

WINFLOW 2.5

Calculation and Specification Program for ITABAR Flow Sensors



The Intra-Automation GmbH WinFlow 2.5 is a Program that automatically calculates the following flow parameters for ITABAR Flow Sensors:

1. Differential pressure.
2. Permanent pressure loss.
3. Frequency of sensor at actual working conditions (Hz).
4. Natural sensor frequency.
5. Maximum allowable differential pressure.
6. Maximum flow rate for the specified sensor type.

This program includes:

7. Steam tables in SI-units.
8. Density at normal condition 0°C / 101,3 kPa
Density of: Air, ammonia, oxygen, carbon dioxide, sulfur dioxide, hydrogen, propane and nitrogen.
9. Viscosity at normal condition 0°C / 101,3 kPa
Viscosity of listed gases; for other gases the values must be entered manually.

System Hardware and Software Requirements

486-40 MHz or better
8 MB RAM
5 MB disk space

MS-DOS 5.0 or later
Windows 3.1, Windows for Workgroups, Windows 95.

Installation:

1. Exit all Windows applications.
2. Insert Disk 1 into the target drive.
3. From the Windows Program Manager, choose Run from File menu. Windows displays the Run dialog box.
4. Type a:\setup.exe in the command box.
5. Choose OK.
6. Follow the setup instructions on the screen, inserting diskettes as requested.

INTRA-AUTOMATION GmbH is not liable for any irregularities in the functioning of software previously installed by the user.

To select a menu

In WinFlow, you select (highlight) a menu and then choose a command from that menu. Choosing the command executes the action.

Selecting a menu using:

Mouse

Using the mouse pointer, point to the name of menu on the menu bar and click with the left mouse button to open the menu. (To move directly to a menu item, drag the selection cursor down the menu until the menu item is highlighted and then release the mouse button.)

Keyboard

1. Press Alt or F10 to select (highlight) the menu bar.
2. Press the LEFT ARROW or the RIGHT ARROW key to select the menu you want.
3. Press ENTER to open the selected menu.
4. If the name in the menu bar has an underlined letter, you can press ALT to drop the menu bar and then type the letter that's underlined to open the menu. For example, to open the File menu in Window DIFFERENTIAL PRESSURE press ALT, F.

Example: differential pressure, air

Medium : Air

Temperature: 45°C

Pressure: 5 bar/g

Flow rate: QMaximum =12500 m³/h, QNormal=10000, QMinimum=8000

Internal pipe diameter: 354 mm

Wall thickness: 6.4 mm

Pipe run: vertical

You select in the list box the option [Volume rate of Gas (Operating Condition)].
With the mouse, click the [↓] on the right side

Select the “air“ medium. At the right side of this listing box, click the [↓].

Enter the pressure in this field and select [bar/G] from the list box.

The actual field density and viscosity are not enabled. Density and viscosity are calculated automatically.

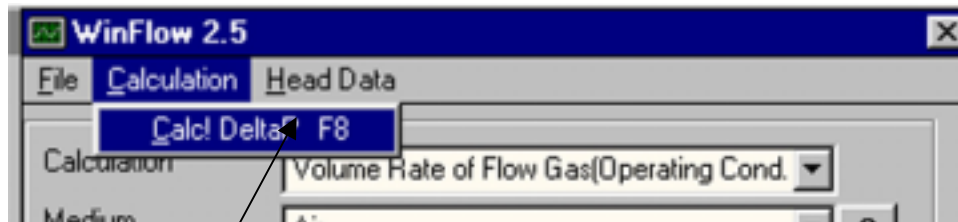
Select the Sensor, type and the material

Enter QMax in this field and select the unit from the list box

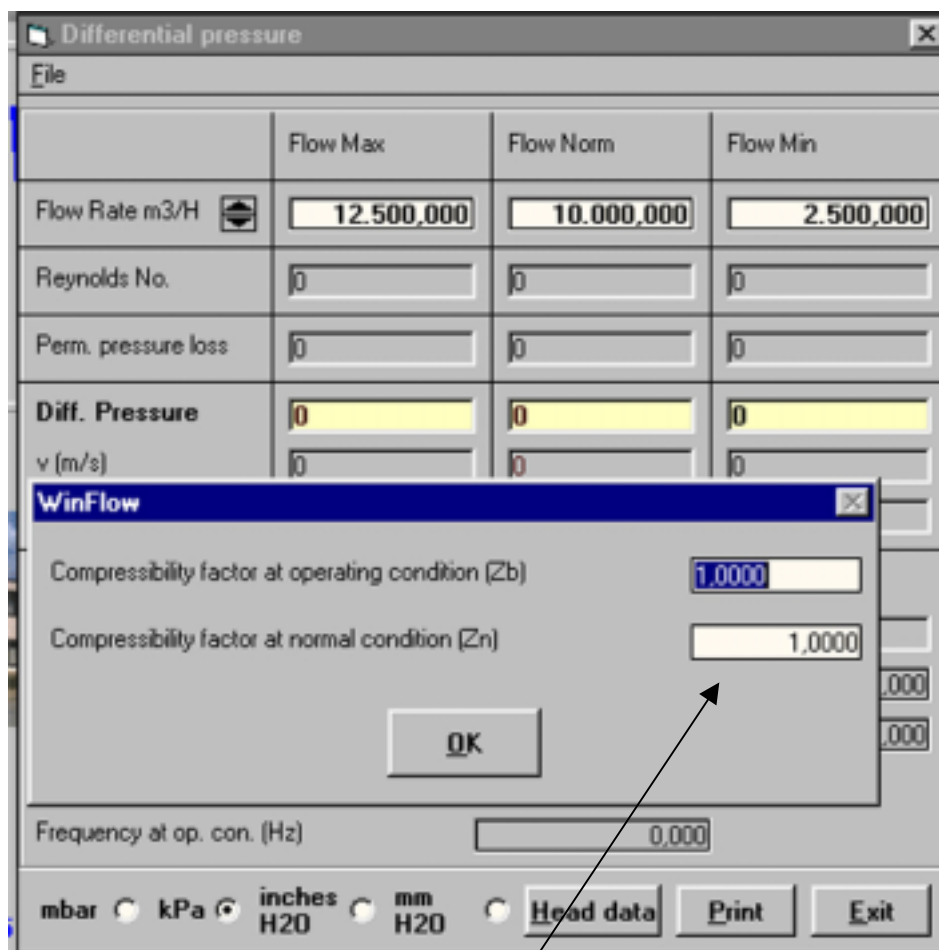
Enter the internal pipe diameter; the engineering unit is [mm].

In the next field type the wall thickness; it is the same engineering unit as the internal pipe diameter.

Calculation / Compressibility factor



Calculation: Press [F8] for calculation or click in the menu line [Calculation] and activate [Calc! DeltaP].



If necessary then enter the compressibility factor at norm and operating condition, s. appendix B .

Head data

Differential pressure

	Flow Max	Flow Nom	Flow Min
Flow Rate m ³ /h	12.500,000	10.000,000	2.500,000
Reynolds No.	4241162	3392930	848232
Perm. pressure loss	0,80	0,51	0,03
Diff. Pressure	10,370	6,627	0,413
v (m/s)	35,28	28,22	7,06
Expansion Factor	0,99797	0,99870	0,99952
K-Factor	0,62248		
Kin Viscosity	15,0039	Op. density	6,590
Max. diff pressure	13,04	QMax	14.045,810
Max. DeltaP FloTap, insert	0,003	QMax	0,003
Natural Frequency (Hz)	137,850		
Frequency at op. con. (Hz)	5,260		

☐ mbar
 ☒ kPa
 ☐ inches H2O
 ☐ mm H2O
 Head data
 Print
 Exit

With the mouse, select the switch [Head data].
In the text fields enter the customer address, contact person, etc.

Head data

Company: _____

Name/dep.: _____

Street: _____

Zip code/city: _____

Office/Con. no.: _____

P. order number: _____

Tag no.: _____

Serial no.: _____

Pipe data: ID= 354,000/6,400 mm - vertical

ITABAR-Type: IIR-25

Sensor material: _____

Note: _____

Pressure	5,00 bar G
Temperature	45,00 °C
Density	1,2330 kg/m ³
Viscosity	0,0154 cPa
QMax	12.500,000 m ³ /h
Pipe intern. Diameter	354,000 mm
Wall thickness	6,400 mm
Pipe shape rectangle	0x0
Itabar-Type	IIR-25
Material	316 Ti / 1,4571
Diff. Pressure	10,370

OK Exit

Print differential pressure calculation

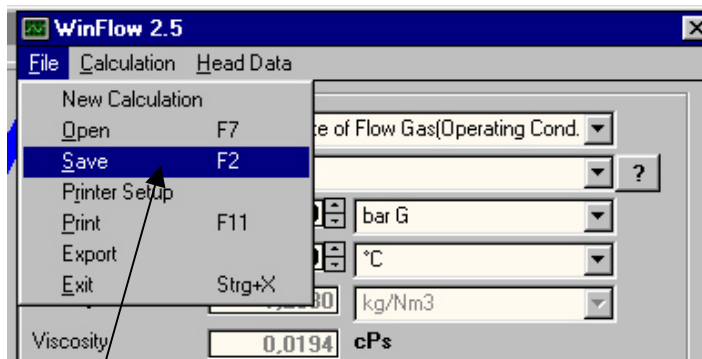
	Flow Max	Flow Norm	Flow Min
Flow Rate m3/H	12.500,000	10.000,000	2.500,000
Reynolds No.	4241162	3392930	848232
Perm. pressure loss	0,80	0,51	0,03
Diff. Pressure	10,370	6,627	0,413
v (m/s)	35,28	28,22	7,06
Expansion Factor	0,99797	0,99870	0,99992

K-Factor	0,62248		
Kin Viscosity	15,0039	Op. density	6,590
Max. diff pressure	13,04	QMax	14,045,810
Max. DeltaP FloTap, insert	0,000	QMax	0,000
Natural Frequency (Hz)	137,850		
Frequency at op. con. (Hz)	5,260		

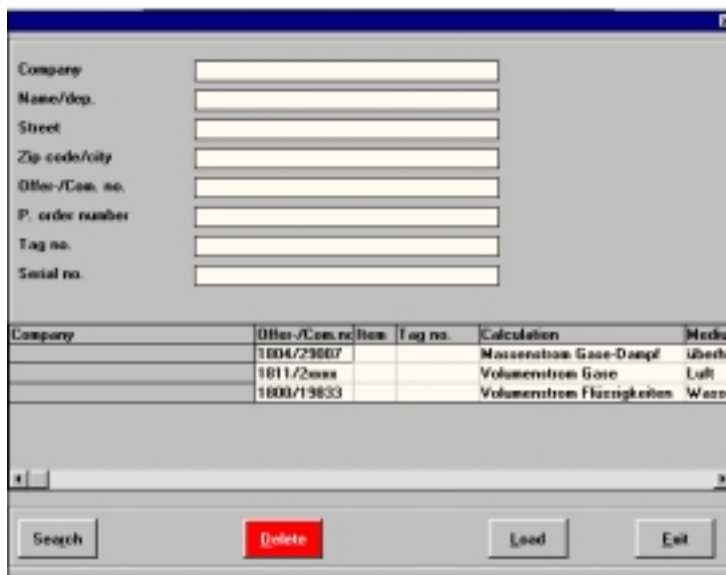
☐ mbar
 ☒ kPa
 ☐ inches H2O
 ☐ mm H2O

Print the calculation, click on [Print].

Save calculation / open calculation



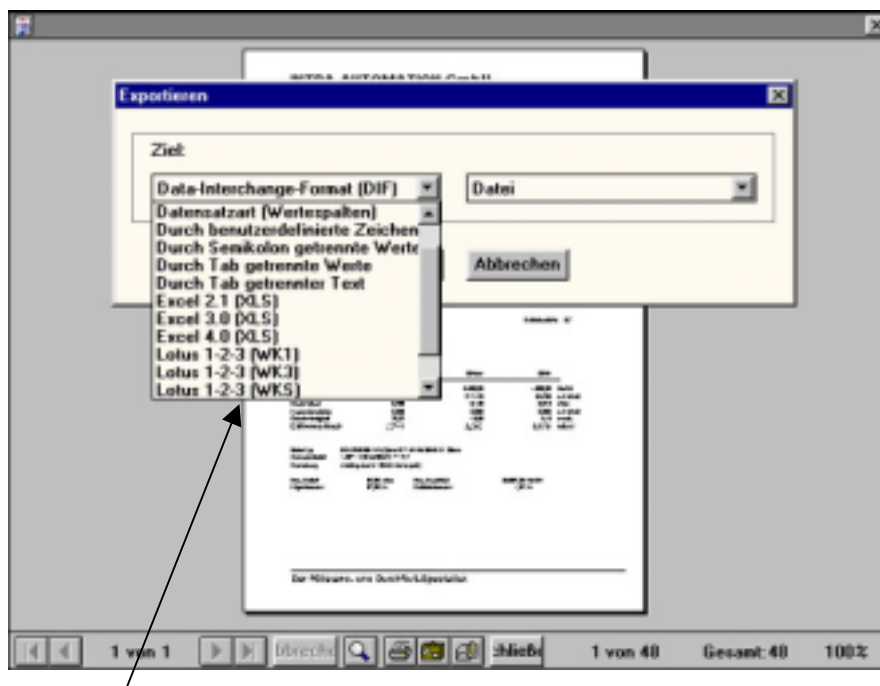
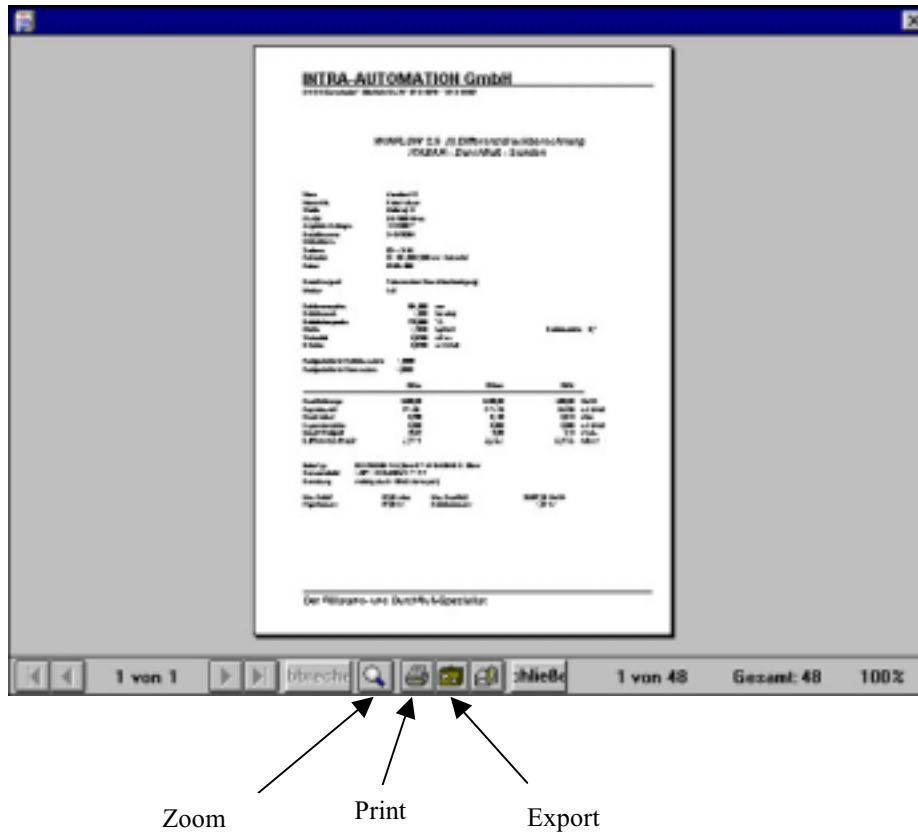
If you save the calculation, click on File / Save



If you open the calculation, click on File / Open. Enter the company and click on [Search]. Select the calculation and click on [Load].

Export data

Click on File / Export



Select the format and click on [OK]

Example: differential pressure, another gas

Medium : Argon

Temperature: 55°C

Pressure: 8 bar/abs

Flow rate: QMaximum=12500 m³/h, QNormal=10000, QMinimum=8000

Internal pipe diameter: 354 mm

Wall thickness: 6.4 mm

Pipe run: vertical

Ratio of Specific Heat = 1.65, see page 12

Density norm = 1.784 kg/Nm³, viscosity = 0,0212 mPas

1. Calculation : Select in the listbox the option [Volume rate of Gas (Operating condition)]
2. Medium: Select in the listbox Medium other Gases
3. Pressure/Temperature: Enter the data for pressure and temperature.
4. Normdensity: see page 11, density = 1,784
5. Calculate the viscosity, see page 13
6. Enter the other data and press [F8] or click on Calculation / Calc! DeltaP
7. If necessary, enter the compressibilityfactor, see appendix B
8. Enter the ratio of specific heat (see page 12). Ratio of specific heat=1.65
9. Click on [OK].

Ratio of Specific Heat

Table 1. Properties of Technical Gases

Gas	M_n ³⁾ molar mass kg/kmol	³⁾ density at normal condition (0°C / 101,3 kPa) kg/m ³	⁴⁾ ratio of secific heat capacities at 20°C 1	^C Shuterland- Constant
acetylene	26.038	1.1715	1.23	215
ammonia	17.031	0.7718	1.31	503
argon	39.948	1.784	1.65	142
n-butane	58.123	2.708	1.66	358
chlorine	70.906	3.210	1.35	350
hydrogen chloride	36.461	1.6422	1.39	360
ethane	30.069	1.355	1.19	252
ethylene	28.054	1.2611	1.24	225
helium	4.0026	0.17848	1.63	-
carbon monoxide	28.010	1.2505	1.40	100
krypton	83.80	3.749	1.69	-
air (dry)	28.963	1.293	1.40	113
methane	16.043	0.7175	1.31	164
neon	20.179	0.8999	1.64	56
propane	44.096	2.0109	1.13	278
oxygen	31.999	1.4290	1.40	125
sulphur dioxide	64.059	2.9310	1.27	306
hydrogen sulfide	34.076	1.5355	1.31	331
nitrogen monoxide	30.006	1.3402	1.39	128
nitrous oxide	44.019	1.9780	1.28	260
nitrogen	28.013	1.2504	1.40	104
hydrogen	2.0158	0.08988	1.41	77

³⁾Data from DIN 1871 (1980)

⁴⁾Use ratio of specific heat capacities $\gamma = C_p / C_v$ for ideal gases in accordance with section 2.4.3 of DIN 1952, if the isentropic exponent is unknown; isentropic exponents for some gases are given in VDI/VDE Part 4.

Viscosity

Dynamic Viscosity of Pure Gases

The unit of dynamic viscosity shall be Pa s and 1 m Pa s is equal to 1 centipoise (cP).

The dynamic viscosities of most liquids decrease considerably as temperature increases.

The dependence of the dynamic viscosity of a liquid on pressure may be neglected unless the temperature of the liquid is close to critical temperature.

The dynamic viscosities of gases increase as temperature increases. For an ideal gas at a pressure of 1 bar or less, the dynamic viscosity is independent of pressure. For this range $\eta(t)$ may be taken from part 4 of Guideline VDI/VDE 2040 or calculated by Sutherland's formula

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

from the viscosity η_n at temperature T_n using the Sutherland constant C shown in Table 1.

$\eta(t)$ = Dynamic viscosity, operating condition in mPa *s

η^n = Dynamic viscosity, 273.15 Kelvin and 101,3 kPa

T = Operating temperature in Kelvin

C = Sutherland Constante (s. page 12)

T_n = Temperature, 273.15 Kelvin

Example: Dynamic viscosity, Air, 100°C

η^n = 0.0172 mPa *s

T = 373.15 Kelvin

T_n = 273.15 Kelvin

C = 113

$$\begin{aligned} 1) & 373.15 / 273.15 &= 1.366099212 & T / T_n \\ 2) & \sqrt{1.366099212} &= 1.1688025 & \sqrt{(T / T_n)} \\ 3) & 1 + (113 / 273.15) &= 1.413692 & 1 + (C / T_n) \\ 4) & 1 + (113 / 373.15) &= 1.302837 & 1 + (C / T) \\ 5) & 1.413692 / 1.302837 &= 1.085095 & (1 + (C / T_n)) / (1 + (C / T)) \\ 6) & 1.085095 * 1.1688025 &= 1.2682593 & (\sqrt{(T/T_n)} * ((1 + (C / T_n)) / (1 + (C / T)))) \\ 7) & 1.2682593 * 0.0172 &= 0.0218 & (\sqrt{(T/T_n)} * ((1 + (C / T_n)) / (1 + (C / T)))) * \eta^n \end{aligned}$$

Dynamic viscosity = 0,0218 mPa * s

Appendix 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
Viskosität: 0,0194 mPa s
K-Faktor: 0,6224 o. Einheit

Betriebsdichte: 6,59

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

	QMax	QNorm	QMin	
Durchflußmenge	12.500,00	10.000,00	2.500,00	m3/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
Viskosität: 0,0211 mPa s
K-Faktor: 0,6224 o. Einheit

Betriebsdichte: 11,727

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

Appendix B

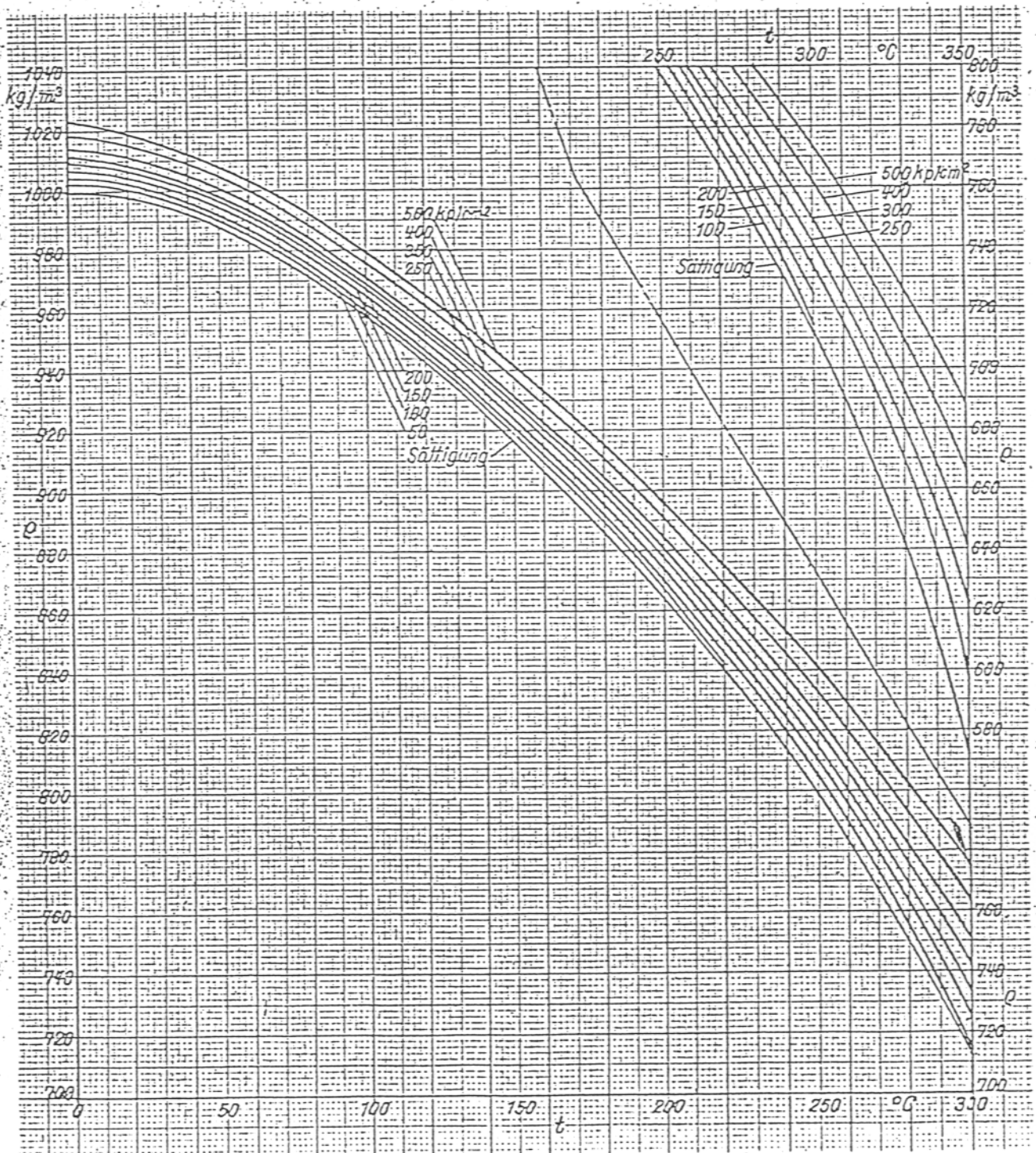
1. Stoffwerte technischer Gase

Gas		M_r Relative Molekül- masse	ρ_n Normdichte kg/m^3_n	R Individuelle Gas- konstante $\frac{\text{kpm}}{\text{kg}^\circ\text{K}}$	Z_n Realgas- faktor im Normzustand	Isen- tro- pen- exponent k für $p \rightarrow 0$ $T = 273^\circ\text{K}$	T_{kr} Krit. Temp. $^\circ\text{K}$	p_{kr} Krit. Druck kp/cm^2	$\sqrt{M_r T_{kr}}$ $^\circ\text{K}^{1/2}$	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	55,8	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	3,4857	10,854	—	—	561,8	49,5	208,2	448
Butan-n	C_4H_{10}	58,124	2,7320	14,586	0,9492	—	425,2	35,75	154,0	358
Butan-i	C_4H_{10}	58,124	2,6467	14,586	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	1,2928	29,275	0,9995	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	0,9995	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	—	1,337	647,3	225,65	107,9	650
Wasserstoff	H_2	2,016	0,0899	47,314	1,0005	1,41	33,3	13,2	8,19	71,7
Xylol	C_8H_{10}	106,16	4,737	7,966	—	—	—	—	—	—

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

$$1 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 9,8067 \frac{\text{Nm}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

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. 1968), 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 Satttdampflinie keine Unsicherheiten angegeben werden können.

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

Bild	Gas	Δp in kp/cm^2
3	C_2H_6	2,5
4	C_2H_4	5,0
7	$\text{i-C}_4\text{H}_{10}$	1,0
8	$\text{n-C}_4\text{H}_{10}$	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

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.

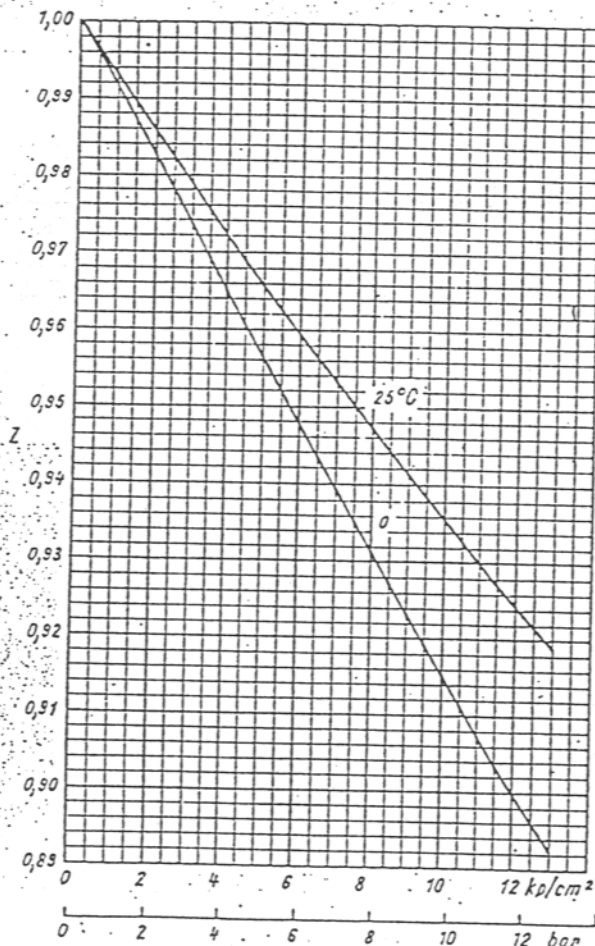


Bild 2. Realgasfaktor Z von Acetylen (C_2H_2)

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

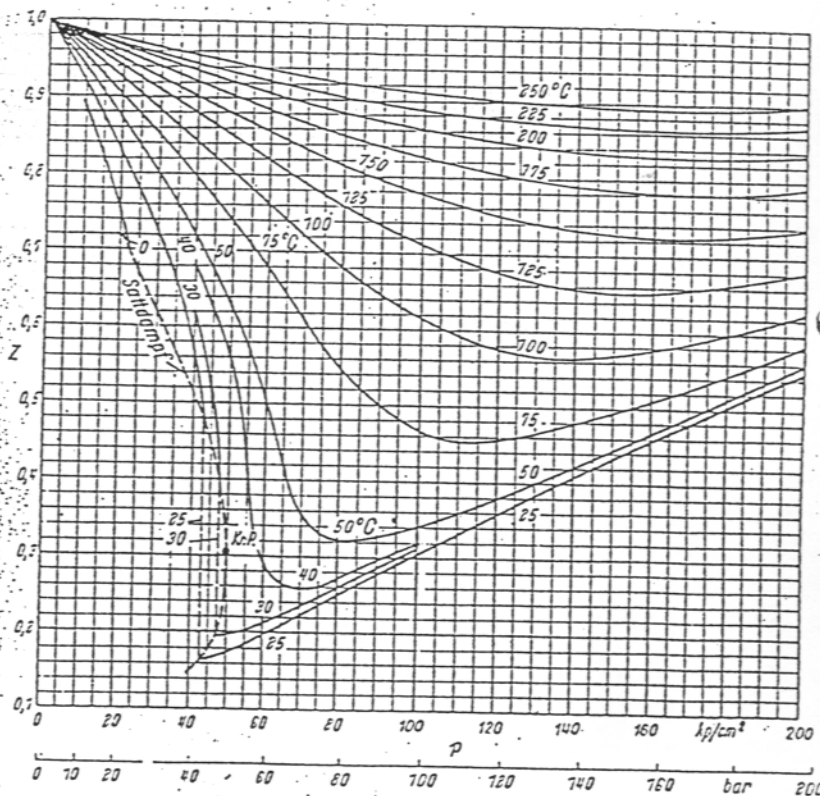
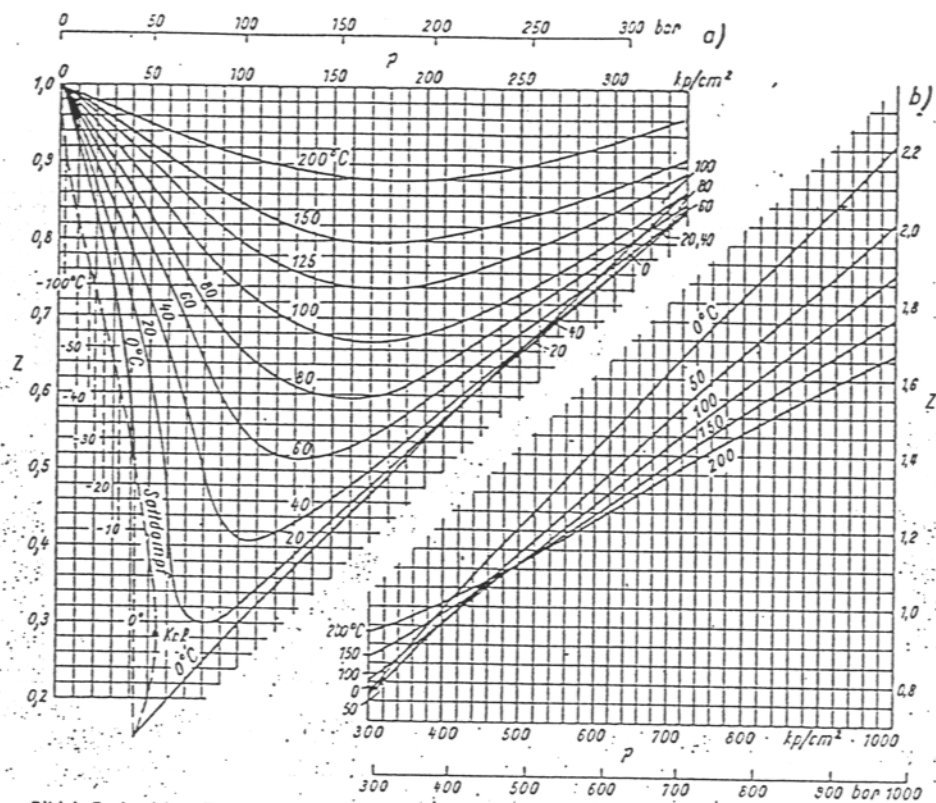
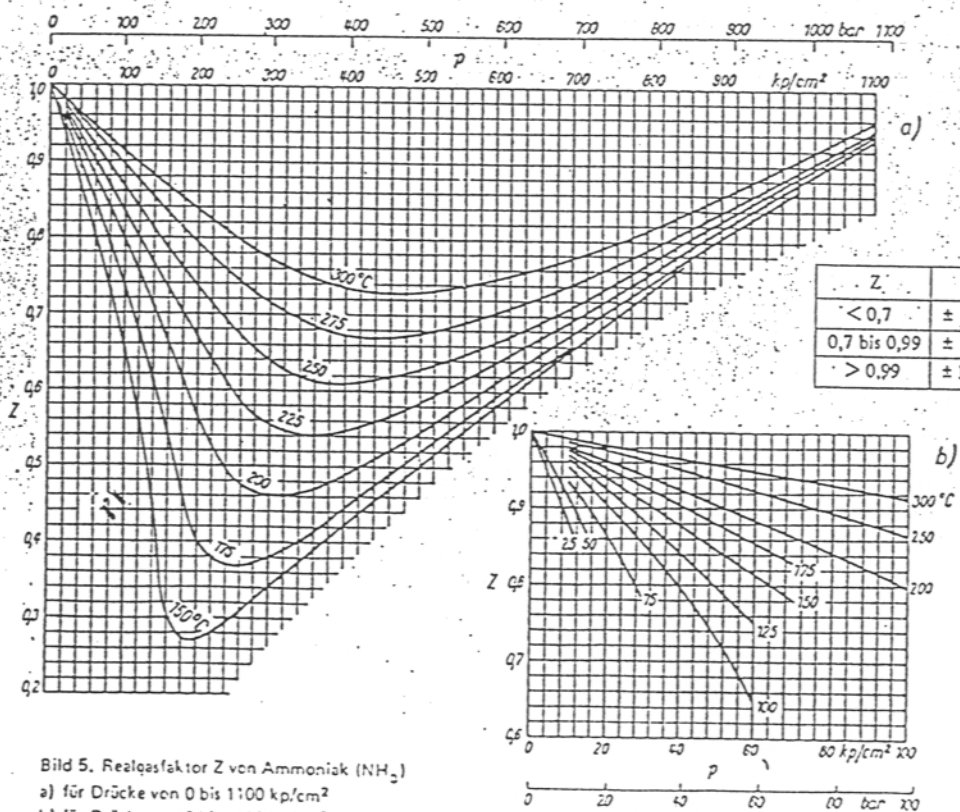


Bild 3. Realgasfaktor Z von Aethan (C_2H_6)

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	$\pm 100 (Z-1) \%$

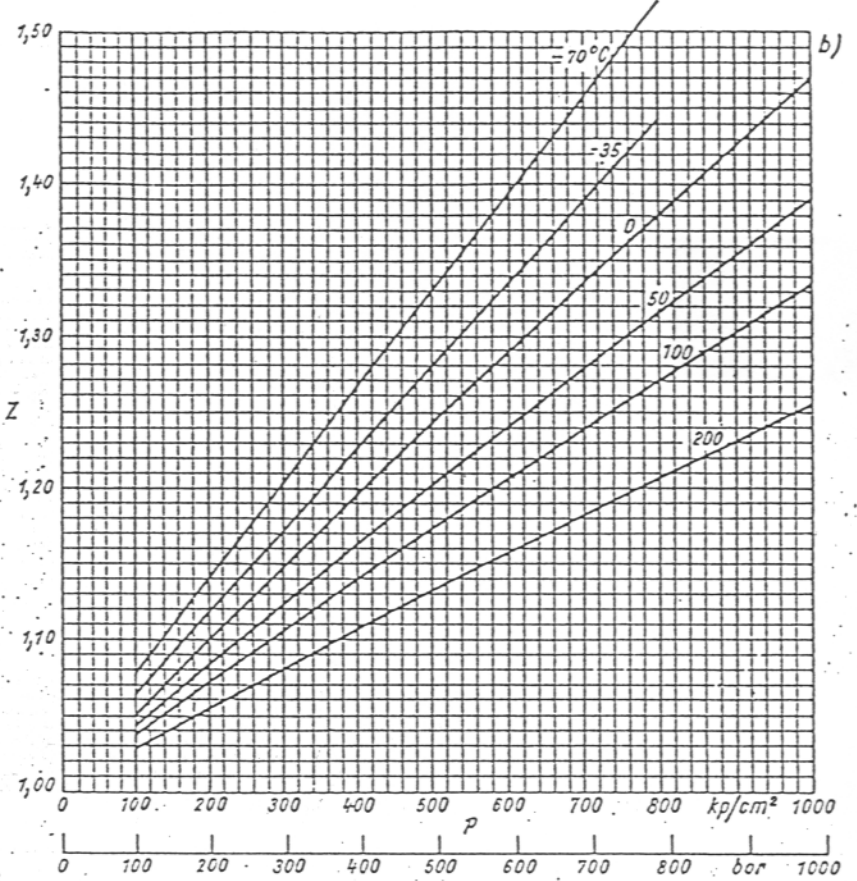
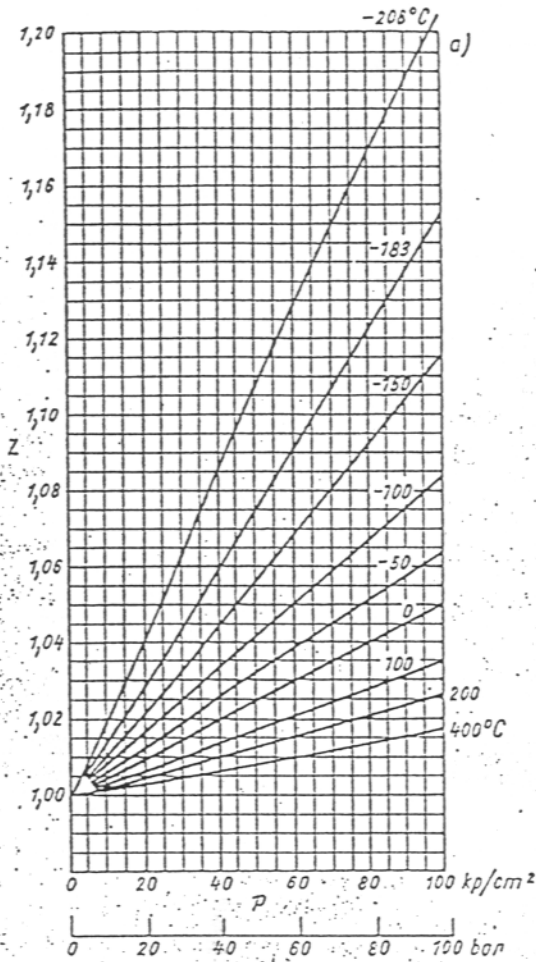
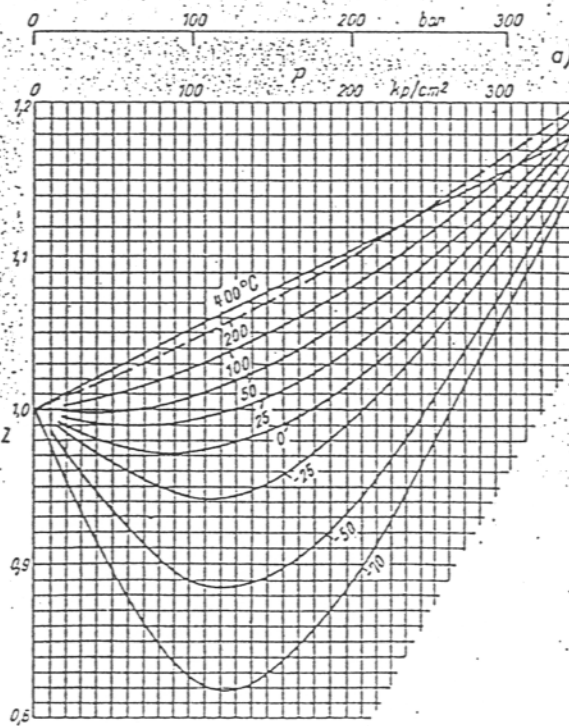


Bild 10. Realgasfaktor Z von Helium (He)

a) für Drücke bis 100 kp/cm²

b) für Drücke von 100 bis 1000 kp/cm²

Z	t °C	p kp/cm²	τ_z
$\geq 1,005$	< 0	< 100	$\pm 1\%$
	0 bis 400	< 100	$\pm 0,5\%$
	alle Werte	> 100	$\pm 2,0\%$
$< 1,005$	alle Werte		$\pm 100 (Z-1)\%$



Z	t °C	τ_z
$\leq 0,997$ oder $\geq 1,003$	< 0	$\pm 0,5\%$
	0 bis 100	$\pm 0,3\%$
	$> 100; < 200$	$\pm 0,5\%$
$> 0,997$ & $< 1,003$	200	$\pm 0,7\%$
	< 10	$\pm 100 (Z-1)\%$
	> 10	wie für $Z \leq 0,997$

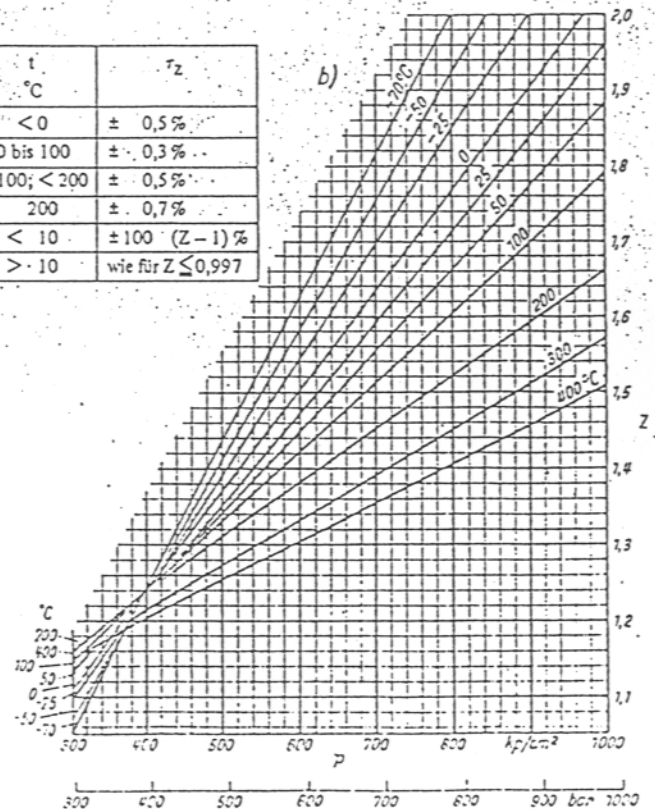
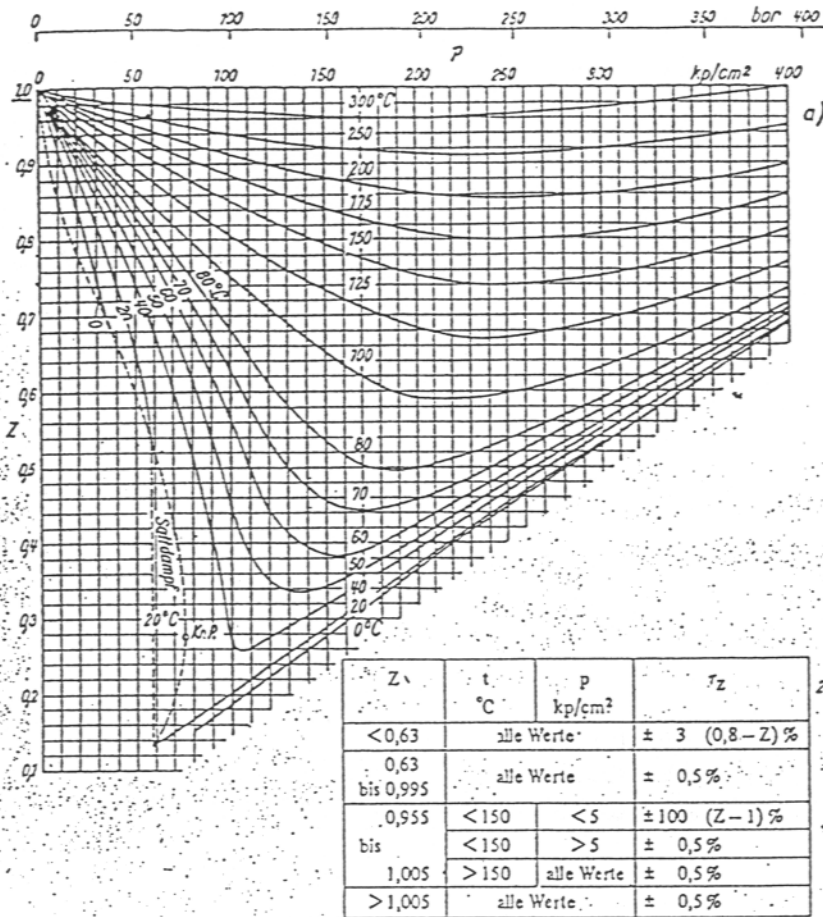


Bild 11. Realgasfaktor Z von Kohlenoxid (CO)

a) für Drücke bis 350 kp/cm²

b) für Drücke von 300 bis 1000 kp/cm²

Bild 12. Realgasfaktor Z von Kohlendioxid (CO₂)

a) für Drücke von 0 bis 400 kp/cm²
b) für Drücke von 400 bis 1000 kp/cm²

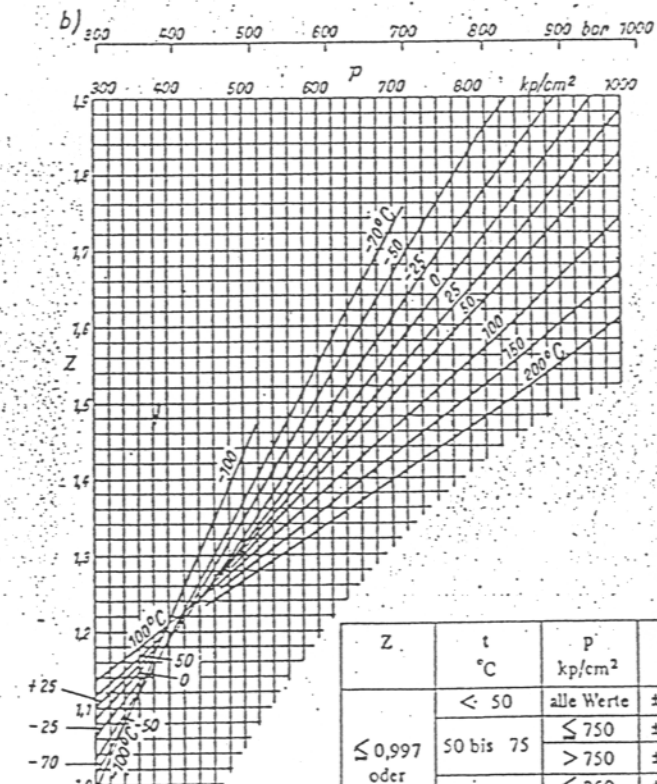
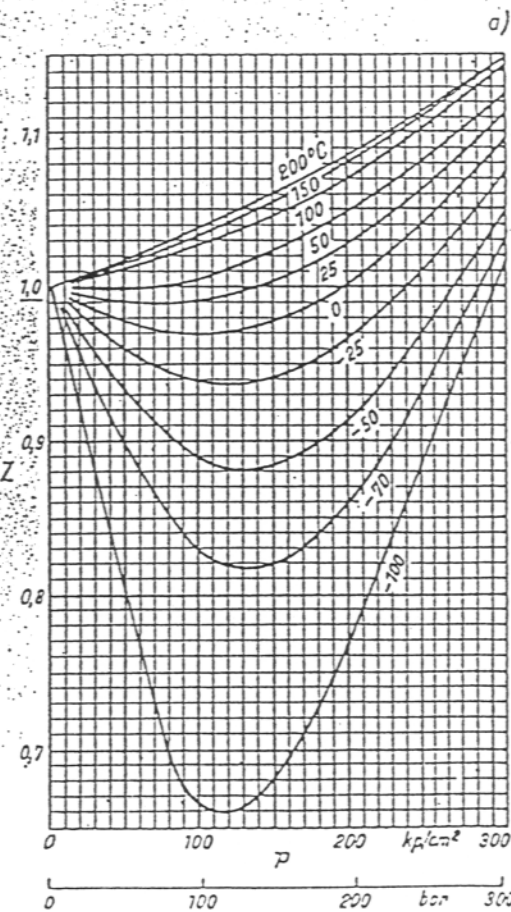
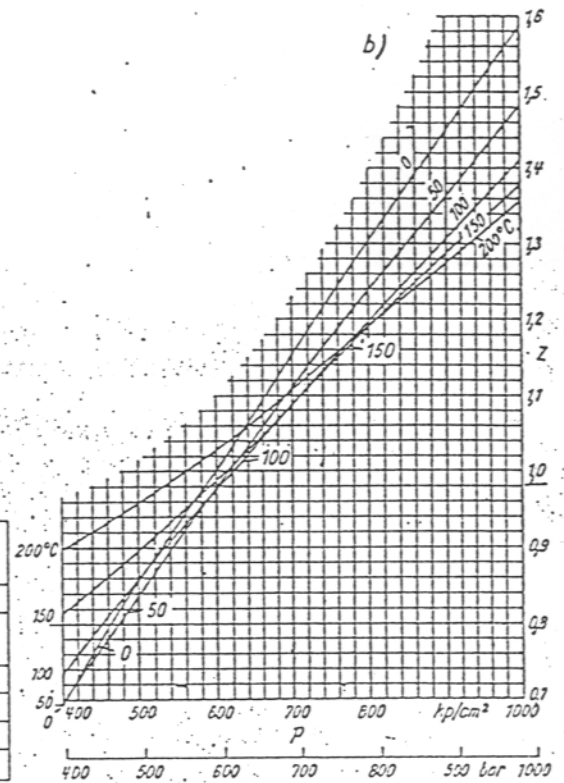
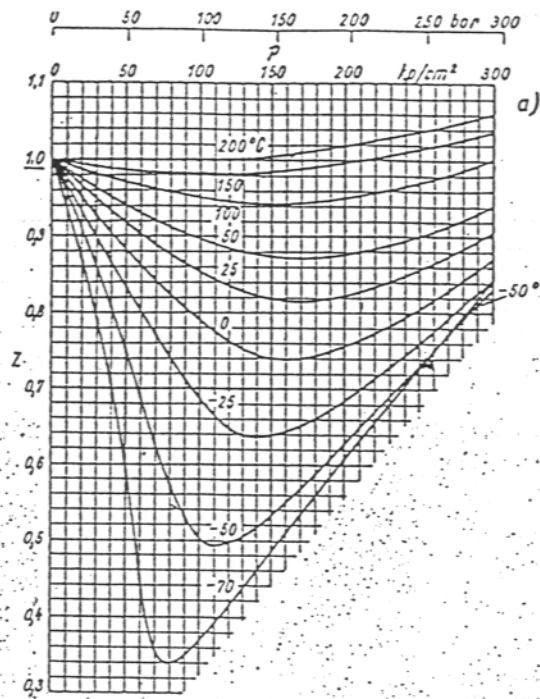


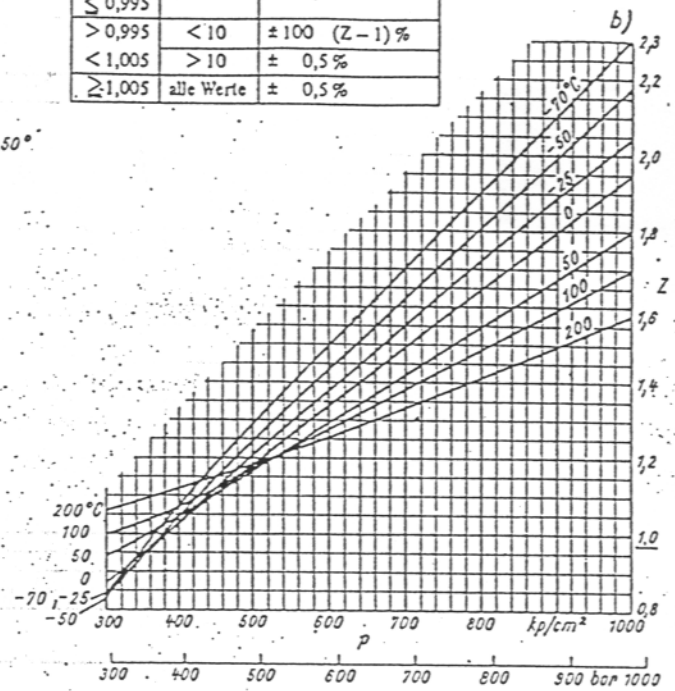
Bild 13. Realgasfaktor Z von Luft

a) für Drücke von 0 bis 300 kp/cm²
b) für Drücke von 300 bis 1000 kp/cm²

Z	t °C	P kp/cm²	τ_z
$\leq 0,997$ oder $\geq 1,003$	< 50	alle Werte	$\pm 0,3 \%$
	50 bis 75	≤ 750	$\pm 0,3 \%$
		> 750	$\pm 0,7 \%$
	75 bis 100	≤ 250	$\pm 0,3 \%$
		> 250	$\pm 0,7 \%$
	≥ 100	alle Werte	$\pm 0,7 \%$
> 0,997 < 1,003	alle Werte	< 10	$\pm 100 (Z - 1) \%$
		> 10	wie für Z < 0,997

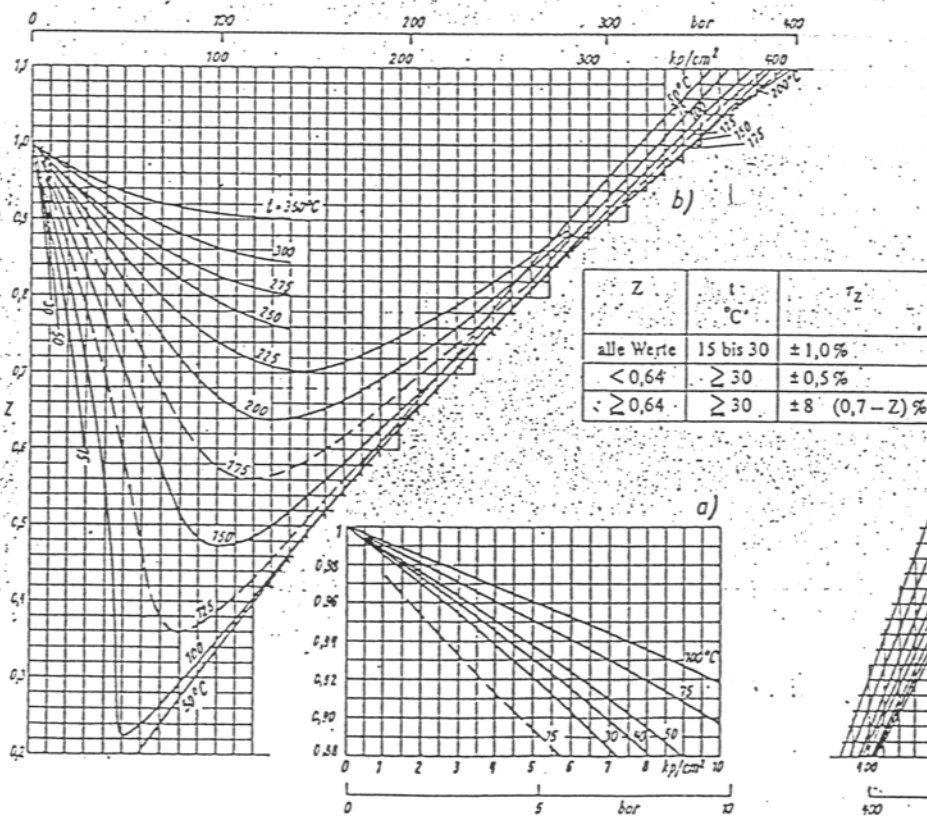


Z	p kp/cm²	τ_z
$\leq 0,64$	alle Werte	$\pm 8 (0,7 - Z) \%$
$> 0,64$	alle Werte	$\pm 0,5 \%$
$\leq 0,995$	< 10	$\pm 100 (Z - 1) \%$
$> 0,995$	> 10	$\pm 0,5 \%$
$\geq 1,005$	alle Werte	$\pm 0,5 \%$

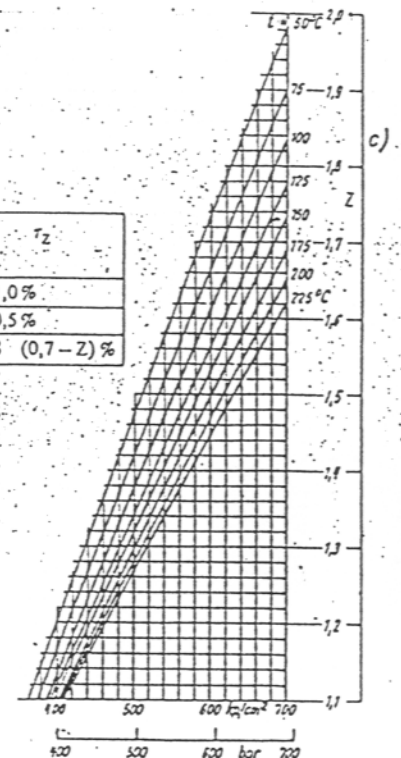
Bild 14. Realgasfaktor Z von Methan (CH_4)

a) für Drücke von 0 bis 300 kp/cm²

b) für Drücke von 300 bis 1000 kp/cm²



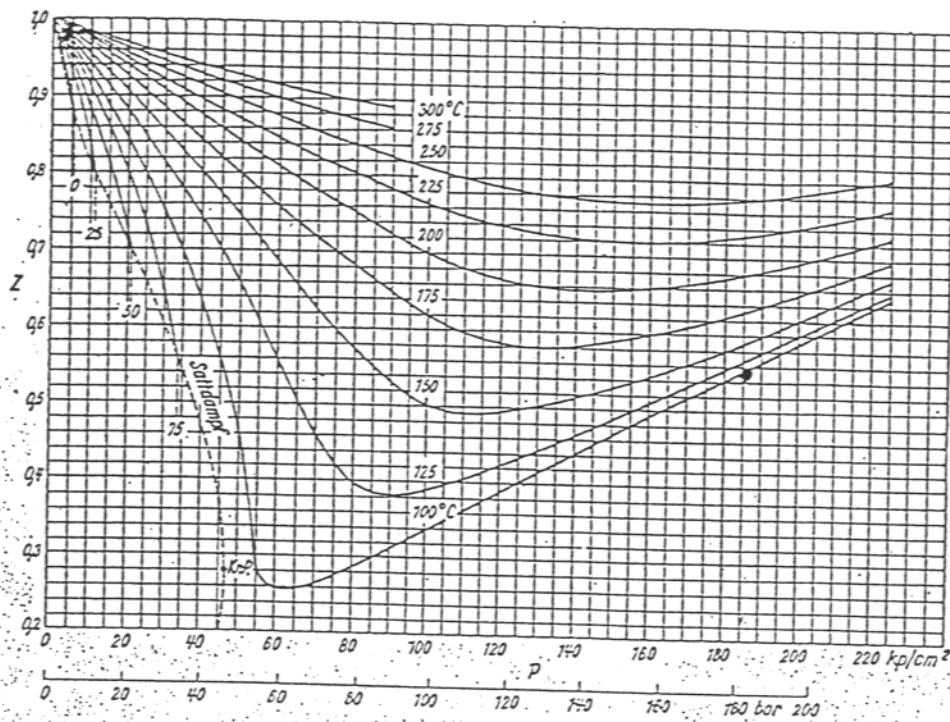
Z	t °C	τ_z
alle Werte	15 bis 30	$\pm 1,0 \%$
$< 0,64$	≥ 30	$\pm 0,5 \%$
$\geq 0,64$	≥ 30	$\pm 8 (0,7 - Z) \%$

Bild 15. Realgasfaktor Z für Propan (C_3H_8)

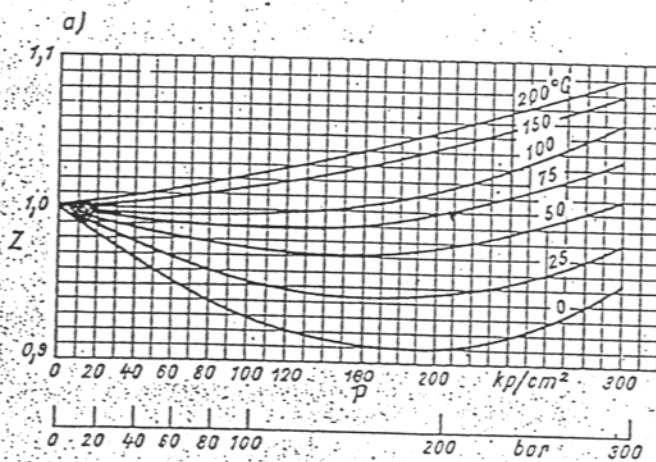
a) von 0 bis 10 kp/cm²

b) von 0 bis 400 kp/cm²

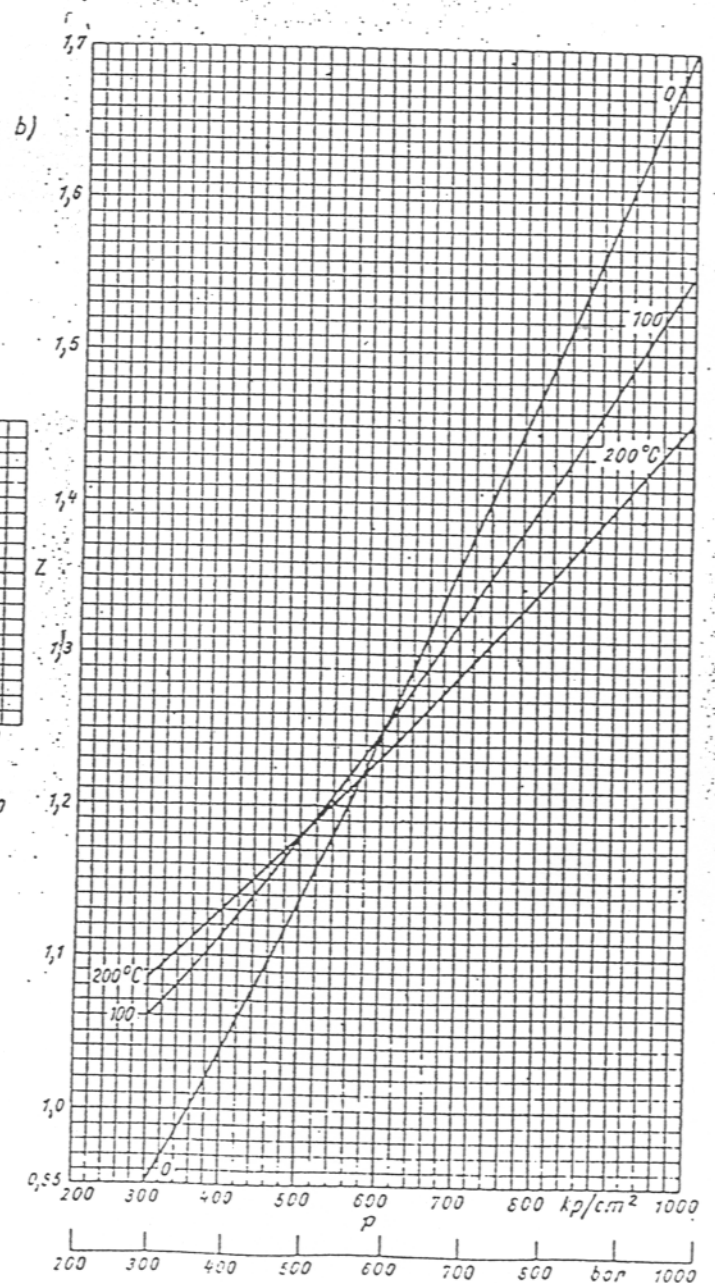
c) von 400 bis 700 kp/cm²

Bild 16. Realgasfaktor Z für Propylen (C_3H_6)

t °C	p kp/cm ²	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 17. Realgasfaktor Z von Sauerstoff (O_2)a) für Drücke bis 300 kp/cm²b) für Drücke von 300 bis 1000 kp/cm²

Z	t °C	p kp/cm ²	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 %
	≥ 25	> 130	± 1,0 %
0,995 bis 1,005	alle Werte	< 10	± 100 (Z - 1) %
		> 10	wie für Z < 0,995



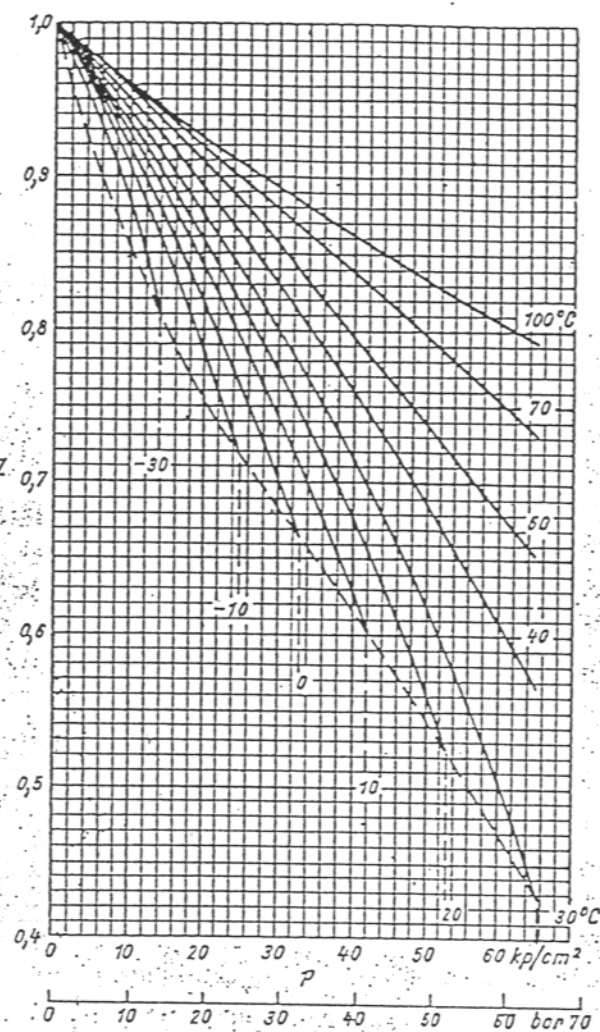
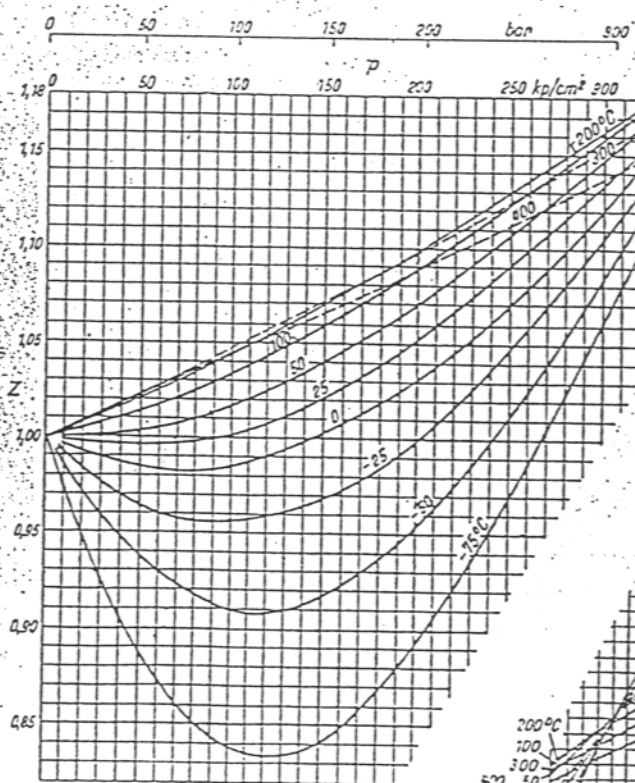


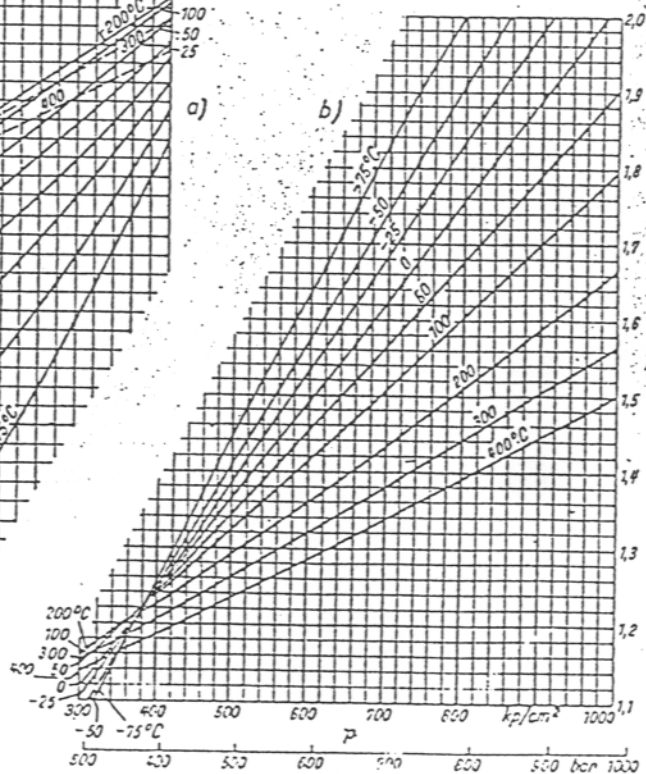
Bild 18

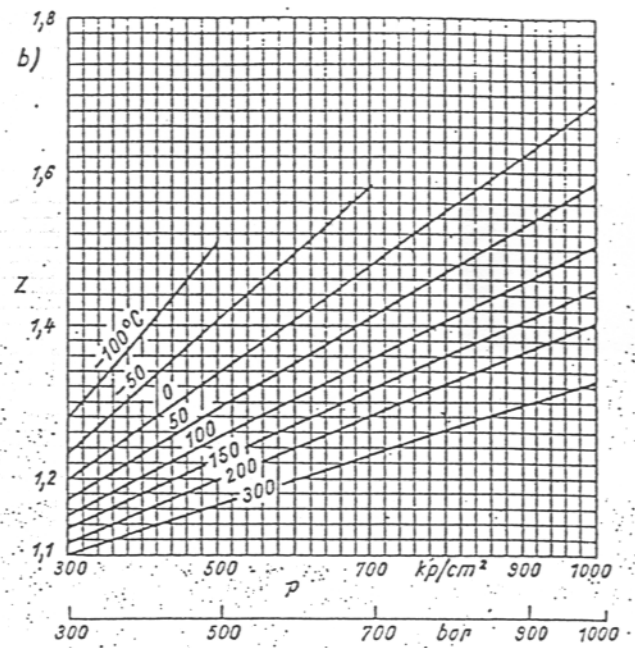
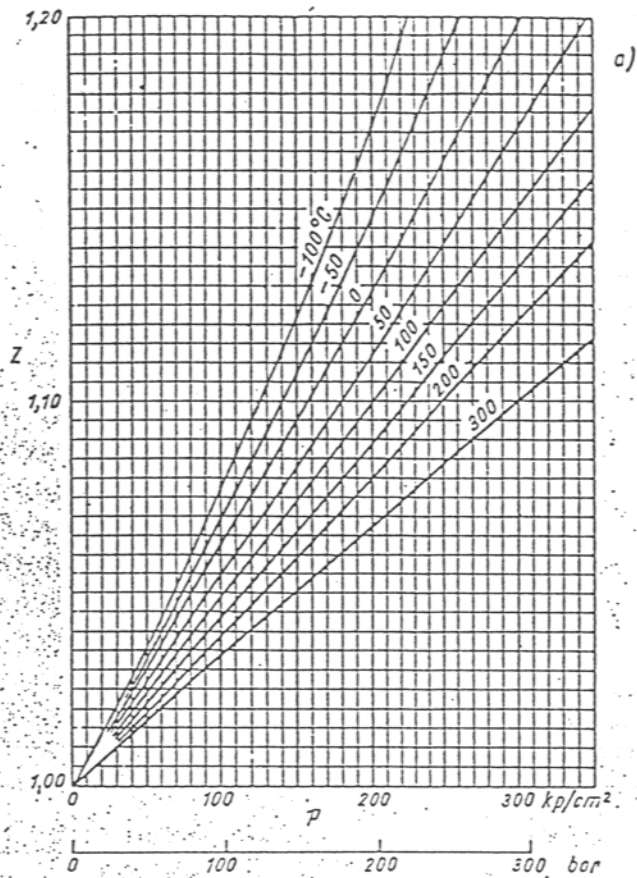
Realgasfaktor Z von Stickoxydul (N_2O)

Z	τ_z
$< 0,6$	$\pm 2,0\%$
$0,6 \text{ bis } 0,8$	$\pm 1,5\%$
$> 0,8$	$\pm 1,0\%$

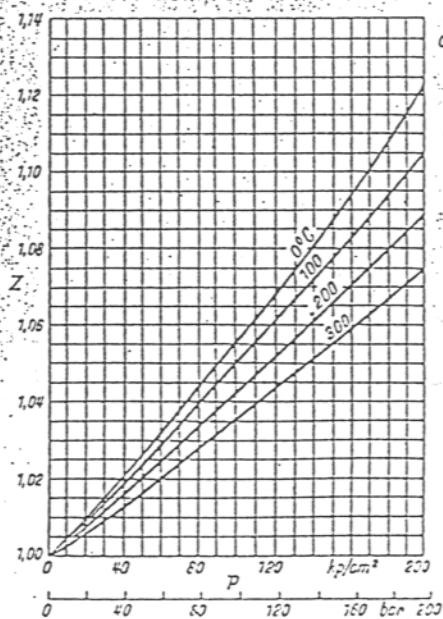


Z	t $^\circ\text{C}$	p kp/cm^2	τ_z
$\leq 0,997$ oder $\geq 1,003$	< 0	alle Werte	$\pm 0,7\%$
	$0 \text{ bis } 100$		$\pm 0,5\%$
$> 0,997$ aber $< 1,003$	< 25 oder > 50	< 10	$\pm 100 (Z - 1)\%$
		> 10	$\pm 0,5\%$
		$25 \text{ bis } 50$	alle Werte $\pm 0,5\%$

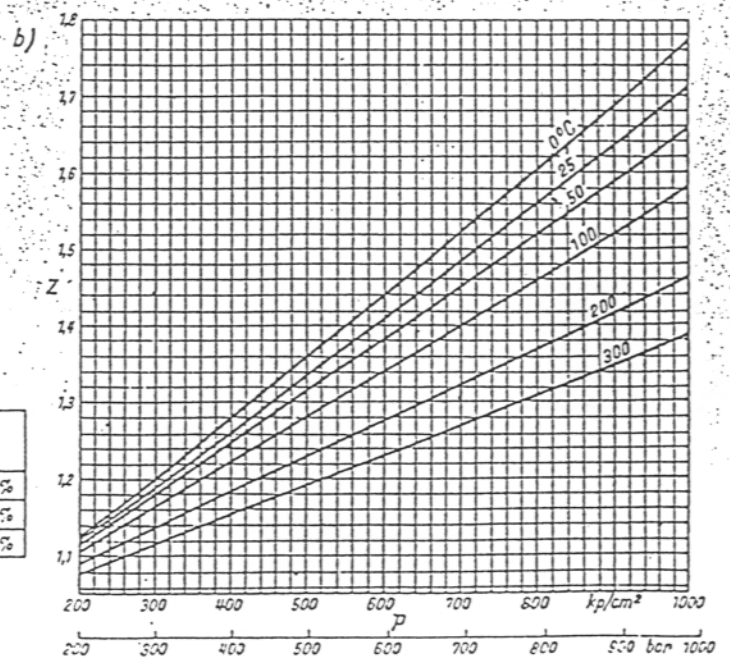
Bild 19. Realgasfaktor Z von Stickstoff (N_2)a) für Drücke von 0 bis 320 kp/cm^2 b) für Drücke von 300 bis 1000 kp/cm^2



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 

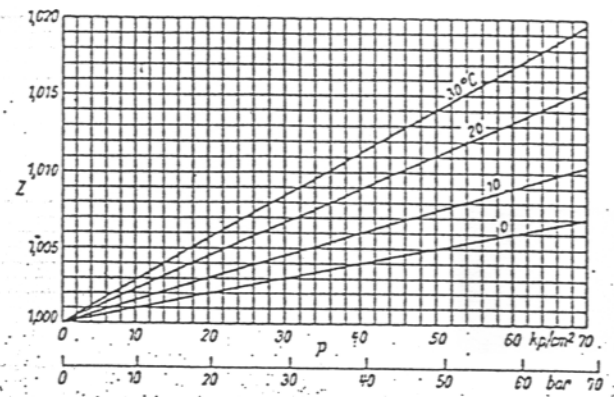
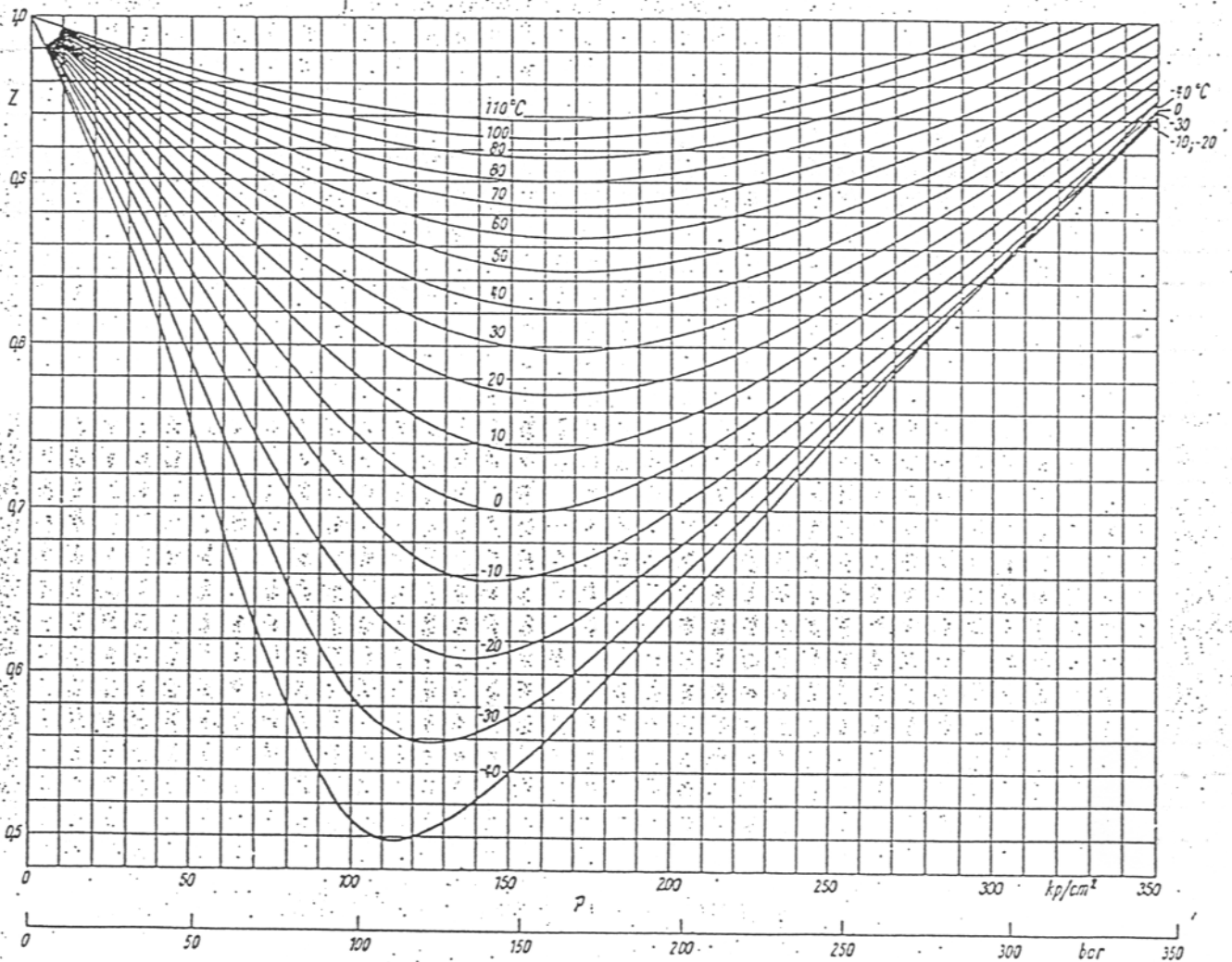


Bild 22. Realgasfaktor Z von Kokereigas

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 Durchflußmessung 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 Beattie u. Bridgeman berechnet.

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

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

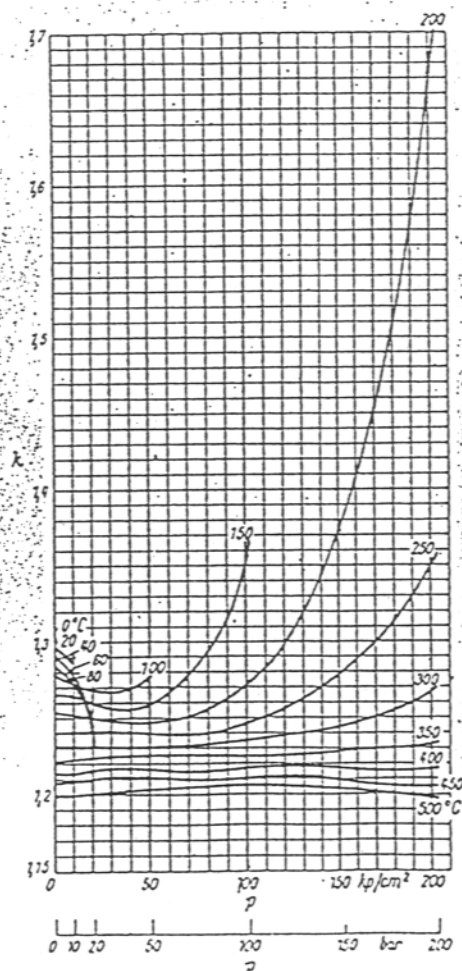


Bild 24. Isentropenexponent κ von Ammoniak (NH_3)

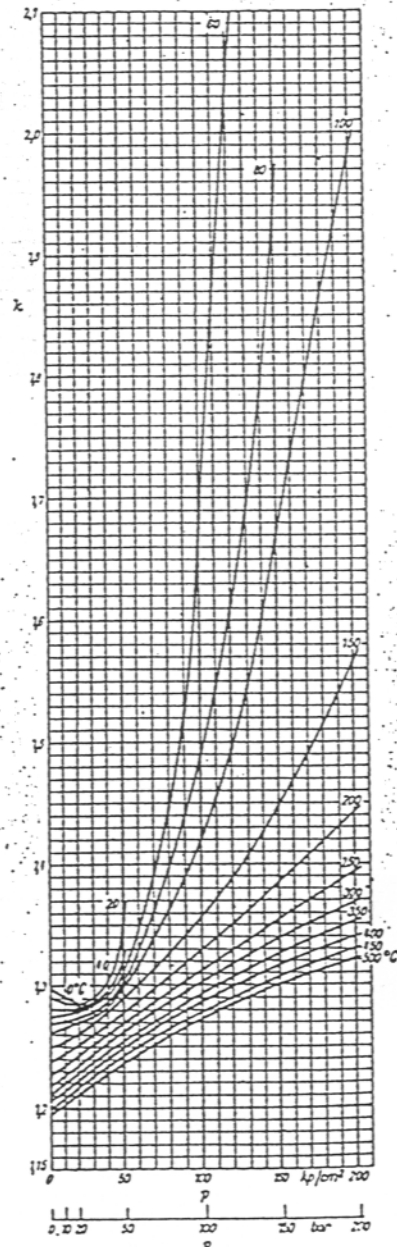
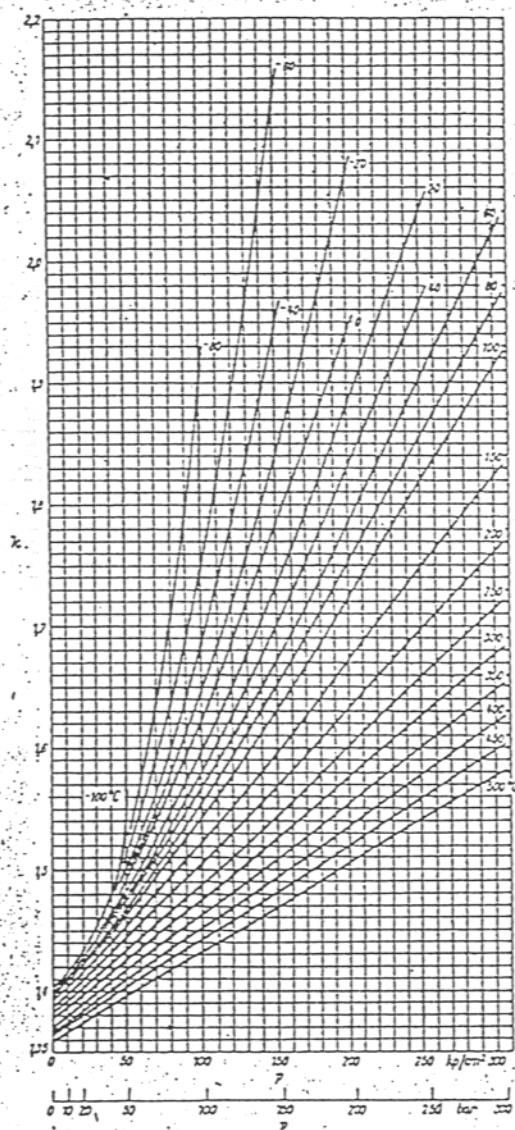
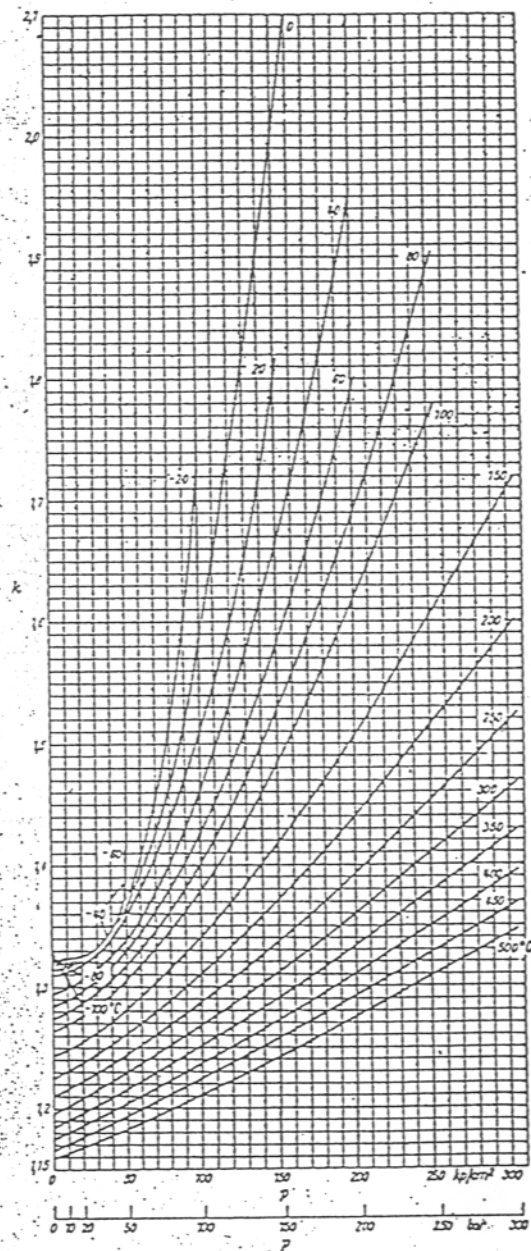
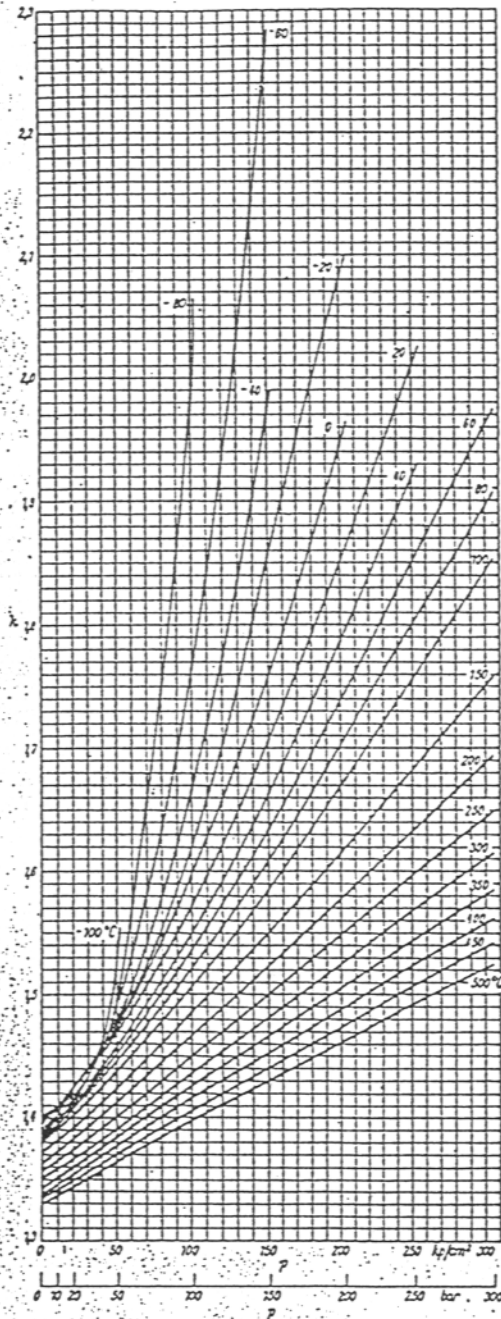
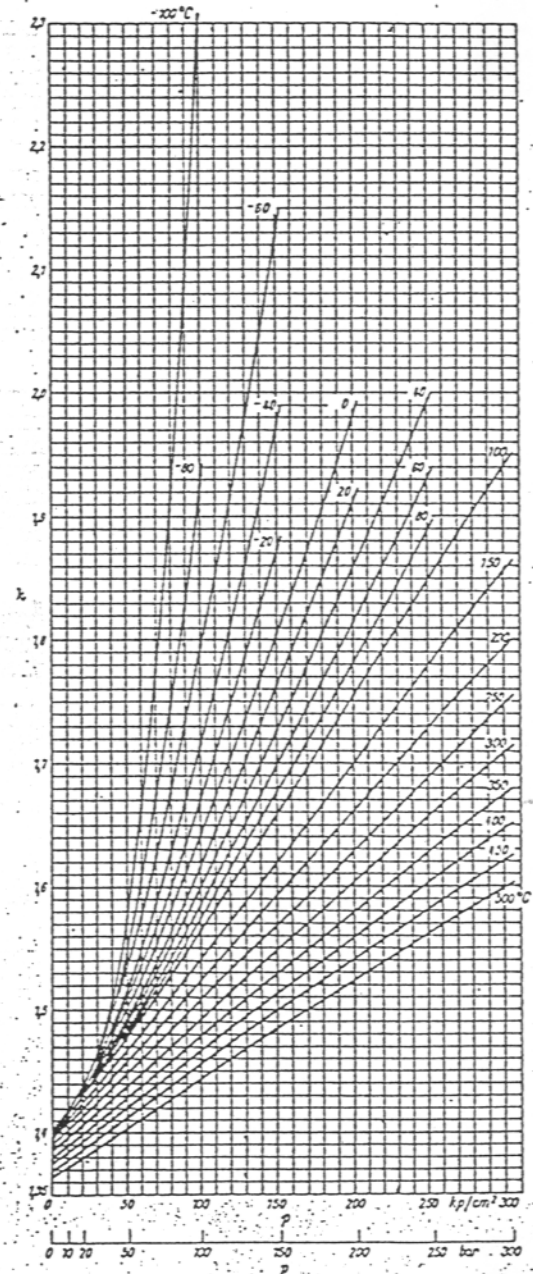


Bild 25. Isentropenexponent κ von Kohlendioxid (CO_2)

Bild 26. Isentropenexponent k von LuftBild 27. Isentropenexponent k von Methan (CH_4)

Bild 28. Isentropenexponent k von Sauerstoff (O_2)Bild 29. Isentropenexponent k von Stickstoff (N_2)

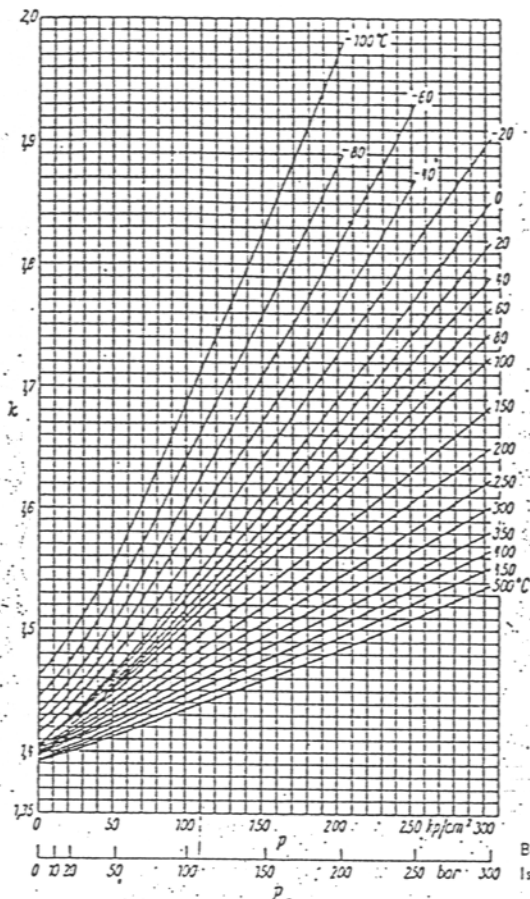


Bild 30a

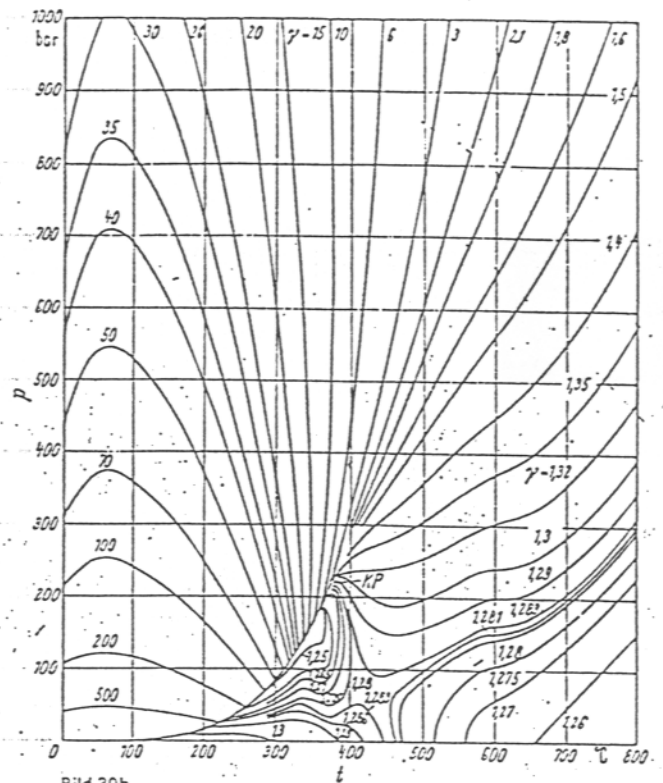
Isentropenexponent k von Wasserstoff (H₂)

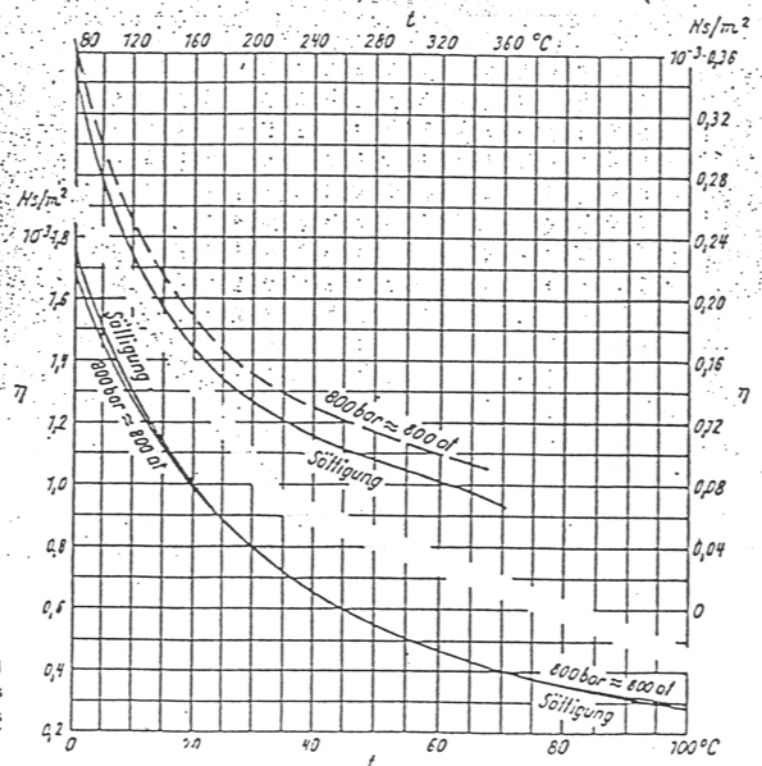
Bild 30b

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



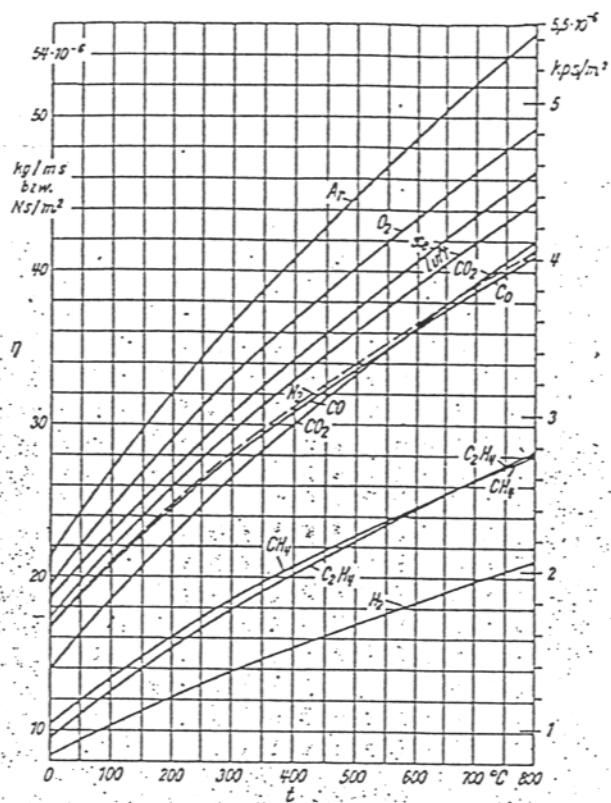


Bild 33. Dynamische Viskosität $\eta(t)$ technischer Gase im druckunabhängigen Bereich, etwa für 1 kp/cm^2 bzw. 1 bar und weniger

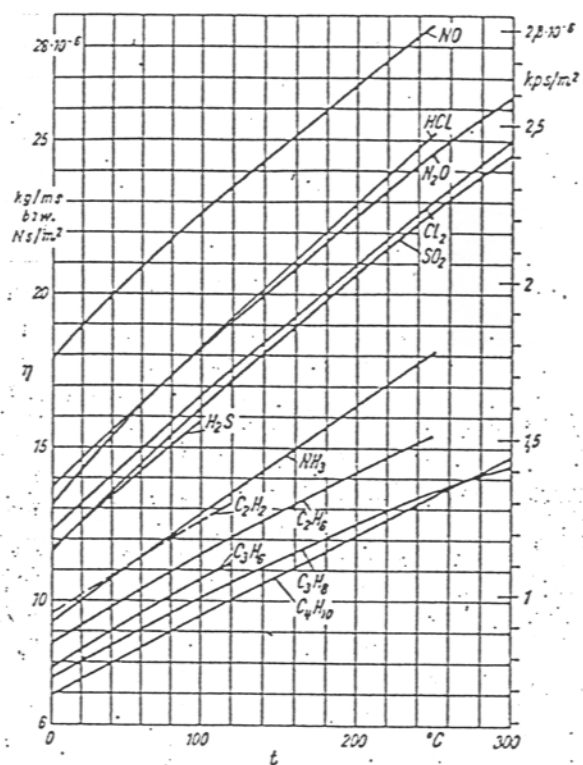


Bild 34. Dynamische Viskosität $\eta(t)$ technischer Gase im druckunabhängigen Bereich, etwa für 1 kp/cm^2 bzw. 1 bar und weniger

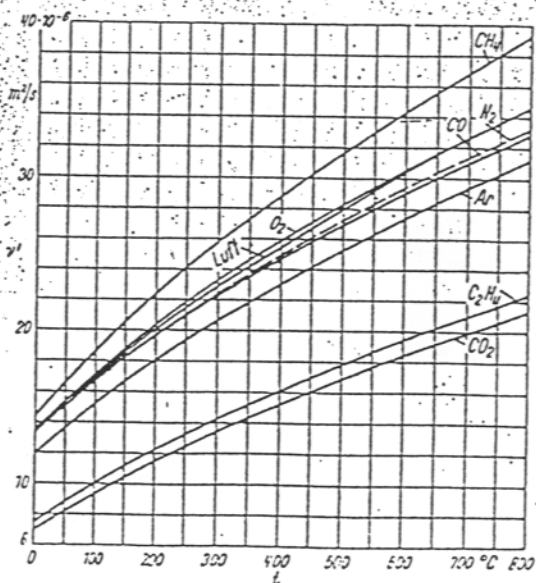
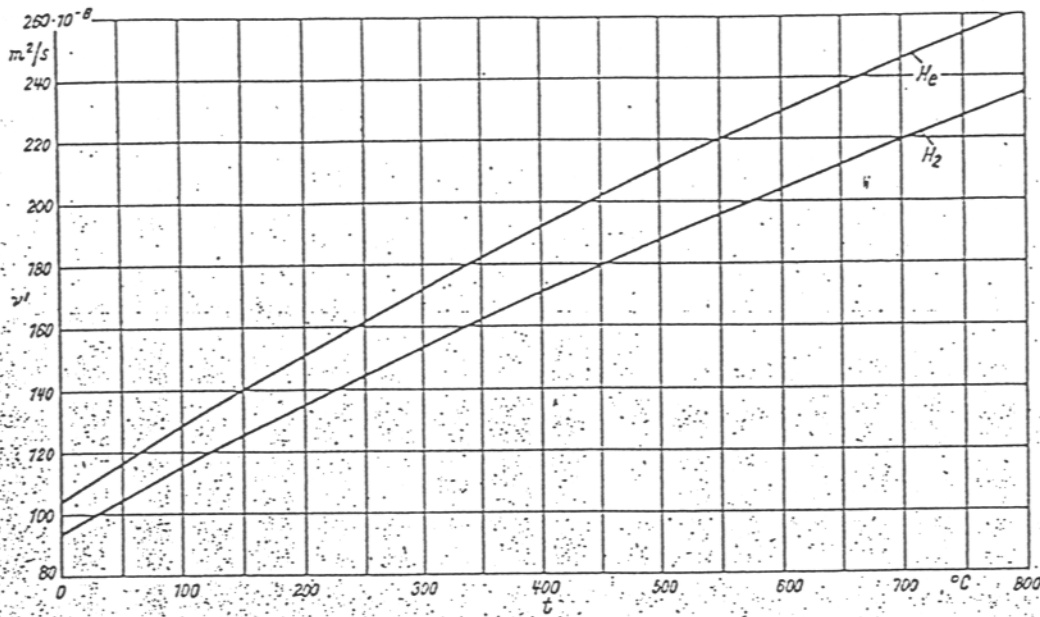
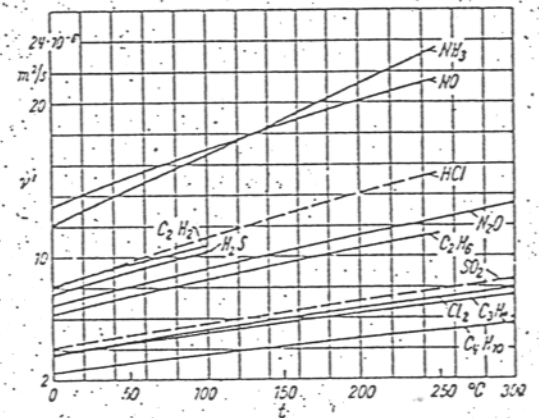
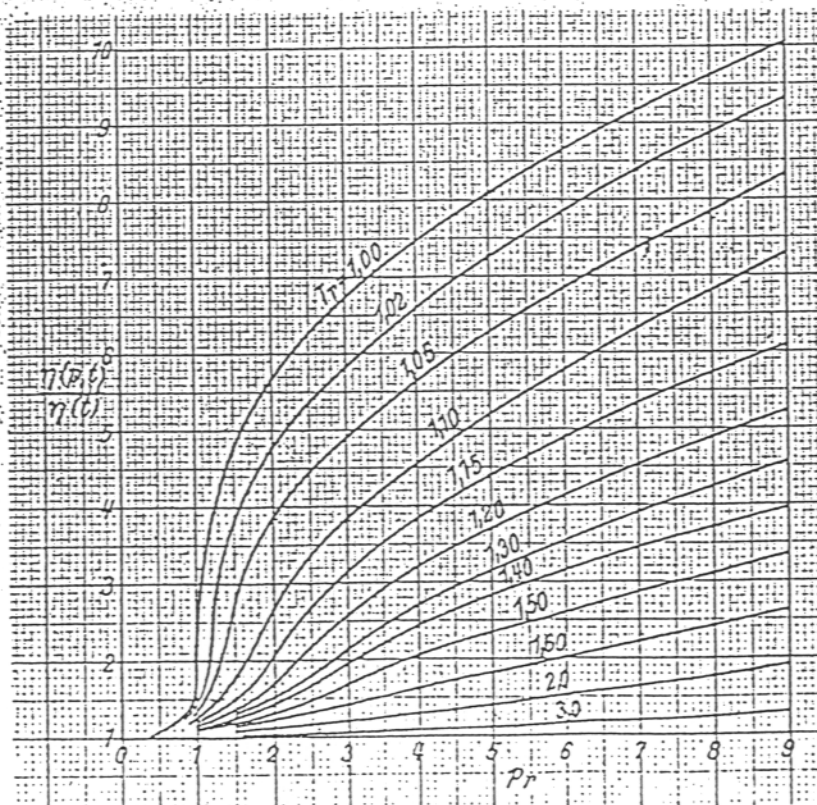


Bild 35. Hilfsgröße ν' für technische Gase

Bild 36. Hilfsgröße η' für technische GaseBild 37
Hilfsgröße η' für technische GaseBild 38
Korrekturfaktor $\eta(p, t)/\eta(t)$
der dynamischen Viskosität η von Gasen
bei hohen Drücken. Reduzierte Darstellung