 | alle Werte | ≤ 100 | ± 0,5% |
| | 0 bis 25 | 100 bis 120 | ± 0,5% |
| | | > 120 | ± 1,0% |
| | 25 bis 50 | 100 bis 130 | ± 0,5% |
| > 130 | | ± 1,0% | |
| 0,995 bis 1,005 | alle Werte | < 10 | ± 100 (Z - 1) % |
| | | > 10 | wie für Z < 0,995 |

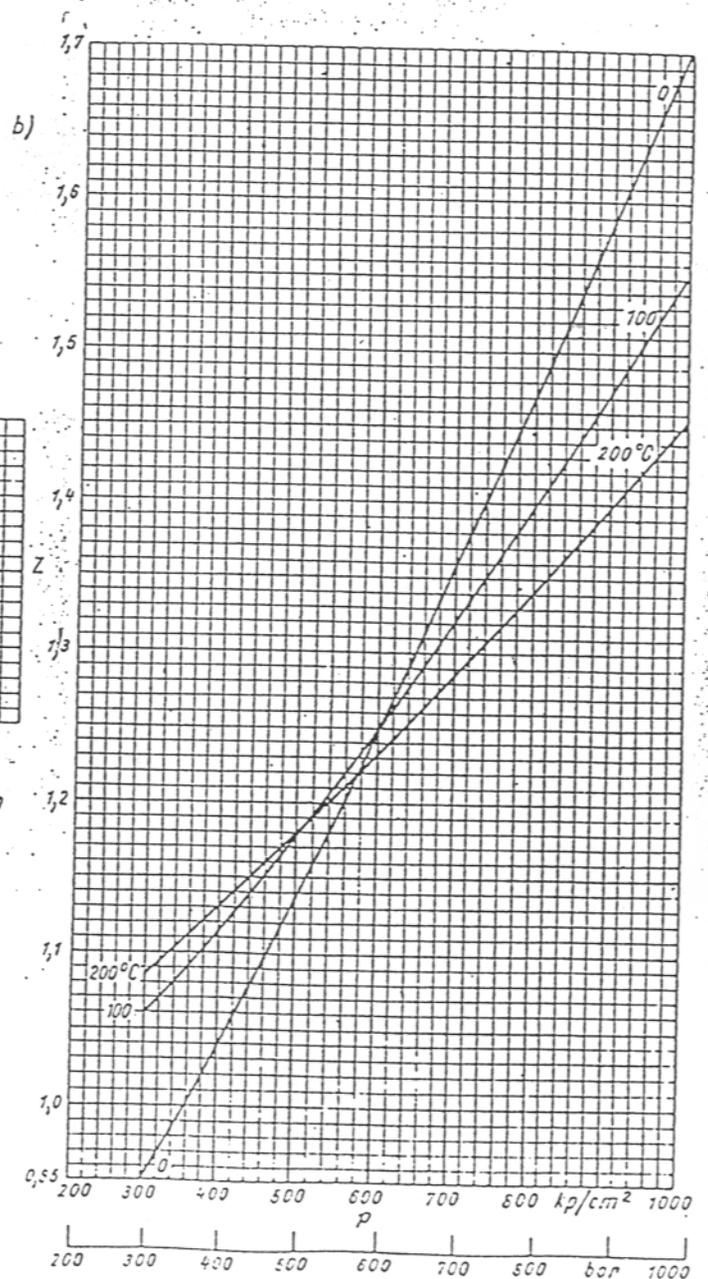
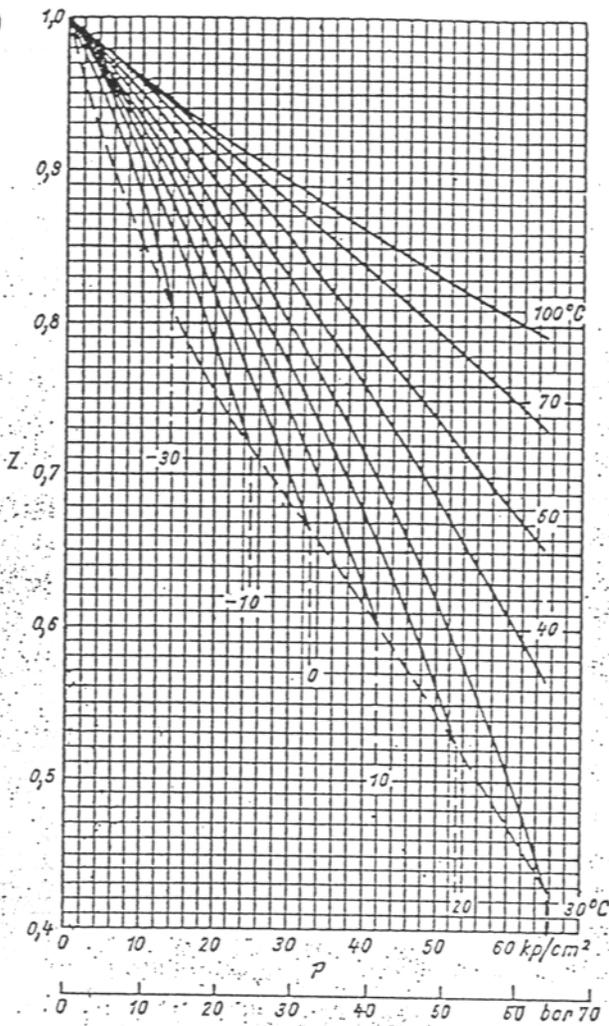


Bild 18
Realgasfaktor Z von Stickoxydul (N₂O)



| Z | τ_z |
|-------------|-------------|
| < 0,6 | $\pm 2,0\%$ |
| 0,6 bis 0,8 | $\pm 1,5\%$ |
| > 0,8 | $\pm 1,0\%$ |

| Z | t °C | p kp/cm ² | τ_z |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| $\leq 0,997$ oder $\geq 1,003$ | < 0 | alle Werte | $\pm 0,7\%$ |
| | 0 bis 100 | | $\pm 0,5\%$ |
| > 0,997 aber < 1,003 | < 25 oder > 50 | < 10 | $\pm 100 (Z-1)\%$ |
| | 25 bis 50 | > 10 | $\pm 0,5\%$ |
| | | alle Werte | $\pm 0,5\%$ |

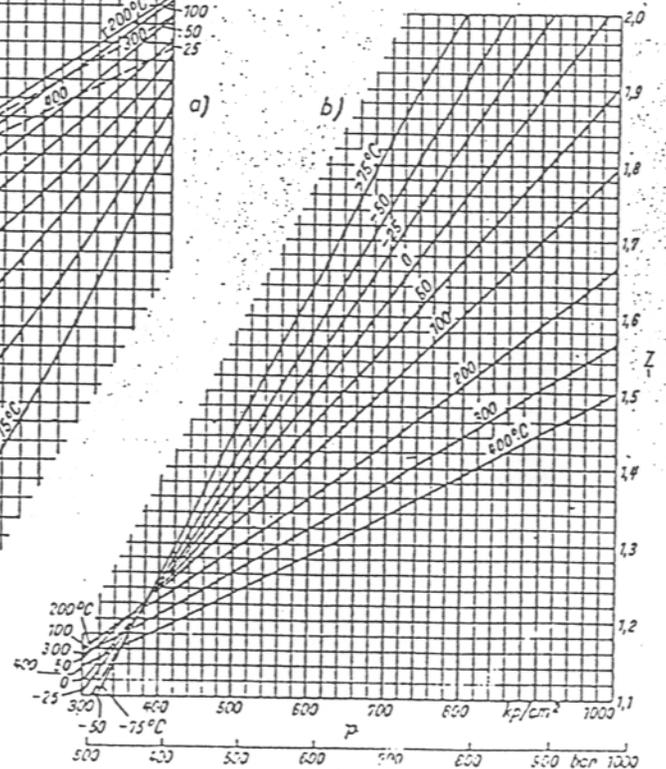
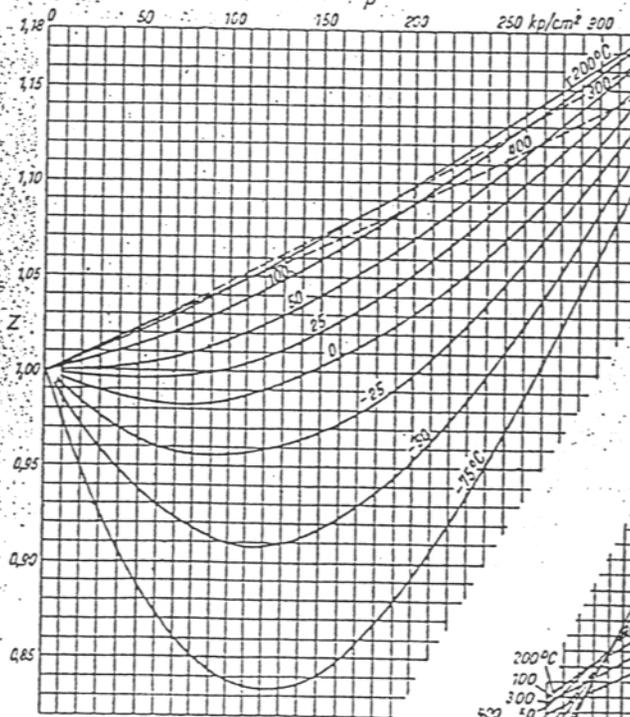
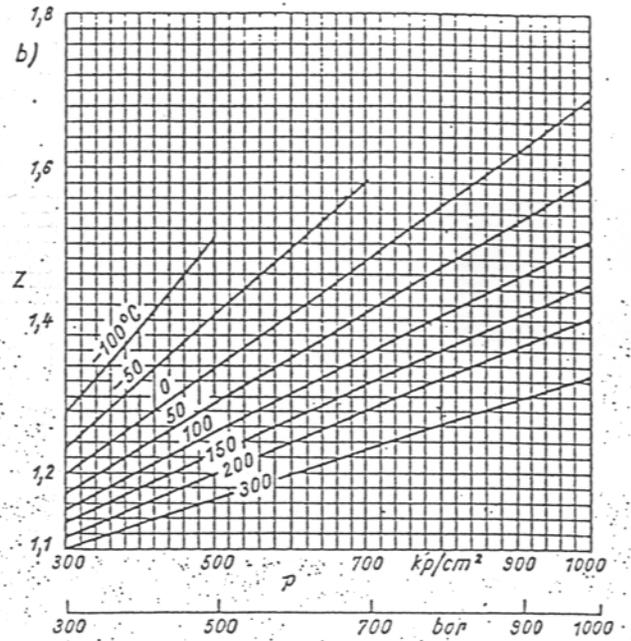
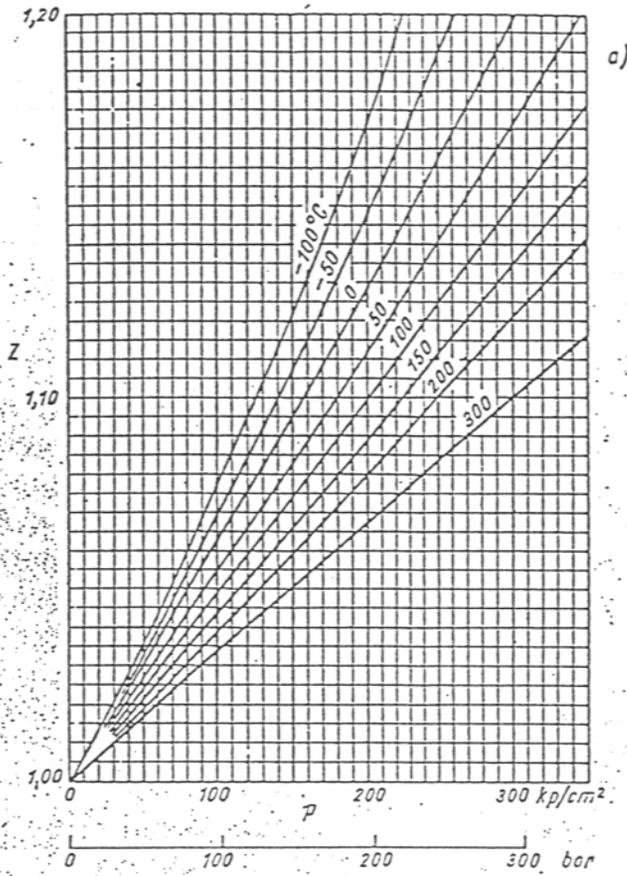
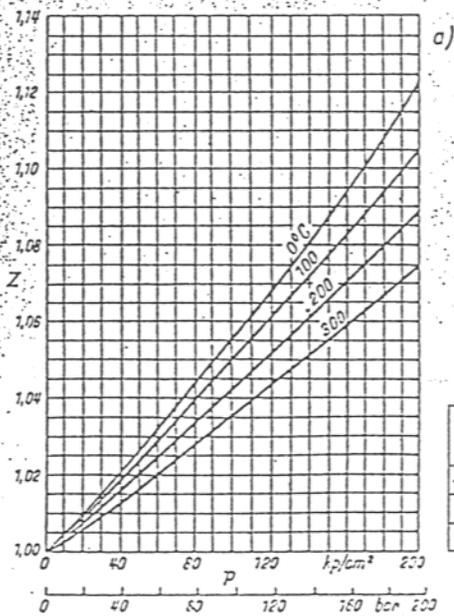


Bild 19. Realgasfaktor Z von Stickstoff (N₂)
a) für Drücke von 0 bis 320 kp/cm²
b) für Drücke von 300 bis 1000 kp/cm²



| Z | τ_z |
|--------------|--------------------|
| $< 1,003$ | $\pm 100 (Z-1) \%$ |
| $\geq 1,003$ | $\pm 0,3 \%$ |

Bild 20. Realgasfaktor Z von Wasserstoff (H_2)
 a) für Drücke von 0 bis 350 kp/cm^2
 b) für Drücke von 300 bis 1000 kp/cm^2



| p kp/cm^2 | τ_z |
|----------------|--------------|
| < 100 | $\pm 0,5 \%$ |
| 100 bis 200 | $\pm 1,0 \%$ |
| > 200 | $\pm 2,0 \%$ |

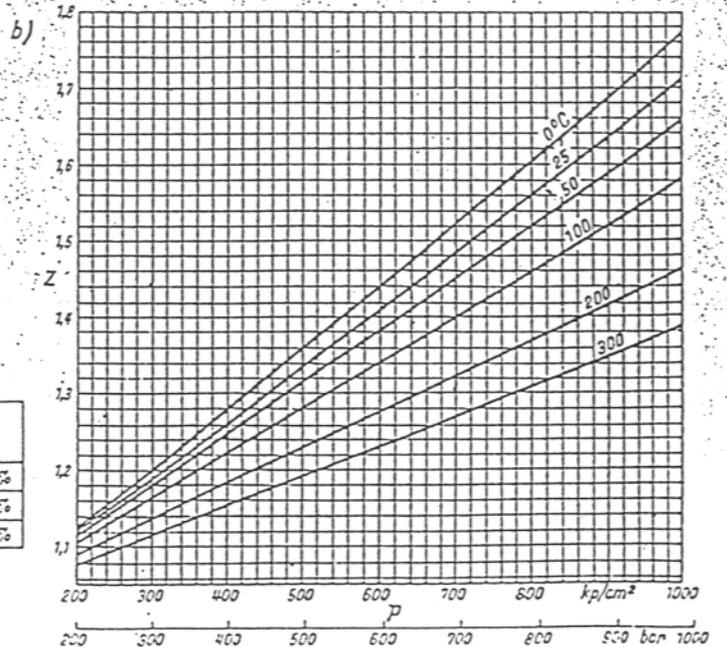


Bild 21. Realgasfaktor Z für ein Gemisch mit 75% H_2 und 25% N_2
 a) für Drücke bis 200 kp/cm^2
 b) für Drücke von 200 bis 1000 kp/cm^2

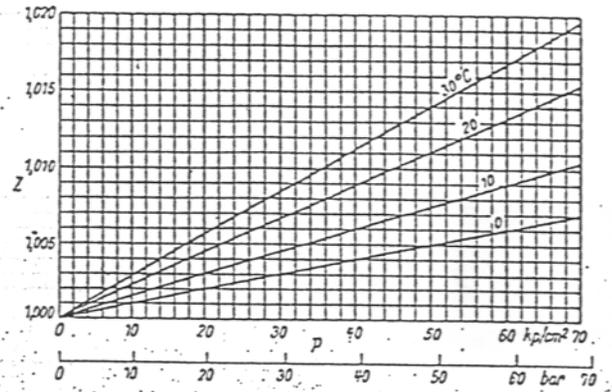


Bild 22. Realgasfaktor Z von Kokereigas

Zusammensetzung in Vol. %:

CO_2 1 bis 1,8 % H_2 55 bis 58 %
 C_nH_m 2 bis 2,7 % CH_4 24 bis 26 %
 O_2 0 bis 0,5 % N_2 8 bis 10 %
 CO 4,5 bis 6 %

$r_z = \pm 0,5\%$

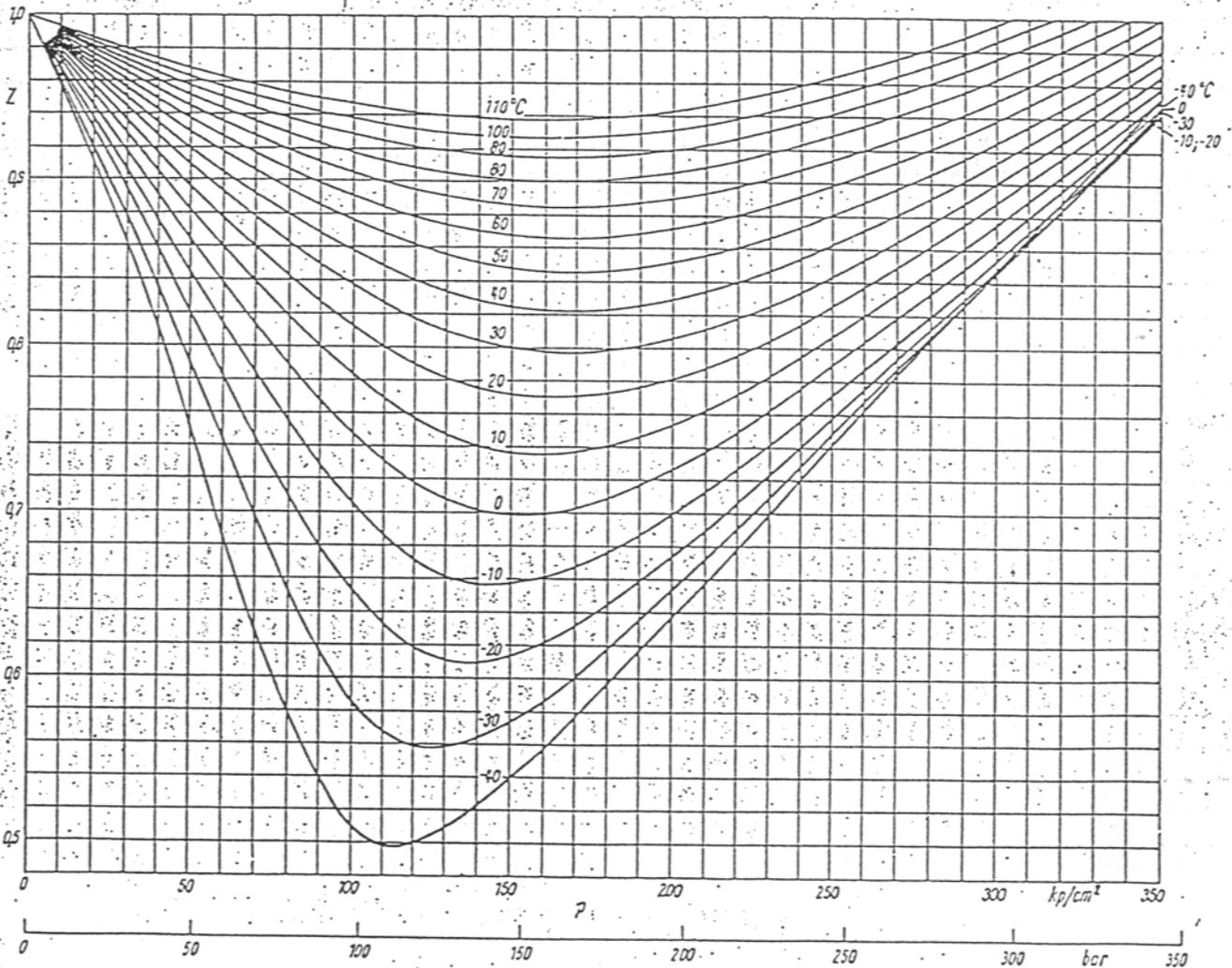


Bild 23. Realgasfaktor Z von Erdgas mit einer Normdichte $\rho_n = 0,776 \text{ kg/m}^3$ und Inertgas-Anteilen $r_{\text{CO}_2} = r_{\text{N}_2} = 0$

Für abweichende Werte ρ_n , r_{CO_2} und r_{N_2} s. VDI 2040, Bl. 2, Abschn. 3.2.3.3

| t °C | p kp/cm ² | r _z |
|----------|-------------------------|----------------|
| < 0 | ≤ 70 | ± 1,0% |
| < 0 | > 70 | ± 1,5% |
| 0 bis 30 | ≤ 70 | ± 0,5% |
| ≥ 0 | > 70 | ± 1,0% |

4. Isentropenexponenten

Zur Berechnung der Expansionszahlen bei der Durchflüßmessung muß man den Isentropenexponenten (früher meist Adiabatenexponent genannt) des Gases kennen. Früher setzte man hierfür meist das Verhältnis κ der spezifischen Wärmen ein. Das ist aber nur soweit zulässig, wie man das Gas als ein ideales Gas ansehen kann. Bei realen Gasen ist es bei höheren Genauigkeitsansprüchen notwendig, den Isentropenexponenten einzusetzen.

Über diesen findet man aber im Schrifttum nur recht spärliche Angaben. Es gibt auch keine einfache Theorie zu seiner Berechnung.

In den nachstehenden Diagrammen sind für einige technisch wichtige Gase die Isentropenexponenten angegeben⁷⁾. Es wird notwendig sein, diese Sammlung von Daten in Zukunft fortzusetzen.

Der Isentropenexponent κ ist definiert durch

$$\kappa = - \frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s$$

⁷⁾ Die Diagramme der Isentropenexponenten κ für sechs reale Gase wurden von H.D. Baehr (Brennst.-Wärme-Kraft 19 (1967) Nr. 2, S. 65/68) aus den Zustandsgleichungen von Beattii u. Bridgeman berechnet.

Bild 30b für den Isentropenexponent von Wasserdampf wurde den VDI-Wasserdampf- tafeln, 7. Auflage (1968) Seite 167, entnommen.

Als Einheit des Druckes wird $1 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ at} = 0,98067 \text{ bar}$ benutzt.

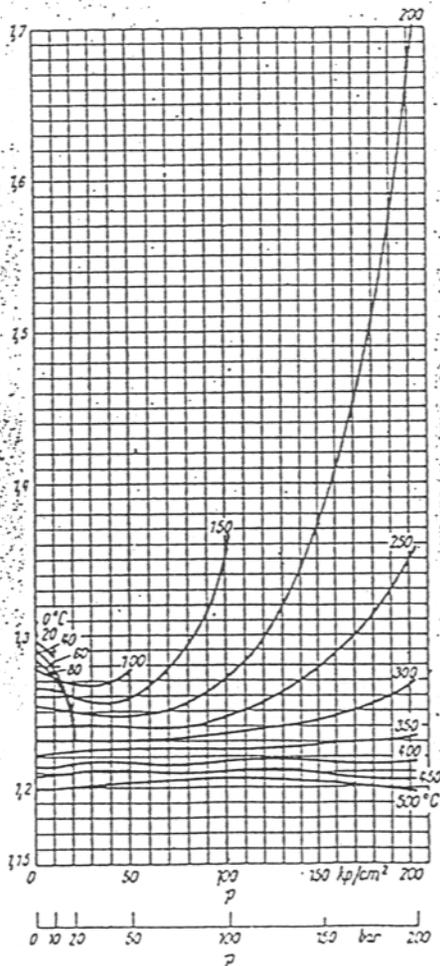


Bild 24. Isentropenexponent κ von Ammoniak (NH_3)

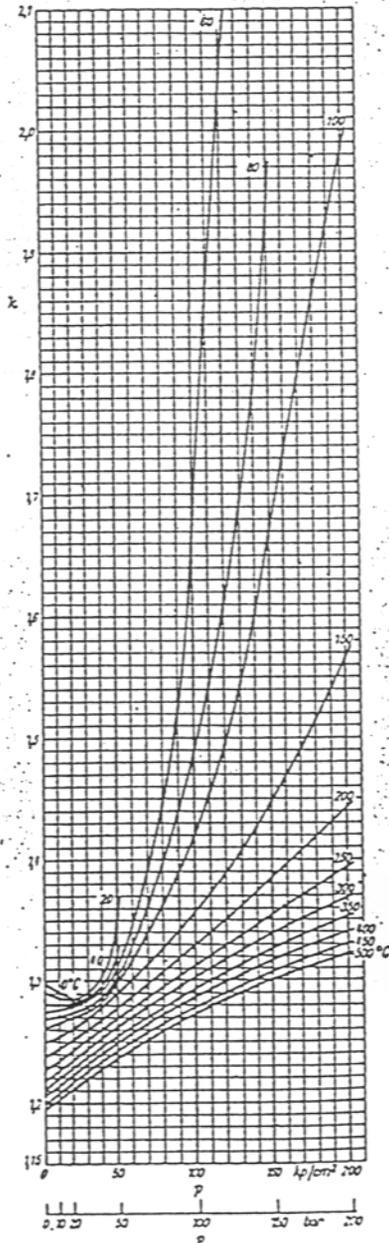


Bild 25. Isentropenexponent κ von Kohlendioxid (CO_2)

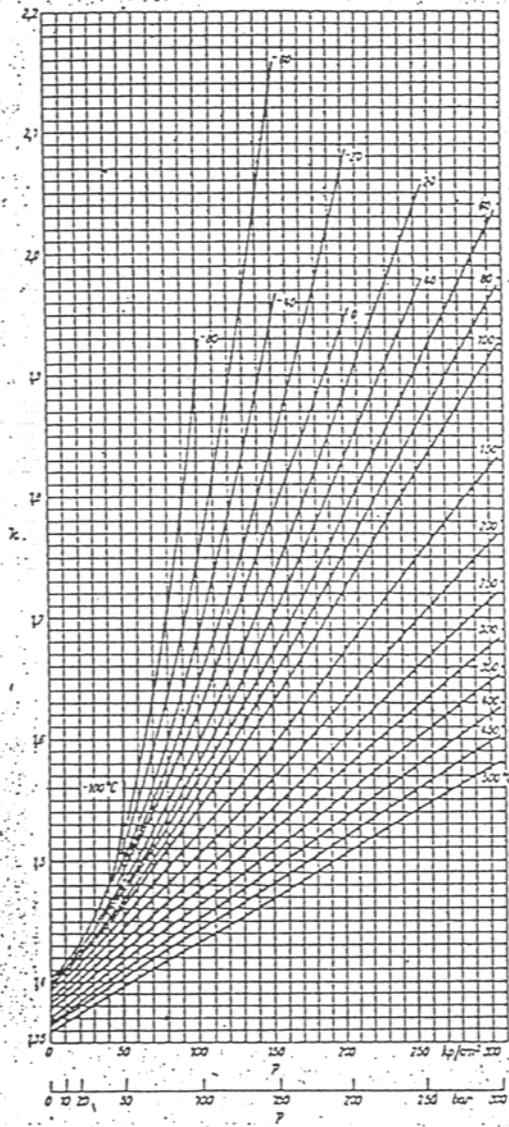


Bild 26. Isentropenexponent k von Luft

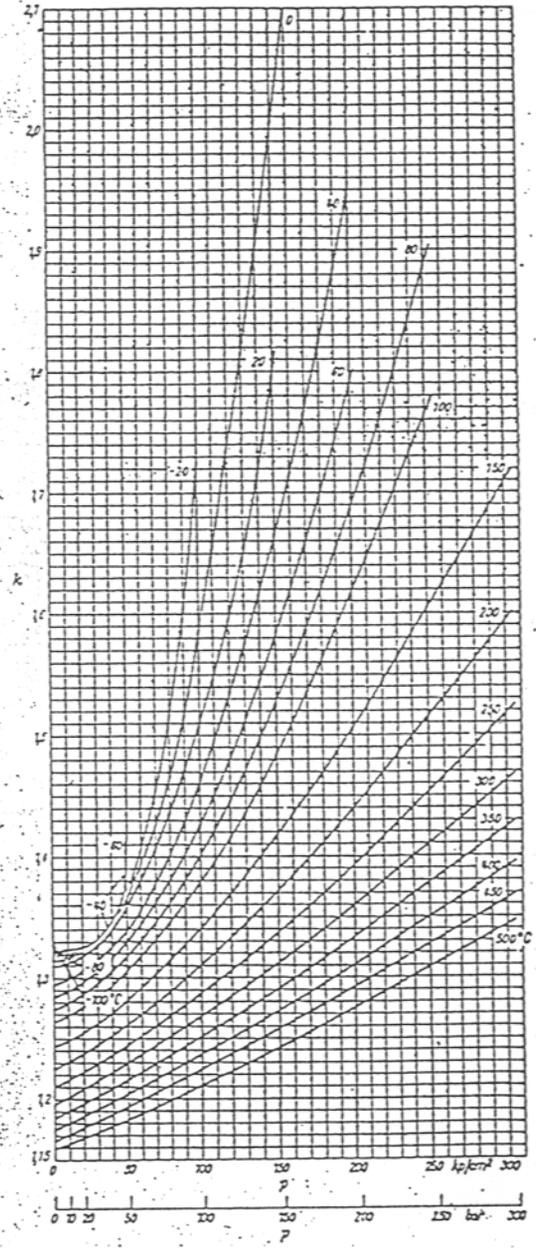


Bild 27. Isentropenexponent k von Methan (CH_4)

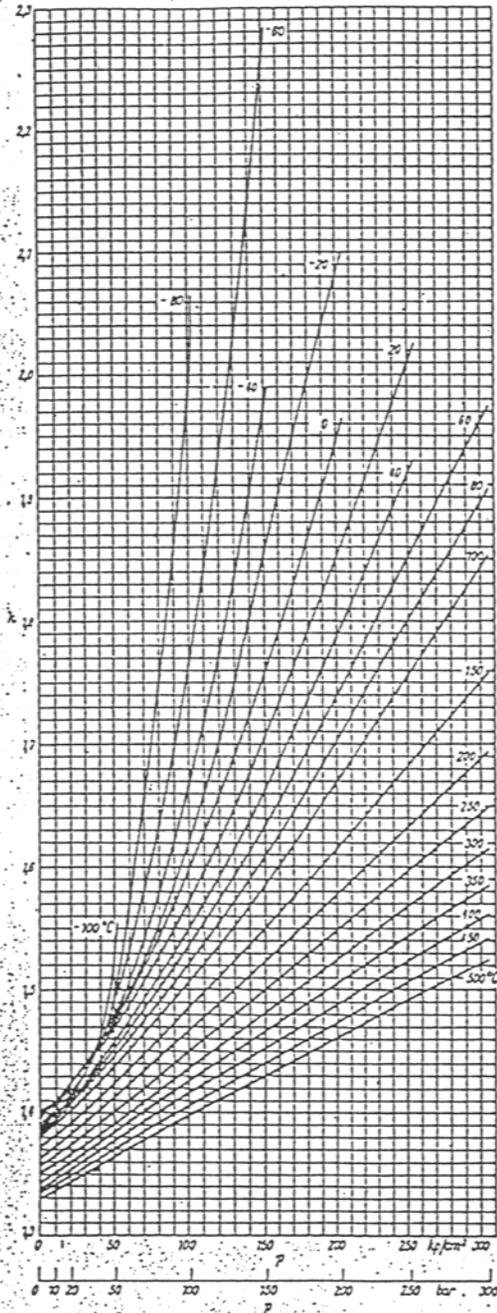


Bild 28. Isentropenexponent k von Sauerstoff (O_2)

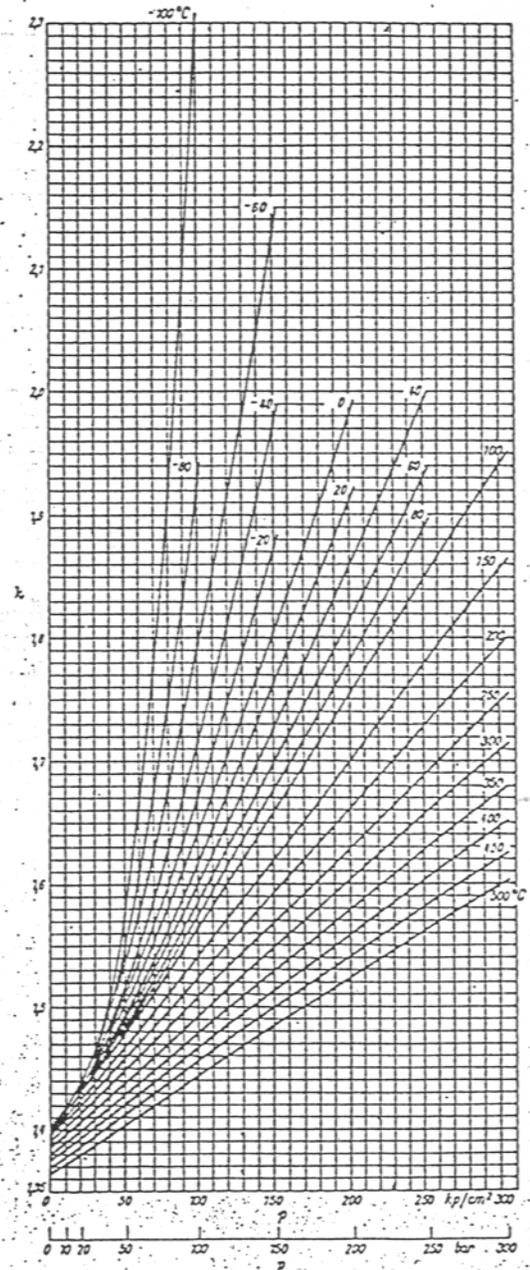


Bild 29. Isentropenexponent k von Stickstoff (N_2)

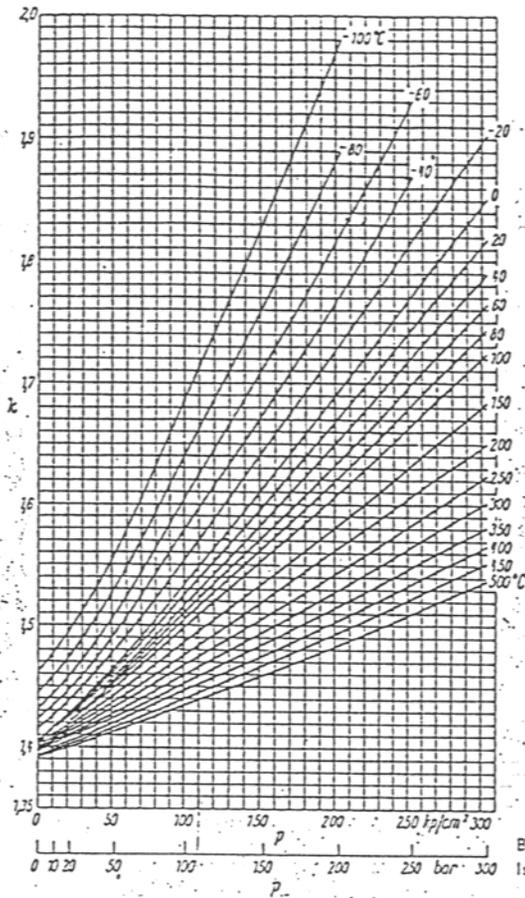


Bild 30a

Isentropenexponent k von Wasserstoff (H₂)

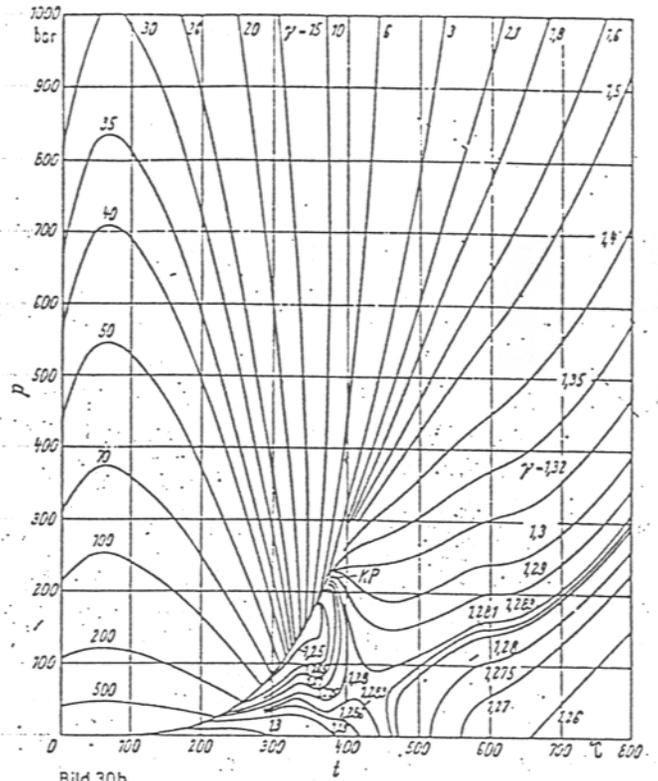


Bild 30b

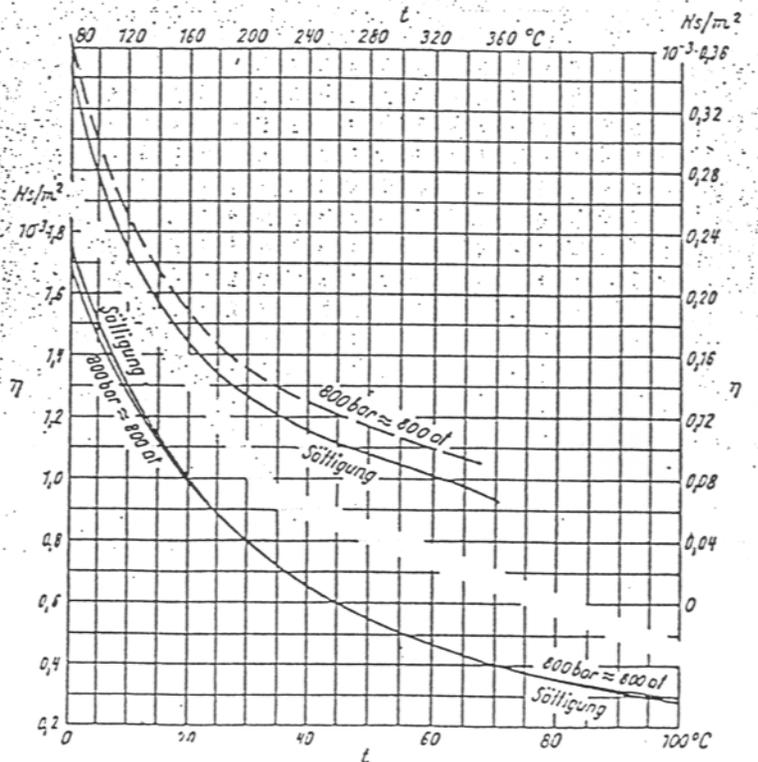
Isentropenexponent k von Wasserdampf

5. Viskosität von Wasser, Wasserdampf und technischen Gasen

Bild 31 und 32 zeigt die dynamische Viskosität von Wasser und Wasserdampf. Die dynamische Viskosität von Gasen $\eta = \eta(t) \cdot \eta(p, t) / \eta(t)$ kann in einen druckunabhängigen, für ideale Gaszustände (Drücke von etwa 1 kp/cm² bzw. 1 bar und weniger) geltenden Anteil $\eta(t)$ und in einen Korrekturfaktor für höhere Drücke $\eta(p, t) / \eta(t)$ aufgespalten werden. $\eta(t)$ kann für verschiedene Gase aus Bild 33 bis 34, und der Korrekturfaktor aus Bild 38 entnommen werden. Zur Berechnung der Reynolds-Zahl aus dem Durchfluß im Normzustand (VDI 2040, Bl. 2, Gl. 48) ist es vorteilhaft, eine Hilfsgröße ν' einzuführen, die für einige Gase in Bild 35 bis 37 dargestellt ist.

Bild 31
Dynamische Viskosität η des Wassers

$$1 \text{ Ns/m}^2 = \frac{1}{9,8067} \text{ kps}$$



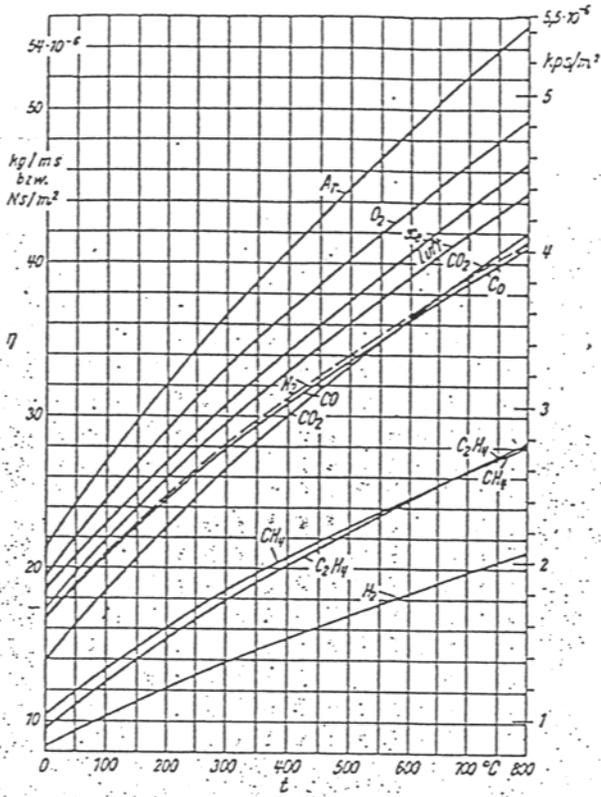


Bild 33. Dynamische Viskosität $\eta(t)$ technischer Gase im druckunabhängigen Bereich, etwa für 1 kp/cm^2 bzw. 1 bar und weniger

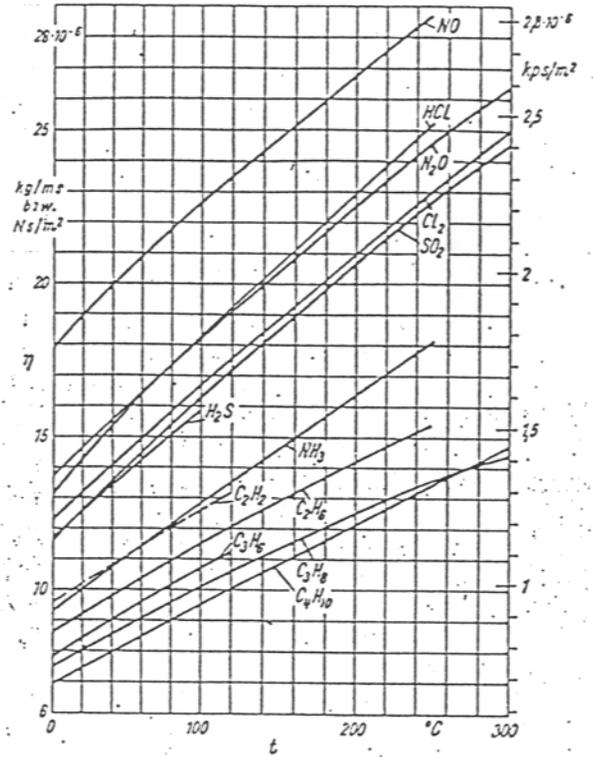


Bild 34. Dynamische Viskosität $\eta(t)$ technischer Gase im druckunabhängigen Bereich, etwa für 1 kp/cm^2 bzw. 1 bar und weniger

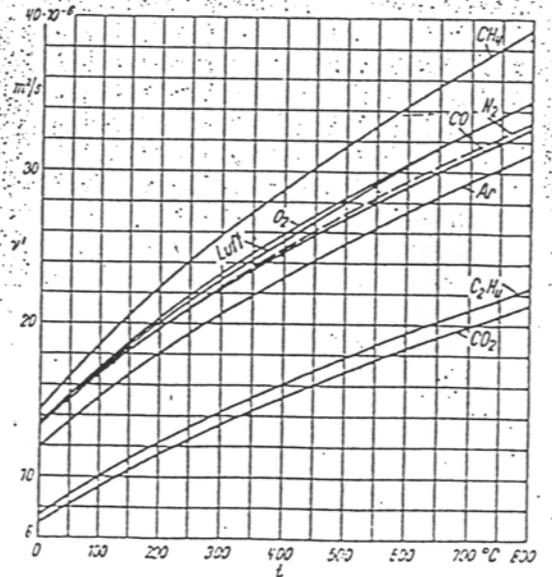


Bild 35. Hilfsgröße ν' für technische Gase

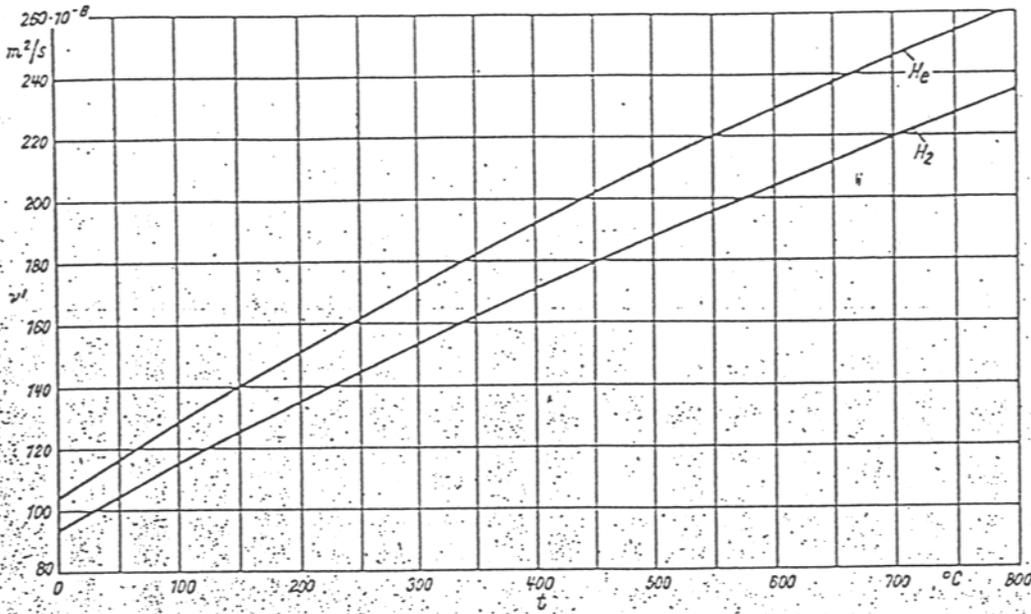


Bild 36. Hilfsgröße ν' für technische Gase

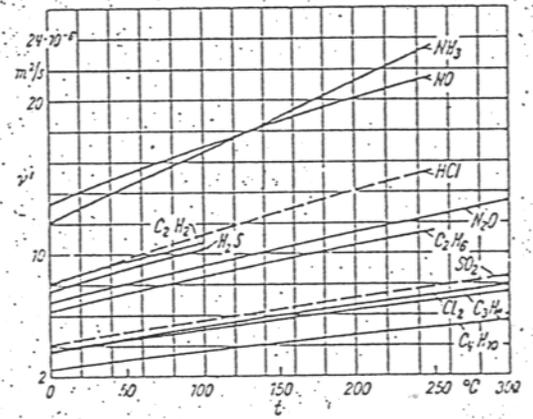


Bild 37
Hilfsgröße ν' für technische Gase

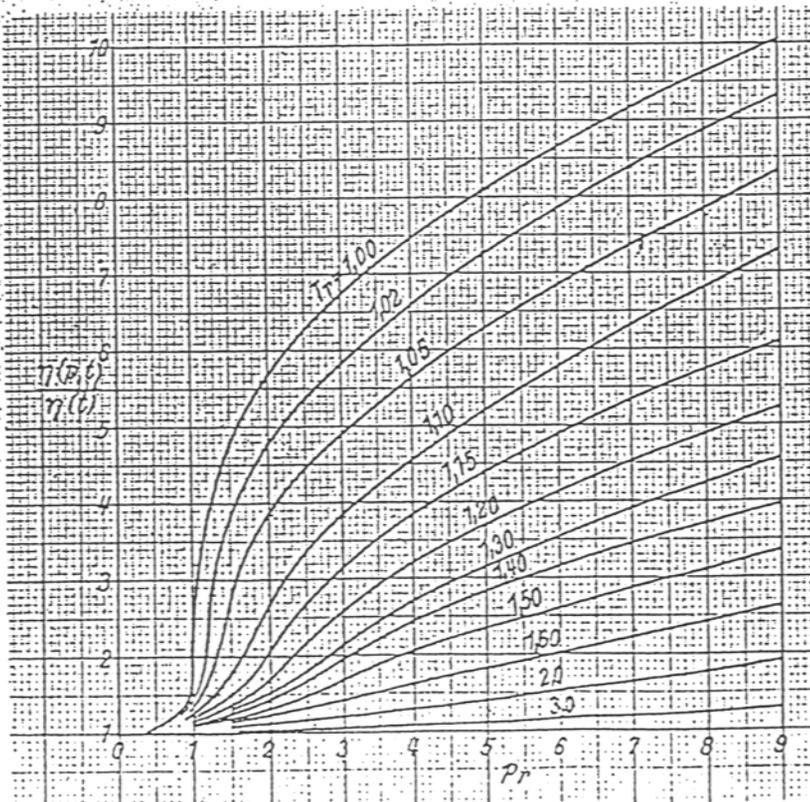


Bild 38
Korrekturfaktor $\eta(p, t) / \eta(t)$
der dynamischen Viskosität η von Gasen
bei hohen Drücken. Reduzierte Darstellung