

kleine Formelsammlung

© 2026 RAGAN ARNOLD

www.ragan-arnold.de
e-mail: ragan-arnold@web.de

Lenzhalde 31
73732 Esslingen
Tel./Fax : 0711 37 57 25

Atelier: Wasenstr.4
73666 Baltmannsweiler-
Hohengehren
mobil : 0176 5040 15 36

Warnung:

Alle Werte, Formeln und Grafiken sind von Hand zusammengetragen, das heißt auch, dass sich immer wieder Fehler einschleichen könnten! Auch mag nicht immer klar sein auf welche Elemente die Bezüge gelten sollen.

Also bitte nur mit Vorsicht und rationalem Misstrauen verwenden und im Zweifel noch einmal recherchieren! (und dann am besten gleich ausbessern!)

Mit ** gekennzeichnete Abschnitte sind ausdrücklich spekulativ und warten noch auf Bestätigung!

© 2026 RAGAN ARNOLD

www.ragan-arnold.de

e-mail: ragan-arnold@web.de

Lenzhalde 31

73732 Esslingen

Tel./Fax : 0711 37 57 25

Atelier: Wasenstr.4

73666 Baltmannsweiler-

Hohengehren

mobil : 0176 5040 15 36

eine kleine

Formelsammlung für ein

Glas - Atelier

eigentlich war das alles nur so als 'Spickzettel' gedacht, das es immer noch sein soll - Motto: „alles, was man sich nicht unbedingt merken muss“ - angefangen mit Rezepten, Zahlenwerte für Öfen oder Faustregeln für dies und das („wenn so, dann so...“). Es hat sich nach und nach eine wilde Anhäufung aus unterschiedlichen Bereichen ergeben, zum Teil ergänzt aus einem reduziertem Schul- und Lexikonwissen, wie amerikanischen Zollmaßen, einfacher und komplizierterer Mathematik, wie die 'geliebten' Logarithmen, etwas Physik und Chemie (aber nur die anorganische...), und hat sich zu einem speziellem Hintergrundwerkzeug entwickelt, um dann im Atelier schnell (naja? bei einem Glas Tee vielleicht) und ohne weitere Hilfsmittel und Lektüre konkrete Werte für anfallende Detailfragen zu bekommen. Es ist aber letztlich auch autobiografischen Umständen geschuldet, denn solche 'Antworten' setzen immer eine Frage, nein, einen Fehler, ein Misslingen (oder der Angst davor) voraus! Und: der Anreiz diese Sammlung immer weiter zu führen, ist auch einfach das Gefühl der Selbstermächtigung für neue Projekte mit unvertrauten Techniken, gerade auch was sicherheits-technische Fragen betrifft und der Neugier des Verstehenswollens.

angloamerikanische Maße	4-f
Mathematik	6-ff
Geometrie, Volumina	10
Physik, Statik	11
Thermodynamik	12-ff
Glas	
Kühlen	15-f
Viskosität	18-f
Kühlkurven	20
Pâte de Verre	21-ff
Metallguss	26
Elektrik, Heizdrähte	27
Gas-Verbrennung	28f
Chemie	31-ff
Glas-Rohstoffe	32-ff
Glas-Zusammensetzung	36-f
Berechnungsmodelle	38-f

Bohrergrößen USA

Size	Hole	D [mm]
#97	.0059	0,15
#96	.0063	0,16
#95	.0067	0,17
#94	.0071	0,18
#93	.0075	0,19
#92	.0079	0,20
#91	.0083	0,21
#90	.0081	0,21
#89	.0091	0,23
#88	.0095	0,24
#87	.0100	0,25
#86	.0105	0,27
#85	.0110	0,28
#84	.0115	0,29
#83	.0120	0,30
#82	.0125	0,32
#81	.0130	0,33
#80	.0135	0,34
#79	.0145	0,37
1/64	.0156	0,40
#78	.0160	0,41
#77	.0180	0,46
#76	.0200	0,51
#75	.0210	0,53
#74	.0225	0,57
#73	.0240	0,61
#72	.0250	0,64
#71	.0260	0,66
#70	.0280	0,71
#69	.0292	0,74
#68	.0310	0,79
1/32	.0312	0,79
#67	.0320	0,81
#66	.0330	0,84
#65	.0350	0,89
#64	.0360	0,91
#63	.0370	0,94
#62	.0380	0,97
#61	.0390	0,99
#60	.0400	1,02
#59	.0410	1,04
#58	.0420	1,07
#57	.0430	1,09
#56	.0465	1,18
3/64	.0469	1,19
#55	.0520	1,32
#54	.0550	1,40
#53	.0595	1,51
1/16	.0625	1,59
#52	.0635	1,61
#51	.0670	1,70
#50	.0700	1,78
#49	.0730	1,85
#48	.0760	1,93
5/64	.0781	1,98
#47	.0785	1,99
#46	.0810	2,06
#45	.0820	2,08
#44	.0860	2,18
#43	.0890	2,26
#42	.0935	2,37
3/32	.0938	2,38
#41	.0960	2,44
#40	.0980	2,49
#39	.0995	2,53

Size	Hole	D [mm]
#38	.1015	2,58
#37	.1040	2,64
#36	.1065	2,71
7/64	.1094	2,78
#35	.1100	2,79
#34	.1110	2,82
#33	.1130	2,87
#32	.1160	2,95
#31	.1200	3,05
#30	.1285	3,26
#29	.1360	3,45
#28	.1405	3,57
9/64	.1406	3,57
#27	.1440	3,66
#26	.1470	3,73
#25	.1495	3,80
#24	.1520	3,86
#23	.1540	3,91
5/32	.1562	3,97
#22	.1570	3,99
#21	.1590	4,04
#20	.1610	4,09
#19	.1660	4,22
#18	.1695	4,31
11/64	.1719	4,37
#17	.1730	4,39
#16	.1770	4,50
#15	.1800	4,57
#14	.1820	4,62
#13	.1850	4,70
3/16	.1875	4,76
#12	.1890	4,80
#11	.1910	4,85
#10	.1935	4,91
#9	.1960	4,98
#8	.1990	5,05
#7	.2010	5,11
13/64	.2031	5,16
#6	.2040	5,18
#5	.2055	5,22
#4	.2090	5,31
#3	.2130	5,41
7/32	.2188	5,56
#2	.2210	5,61
#1	.2280	5,79
#A	.2340	5,94
15/64	.2344	5,95
#B	.2380	6,05
#C	.2420	6,15
#D	.2460	6,25
#E	.2500	6,35
1/4	.2500	6,35
#F	.2570	6,53
#G	.2610	6,63
17/64	.2656	6,75
#H	.2660	6,76
#I	.2720	6,91
#J	.2770	7,04
#K	.2810	7,14
9/32	.2812	7,14
#L	.2900	7,37
#M	.2950	7,49
19/64	.2969	7,54
#N	.3020	7,67
5/16	.3125	7,94

Size	D [mm]
21/64	8,33
11/32	8,73
23/64	9,13
3/ 8	9,53
25/64	9,92
13/32	10,32
27/64	10,72
7/16	11,11
29/64	11,51
15/32	11,91
31/64	12,30
1/ 2	12,70
33/64	13,10
17/32	13,49
35/64	13,89
9/16	14,29
37/64	14,68
19/32	15,08
39/64	15,48
5/ 8	15,88
41/64	16,27
21/32	16,67
43/64	17,07
11/16	17,46
45/64	17,86
23/32	18,26
47/64	18,65
3/ 4	19,05
49/64	19,45
25/32	19,84
51/64	20,24
13/16	20,64
53/64	21,03
27/32	21,43
55/64	21,83
7/ 8	22,23
57/64	22,62
29/32	23,02
59/64	23,42
15/16	23,81
61/64	24,21
31/32	24,61
63/64	25,00
1	25,40
1 1/ 8	28,58
1 1/ 4	31,75
1 3/ 8	34,93
1 1/ 2	38,10
1 5/ 8	41,28
1 3/ 4	44,45
1 7/ 8	47,63
2	50,80
2 1/ 8	53,98
2 1/ 4	57,15
2 3/ 8	60,33
2 1/ 2	63,50
2 5/ 8	66,68
2 3/ 4	69,85
2 7/ 8	73,03
3	76,20
3 1/ 8	79,38
3 1/ 4	82,55
3 3/ 8	85,73
3 1/ 2	88,90
3 5/ 8	92,08

Angloamerikanische Maße

Längen

Einheit	Deutsch	Abk.	Größe	metrische Größe
inch	Zoll	in.	"	0,0254 m
foot	Fuß	ft.	'	12 inch
yard	Schritt	yd.		3 feet
mile	Meile	mi., m.		1760 yard
				1.609,344 m

Flächen

square inch	Quadratzoll	sq.in., in²		0,00064516 m²
square foot	Quadratfuß	sq.ft., ft²	144 in²	0,09290304 m²
square yard	Quadratyard	sq.yd., yd²	9 ft² = 1.296 in²	0,83612736 m²
square mile	Quadratmeile	sq.mi., mi²	3.097.600 yd²	2,5899881 km²

Volumen

cubic inch	Kubikzoll	cu.in.	1 inch³	16,4 cm³
cubic foot	Kubikfuß	cu.ft.	1 foot³ = 1728 inch³	28,3 dm³
perch	Schachtrute		1 perch × 1 ½ feet² = 24¾ feet³	701 dm³
cubic yard		cu.yd.	1 yard³ = 27 feet³ = 46656 inch³	765 dm³
freight ton			40 feet³	1,13 m³
load			50 feet³	1,42 m³
register ton	Registertonne	RT	100 feet³	2,83 m³

Hohlmaße

Amerikanische Flüssigkeitsmaße, US wet

gill		gi.	1/4 pint	1,18 dl
pint	Pint	pt.	1/2 quart	4,73 dl
quart	Quart	qt.	1/4 gallon	9,46 dl
gallon	Gallone	gal.	231 inch³	3,79 l
petrol barrel	Erdölbarrel	bl., bbl.	42 gallon	1,59 hl

Amerikanische Trockenmaße, US dry

pint	Pint	pt.	1/8 gallon	5,51 dl
quart			2 pint	1,10 l
gallon	Gallone	gal.	1/2 peck ≈ 268,8 inch³	4,40 l
peck		pk.	2 gallon = 1/4 bushel	8,81 l
(Winchester) bushel	Scheffel	bsh., bu.	8 inch × π · (9 1/4 inch)²	35,24 l
quarter		qr.	8 bushel	2,82 hl

Gewichte

Handelsgewichte, Avoirdupois

dram	Drachme	dr.	1/16 ounce	1,77 g
ounce, ugs. lid	Unze	oz.	1/16 pound	28,35 g
pound	Pfund	lb., pd., #, lbm.	7000 grain	454,59 g

short Avoirdupois

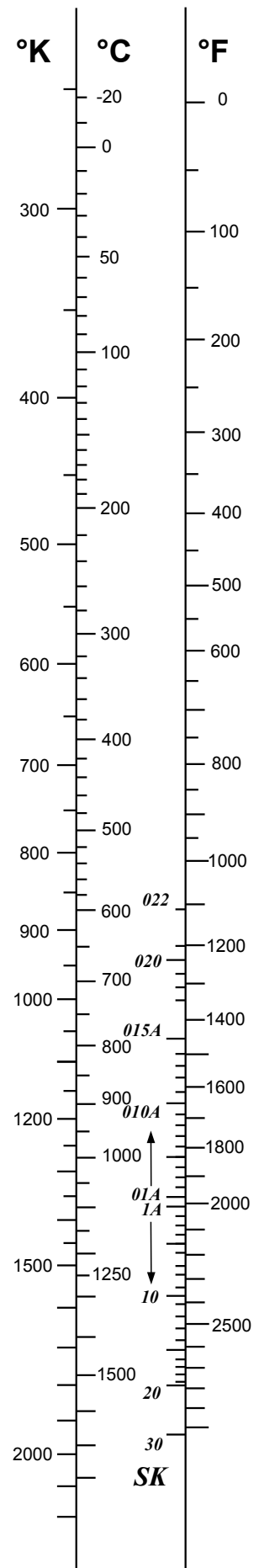
quarter	Viertelzentner		¼ hundredweight	11,339 kg
hundredweight, cental	Zentner	cwt.	100 pound	45,359 kg
ton	Tonne	T., to., t.	20 hundredweight	0,907 t

long Avoirdupois

stone	Stein	st.	14 pound	6,35 kg
quarter	Viertelzentner	qu., qr. l.	2 stone	12,7 kg
hundredweight	Zentner	cwt.	4 quarter	50,8 kg
ton	Tonne	T., to., t.	20 hundredweight	1,02 t

Troy / apothecaries

grain	Gran	gr.	1	0,06480 g
scrupel	Skrupel	s.ap.	20 grain	1,2960 g
pennyweight	Pfenniggewicht	dwt.	24 grain	1,5552 g
dram	Quentchen	dr.ap.	60 grain	3,8879 g
ounce	Feinunze	oz.ap.	480 grain	31,1035 g
pound	Troy-Pfund	lb.ap.	5.760 grain	373,242 g



$$x^{\circ}C = (273,15 + x)^{\circ}K$$

$$x^{\circ}C = \left(\frac{9}{5} \cdot x + 32\right)^{\circ}F$$

$$y^{\circ}F = \left(\frac{5}{9} \cdot (y - 32)\right)^{\circ}C$$

binomische Formeln

$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2 \cdot a \cdot b + b^2$$

$$a^2 - b^2 = (a + b)(a - b) \quad a^3 - b^3 = (a - b)(a^2 + ab + b^2)$$

$$(a \pm b)^3 = a^3 \pm 3 \cdot a^2 \cdot b + 3 \cdot a \cdot b^2 \pm b^3$$

$$a^3 + b^3 = (a + b)(a^2 - ab + b^2)$$

$$(a \pm b)^4 = a^4 \pm 4 \cdot a^3 \cdot b + 6 \cdot a^2 \cdot b^2 \pm 4 \cdot a \cdot b^3 + b^4$$

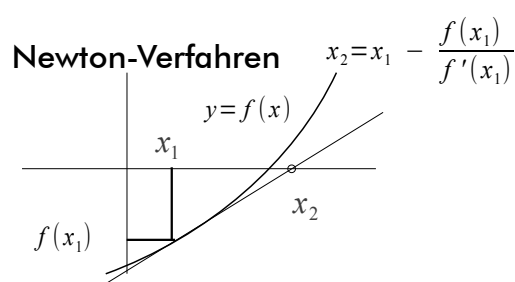
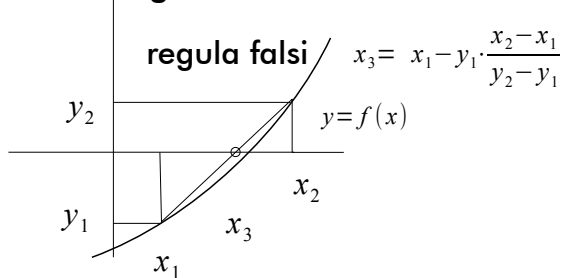
$$a^n - b^n = (a - b)(a^{n-1} + a^{n-2}b + \dots + ab^{n-2} + b^{n-1})$$

$$(a \pm b)^5 = a^5 \pm 5 \cdot a^4 \cdot b + 10 \cdot a^3 \cdot b^2 \pm 10 \cdot a^2 \cdot b^3 + 5 \cdot a \cdot b^4 \pm b^5$$

$$a^{2n+1} + b^{2n+1} = (a + b)(a^{2n} - a^{2n-1}b + \dots - ab^{2n-1} + b^{2n})$$

$$a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0 \quad \rightarrow \quad x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

Näherungsverfahren



iteratives Radizieren

$$x^2 - R = 0$$

$$x_{n+1} = \frac{1}{2} \cdot \left(x_n + \frac{R}{x_n} \right) = x_n + \frac{(R - x_n^2)}{2 \cdot x_n}$$

$$x^3 - R = 0$$

$$x_{n+1} = \frac{1}{3} \cdot \left(2 \cdot x_n + \frac{R}{x_n^2} \right) = x_n + \frac{(R - x_n^3)}{3 \cdot x_n^2}$$

Interpolationen

reziprok:

$$y = a + \frac{b}{(x - c)}$$

$$\begin{matrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{matrix}$$

$$d = \frac{(y_1 - y_2) \cdot (x_3 - x_2)}{(x_2 - x_1) \cdot (y_2 - y_3)} \quad c = \frac{(d \cdot x_1 - x_3)}{(d - 1)}$$

$$b = \frac{(y_1 - y_2) \cdot (x_1 - c) \cdot (x_2 - c)}{(x_2 - x_1)}$$

$$a = y_1 - \frac{b}{(x_1 - c)}$$

polynome Regression:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n$$

mit $n+1$ Stützpunkte $P_i(x_i | y_i)$:

$$a_0 = y_1 - a_1 x_1 - a_2 x_1^2 - a_3 x_1^3 - a_4 x_1^4 - \dots$$

$$a_1 = A_{1/2} - a_2(x_1 + x_2) - a_3(x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2) - a_4 \frac{(x_1^4 - x_2^4)}{(x_1 - x_2)} - \dots$$

$$a_2 = B_{1/3} - a_3(x_1 + x_2 + x_3) - a_4(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3)$$

$$a_3 = C_{1/4} - a_4(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)$$

$$a_4 = D_{1/5}$$

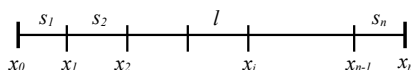
$$A_{1/2} = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}$$

$$B_{1/3} = \frac{A_{1/2} - A_{2/3}}{x_1 - x_3}$$

$$C_{1/4} = \frac{B_{1/3} - B_{2/4}}{x_1 - x_4}$$

$$D_{1/5} = \frac{C_{1/4} - C_{2/5}}{x_1 - x_5}$$

Teilung einer Strecke



$$x_0 = 0 \quad x_n = l \quad s_i = x_i - x_{i-1} \quad \sum_{i=1}^n s_i = l$$

linear: $x_i = l \cdot \frac{i}{n}$

binär: $x_i = l \cdot 2^{\frac{i-1}{2m}}$

proport.: $x_i = s_1 \cdot \left(\frac{l}{s_1} \right)^{\frac{i-1}{n-1}}$

exponentiell: $x_i = l \cdot n^{\frac{i-n}{n}} \quad i = 1 \dots n$

Mittelwerte

harmonisches M.

$$\frac{n}{\sum \frac{1}{a_i}}$$

geometr. M

$$\sqrt[n]{a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n}$$

arithmet. M.

$$\frac{\sum a_i}{n}$$

quadrat. M

$$\sqrt{\frac{\sum a_i^2}{n}}$$

iterierte Mittelwertbildung (zur numerischen Integration)

$$M_1 = \frac{1}{2} \cdot (y_0 + y_1)$$

$$\rightarrow N_1 = \frac{1}{3} \cdot (4 \cdot M_2 - M_1) \rightarrow O_1 = \frac{1}{4^2 - 1} \cdot (4^2 \cdot N_2 - N_1) \rightarrow P = \frac{1}{4^3 - 1} \cdot (4^3 \cdot O_2 - O_1)$$

$$M_2 = \frac{1}{2} \cdot (M_1 + y_{1/2})$$

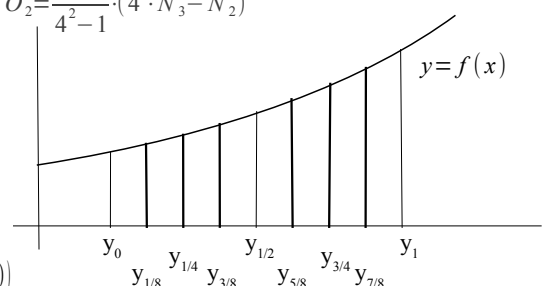
$$N_2 = \frac{1}{3} \cdot (4 \cdot M_3 - M_2)$$

$$O_2 = \frac{1}{4^2 - 1} \cdot (4^2 \cdot N_3 - N_2)$$

$$M_3 = \frac{1}{2} \cdot \left(M_2 + \frac{y_{1/4} + y_{3/4}}{2} \right)$$

$$N_3 = \frac{1}{3} \cdot (4 \cdot M_4 - M_3)$$

$$M_4 = \frac{1}{2} \cdot \left(M_3 + \frac{y_{1/8} + y_{3/8} + y_{5/8} + y_{7/8}}{4} \right)$$



Simpsonsche Regel: $n=2 \cdot m$; $m \in \mathbb{Z}$

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{(b-a)}{3n} \cdot (y_0 + y_n + 2 \cdot (y_1 + y_3 + \dots + y_{n-1}) + 4 \cdot (y_2 + y_4 + \dots + y_{n-2}))$$

Analysis

Differentiale:

$$f'(a) = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{(x - a)} = \frac{\partial f}{\partial x}$$

$$(u \pm v)' = u' \pm v', \quad (Cf(x))' = Cf'(x), \quad (uv)' = u'v + uv', \quad \left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$$

$$(f(\varphi(x)))' = f'(\varphi(x)) \varphi'(x), \quad (f(\varphi(x)))'' = f'(\varphi(x)) \varphi''(x) + f''(\varphi(x))(\varphi'(x))^2$$

$f(x)$	$f'(x)$	$f(x)$	$f'(x)$	$f(x)$	$f'(x)$
C	0	$\sin x$	$\cos x$	$\arcsin x$	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
ax	a	$\cos x$	$-\sin x$	$\arccos x$	$-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
x^n	$n x^{(n-1)}$	$\tan x$	$\frac{1}{\cos^2 x}$	$\arctan x$	$\frac{1}{1+x^2}$
$\sqrt{ax+b}$	$\frac{a}{2\sqrt{ax+b}}$	$\cot x$	$-\frac{1}{\sin^2 x}$	$\operatorname{arccot} x$	$-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
a^x	$a^x \ln a$				
$\log_a x$	$\frac{1}{x \ln a}$				

Integrale:

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_a^b f(x_i) \cdot \Delta x = (b-a) \cdot f(\xi) \quad \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a), \quad F'(x) = f(x)$$

$$\int (u \pm v) dx = \int u dx \pm \int v dx, \quad \int C f(x) dx = C \int f(x) dx$$

$$\int x^n dx = \frac{1}{n+1} x^{(n+1)} \quad |n \neq -1$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x|$$

$$\int \frac{f'(x)}{f(x)} dx = \ln|f(x)|$$

$$\int a^x dx = \frac{1}{\ln a} a^x \quad |0 < a \neq 1$$

$$\int x^n e^{ax} dx = \frac{1}{a} x^n e^{ax} - \frac{n}{a} \int x^{n-1} e^{ax} dx \quad |a \neq 0$$

$$\int \ln x dx = x \ln x - x$$

$$\int \frac{\ln x}{x} dx = \frac{1}{2} (\ln x)^2$$

$$\int x^n \ln ax dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \left(\ln ax - \frac{1}{n+1} \right) \quad |n \neq -1$$

$$\int \frac{dx}{x-a} = \ln|x-a|$$

$$\int \frac{dx}{(x-a)(x-b)} = \frac{1}{a-b} \ln \left| \frac{x-a}{x-b} \right| \quad |a \neq b$$

$$\int \frac{dx}{(x-a)^n} = -\frac{1}{(n-1)(x-a)^{n-1}} \quad |n \neq 1$$

$$\int \frac{dx}{x^2 - a^2} = -\frac{1}{2a} \ln \frac{x-a}{x+a} \quad | |x| > |a|$$

$$\int \frac{dx}{a^2 - x^2} = -\frac{1}{2a} \ln \frac{a+x}{a-x} \quad | |x| < |a|$$

$$\int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \arctan \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{x dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{2} \ln(x^2 + a^2)$$

$$\int \sqrt{ax+b} dx = \frac{2}{3a} \sqrt{(ax+b)^3}$$

$$\int \sqrt{a^2 - x^2} dx = \frac{x}{2} \sqrt{a^2 - x^2} + \frac{a^2}{2} \arcsin \frac{x}{a}$$

$$\int \sqrt{a^2 + x^2} dx = \frac{x}{2} \sqrt{a^2 + x^2} + \frac{a^2}{2} \ln \left(\frac{x}{a} + \sqrt{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + 1} \right)$$

$$\int \sqrt{x^2 - a^2} dx = \frac{x}{2} \sqrt{x^2 - a^2} + \frac{a^2}{2} \ln \left(\frac{x}{a} + \sqrt{\left(\frac{x}{a}\right)^2 - 1} \right)$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{ax+b}} = \frac{2}{a} \sqrt{ax+b}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \arcsin \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 - a^2}} = \ln |x + \sqrt{x^2 - a^2}|$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \ln |x + \sqrt{x^2 + a^2}|$$

$$\int \sin(nx) dx = -\frac{1}{n} \cos(nx)$$

$$\int \cos(nx) dx = \frac{1}{n} \sin(nx)$$

$$\int \tan(nx) dx = -\frac{1}{n} \ln |\cos(nx)|$$

$$\int \cot(nx) dx = \frac{1}{n} \ln |\sin(nx)|$$

Logarithmen

$$a^x = e^{\ln a \cdot x} = 10^{\lg a \cdot x} \quad \lg a^n = n \cdot \lg a \quad \lg \sqrt[m]{a} = \frac{1}{m} \cdot \lg a \quad \lg(a \cdot b) = \lg a + \lg b \quad \lg\left(\frac{1}{a}\right) = -\lg a$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1000		.0004341	.0008677	.001301	.001734	.002166	.002598	.003029	.003461	.003891
1010	.004321	.004751	.005181	.005609	.006038	.006466	.006894	.007321	.007748	.008174
1020	.008600	.009026	.009451	.009876	.01030	.01072	.01115	.01157	.01199	.01242
1030	.01284	.01326	.01368	.01410	.01452	.01494	.01536	.01578	.01620	.01662
1040	.01703	.01745	.01787	.01828	.01870	.01912	.01953	.01995	.02036	.02078
1050	.02119	.02160	.02202	.02243	.02284	.02325	.02366	.02407	.02449	.02490
1060	.02531	.02572	.02612	.02653	.02694	.02735	.02776	.02816	.02857	.02898
1070	.02938	.02979	.03019	.03060	.03100	.03141	.03181	.03222	.03262	.03302
1080	.03342	.03383	.03423	.03463	.03503	.03543	.03583	.03623	.03663	.03703
1090	.03743	.03782	.03822	.03862	.03902	.03941	.03981	.04021	.04060	.04100
110	.04139	.04532	.04922	.05308	.05690	.06070	.06446	.06819	.07188	.07555
120	.07918	.08279	.08636	.08991	.09342	.09691	.10037	.10380	.10721	.11059
130	.1139	.1173	.1206	.1239	.1271	.1303	.1335	.1367	.1399	.1430
140	.1461	.1492	.1523	.1553	.1584	.1614	.1644	.1673	.1703	.1732
150	.1761	.1790	.1818	.1847	.1875	.1903	.1931	.1959	.1987	.2014
160	.2041	.2068	.2095	.2122	.2148	.2175	.2201	.2227	.2253	.2279
170	.2304	.2330	.2355	.2380	.2405	.2430	.2455	.2480	.2504	.2529
180	.2553	.2577	.2601	.2625	.2648	.2672	.2695	.2718	.2742	.2765
190	.2788	.2810	.2833	.2856	.2878	.2900	.2923	.2945	.2967	.2989
200	.3010	.3032	.3054	.3075	.3096	.3118	.3139	.3160	.3181	.3201
210	.3222	.3243	.3263	.3284	.3304	.3324	.3345	.3365	.3385	.3404
220	.3424	.3444	.3464	.3483	.3502	.3522	.3541	.3560	.3579	.3598
230	.3617	.3636	.3655	.3674	.3692	.3711	.3729	.3747	.3766	.3784
240	.3802	.3820	.3838	.3856	.3874	.3892	.3909	.3927	.3945	.3962
250	.3979	.3997	.4014	.4031	.4048	.4065	.4082	.4099	.4116	.4133
260	.4150	.4166	.4183	.4200	.4216	.4232	.4249	.4265	.4281	.4298
270	.4314	.4330	.4346	.4362	.4378	.4393	.4409	.4425	.4440	.4456
280	.4472	.4487	.4502	.4518	.4533	.4548	.4564	.4579	.4594	.4609
290	.4624	.4639	.4654	.4669	.4683	.4698	.4713	.4728	.4742	.4757
300	.4771	.4786	.4800	.4814	.4829	.4843	.4857	.4871	.4886	.4900
310	.4914	.4928	.4942	.4955	.4969	.4983	.4997	.5011	.5024	.5038
320	.5051	.5065	.5079	.5092	.5105	.5119	.5132	.5145	.5159	.5172
330	.5185	.5198	.5211	.5224	.5237	.5250	.5263	.5276	.5289	.5302
340	.5315	.5328	.5340	.5353	.5366	.5378	.5391	.5403	.5416	.5428
350	.5441	.5453	.5465	.5478	.5490	.5502	.5514	.5527	.5539	.5551
360	.5563	.5575	.5587	.5599	.5611	.5623	.5635	.5647	.5658	.5670
370	.5682	.5694	.5705	.5717	.5729	.5740	.5752	.5763	.5775	.5786
380	.5798	.5809	.5821	.5832	.5843	.5855	.5866	.5877	.5888	.5899
390	.5911	.5922	.5933	.5944	.5955	.5966	.5977	.5988	.5999	.6010
400	.6021	.6031	.6042	.6053	.6064	.6075	.6085	.6096	.6107	.6117
410	.6128	.6138	.6149	.6160	.6170	.6180	.6191	.6201	.6212	.6222
420	.6232	.6243	.6253	.6263	.6274	.6284	.6294	.6304	.6314	.6325
430	.6335	.6345	.6355	.6365	.6375	.6385	.6395	.6405	.6415	.6425
440	.6435	.6444	.6454	.6464	.6474	.6484	.6493	.6503	.6513	.6522
450	.6532	.6542	.6551	.6561	.6571	.6580	.6590	.6599	.6609	.6618
460	.6628	.6637	.6646	.6656	.6665	.6675	.6684	.6693	.6702	.6712
470	.6721	.6730	.6739	.6749	.6758	.6767	.6776	.6785	.6794	.6803
480	.6812	.6821	.6830	.6839	.6848	.6857	.6866	.6875	.6884	.6893
490	.6902	.6911	.6920	.6928	.6937	.6946	.6955	.6964	.6972	.6981
50	.6990	.7076	.7160	.7243	.7324	.7404	.7482	.7559	.7634	.7709
60	.7782	.7853	.7924	.7993	.8062	.8129	.8195	.8261	.8325	.8388
70	.8451	.8513	.8573	.8633	.8692	.8751	.8808	.8865	.8921	.8976
80	.9031	.9085	.9138	.9191	.9243	.9294	.9345	.9395	.9445	.9494
90	.9542	.9590	.9638	.9685	.9731	.9777	.9823	.9868	.9912	.9956

$$\begin{array}{l} \lg \pi \quad 0.4971 \\ \lg e \quad 0.9919 \end{array} \quad \ln a = \frac{\lg a}{\lg e} \quad \begin{array}{l} \lg e \quad 0.4343 \\ \lg((\lg e)^{-1}) \quad 0.3622 \end{array} \quad \lg a = \frac{\lg a}{\lg 2} \quad \lg((\lg 2)^{-1}) \quad 0.5214$$

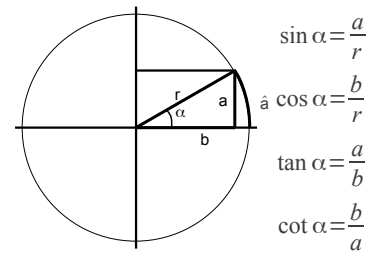
Winkelfunktionen

$$\alpha[\text{rad}] = \frac{\hat{a}}{r} = \frac{\alpha[^\circ]}{360^\circ} \cdot 2\pi$$

$$\alpha[^\circ] = 360^\circ \cdot \frac{\hat{a}}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$\begin{aligned} 1^\circ &= 0,0174533 \\ 1' &= 0,0002909 \\ 1'' &= 0,0000048 \\ 1' &= 57^\circ 17' 44'' \\ 0,1' &= 5^\circ 43' 46'' \\ 0,01' &= 0^\circ 34' 22'' \\ 0,01' &= 0^\circ 03' 26'' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f &\leq 1\text{‰} \\ \sin x &\approx x; |x| \leq 0,077 \\ \cos x &\approx 1 - \frac{x^2}{2}; |x| \leq 0,386 \\ \tan x &\approx x; |x| \leq 0,054 \end{aligned}$$



$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

$$\tan \alpha \cdot \cot \alpha = 1$$

$$\sin \alpha = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \frac{\tan \alpha}{\pm \sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}$$

$$\cos \alpha = \pm \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \frac{1}{\pm \sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}$$

$$\tan \alpha = \frac{1}{\cot \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

$$\begin{aligned} \sin(\alpha \pm \beta) &= \sin \alpha \cdot \cos \beta \pm \cos \alpha \cdot \sin \beta \\ \cos(\alpha \pm \beta) &= \cos \alpha \cdot \cos \beta \mp \sin \alpha \cdot \sin \beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin(2\alpha) &= 2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \\ \cos(2\alpha) &= \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{aligned}$$

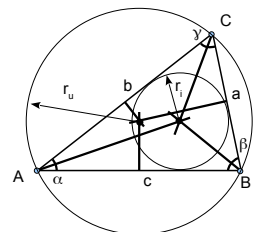
$$\tan(2\alpha) = \frac{2 \cdot \tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha}$$

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{2}}$$

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{2}}$$

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{1 + \cos \alpha}}$$

allgemeines Dreieck:



$$\cos \alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot c}$$

$$U = a + b + c \quad s = \frac{U}{2}$$

$$A = \frac{a \cdot b}{2} \cdot \sin \gamma = \frac{a \cdot b \cdot c}{4 \cdot r_u} = r_i \cdot s$$

$$r_u = \frac{a}{2 \sin \alpha} = \frac{a \cdot b \cdot c}{4 \cdot r_i \cdot s}$$

$$r_i = \sqrt{\frac{(s-a) \cdot (s-b) \cdot (s-c)}{s}}$$

$$S(x_s | y_s):$$

$$x_s = 1/3 \cdot (x_1 + x_2 + x_3)$$

$$y_s = 1/3 \cdot (y_1 + y_2 + y_3)$$

$$A = 1/2 \cdot \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} 2 \cdot A &= x_1 y_2 + y_1 x_3 + x_2 y_3 \\ &\quad - y_2 x_3 - y_1 x_2 - x_1 y_3 \end{aligned}$$

°	rad	sin	cos	tan	cot	1,57080	90°
1°	0,01745	0,01745	0,99985	0,01746	57,28996	1,55334	89°
2°	0,03491	0,03490	0,99939	0,03492	28,63625	1,53589	88°
3°	0,05236	0,05234	0,99863	0,05241	19,08114	1,51844	87°
4°	0,06981	0,06976	0,99756	0,06993	14,30067	1,50098	86°
5°	0,08727	0,08716	0,99619	0,08749	11,43005	1,48353	85°
6°	0,10472	0,10453	0,99452	0,10510	9,51436	1,46608	84°
7°	0,12217	0,12187	0,99255	0,12278	8,14435	1,44862	83°
8°	0,13963	0,13917	0,99027	0,14054	7,11537	1,43117	82°
9°	0,15708	0,15643	0,98769	0,15838	6,31375	1,41372	81°
10°	0,17453	0,17365	0,98481	0,17633	5,67128	1,39626	80°
11°	0,19199	0,19081	0,98163	0,19438	5,14455	1,37881	79°
12°	0,20944	0,20791	0,97815	0,21256	4,70463	1,36136	78°
13°	0,22689	0,22495	0,97437	0,23087	4,33148	1,34390	77°
14°	0,24435	0,24192	0,97030	0,24933	4,01078	1,32645	76°
15°	0,26180	0,25882	0,96593	0,26795	3,73205	1,30900	75°
16°	0,27925	0,27564	0,96126	0,28675	3,48741	1,29154	74°
17°	0,29671	0,29237	0,95630	0,30573	3,27085	1,27409	73°
18°	0,31416	0,30902	0,95106	0,32492	3,07768	1,25664	72°
19°	0,33161	0,32557	0,94552	0,34433	2,90421	1,23918	71°
20°	0,34907	0,34202	0,93969	0,36397	2,74748	1,22173	70°
21°	0,36652	0,35837	0,93358	0,38386	2,60509	1,20428	69°
22°	0,38397	0,37461	0,92718	0,40403	2,47509	1,18682	68°
23°	0,40143	0,39073	0,92050	0,42447	2,35585	1,16937	67°
24°	0,41888	0,40674	0,91355	0,44523	2,24604	1,15192	66°
25°	0,43633	0,42262	0,90631	0,46631	2,14451	1,13446	65°
26°	0,45379	0,43837	0,89879	0,48773	2,05030	1,11701	64°
27°	0,47124	0,45399	0,89101	0,50953	1,96261	1,09956	63°
28°	0,48869	0,46947	0,88295	0,53171	1,88073	1,08210	62°
29°	0,50615	0,48481	0,87462	0,55431	1,80405	1,06465	61°
30°	0,52360	0,50000	0,86603	0,57735	1,73205	1,04720	60°
31°	0,54105	0,51504	0,85717	0,60086	1,66428	1,02974	59°
32°	0,55851	0,52992	0,84805	0,62487	1,60033	1,01229	58°
33°	0,57596	0,54464	0,83867	0,64941	1,53986	0,99484	57°
34°	0,59341	0,55919	0,82904	0,67451	1,48256	0,97738	56°
35°	0,61087	0,57358	0,81915	0,70021	1,42815	0,95993	55°
36°	0,62832	0,58779	0,80902	0,72654	1,37638	0,94248	54°
37°	0,64577	0,60182	0,79864	0,75355	1,32704	0,92502	53°
38°	0,66323	0,61566	0,78801	0,78129	1,27994	0,90757	52°
39°	0,68068	0,62932	0,77715	0,80978	1,23490	0,89012	51°
40°	0,69813	0,64279	0,76604	0,83910	1,19175	0,87266	50°
41°	0,71558	0,65606	0,75471	0,86929	1,15037	0,85521	49°
42°	0,73304	0,66913	0,74314	0,90040	1,11061	0,83776	48°
43°	0,75049	0,68200	0,73135	0,93252	1,07237	0,82030	47°
44°	0,76794	0,69466	0,71934	0,96569	1,03553	0,80285	46°
45°	0,78540	0,70711	0,70711	1,00000	1,00000	0,78540	45°
		cos	sin	cot	tan	rad	°

Geometrie

Pyramide

$$V = \frac{1}{3} \cdot h \cdot A_G$$

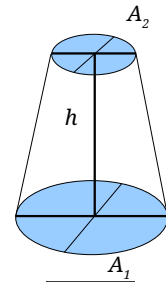
Pyramidenstumpf

$$V = \frac{1}{3} \cdot h \cdot (A_1 + \sqrt{A_1 \cdot A_2} + A_2)$$

Kegelstumpf

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot h \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2)$$

$$M = \pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot \sqrt{h^2 + (r_2 - r_1)^2}$$

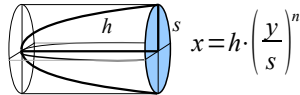


Rotationskörper (einer Kurve um die x-Achse)

$$V = \pi \cdot \int_{x_0}^{x_1} y^2 dx$$

$$M_x = 2\pi \cdot \int_{x_0}^{x_1} y \cdot \sqrt{1 + y'^2} dx$$

Rotationsparaboloid



$$x = h \cdot \left(\frac{y}{s}\right)^n$$

$$V = \frac{n}{2+n} \cdot \pi \cdot h \cdot s^2$$

Krümmungsradius

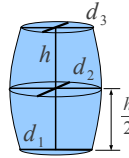
einer Kurve im Punkt $(x_1 | f(x_1))$

$$R = \left| \frac{(1 + f'(x_1)^2)^{\frac{3}{2}}}{f''(x_1)} \right|$$

Keplersche Fassregel

(vgl. S6: iterierte Mittelwertbildung)

$$V \approx \frac{\pi}{24} \cdot h \cdot (d_1^2 + 4d_2^2 + d_3^2)$$

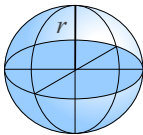


Bogenlänge

eines Kurvenstücks $y = f(x)$

$$S = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)^2} dx$$

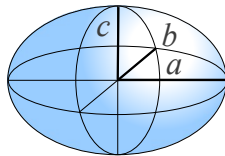
Kugel



$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad O = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 \quad O = \pi \cdot d^2$$

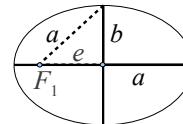
Ellipsoid



$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c$$

$$O \approx 4\pi \cdot \left(\frac{(a \cdot b)^{1.6} + (a \cdot c)^{1.6} + (b \cdot c)^{1.6}}{3} \right)^{0.625}$$

Ellipse



$$A = \pi \cdot a \cdot b$$

$$e = \frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

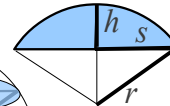
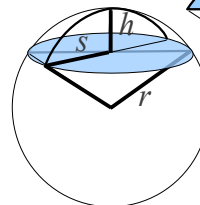
$$U \approx \pi \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot (a + b) - \sqrt{a \cdot b} \right)$$

$$U = 2\pi a \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{1} - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^4}{3} - \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^6}{5} - \dots \right]$$

Kugelabschnitt

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h^2 \cdot (3r - h) = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h \cdot (3s^2 + h^2)$$

$$M = \pi \cdot (s^2 + h^2) = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$



Kreisbogen:

$$s = \sqrt{h \cdot (2r - h)}$$

$$r = \frac{s^2 + h^2}{2 \cdot h}$$

$$h = r - \sqrt{r^2 - s^2}$$

Kugelausschnitt

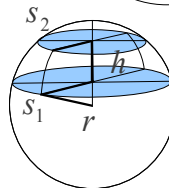
$$V = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$O = 2\pi \cdot r \cdot (s + h)$$

Kugelschicht

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h \cdot (3 \cdot s_1^2 + h^2 + 3 \cdot s_2^2)$$

$$M = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$



Kreisbogen-Fläche:

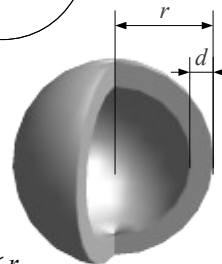
$$A = r^2 \cdot \arcsin\left(\frac{s}{r}\right) - s \cdot (r - h)$$

Hohlkugel

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r^3 - (r - d)^3)$$

$$= 4 \cdot \pi \cdot d \cdot \left(r^2 - r \cdot d + \frac{d^2}{3} \right)$$

$$2 \cdot r = d + \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot d} - \frac{d^2}{3}} \approx d + \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot d}} \quad |d \ll r$$

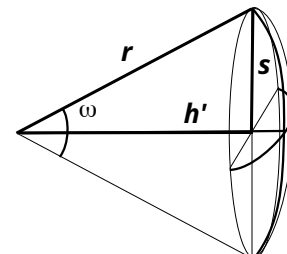


Kreisring-Fläche:

$$A = \pi \cdot d \cdot (2r - d)$$

Raumwinkel

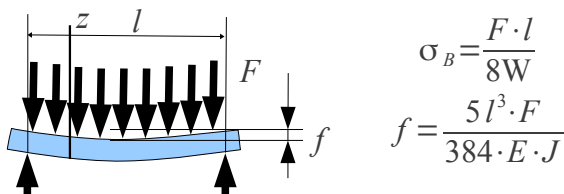
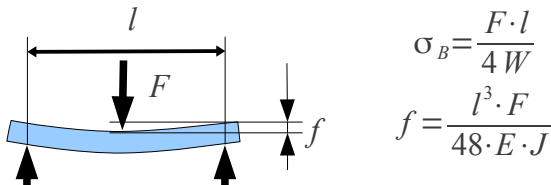
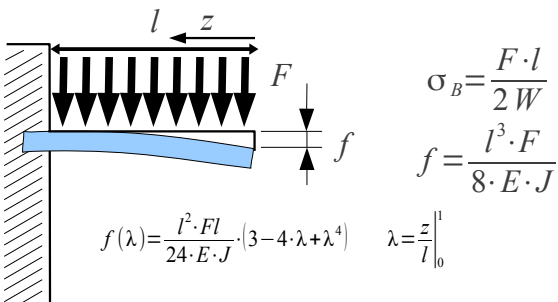
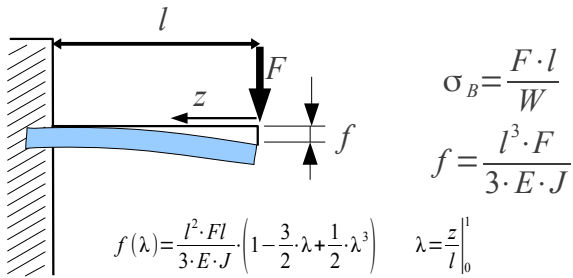
$$\Omega = \frac{A}{r^2} = 2 \cdot \pi \cdot \left(1 - \cos \frac{\omega}{2} \right) = 2 \cdot \pi \cdot \left(1 - \frac{h'}{\sqrt{s^2 + h'^2}} \right)$$



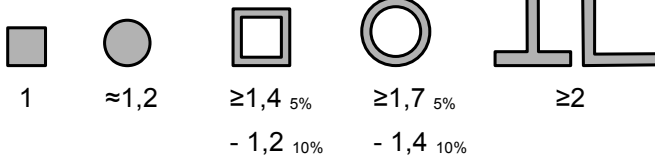
ω	15°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
Ω	0,054	0,214	0,478	0,842	1,840	3,142	4,657	6,283
$2s/r$	0,261	0,518	0,765	1	1,414	1,732	1,932	2

Statik

Spannung und Biegung eines Trägers bei Belastung



(grobe) Maße für ähnliche Widerstandsmomente bei verschiedene Querschnitte



für Baustahl mit quadat. Querschnitt:

$$d_{[mm]} \approx 3,3 mm \cdot \sqrt[3]{F \cdot L_{[N \cdot m]}}$$

$$lg(d_{[mm]}) = 0,5176 + 1/3 \cdot lg(M_{[Nm]})$$

Flächen-Trägheitsmomente

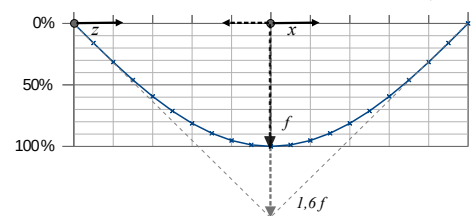
Flächen-Widerstandsmomente

	$J = \frac{b \cdot h^3}{12}$	$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$
	$J = \frac{1}{12} \cdot (H^4 - h^4)$	$W = \frac{H^3}{6} \cdot \left[1 - \left(\frac{h}{H}\right)^4\right]$
	$J = \frac{(B \cdot H^3 - b' \cdot h'^3)}{12}$	$W = \frac{(B \cdot H^3 - b' \cdot h'^3)}{6 \cdot H}$
	$J = \frac{\pi}{4} \cdot r^4$ $\approx \frac{d^4}{20}$	$W = \frac{\pi}{4} \cdot r^3$ $\approx \frac{d^3}{10}$
	$J = \frac{\pi}{4} \cdot a \cdot b^3$	$W = \frac{\pi}{4} \cdot a \cdot b^2$
	$J = \frac{\pi}{4} \cdot R^4 \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^4\right]$	$W = \frac{\pi}{4} \cdot R^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^4\right]$

Kurve der Biegung: $A = \frac{F \cdot l^3}{24 E \cdot J}$

$$f(\lambda) = A \cdot (\lambda - 2 \lambda^3 + \lambda^4) \quad \lambda = \frac{z}{l} \Big|_0^l$$

$$f(\gamma) = A \cdot \left(\frac{5}{16} - \frac{3}{2} \cdot \gamma^2 + \gamma^4\right) \quad \gamma = \frac{x}{l} \Big|_{-1/2}^{+1/2}$$



Maße für ähnliche Belastbarkeit bei verschiedene Materialien:

$$a_2 = a_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_1}{\sigma_2}}$$

$$a_{Glas} \geq 2,76 \cdot a_{Stahl}$$

pauschale Werte für:	Elastizitäts- Modul [kN/mm ²]	zulässige Biege- Festigkeit [N/mm ²]	theoretische Zug- Festigkeit [N/mm ²]
Baustahl	210	168	360
Bronze	100	110	240
Aluminium	72	16 – 56	60 – 140
Holz	5-15	65-125	50-150
Glas	55-70	8-38	40 -80
Plexiglas	3,2	10-130	70

1 Pa = 1 N/m² = 10⁻⁵ bar
 1 N/mm² = 1 MPa = 10 bar
 1 kN/mm² = 1 GPa
 1 psi = 6896,6 Pa = 68,966 mbar

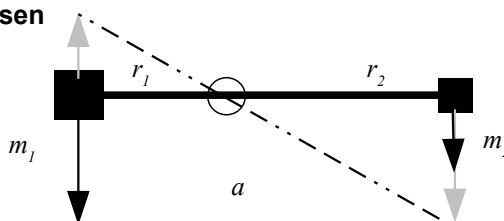
Schwerpunkt zwischen zwei Massen

$$m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2$$

$$r_1 = r_2 \cdot \frac{m_2}{m_1}$$

$$a = r_1 + r_2$$

$$r_1 = \frac{a}{1 + \frac{m_1}{m_2}}$$



$$x_S = \frac{\sum x_i \cdot m_i}{\sum m_i}$$

$$y_S = \frac{\sum y_i \cdot m_i}{\sum m_i}$$

stationärer Wärmedurchgang

Wärmeübergang

$$\Phi = (\alpha_K + \alpha_E) \cdot A \cdot \Delta T$$

konvektiver Wärmeübergang (Luft)
(nach B. GLÜCK: Wärmeübertragung, 1990)

$$\alpha_{K, 20^\circ C} \approx 1,6 \cdot \Delta T^{0,31}$$

$$\alpha_K(T) \approx 1,6 \cdot \Delta T^{0,31} \cdot \left(\frac{(T+273)}{293} \right)^{0,2}$$

Φ	Wärmestrom [W]
A	Fläche [m²]
b	Wand-/ Schichtstärke [m]
λ	Wärmeleitkoeffizient [W/mK]
α	Wärmeübergangszahl [W/m²K]
T	Temperatur [°C]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]

ebene Wand

$$\Phi = \frac{A \cdot (T_i - T_o)}{\sum \frac{b_j}{\lambda_j}} = \frac{\bar{\lambda}}{b} \cdot A \cdot (T_i - T_o) \quad T_{(x)} = T_i - (T_i - T_o) \cdot \frac{x}{b}$$

Wärmewiderstand

$$\Phi = \frac{A \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a} + \sum \frac{b_j}{\lambda_j}}$$

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Phi}$$

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad \Delta T = \Phi \cdot R_{th}$$

seriell:

$$R = R_1 + R_2 + \dots \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

parallel:

$$R_{(Wärmeleitung)} = \frac{b}{\lambda \cdot A} \quad R_{(Wärmeübergang)} = \frac{1}{\alpha \cdot A} \approx \frac{1}{(\alpha_k + 4 \cdot \epsilon_{1/2} \cdot (\bar{T} + 273)^3) \cdot A}$$

für Öfen (als räumliche Gebilde)**:

$$\Phi = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_i \cdot \alpha_i} + \sum \frac{b_j}{\lambda_j \cdot A_j} + \frac{1}{A_a \cdot \alpha_a}}$$

(für kubische Formen **)

(oder allgemein)

$$\bar{A} \approx 1/3 \cdot (A_1 + \sqrt{A_1 \cdot A_2} + A_2)$$

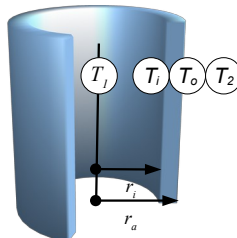
$$\text{für } b = \text{const.} \ll a \rightarrow \bar{A} \approx \Sigma (V_{\text{Offenwände}}) \div b$$

$$\bar{A} \approx \frac{(V_{\text{außen}} - V_{\text{innen}})}{b}$$

Zylinder

$$\Phi = \frac{2 \pi \cdot l \cdot (T_i - T_o)}{\sum \left(\frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \frac{r_{aj}}{r_{ij}} \right)} = 2 \pi \cdot l \cdot \frac{\bar{\lambda}}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \cdot (T_i - T_o)$$

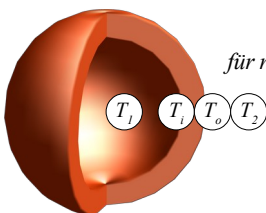
$$\Phi = \frac{2 \pi \cdot l \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_i \cdot \alpha_i} + \frac{1}{r_a \cdot \alpha_a} + \sum \left(\frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \frac{r_{aj}}{r_{ij}} \right)}$$



$$T_{(x)} = T_i - (T_i - T_a) \cdot \frac{\ln \frac{x}{r_i}}{\ln \frac{r_a}{r_i}}$$

$$x = r_i \cdot \left(\frac{r_a}{r_i} \right)^{\left(\frac{T_i - T_x}{T_i - T_a} \right)}$$

Kugel



$$T_{(x)} = T_i - (T_i - T_o) \cdot \frac{r_i^{-1} - x^{-1}}{r_i^{-1} - r_a^{-1}}$$

$$\text{für } r_a \rightarrow \infty \quad (T_x - T_2) = (T_i - T_2) \cdot \frac{r_i}{x}$$

$$\Phi_{i-o} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (T_i - T_o)}{\sum \left(\frac{1}{\lambda_j} \cdot \left(\frac{1}{r_{ij}} - \frac{1}{r_{aj}} \right) \right)} = 4 \cdot \pi \cdot r_a^2 \cdot \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{r_a} \right) \cdot \bar{\lambda} \cdot (T_i - T_o)$$

$$\Phi_{1-2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_i^2 \cdot \alpha_i} + \frac{1}{r_a^2 \cdot \alpha_a} + \sum \left(\frac{1}{\lambda_j} \cdot \left(\frac{1}{r_{ij}} - \frac{1}{r_{aj}} \right) \right)}$$

Wind-Geschwindigkeit
Wärme-Übergang (einer senkrechten Wand)

0 m/s	8,12 W/m²K
1 m/s	12,22 W/m²K
2 m/s	16,32 W/m²K
4 m/s	24,52 W/m²K
10 m/s	49,12 W/m²K
waagrecht nach unten	5,80 W/m²K
waagrecht nach oben	10,20 W/m²K

Wärmeübergangskoeffiziente für architek. Gebäudeflächen

	Leitfähigkeit	Dichte	Wärmekapazität	Temperatur-relaxationszeit
(bei 20°C)	λ [W/mK]	ρ [kg/m³]	c [J/kg K]	γ [s/mm²]
Luft	0,025	1,19	1000	0,05
Wasser	0,54	998	4187	7,68
Baustahl	48	7850	470	0,08
Edelstahl	15	7800	480	0,25
Beton	2,1	2400	1000	1,14
Gipsputz	0,35	1400	1100	4,40
Mineralfaser	0,05	150	1300	3,90
Schamottesteine	1,2	2200	1000	1,83
FL-Steine	0,5	800	1000	1,60
Ca-Si Platten	0,1	240	880	2,11
Keramikfaser	0,1	130	1130	1,47
Glas	1,05	2500	800	1,90

$$x^\circ C = (273,15 + x)^\circ K = \left(\frac{9}{5} \cdot x + 32 \right)^\circ F$$

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

=	J	kWh	cal	Btu
1 J	1	2,7778 E-07	2,3885 E-01	9,4787 E-04
1 kWh	3,6000 E+06	1	8,5987 E+05	3,4123 E+03
1 cal	4,1867 E+00	1,1630 E-06	1	3,9684 E-03
1 Btu	1,0550 E+03	2,9306 E-04	2,5199 E+02	1

Wärmestrahlung

Strahlungsaustausch zwischen e. Körper 1
und e. Körper 2, der den ersten vollständig umschließt

$$\Phi = A \cdot \varepsilon_{1/2} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{c_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

für geringe Temp. Differenzen:

$$\Phi \approx A \cdot \Delta T \cdot \varepsilon_{1/2} \cdot 4 \cdot T^3$$

ε Emissionskoeffizient
 c_s Strahlungskonstante
 $= 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T absolute Temperatur
 $T[\text{K}] = T_c[^\circ\text{C}] + 273,15$

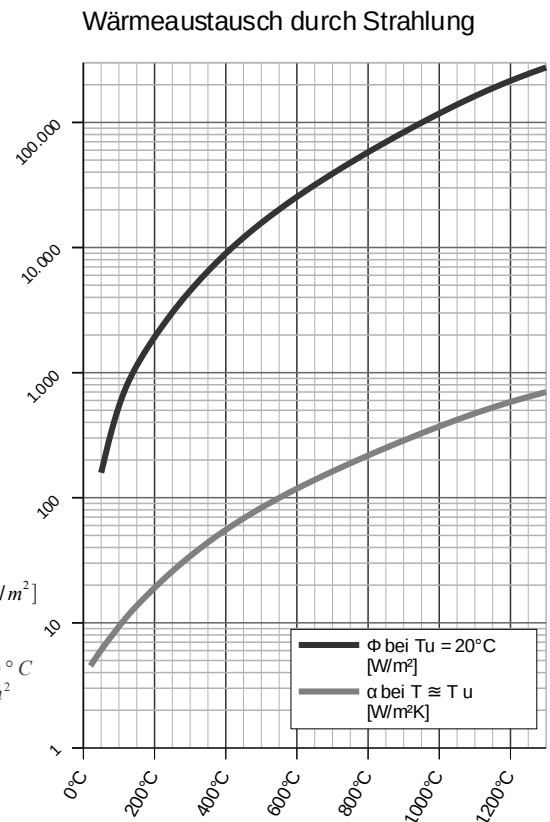
Richtwerte für ε

Aluminium	glänzend	500°	0,06
	oxidiert	600°	0,18
Kupfer	glänzend	100°	0,02
	oxidiert	1000°	0,6
Eisen	glänzend	100°	0,3
	oxidiert	1200°	0,85
Stahl	glänzend	100°	0,1
	oxidiert	600°	0,8
FF Stein		1000°	0,8
Zirkonoxid		1400°	0,4
Russ			0,97

für $T_u = 20^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 0,8$

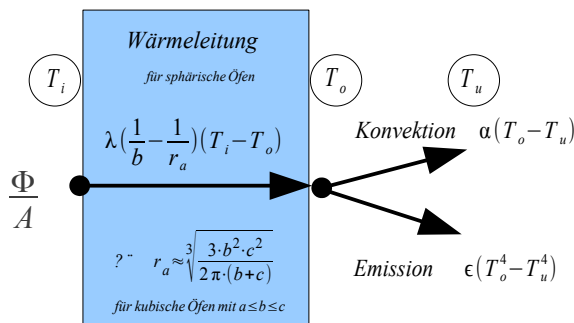
$$\phi \approx 4,5 \cdot \left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - 333 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

für $T = 1250^\circ\text{C}$
 $\phi \approx 25 \text{ W/cm}^2$



Oberflächentemperatur e. Ofenwand**

Wärmedurchgang incl. Strahlung



$$\frac{\Phi}{A} = \lambda \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{r_a} \right) (T_i - T_o) = \alpha (T_o - T_u) + \varepsilon (T_o^4 - T_u^4)$$

für T_o gilt: $f_{(t)} = 0$ mit

$$f(t) = At^4 + Bt - C$$

iterative Nullstellensuche
nach Newton:

und:

$$\varepsilon = A$$

$$\alpha + \lambda \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{r_a} \right) = B$$

$$\varepsilon T_o^4 + \alpha T_u + \lambda \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{r_a} \right) T_i = C$$

$$t_{n+1} = t_n - \frac{At_n^4 + Bt_n - C}{4At_n^3 + B}$$

Energieabgabe eines Heizleiters **

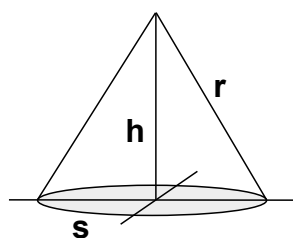
freistehend
(eingebaut)
[vgl. S. 27]

$$\frac{\Phi}{A} \approx 4[2] \cdot 10^{-8} \cdot T_H^4 + 8,2[4,1] \cdot T_H - (4[2] \cdot 10^{-8} \cdot T_U^4 + 8,2[4,1] \cdot T_U) \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right]$$

oder ungefähr:

$$T_H [^\circ\text{C}] \leq 1000 \cdot \sqrt[4]{\frac{p}{c_\varepsilon} + \left(\frac{T_U + 273}{1000} \right)^4} - 273 \quad \left| p \left[\frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right], c_\varepsilon \approx 4 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \right] \right|$$

Lichtstärke

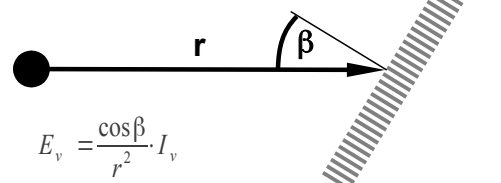


$$I_v [\text{cd}] = \frac{\Phi_v [\text{lm}]}{\Omega [\text{sr}]}$$

$$\frac{I_v}{E_v} = \frac{A}{\Omega} = \frac{s^2 \cdot \sqrt{s^2 + 4 \cdot h^2}}{8 \cdot (\sqrt{s^2 + 4 \cdot h^2} - s \cdot h)}$$

Beleuchtungsstärke

$$E_v [\text{lx}] = \frac{\Phi_v [\text{lm}]}{A [\text{m}^2]}$$



$$E_v = \frac{\cos \beta}{r^2} \cdot I_v$$

instationärer Wärmedurchgang

Eine Sprungantwort der Temperatur eines Körpers mit T_0 in ein Medium mit T_∞ beschreibt die Wärmeleitungsgleichung nach FOURIER:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

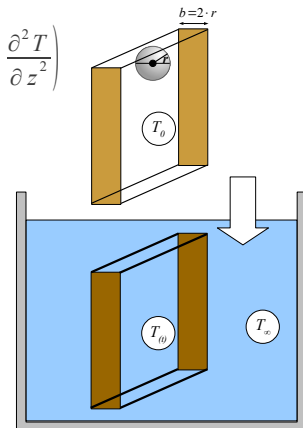
und ist gekennzeichnet durch das Verhältnis des äußeren Wärmeaustausches

zur inneren Wärmeleitung, der **Biotzahl** $Bi = \frac{\alpha \cdot r}{\lambda}$ und der **Fourierzahl**, der Relation der verstrichenen Zeit zu dem Verhältnis zwischen der inneren Wärmeleitung und der gespeicherten Wärme,

$$Fo = \frac{\lambda}{\rho \cdot c \cdot r^2} \cdot t = \frac{t}{\gamma \cdot r^2} = \frac{t}{\tau_{Fo}}$$

Bzw. der **dimensionsfreien Relaxationszeit**:

$$\tau_{Bi^2 Fo} = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot c}{\alpha^2}$$



	ln
1,5	0,4
2	0,7
3	1,1
5	1,6
10	2,3
20	3,0
50	3,9
100	4,6
200	5,3
500	6,2
1000	6,9

als Annäherung für kleine Biotzahlen, also hohen Leitfähigkeitswerten bei kleinen Wandstärken,

ergibt sich die einfache

$$\rho c V \frac{\partial T}{\partial t} = -\alpha A (T_i - T_\infty)$$

Exponentialfunktion:

$$T(t) = T_\infty + (T_0 - T_\infty) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{mit } \tau = \frac{\rho c \cdot V}{\alpha \cdot A} = \frac{\rho c}{\alpha} \cdot r \cdot f$$

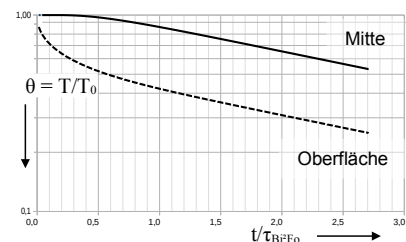
Allgemein, wenn man $T_i = T_x - T_\infty$ setzt und $\Theta = \frac{T}{T_0}$

sowie $t_i = \frac{t_x}{\tau_{Bi^2 Fo}} = Bi^2 \cdot Fo$

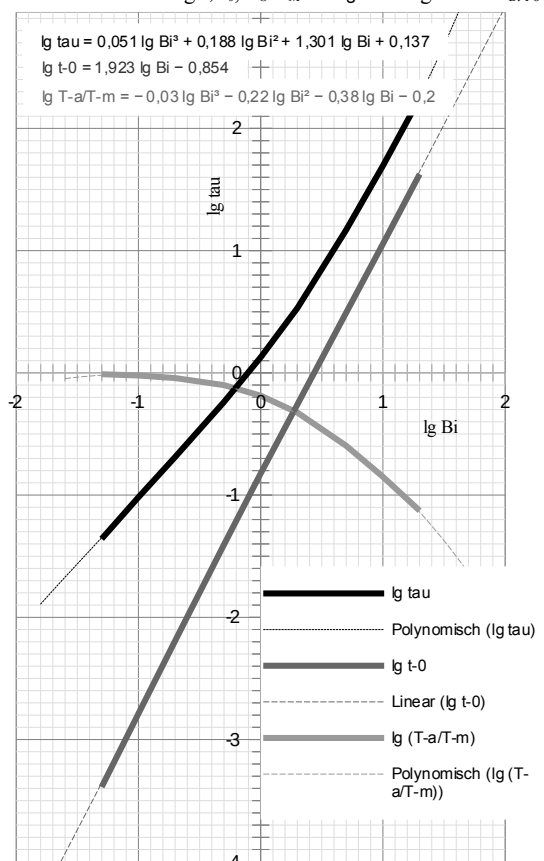
erhält man annähernd: $T(t) = T_0 \cdot e^{-\frac{(t_0 - t)}{\tau}}$ bzw. $-\ln \Theta = \frac{(t - t_0)}{\tau}$

wobei $\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} T_i \cdot \frac{\Delta t}{\Delta T} = \text{konstant}$

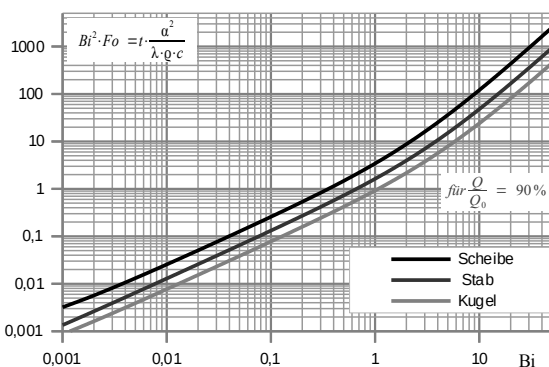
und t_0 die Verzugszeit der Kerntemp. darstellt.



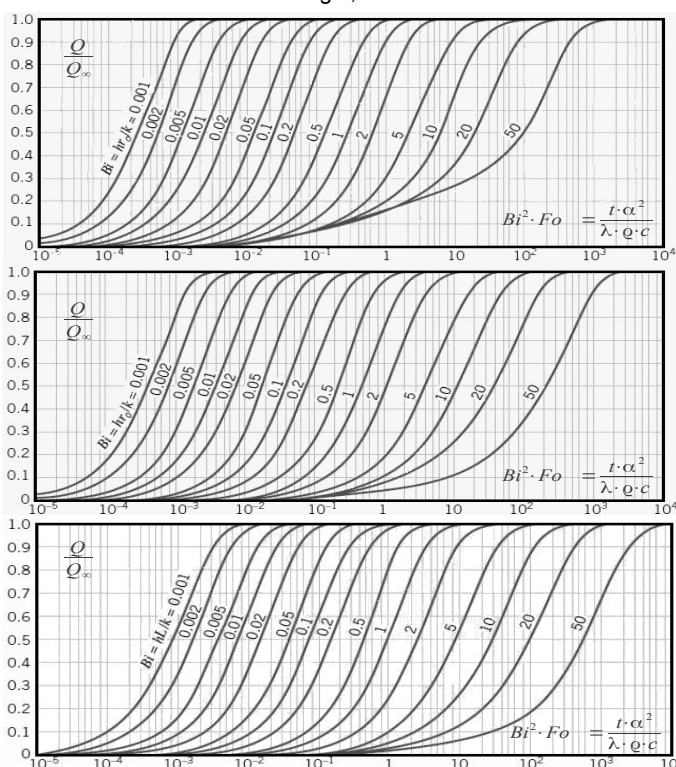
Werte e. Scheibe für $\lg \tau$, t_0 , T_0/T_M bezogen auf $\lg Bi$ und $\tau_{Bi^2 Fo}$



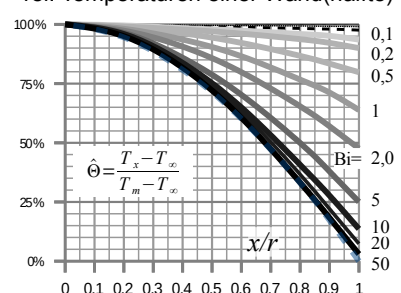
rel. Zeiten für einen Wärmeaustausch v. 90%



Wärmeaustausch in einer Kugel, einem Stab und einer Scheibe



rel. Temperaturen einer Wand(hälfte)



Grundlagen des Kühlens von Glas **

rechn. Beispielswerte für e. Kristallglas:

E	66 G Pa
α	9,6 ppm/° K
$\sigma_{B, zul.}$	10 M Pa
$\sigma_{B, max.}$	40 M Pa
$\sigma_{Z, intern}$	2,5 M Pa

maßgeblich ist die **thermische Spannung**, die durch die unterschiedliche Wärmedehnung durch eine **Temperaturdifferenz ΔT** im Stück hervorgerufen wird :

$$\sigma_{Z, th} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$\Delta T_{max, kurz}$	60 ° K
$\Delta T_{max, Entspannung}$	4 ° K

visko-elastisches Paradox:

Spannungen werden durch viskoses Fließen abgebaut, abhängig von Zeit und Viskosität (nach H. SCHOLZE):

$$S(t; \eta) = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} = 0,61 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} + 0,39 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad \tau_1 = 0,5' \cdot 10^{(\lg \eta - 12)} \quad \tau_2 = 2,1' \cdot 10^{(\lg \eta - 12)}$$

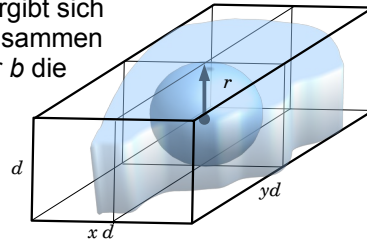
Relaxationszeit für (bei $\lg \eta = 12,0$)	$S_0 = 50\%$	$t_0 = 0'33''$
	$S_0 = 10\%$	$t_0 = 2'54''$
	$S_0 = 1\%$	$t_0 = 7'41''$
	$S_0 = 0,1\%$	$t_0 = 12'32''$

allerdings werden bei laufender Abnahme der Temperatur im Kühlprozess, verursacht durch die momentane Temperaturdifferenzen im Stück, die temporäre Spannungszustände residuell, d.h. die eingefrorenen aufaddierten Längenänderungen verursachen nach dem Temp.ausgleich Spannungen mit umgekehrtem Vorzeichen!

massgebende Größen:

Für eine Annäherung an die komplexen thermodynamischen Zusammenhänge zwischen Ofen (Bauweise, Verteilung der Wärmequelle) und dem **Glaskörper**, der zusammen mit seiner **Unterlage** oder **Form** in seiner **Geometrie** den **inneren Abkühlprozess** beeinflusst, kann man verschiedene Vereinfachungen annehmen. Die erste ist die Reduktion der allgemeinen (4-dimensionalen) Differenzialgleichung der instationären Wärmeleitung auf eine Zeit- und eine Raumdimension, also einer als unendlich gedachter Scheibe, deren **Dicke allein** die Art der Temperaturdifferenzen bestimmt.

die thermodynamisch wirksame **Wandstärke D** ergibt sich aus der Gesamtheit der Dicke der Glaswand a zusammen mit der der Unterlage bzw. des Kerns b , wobei für b die relative **Temperaturrelaxationszeit** $y = \frac{Q \cdot c}{\lambda}$ zu berücksichtigen ist (vgl. S. 12):



$\sqrt{y_{rel, Schamotte}}$	$\approx 0,95$
$\sqrt{y_{rel, Gips-Schamotte}}$	$\approx 1,6$
$\sqrt{y_{rel, Stahl}}$	$\approx 0,2$
$\sqrt{y_{rel, Luft}}$	≈ 0

$$b' = b \cdot \sqrt{\frac{y_i}{y_{Glas}}}$$

Man kann die Dicke auch als den Durchmesser der größten einzuschreibende **Kugel** beschreiben:

$$f = \frac{V}{A \cdot r} = \frac{xy}{(x+y+xy)}$$

für eine Scheibe : $f \rightarrow 1$

für einen Stab : $f \rightarrow 1/2$

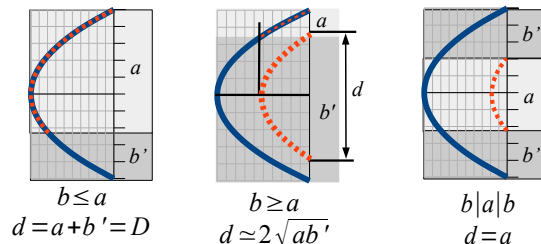
für einen Würfel : $f \rightarrow 1/3$

zudem wäre das Verhältnis von Volumen zur Oberfläche als **Formmodul f** des umschreibenden Quaders zu berücksichtigen, um eine äquivalente Relaxationszeit im Vergleich zu einer Scheibe abzuschätzen:

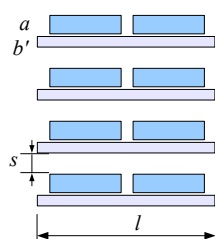
$$t_x \approx f \cdot t_{Scheibe}(d)$$

in der **Kühlphase** wird sich eine neue **Temperaturwelle** ausbilden:

Die Form einer Parabel (für große Biot-Werte) vermutet, ergäbe sich eine **fiktive Dicke d** mit einem äquivalenten Verhalten mit:

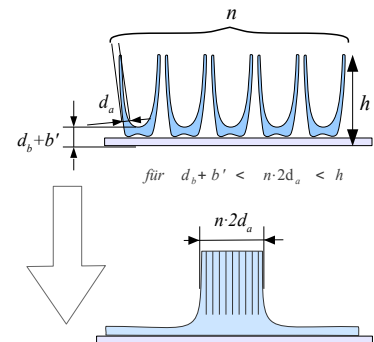


bei einer **Anhäufung in einem voll besetzten Ofen** oder bei Benutzung eines Hordengestells (z.B. beim Brennen von Glasmalerei) müsste man das gesamte Brenngut als thermodynamisch wirksamer Körper betrachten um kritische Temperaturdifferenzen zu identifizieren!



$$D = n \cdot (a + b')$$

$$d' = 2 \cdot \sqrt{a \cdot (D - a)}$$



$$D = n \cdot 2d_a$$

$$d' = 2d_a \cdot \sqrt{(2n-1)}$$

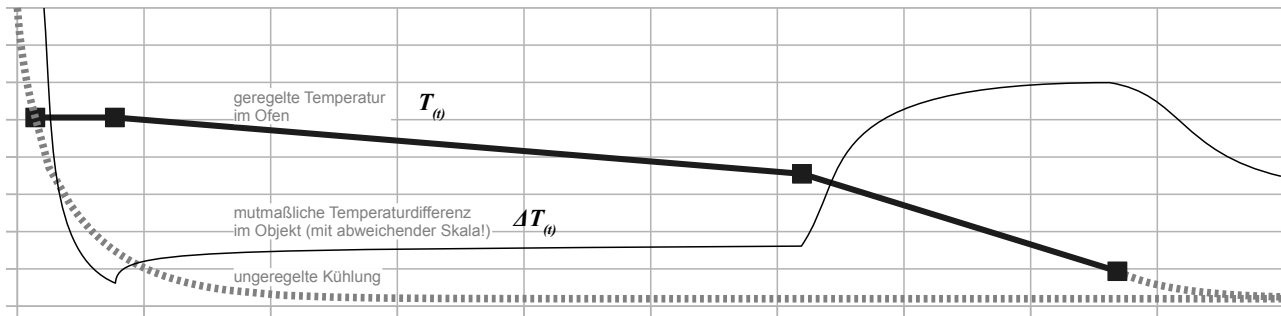
(aber mit zunehmendem Abstand nimmt die Kummulationswirkung ab: ??)

für einen relativen Abstand $s = x/l$

$$D = (a + b') \cdot (1 + (n-1) \cdot f(x)) \quad \text{mit } f(x) = 1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + 0,25}} \quad (?):$$

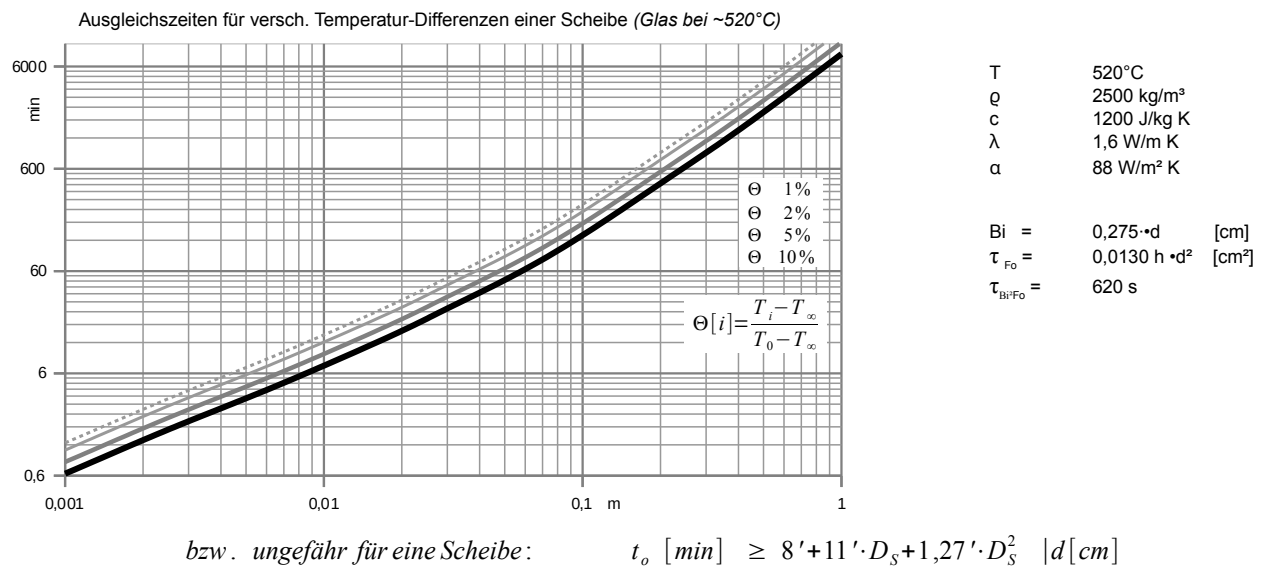
x	5%	10%	20%	30%	50%	100%	200%
f(x)	90%	80%	63%	49%	29%	11%	3%

die Kühlkurve



Die **Kühlkurve** beginnt i.d.R. mit einer **Haltezeit** t_0 bei der oberen Kühltemperatur in der Nähe von T_G zum Ausgleich der inneren Temperaturdifferenzen und dem Abbau der bis dahin entstandenen thermischen Spannungen. Darauf folgt eine, zwei oder mehr geregelte **Abkühlrampen** mit zunehmender Kühlgeschwindigkeit $c_0, c_1, \dots$ bis zu der Temperatur, bei der die natürliche Abkühlung des jeweiligen Ofens die maximale Geschwindigkeit nicht mehr übersteigt.

die **Entspannungszeit** t_0 (annealing time) ergibt sich aus der thermodynamischen Ausgleichszeit des gesamten Körpers plus der visko-elastischen Relaxationzeit



Im Anschluss daran ist in der **ersten Kühlphase** die Kühlgeschwindigkeit c_0 soweit zu begrenzen, dass die dadurch erzeugte Temperaturdifferenz in dem Stück eine **bleibende Dehnung** (durch den momentanen viskosen Spannungs-Abbau) von maximal 50 ppm ergibt.

$$\tau_{0,100} \geq (15' - 0,8' \cdot d_s + 30' \cdot d_s^2) \quad \left| \begin{array}{l} d [\text{cm}] \\ \tau_0 [\text{min}/100^\circ\text{K}] \\ c_0 [^\circ\text{K}/\text{h}] \end{array} \right|$$

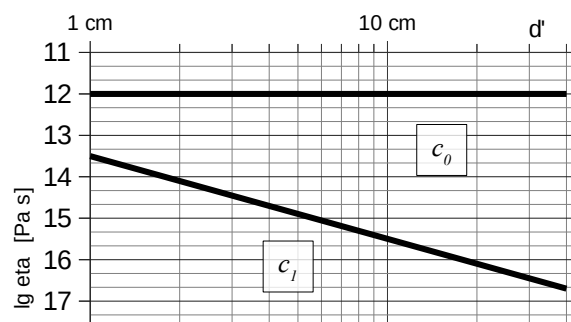
$$c_0 \leq \frac{6000}{(15' - 0,8' \cdot d_s + 30' \cdot d_s^2)}$$

Ab dem **unterem Kühlpunkt** hat die Fähigkeit, die vorübergehende, thermische Spannung in eine bleibende Dehnung umzuwandeln, soweit angenommen, dass dann schneller gekühlt werden kann, die **Kühlgeschwindigkeit** ergibt sich dann aus der angestrebten **Temperatur-Differenz**, die in der Wand des Glases eine noch-tolerierbare **Spannung** erzeugt.

die **Temperaturintervalle** werden durch die **Viskosität** des jeweiligen Glases bestimmt, wobei aber der untere Kühlpunkt mit zunehmender Verweildauer und damit der massgebenden **Dicke** verschoben werden:

$$\lg \eta(T_1, d) \approx 13,5 + 2 \cdot \lg d \quad |d[\text{cm}]$$

$T_{0, \lg \eta > 12}$	$T_{0, \lg \eta > 12}$	$T_{1, \lg \eta > 13,5}$	T_A
t_0	$1 \cdot c_0$	$3 - 5 \cdot c_0$	ungeregelt



für Gussformen mit Hinterschnitte oder Kerne ist es u.U. wichtig, die gebremsten Kühlrampen schon bei niedrigerer Viskosität (also höherer Temp.) anzusetzen und die Kurve bis zu T_G annähernd symmetrisch zu gestalten, dafür kann dann die Haltezeit gespart werden!

$T_{(-)} :$ $\lg \eta > 9,5$	$T_{(0)} :$ $\lg \eta > 10,5$	T_1
$4 \cdot c_0$	c_0	$4 \cdot c_0$

verschiedene eigene Kühlkurven ** (vgl. S. 20)

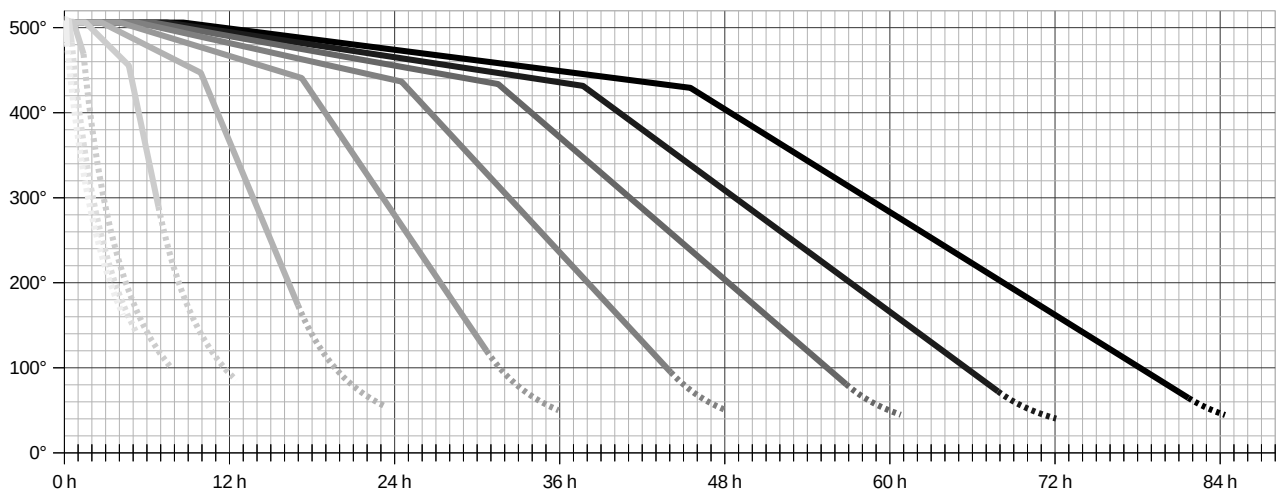
Die Werte beziehen sich auf eine Scheibe Glas mit einer Wandstärke a auf einer Schamotteplatte mit der Dicke b in einem mittelgroßen Ofen.

Für Hohlkörper muss man zwar mit dem Doppelten der Wandstärke rechnen, darf aber den entsprechenden Formfaktor berücksichtigen! (vgl. S. 15!)

Die Temperaturwerte beziehen sich auf DoOptic-Linsen, können aber additiv angepasst werden.

Die Zeiten sind Mindestwerte; wenn man die **Temperaturspannen** erweitert, müssen auch die Zeiten **proportional** angepasst werden!

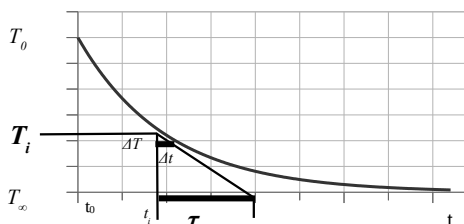
Unterlage	b	0,01 cm	0,3 cm		0,3 cm		0,3 cm		0,8 cm		0,8 cm		1,2 cm		1,2 cm		0,8 cm		1,2 cm	
	a	0,3 cm	0,8 cm		1,6 cm		3,3 cm		4,3 cm		5,7 cm		6,5 cm		7,4 cm		8,6 cm		9,0 cm	
Glasdicke (maximal)	d'	0,31	1,10		1,90		3,55		5,10		6,50		7,65		8,60		9,35		10,15	
	T	t	T	t	T	t	T	t	T	t	T	t	T	t	T	t	T	t	T	t
	506°	0h 10'	506°	0h 20'	506°	0h 32'	506°	1h 00'	505°	1h 34'	506°	2h 09'	506°	2h 42'	506°	3h 11'	506°	3h 36'	506°	4h 05'
	482°	0h 04'	482°	0h 11'	469°	0h 44'	456°	3h 14'	447°	7h 33'	441°	13h 40'	437°	20h 05'	434°	31d 2h 28'	432°	1d 8h 13'	429°	1d 15h 04'
							290°	2h 16'	174°	7h 27'	120°	13h 57'	95°	20h 28'	81°	1d 2h 38'	72°	1d 7h 59'	65°	1d 14h 10'
geschätzte Gesamt- zeit:	4h		6h		8h		12h		1d 0h		1d 12h		2d 0h		2d 12h		3d 0h		3d 12h	



$$\Sigma t [h] \approx 3,6 + \frac{126}{(c_0 [^\circ/h] - 0,46)}$$

Abkühlung eines Ofens **

(untere Grenztemperatur der benötigten Steuerung bei einer vorgegebenen linearen Abkühlung)



Wenn man davon ausgeht, dass der Ofen annähernd exponentiell abkühlt mit :

(in Bezug zur Umgebungstemperatur) $T_i = T_x - T_\infty$

bzw der Umkehrfunktion:

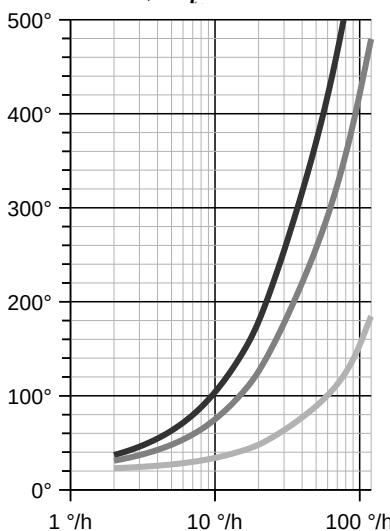
bei der Beobachtung des jeweiligen Temperaturabfalls in einer bestimmten Zeit kann man aber feststellen, dass mit abnehmender **Temperatur T** der Wert von τ **leicht zunimmt** und bestimmt werden kann mit:

(wenn man eine lineare Interpolation annimmt),
sei $\tau_i = k - m \cdot T_i$; so ist $t'_{(T)} = \frac{1}{c} = \frac{k}{T} - m$

und $t_{(T)} = \int_T^{T_0} \left(\frac{k}{x} - m \right) dx = k \cdot \ln \left(\frac{T_0}{T} \right) - m \cdot (T_0 - T)$

um damit die Grenztemperatur für eine bestimmte Kühlgeschwindigkeit C_A finden :

$$T_A = T_\infty + \frac{c_A \cdot k}{(1 + m \cdot c_A)}$$

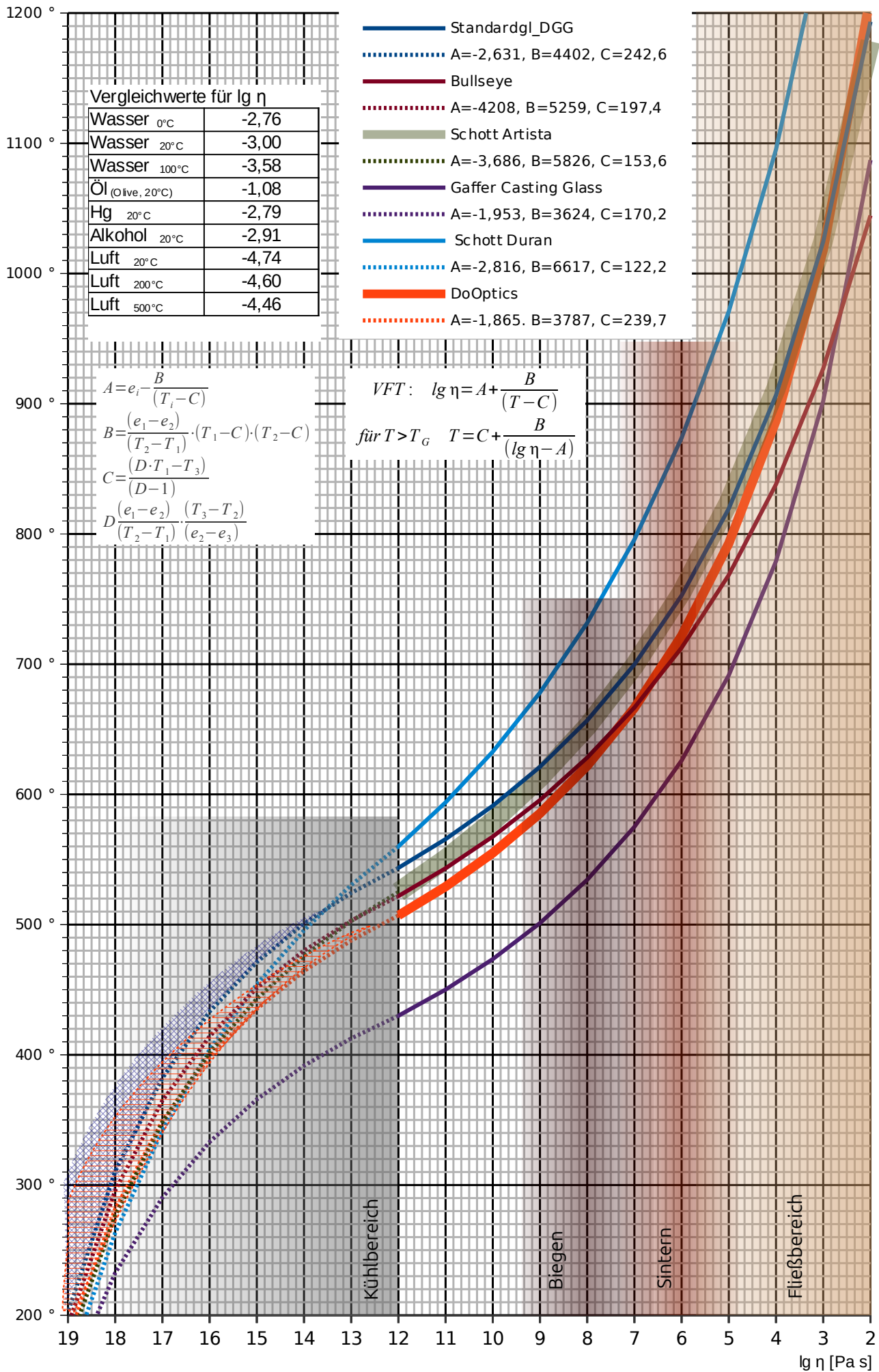


typische Beispiele

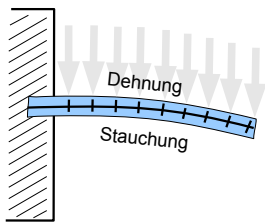
großer Ofen		mittlerer Ofen		kleiner Ofen	
T_i (Tu=20°)	c_i	T_i (Tu=20°)	c_i	T_i (Tu=20°)	c_i
600°	100 °/h	600°	180 °/h	820°	1.000 °/h
150°	16 °/h	150°	25 °/h	520°	480 °/h
m=	0,0052	m=	0,0044	m=	0,00081
k=	8,8	k=	5,8	k=	1,4

Viskositäten versch. Gläser **

$$\lg X \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] = \lg X + 1 \quad [\text{d Pa} \cdot \text{s}] = \lg X + 1 \quad [\text{Poise}]$$

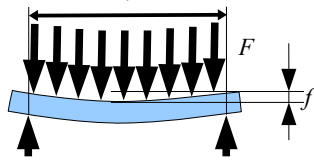


Viskositätsmessung, (zum Kalibrieren der Ofentemperaturen) **



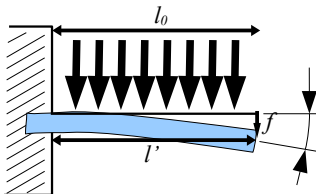
Einschränkung: hinreichend genau bis ca. 10° / 17,5%

beidseitig gestützt:



für $t=1000\text{ s} \rightarrow f/l = 0,5\%$ und
für $t=10.000\text{ s} \rightarrow f/l = 5\%$
bei $\lg \eta = 12,3$:
 $l[\text{cm}] \approx 17,1 \cdot \sqrt[3]{d[\text{mm}]^2}$

einseitig eingespannt:



für $t=1000\text{ s} \rightarrow \alpha \approx 1^\circ$ und
 $t=10.000\text{ s} \rightarrow \alpha \approx 10^\circ$
bei $\lg \eta = 12,3$:
 $l[\text{cm}] \approx 11,7 \cdot \sqrt[3]{d[\text{mm}]^2}$

Korrekturen mit Fadentest:

Fadentest bei Gläsern in der Nähe des Transformationspunktes:
ein gezogener Glasfaden wird durch das Eigengewicht bei entsprechender Temperatur in beobachteter Zeit verformt.

(Elastizität:
(Viskosität:

reversible Dehnung unter Zugspannung)
irreversible Bewegung des Materials unter Scherspannung)

Zusammenhang zwischen Elastizitäts- und Schermodul: $E = G \cdot 2 \cdot (1 + \nu)$ für $\Delta V = 0$; $\rightarrow \nu = 0,5$

zwei Messungen mit unterschiedlichen Dicken, Temperaturen und Zeiten
erlauben die Viskositätskurve linear zu interpolieren:
(vgl. auch S. 25)

$$T_0 = T_1 + (T_2 - T_1) \cdot \frac{\lg \eta_0 - \lg \eta_1}{\lg \eta_2 - \lg \eta_1}$$

$$\eta = \frac{5 \cdot F \cdot l^3 \cdot t}{3 \cdot 384 \cdot J \cdot f}$$

$$\begin{aligned} &[d, f, l] \quad [\text{m}] \\ &[t] \quad [\text{s}] \\ &[g] = 9,81 \text{ m s}^{-2} \\ &[\rho_{\text{Glas}}] = 2500 \text{ kg m}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= \rho \cdot g \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot l \\ J_o &= \frac{\pi}{64} \cdot d^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= \rho \cdot g \cdot b \cdot h \cdot l \\ J_o &= \frac{b \cdot h^3}{12} \end{aligned}$$

$$\lg \eta = k + \lg(t) + 3 \cdot \lg(l) - 2 \cdot \lg(d) - \lg\left(\frac{f}{l}\right)$$

für runde oder elliptische Querschnitte: $k=3.2312$
für rechteckige Querschnitte: $k=3.1063$

wenn man den Faden diagonal an die
Ofenwand lehnt, muss das entsprechende
Kräfteparallelogramm berücksichtigt werden:

$$\begin{aligned} \lg \eta &= 3.2312 + \lg(\cos \beta) + 4 \cdot \lg(l) + \dots \\ \text{für } \alpha &= 45^\circ \quad \lg \eta = 3,0807 + 4 \cdot \lg(l) + \dots \end{aligned}$$

Die Kurve der Biegung kann in
Parameterdarstellung mit e.
numerischen Annäherung mit finiten
Elementen (räuml., zeitl.) erstellt
werden um daraus mit konkreten
Werten über die Funktion der
Biegung zu dem Durchlauf die
Viskosität zu erhalten:

$$\lg \eta = k + 3 \cdot \lg(S) + \lg(t) - \lg(i)$$

für runde oder elliptische Querschnitte: $k=6.3499$
für rechteckige Querschnitte: $k=6.2250$
mit: $i = 3,598 \cdot z^3 - 37,33 \cdot z^2 + 151,8 \cdot z - 1,26$

$$\text{und } z = \frac{f}{l}; \quad S = \frac{l_0}{\sqrt[3]{d^2}}$$

$$\text{Abweichung der Krümmung: } X = \frac{f_x}{f_0}$$

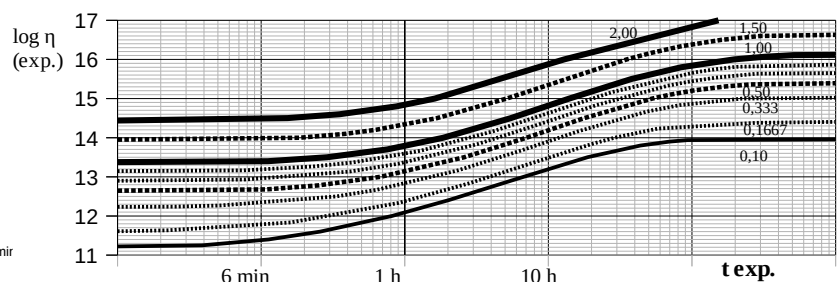
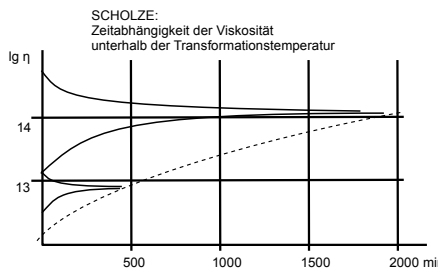
$$\text{Temperaturkorrektur: } \Delta T \approx -18^\circ \cdot \lg X$$

strukturelle
Relaxation

Bei tieferen Temperaturen wird das Verhalten auch durch die Vorgeschichte verfälscht,
die Proben sollten also vor der Messung bei der entsprechenden Temperatur ausgelagert werden mit
mindestens:

$$\lg \tau_a |_s \approx 0,5 \cdot \lg \eta - 2,05$$

oder es kann bei frisch(!) gezogenen Glasfäden ein zur Messzeit und gemessenen Viskosität
entsprechender Korrekturfaktor addiert werden



Wärmedehnung:

linear: $l' = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$

kubisch: $V' \approx V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot \Delta T)$

Spannungen

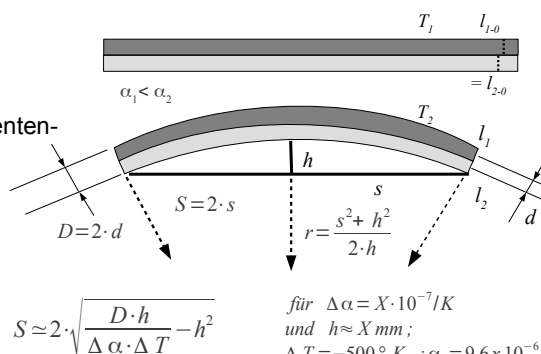
durch Temperatur- oder Koeffizienten-
differenzen in einem Glasstab:

$$\sigma_{z, th} = E \cdot \frac{(\Delta) \alpha \cdot \Delta T}{2(1 - \nu)}$$

$$\nu_{20^\circ} \approx 0,25 - 0,30$$

$$\frac{\Delta l}{l} \leq 50 \text{ ppm}$$

$$\Delta \alpha \leq 3 \cdot 10^{-7} / ^\circ \text{K}$$



Fadentest:

Krümmung bei zwei
unterschiedlichen Gläser:

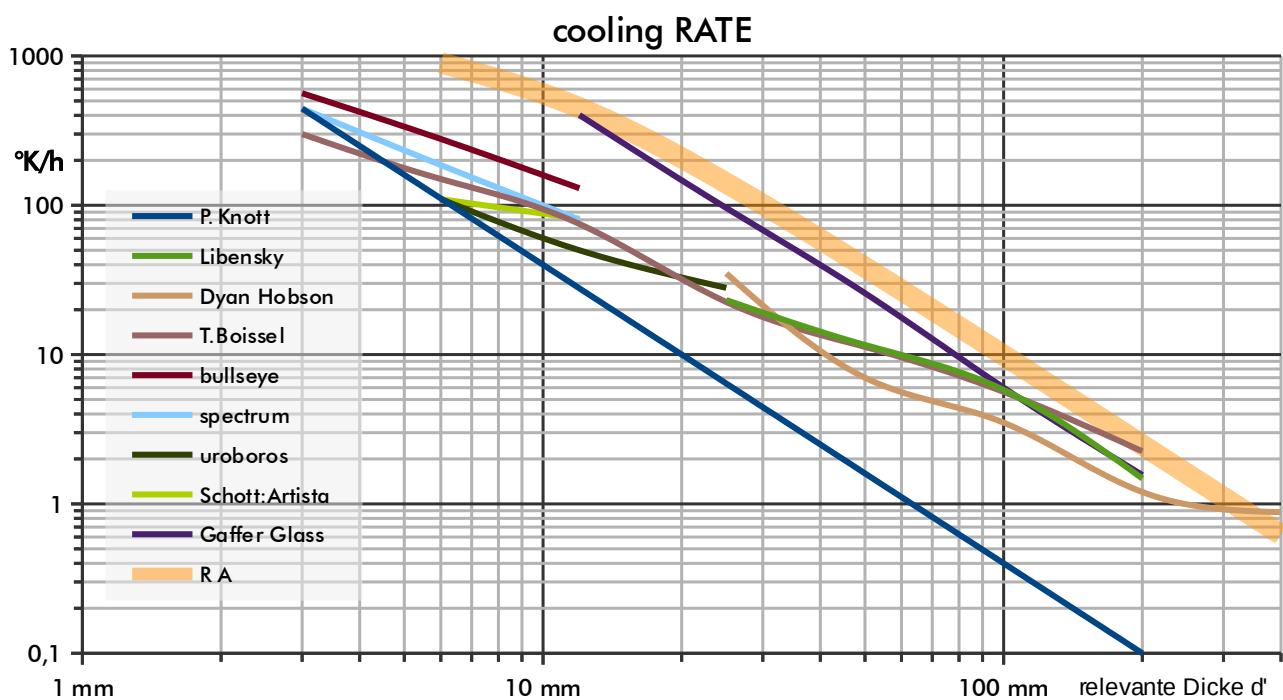
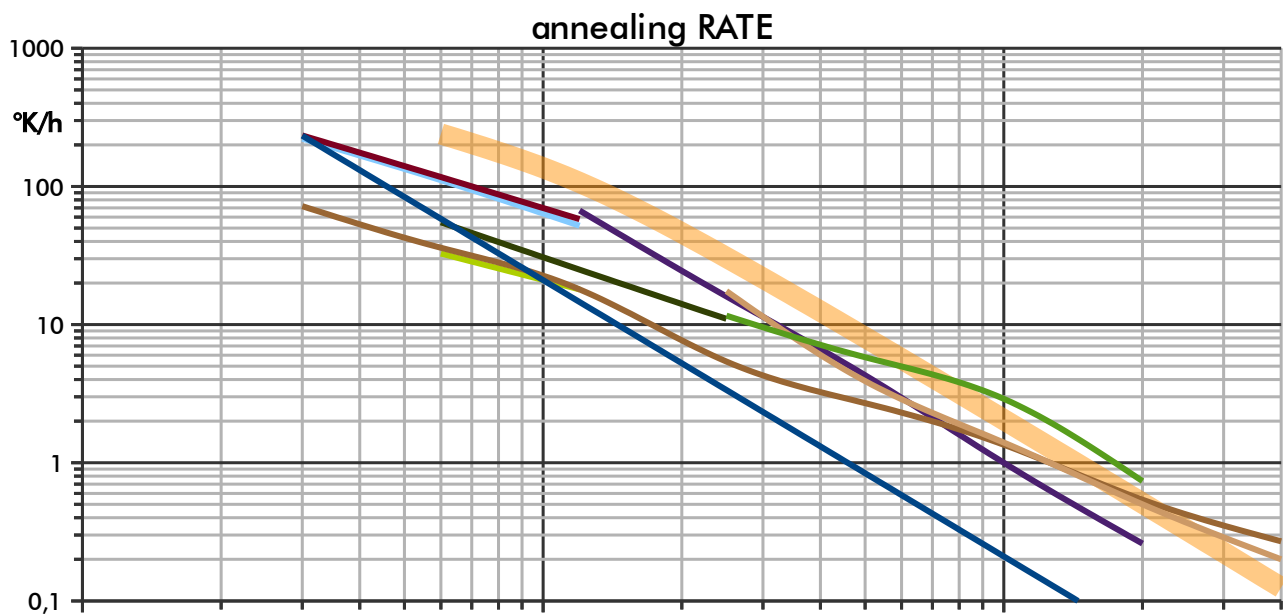
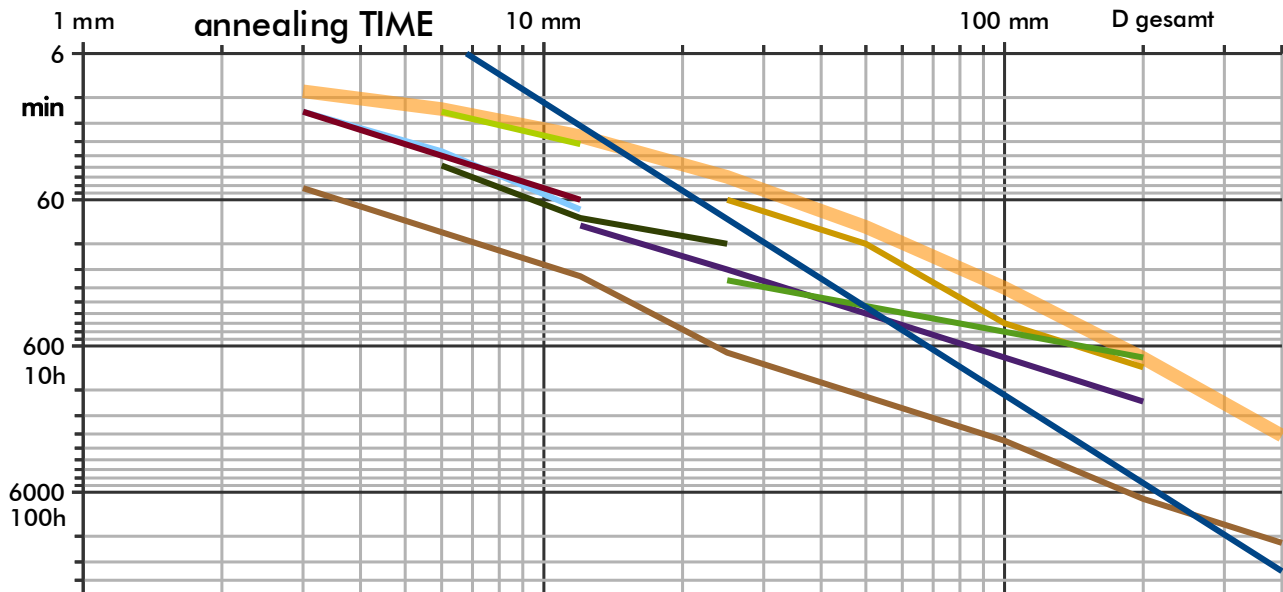
$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{r+d}{r} \rightarrow \frac{d}{r} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{(1 + \alpha_2 \Delta T)}$$

$$\Delta \alpha \Delta T = \frac{D \cdot h}{\left(\frac{S^2}{4} + h^2\right)} \cdot (1 + \alpha_2 \Delta T)$$

D [mm]	0,5	1,0	2,0	3,0
S [mm]	199	283	399	491

Beispiele für Parameter einer Kühlkurve **

nach verschiedenen Autoren



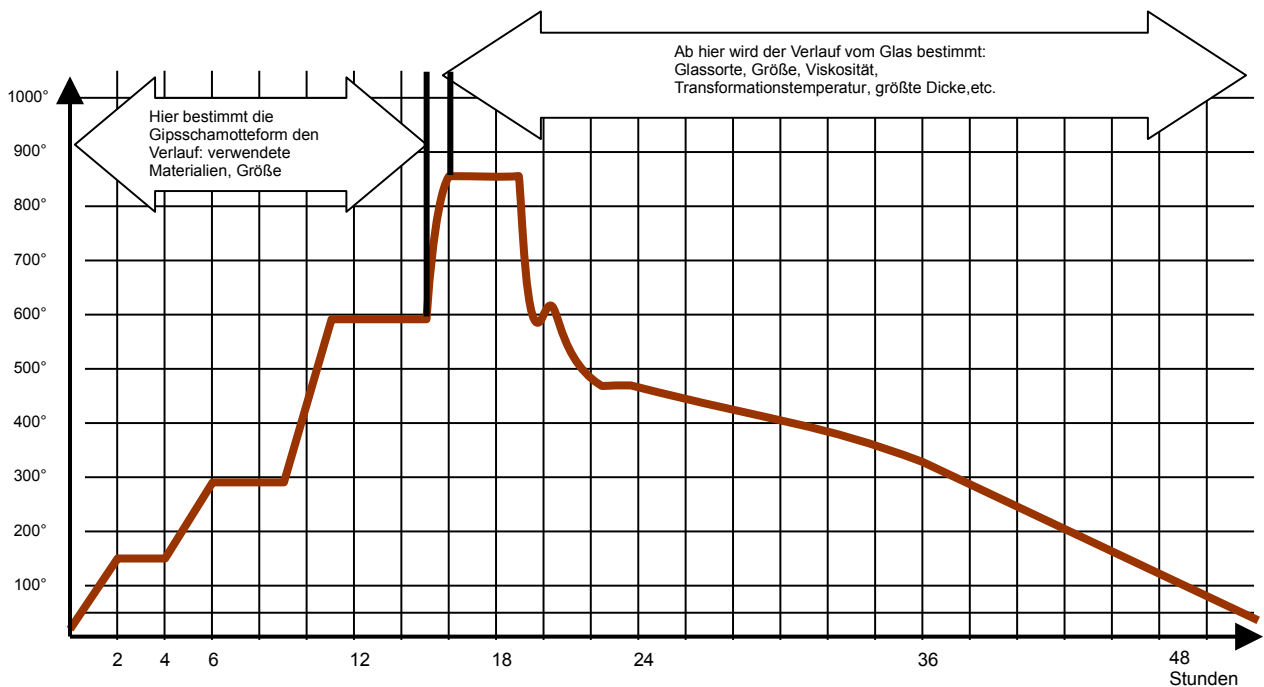
Brennkurven für Pâte de Verre, Glasguss u.ä.

Theorie: Geschehen bei den verschiedenen Abschnitten des Brennprozesses:

- 20-150 °C Trocknungsphase
- 300-450°C Entweichen des Kristallwassers
- 450-600°C Ausbrennen von organischem Material wie Wachs
- 600-750°C Erweichung der Glasscherben, Abrundung der Kanten, Deformierung und Zusammenkleben der Scherben
- 800-900°C Fließen des Glases, Arbeitstemperatur
- 800-700°C Risiko der Devitrifikation (je nach Glassorte)
- 450-550°C oberer Kühlpunkt (je nach Glassorte), Abbau von thermischer Spannungen (annealing time)
- 350-500°C unterer Kühlpunkt (je nach Glassorte), untere Grenze des Transformationsbereichs, langsame Kühlung zur Vermeidung zu großer Spannungen im Stück (annealing rate)
- bis 50°C gesteuertes Abkühlen auf Raumtemperatur zur Vermeidung zu großer Temperaturunterschiede (cooling rate)

Die Gestaltung der Abschnitte der Aufheizphase hängt vor allem von der Größe und der verwendeten Materialien der Negativform ab, die der Arbeitsphase von der Zähigkeit des Glases und des Fließwiderstands der Form.

Die Kühlphase wird bestimmt in der Temperatur von der verwendeten Glassorte, in der Länge der Abschnitte von der Gesamtmasse des Glaskörpers und dessen Ausformung, insbesondere der größten Dicke.



Beispiel einer Brennkurve (nach M.Perozeni, Strasbourg) für Stücke mit einer maximalen Dicke von < 5 cm und ein Gewicht von <1 kg:

Werte und Temperaturen verschiedener Gläser (nach Detlef Tanz)

Glas Sorte	AK	Schmelztemp.	Relief temp.	Biegetemp.	Obere Kühltmp.	Untere Kühltmp.	Devitrifikation sbereich
AR Glas	90	830-850° C	750° C	680° C	520° C	460° C	860-920° C
Artista (Schott)	94	830-850° C	785° C	680° C	530° C	480° C	950-960° C
B270 (Schott)	94	830-850° C	785° C	680° C	520° C	460° C	950-960° C
Bulls Eye	90	800-830° C	745° C	650° C	520° C	460° C	860-920° C
Float Glas	84	830-850° C	785° C	680° C	540° C	480° C	850° C
Spektrum	95	790° C	735° C	630° C	472° C	440° C	600° C
Thomson Email	85	720° C	640° C	500° C	400° C	320° C	

Verschiedene Rezepte für den Formenbau

(Angaben in Raumteile „T“ oder nach Gewicht bzw. Gewichtsprozent „%“)

Gipsmassen:

Grundrezept: 1 Teil Gips + 2 Teile Feuerfeststoffe gemischt in Wasser einstreuen bis es aufgesogen ist, kurz stehen lassen, dann vorsichtig homogenisieren ...

1. *(ähnlich der Masse der Bronze gießerei)*

		<i>für 1 Ltr. Gipsmasse:</i>		
Altschamotte	1 T bis 8 T	345 g	2T: 532 g	4T: 690 g
= alte Formen, gemahlen				
Neuschamotte	1 T	600 g	450 g	300 g
= Ziegelsplitt (evt. aussieben: Siebkurvel!)				
Alabastermodellgips	1 T	400 g	300 g	200 g
		+Wasser: 600 cm ³		

2. *„Schludermasse“ (Bronze gießerei)*

Schamotte, 0-1	2 T
Quarz, 0-0,2	1 T
Kalifeldspat, Mehl	1 T
Kaolin	1 T
Ziegelmehl, 0-1	2 T
Gips	8 T

3. *„Dentalmasse“, relativ hart, für kleinere Formen*

Quarzmehl	2 T
Quarzsand, 0-0,1	1 T
Zirkonsilikat Mehl	2 T
Zirkonsilikat Sand, 0-0,1	1 T
Hartformgips	2 T

4. *„relativ hart, für kleinere Formen“*

Quarzmehl	4 T	
Kaolin	2 T	
Gips	6 T	
(+Papierbrei	1-2%)	
(+Keramikfaserbrei	1-2%)	im Anmachwasser

5.

Sand	1 T	2 T	1 T
Gips	1 T	1 T	1 T
Alte Formen			1 T

6. *(Strasbourg), für große Formen, weich, leicht*

Quarzsand 0-1 mm	3 T
Schamotte	6 T
Vermiculite	5 T
Gips	6 T

7. *(?) „bis zu 820 °C, je 1 l“*

Sand	125 g
Vermiculite	31 g
Alte Formen	94 g
Gips	375 g
Wasser	ca. 500 ml

8. *(?) „bis zu 700 °C, Größe?“*

Sand	375 g
Gips	1125 g
Wasser	980 ml

9. *mit Puzzolanerde (Heinzel)*

Puzzolanerde	136 T
Gips	54 T

Sonstige Rezepte

10. **Trennmittel** (zum Isolieren von harten, spröden Formen gegen Glaskontakt)

- a bis 650-700°C (?):
reicht i.d.R. Kreide, Gips, Bentonit oder Kaolin, auch Zementstaub (trocken!)
- b Keramiktrennmittel für höhere Temp.:
- | | |
|---------------|-----|
| Kaolin | 5 T |
| Tonerdehydrat | 5 T |
| Bentonit | 2 T |
- c *Gibersons* Pasterelliwash:
- | | | |
|----------------|-------|-------|
| Nephylensyenit | 160 g | 27,2% |
| Quarzmehl | 160 g | 27,2% |
| Knochenasche | 140 g | 23,8% |
| Kaolin | 88 g | 15,0% |
| Tonerde | 40 g | 6,8% |
- d *Gibersons* wiredip
- | | |
|-----------|-----|
| Quarzmehl | 9 T |
| Kaolin | 1 T |
- e *Graphit-Schlichte* (Heinzel)
- | | | |
|--------------------------|-----|--------------|
| Graphit (fein verrieben) | 96% | mit Wasser |
| Bentonit | 3% | rel. flüssig |
| Dextrin (Maisstärke) | 1% | anmachen |
- f Schmierwachs für heißes Glas
- | | |
|----------------|--------------------|
| Bienenwachs | 450g |
| Holzkohlestaub | 150g |
| Kolophonium | 1 gestr. Teelöffel |
| Kaugummi | 1 Streifen |

11. *Formsand für Sandguss* (Strassacker)

Quarzsand 0-0,5	87%
Bentonit	13%
Wasser	+6%

12. *Gibersons SandCore Material*

Peat and Dung (Torf u. Mist) [20' mesh]	40 g	1,9%	
Sawdust (Sägemehl) [20' mesh]	40 g	1,9%	2 T
calcined Core (Lehm, gemahlen) [50' mesh]	400 g	19,3%	
Clay (Tonmehl)	600 g	28,8%	2 T
Silica (Quarzsand) [60-100' mesh]	1000 g	48,1%	1 T

13. *Zementmassen* (Heinzel)

Schamottmehl, 0-0,07	290 T
Schamotte, 0,07-0,3	180 T
Schamotte, 0,3-0,6	330 T
Schamotte, 0,6-1,6	50 T
Zement „Lafarge fondue“	68 T
(8-15 % der Trockenmasse)	

+12% Wasser (nicht zu flüssig anmachen!) evt. 0,5% Tenside
zum Beschleunigen: +1% (des Zementanteils) Lithiumchloridsg.(10%)

14. *keramische Masse für Schmelztiegel / Glashafen*

Schamotte (aus alten Wannensteinen)	40%	47%
Tonmehl	8,33%	7,8%
Bentonit	0,67%	
Kaolin	6,0%	6,1%
Aluminiumoxid	27%	23,5%
Zirkonsilikat	18%	15,6%
Wasser	+20%	+15 - 25%

mischen und ziehen lassen (mauken), dann nochmal durchschlagen und in eine Gipsform stampfen; nach dem Trocknen bei 1200°C brennen

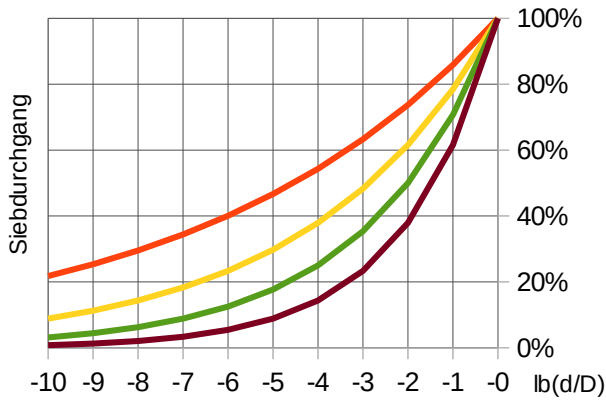
15. *Reparaturmasse für Glashäfen* (?)

Mullitmörtel „M60“	51,2%
Zirkonsilikat	27,3%
Tonerde, calz.	21,5%

Sieblinie

theoretische Fuller-Parabel: Siebdurchgang einer bestimmten Maschengröße d als Funktion der Relation zum größten Korn D

$$\frac{m(d)}{\sum m} = \left(\frac{d}{D}\right)^q$$



q =

0,220

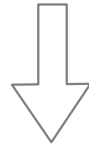
0,350

0,500

0,700

größere Dichtigkeit, feinere Abbildung, größere Rissanfälligkeit

größere Durchlässigkeit, gröbere Abbildung, geringere Rissanfälligkeit



Richtwerte für die max. Korngröße D bei einer best. Wandstärke B:

$$\frac{1}{10} \leq \frac{D}{B} \leq \frac{1}{5}$$

theoretische Packungsdichte

für Stäbe

orthogonal

$$\frac{A_o}{A_{\phi}} \leq \frac{\pi}{4} \approx 0,785$$

hexagonal

$$\frac{A_o}{A_{\phi}} \leq \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0,906$$

für Kugeln

orthogonal

$$\frac{V_o}{V_{\phi}} \leq \frac{\pi}{6} \approx 0,524$$

hexagonal

$$\frac{V_o}{V_{\phi}} \leq \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0,741$$

Probenreihen mit verschiedenen Zugabegrößen

für n+1 (incl. 0-Probe) Proben, sei
p₀ die minimale und
p₁ die maximale Konzentration der Zugabe:

(lineare Verteilung)
$$p_i = p_0 + \frac{(i-1)}{(n-1)} \cdot (p_1 - p_0)$$

(harmonische Verteilung)

$$p_i = p_0 \cdot \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{i-1}{n-1}} \quad \lg(p_i) = \lg(p_0) + \frac{(i-1)}{(n-1)} \cdot (\lg(p_1) - \lg(p_0))$$

(binäre Verteilung)

$$p_i = p_1 \cdot 2^{f(i)} \quad \begin{aligned} f_1(i) &= -1 \cdot (i-1) \\ f_2(i) &= -1/2 \cdot (i-1) \\ f_3(i) &= -1/6 \cdot (i-1) \end{aligned}$$

1,000	0,891
	0,794
0,707	0,630
	0,561
0,500	0,445
	0,397
0,354	0,315
	0,281
0,250	0,223
	0,198
0,177	0,157
	0,140
0,125	0,111
	0,099
0,088	0,079
	0,070
0,063	

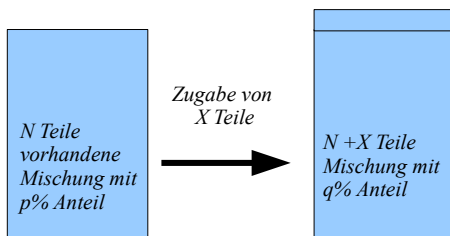
Ergänzungen von Gemischen

neue Mischung:

$$\frac{q\%}{100} = \frac{X + \frac{p\%}{100} \cdot N}{X + N}$$

Zugabe:

$$X = N \cdot \frac{q\% - p\%}{100 - q\%}$$



Wassergehalt

$$\frac{w\%}{100} = \frac{X_{(Wasser)}}{M_{(feucht)}} = \frac{X}{\sum N_{(Feststoffe, trocken)} + X} = \frac{M - \sum N}{M}$$

$$Y = \sum N \cdot \frac{w\%}{100 - w\%} \quad \sum N = M \cdot \frac{100 - w\%}{100} \quad M = \sum N \cdot \frac{100}{100 - w\%}$$

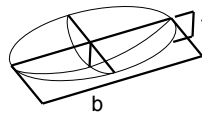
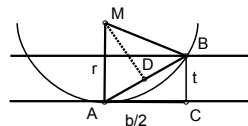
**Schüttgewichte u. relatives Volumen

Quarzsand	1,48	61%
Zirkonsilikat	1,28	
Ziegelsplitt	1,26	57%
Quarzmehl	1,14	44%
Aluminiumoxid	1,05	
Zement	1,03	
Gips	0,95	
Grog	0,93	37%
Tonmehl	0,77	28%
Kaolin	0,54	24%
Papp-Machee		15%
Plastilin	1,95	
Wachs	0,98	

Glasschleifen mit Steinen **

Korngrößen

mesh #	µm
18	1000
20	850
25	710
30	600
35	500
40	425
45	355
50	300
60	250
70	212
80	180
100	150
120	125
140	106
170	90
200	75
230	63
270	53
325	45
400	38
500	32
600	25



$$\Delta MAD \approx \Delta ACB$$

$$2 \cdot r = \frac{b^2}{4 \cdot t} + t$$

$$b = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot t - t^2}$$

2r = [mm]

b/t [mm]	1	2	3	4	5
10	26	15	11	10	10
15	57	30	22	18	16
20	101	52	36	29	25
25	157	80	55	43	36
30	226	115	78	60	50
35	307	155	105	81	66
40	401	202	136	104	85

Abschätzung von Volumina fürs Glasblasen **

theoretische Gesamtmasse

$$\text{für } \frac{d_i}{d_0} = \sqrt{\frac{r_i}{r_0}} \rightarrow \frac{V_i}{V_0} \approx \left(\frac{r_i}{r_0} \right)^{2,5}$$

$$\text{für eine Hohlkugel: } m = 2,5 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r^3 - (r-d)^3)$$

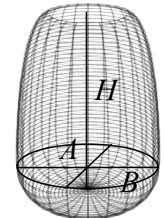
$$d = r - \sqrt[3]{r^3 - \frac{3}{10\pi} \cdot m} \quad [\text{cm}; \text{g}]$$

$$\text{statistisch nach Profil: } m \approx 0,22 \cdot (H \cdot (A+B))^{1,36} \pm 30\% \quad [\text{g/cm}]$$

$$\text{alternativ nach Volumen: } m \approx 0,71 \cdot (A \cdot B \cdot H)^{0,89} \pm 40\% \quad [\text{g/cm}]$$

$$\text{für massive Körper: } m \approx 1,32 \cdot B^2 \cdot H$$

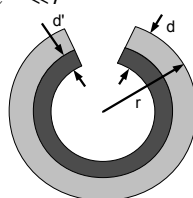
$$\text{für dickwandige Hohlkugel: } m \approx 1,27 - 1,16 \cdot B^3 \quad | \quad d \approx 1/3 - 1/4 \cdot B$$



theoretische Menge für Überfang

für $d' = \text{konstant} \ll r$

$$\lim_{\frac{d'}{r} \rightarrow 0} \frac{V_i}{V_0} = \left(\frac{r_i}{r_0} \right)^2$$



Ø [cm]

10

20

30

40

M_(Fabglas, d=0,1mm) [g]

7,9

31,4

70,7

125,7

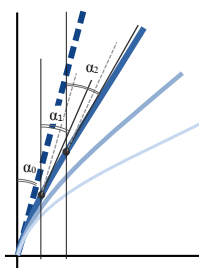
Zapfenabschnitt (d≈3cm) [cm]

0,4

1,8

4,0

7,1



dynamischer Fadentest (bei ansteigender Ofentemp.)

ein schräg nach oben gerichteter Glasfaden wird sich unter seinem eigenen Gewicht verbiegen, abhängig von Glas, bzw dessen Viskosität $\lg \eta$, Schlankheit S und Heizgeschwindigkeit c .

Dass er bei Erreichen der einer bestimmten Viskosität zuzuordnenden Temperatur gerade bis zu dem Fusspunkt gebogen ist, sollten die Proportionen so bemessen sein:

$$\text{Schlankheitsgrad}$$

$$3 \cdot \lg S = 3 \cdot \lg l - 2 \lg d$$

$$\lg S \approx \lg K + 0,36 \cdot (\lg \eta - 10) + 0,33 \cdot \lg (c_{[\circ/\text{min}]})$$

$$\lg K (45^\circ) = 0,9899$$

$$\lg K (15^\circ) = 1,1189$$

$$\text{bzw.: } \frac{l^3}{d^2} = \text{const.} = S^3$$

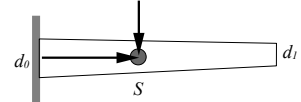
$$l = S \cdot \sqrt[3]{d^2} \quad d = \sqrt[3]{\left(\frac{l}{S} \right)^3}$$

[und für d/mm ergibt l/cm]

(Korrektur für leicht konische Stäbe ??)

$$\text{sei } \frac{d_1}{d_0} = e \text{ und } |e-1| < 0,2$$

$$\lg S \approx \dots + \dots - 0,33 \cdot \lg \left(\frac{e+e^2}{2} \right)$$



Korrekturen bei vermuteten Messfehler an Öfen:

$$\text{Messfehler } T_{\text{gemessen}} = T_{\text{real}} \pm X^\circ = T_{\text{real}} \cdot \frac{(100 \pm f\%)}{100}$$

(bei Temperaturmessungen)

Fehlerrechnung für die Haltezeit:

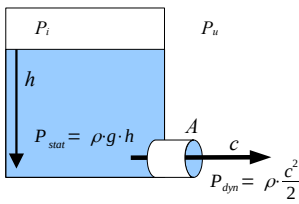
$$t'_{\sigma} \approx t_{\sigma} \cdot 10^{\left(\frac{X^\circ}{18^\circ} \right)}$$

für die Temp.punkte der Kühlphase:

$$T'_i \approx T_i \cdot \left(1 - \frac{f\%}{100} \right)$$

Metallguss

Auströmgesehen: Hydrostatik / Hydrodynamik



$$p_i - p_u + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2 + \rho \cdot g \cdot h = p_0 = \text{const.}$$

BERNOULLI

$$\dot{V} = \mu \cdot A \cdot c = \mu \cdot A \sqrt{2gh} \quad \mu_o \approx 0,62 \quad \text{bei Kreisloch}$$

TORRICELLI

$$\Delta p = \frac{\dot{V} \cdot 8 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot R^4}$$

L Rohrlänge
 R Rohrradius

HAGEN - POISEUILLE

Angusssystem

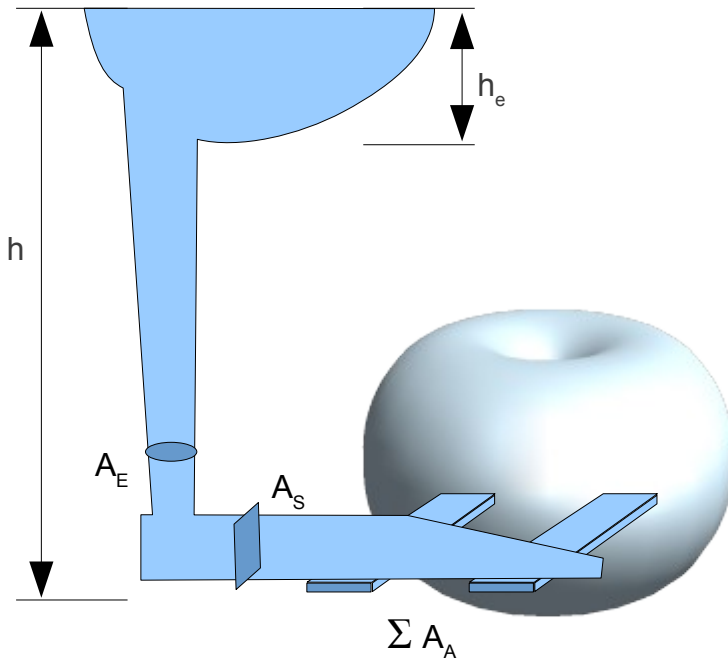
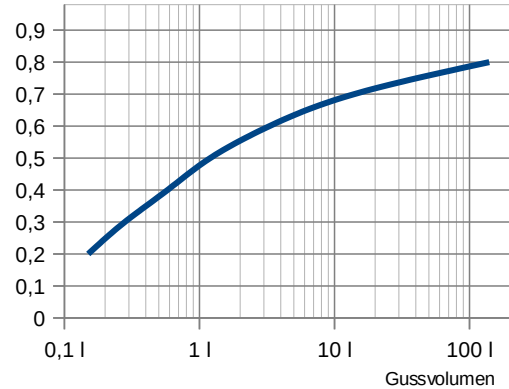
(nach ROLLER et al: Gießereitechnik, 2007)

$$A_{\text{Anschnitt}} \approx \frac{22,6}{\xi \cdot \sqrt{h}} \cdot \frac{V}{t} \quad | \quad A[\text{cm}^2]; h[\text{cm}]; V[\text{l}]; t[\text{s}]$$

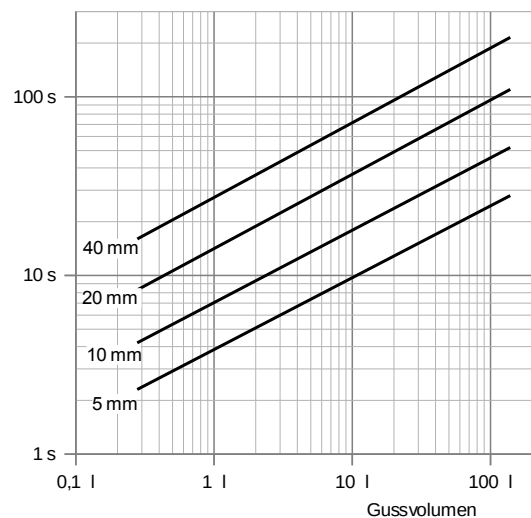
$$A_{\text{Einguss}} > A_{\text{Schlackenlauf}} > A_{\text{Anschnitt}} \\ 4 : 3 : 2 ?$$

$$A_E \geq A_A \cdot \sqrt{\frac{h}{h_e}}$$

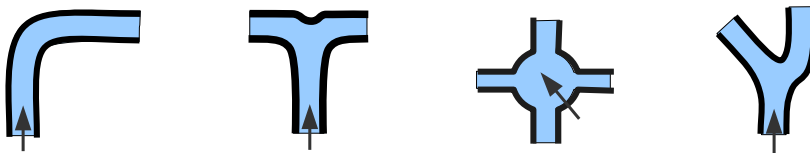
Näherungswerte für Strömungsverlustfaktor ξ



Giesszeiten bei versch. Wandstärken



typische Formen der Anguskanäle:



Trocknungs- und Ausbrennzeiten für das Wachsausschmelzen**

$$\text{zum Trocknen der Formen bei } 200^\circ\text{C: } t_0 \geq f \cdot (28' \cdot D + 2,4' \cdot D^2) \quad [\text{min/cm}]$$

$$\text{zum Brennen der Formen bei } 600^\circ\text{C: } t_1 \geq f \cdot (14' \cdot D + 1,2' \cdot D^2) \quad [\text{min/cm}]$$

mit Formfaktor f des umschreibenden Quaders (siehe S. 15)

elektrische Heizdrähte **

bei gegebenem Drahtdurchmesser d [mm]

elektr. Widerstand je m: $\frac{R}{l} = \frac{4 \cdot c_T \cdot \alpha}{\pi \cdot d^2} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$

Oberfläche je m: $\frac{A}{l} = \pi \cdot d \cdot 10 \left[\frac{cm^2}{m} \right]$

Masse je m: $\frac{m}{l} = \frac{\rho \cdot \pi}{4} \cdot d^2 \left[\frac{g}{m} \right]$

relative Oberfläche: $a = \frac{A}{R} = \frac{\pi^2 \cdot d^3 \cdot 2,5}{c_T \cdot \alpha} \left[\frac{cm^2}{\Omega} \right]$

Oberflächenlast: $p = \frac{P}{A} = \frac{I^2}{a} \left[W/cm^2 \right]$ $1 W/cm^2 < p < 4 W/cm^2$
[vgl. S. 13]

Stromlast: $I = \sqrt{p \cdot a}$

relative Spannung: $\frac{U}{l} = \frac{R}{l} \cdot I$

Cu	1/58 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Fe	0,15 – 0,1 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Cr	1/7,87 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Ni	1/14,5 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Konstantan	0,5 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

NiCroTal 60

max. 1125 °C

Cr 15%, Fe 25%, Ni 60%

ρ 8,2 g/cm³

α 1,11 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

c_T 1 + 1,9 x 10⁻⁴ 1/K x ΔT

Kanthal AF

max. 1300 °C

Cr 22%, Al 5,3%, Fe: Rest

ρ 7,15 g/cm³

α 1,39 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

c_T 1 + 6 x 10⁻⁵ 1/K x ΔT

Kanthal A1

max. 1400 °C

Cr 22%, Al 5,8%, Fe: Rest

ρ 7,10 g/cm³

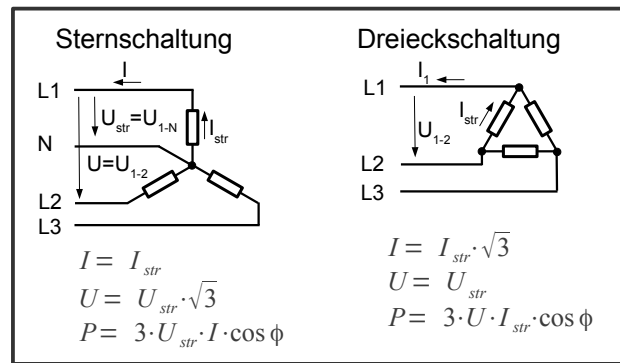
α 1,45 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

c_T 1 + 4 x 10⁻⁵ 1/K x ΔT

$$P = U \cdot I \quad I = \frac{P}{U} \quad U = \frac{P}{I}$$

$$R = \frac{U}{I} \quad I = \frac{U}{R} \quad U = R \cdot I$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad R = \frac{U^2}{P} \quad P = I^2 \cdot R \quad R = \frac{P}{I^2}$$



für Kanthal A1

d	l	R/l	a
[mm]	m/kg	[Ω/m]	[cm ² / Ω]
1,8	55,35	0,57	99,24
1,5	79,70	0,82	57,43
1,2	124,53	1,28	29,40
1,1	148,21	1,53	22,65
1	179,33	1,85	17,02
0,9	221,39	2,28	12,41
0,8	280,20	2,88	8,71
0,7	365,98	3,77	5,84

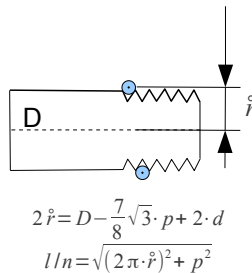
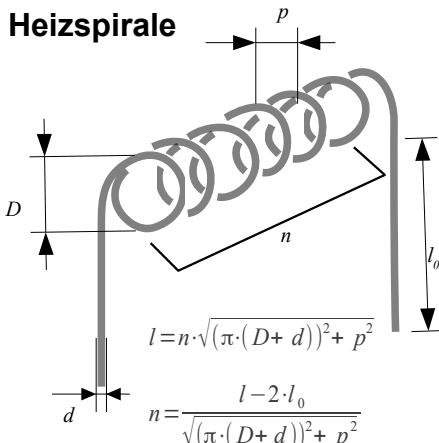
l für p=1W/cm ²	P an 230 V	l	m
[A]	[W]	[m]	[g]
9,96	2291	40,52	737
7,58	1743	36,99	467
5,42	1247	33,08	268
4,76	1095	31,67	215
4,13	949	30,20	170
3,52	810	28,65	130
2,95	679	27,01	97
2,42	556	25,27	70

für Kanthal AF

d	l	R/l	a
[mm]	m/kg	[Ω/m]	[cm ² / Ω]
1,8	54,96	0,55	103,52
1,5	79,14	0,79	59,91
1,2	123,66	1,23	30,67
1,1	147,17	1,46	23,63
1	178,08	1,77	17,75
0,9	219,85	2,18	12,94
0,8	278,24	2,77	9,09
0,7	363,42	3,61	6,09

l für p=1W/cm ²	P an 230 V	l	m
[A]	[W]	[m]	[g]
10,17	2340	41,38	753
7,74	1780	37,78	477
5,54	1274	33,79	273
4,86	1118	32,35	220
4,21	969	30,85	173
3,60	827	29,26	133
3,01	693	27,59	99
2,47	568	25,81	71

Heizspirale



für Wicklung über eine Gewindestange ergibt je Windung 'l/n', was einer Gewindelänge 'a' je lfm entspricht:

Gewinde Drahtstärke	M10 x 1,5		M12 x 1,75		M20 x 2,5	
	l/n [mm]	a [mm/lfm]	l/n [mm]	a [mm/lfm]	l/n [mm]	a [mm/lfm]
1,0	30,59	49,03	35,69	49,03	57,27	43,66
1,2	31,85	47,10	36,95	47,36	58,52	42,72
1,5	33,73	44,47	38,83	45,07	60,41	41,39
1,8	35,62	42,12	40,71	42,98	62,29	40,14

Propan Eigenschaften

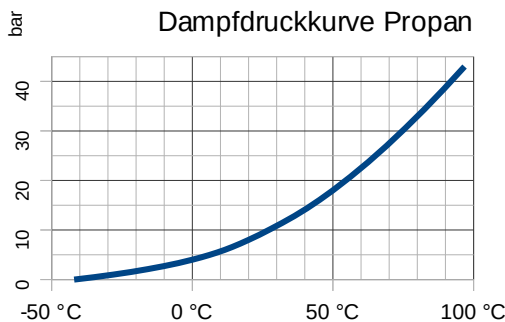
$d_{15^{\circ}\text{C}}$	0,51 kg/l (flüssig)
$d_{0^{\circ}\text{C}}$	2,01 kg/m ³ (Gas)
spez. Volumen	0,508 m ³ /kg 0°C
	0,535 m ³ /kg 15°C

unt. Heizwert	12,87 kWh/kg
	46,35 MJ/kg

theor. Luftbedarf	24,36 m ³ /m ³
	12,1 m ³ /kg
	15,61 kg/kg

Verbrennungsgasmenge	26,84 m ³ /m ³
----------------------	--------------------------------------

Dampfdruck	20°C	8,37 bar
	0°C	3,703 bar
	-10°C	2,424 bar
Siedepunkt	-42°C	1013 mbar
Verdampfungswärme	0°C	378,5 kJ/kg
Zündtemperatur mit Luft		470°C
Zündgrenzen mit Luft		2,1% - 9,5% Vol
max. Zündgeschwindigkeit		0,472 m/s



Entnahmeleistung aus Flaschen			
kg/h	5 kg Leergewicht 6,6 kg	11 kg Leergewicht 13,1 kg	33 kg Leergewicht 35,5 kg
bei ununterbrochener Entnahme	0,2	0,3	0,6
bei 50% Unterbrechung	0,5	0,8	1,8
bei stoßweiser Entnahme (max. 20 min)	1,5	2,0	3,0

Heizwerte H_u [kWh/kg]

Propan	12,87	Holz	4,3
Erdgas	9,61	Steinkohle	8,3 – 9,1
Heizöl	11,03	BK-Brikett	5,56

Rauchgase $[N\ m^3/kWh]$: 0,93 – 1,12

Richtwerte

für Brennkammer und Kamin ** :

Brennkammergröße

$$P_{max} \approx A_{Bk} \cdot 3,5 \ [kW/dm^2]$$

$$P_{max} \approx V_{Bk} \cdot 0,85 \ [kW/dm^3]$$

allg. Abgasvolumen:

$$V_{Abgas} \sim 0,3\ l/kJ \ (kalt) \Rightarrow 1,5\ l/kJ \ (heiß)$$

Kamindurchmesser

$$D_{Kamin} \approx 1/4 - 1/5 \cdot \sqrt{A_{Brennkammer}}$$

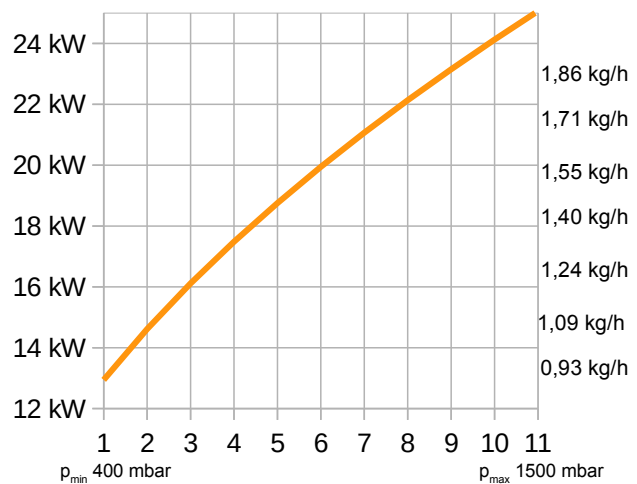
Kaminhöhe

$$h \geq 3 \times L_{fallender} + 1/3 \times L_{liegender\ Zug}$$

Brennerleistung (nach PHAROS) :

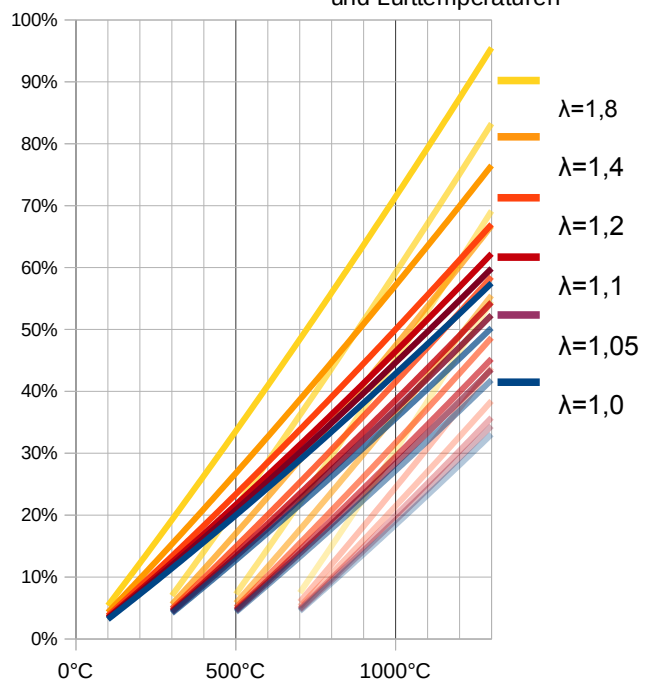
$$P \ [KW] = 0,71706 \cdot d^2 [mm] \cdot \sqrt{p} [mbar]$$

$$P \ [KW] = 0,6471 \cdot \sqrt{p} [mbar] \quad |d = 0,95\ mm|$$



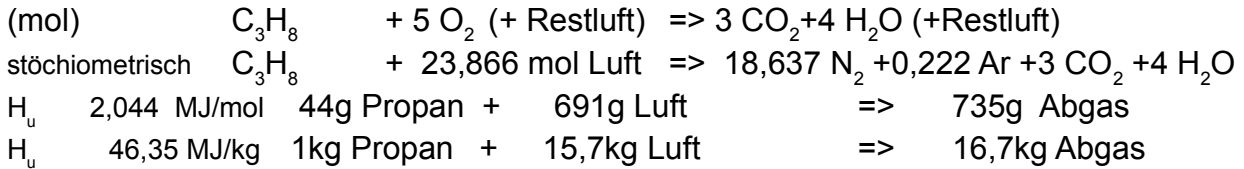
Abgasverluste

bei verschiedenen λ -Werten und Lufttemperaturen



Gasverbrennung ** Propan

Massenströme



Wärmekapazitäten [J/mol K]

$$c_p = a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3 \quad c_p = c_{p, \text{mol}} \cdot 1000 / M \quad [J / kg K]$$

	M [g/mol]	Normdichte: 0°C, 1013,25mbar [kg/m³]	$a_1 +$	$a_2 \times T +$	$a_3 \times T^2 +$	$a_4 \times T^3$
C_3H_8	44,096	2,01	-5,062	$308,7_{10}^{-3}$	$-161,8_{10}^{-6}$	$33,33_{10}^{-9}$
N_2	28,014	1,25	28,3	$2,537_{10}^{-3}$	$0,5443_{10}^{-6}$	
O_2	31,998	1,43	27,96	$4,180_{10}^{-3}$	$-0,167_{10}^{-6}$	
CO_2	44,009	1,98	21,57	$63,74_{10}^{-3}$	$-40,53_{10}^{-6}$	$9,684_{10}^{-9}$
CO	28,01	1,25	27,63	$5,024_{10}^{-3}$		
H_2O	18,005		30,38	$9,621_{10}^{-3}$	$1,185_{10}^{-6}$	
Ar	39,448	1,78	20,632			

Abgasverluste:

$$H_{\text{Abgas}} = \sum \dot{m}_i \cdot \int_{T_U}^{T_{\text{Abgas}}} c_{p,i}(T) dT \quad H_{(T_0-T_1)} = \int_{T_0}^{T_1} c_p(T) dT = T_1 \left[a_1 \cdot T + \frac{a_2}{2} \cdot T^2 + \frac{a_3}{3} \cdot T^3 + \frac{a_4}{4} \cdot T^4 \right] - T_0 \left[a_1 \cdot T + \frac{a_2}{2} \cdot T^2 + \frac{a_3}{3} \cdot T^3 + \frac{a_4}{4} \cdot T^4 \right]$$

$$c_{p, \text{Gemisch}} = \sum \zeta_i \cdot c_{p,i}$$

Zusammensetzung

	Luft, trocken	Luft, feucht	Abgas, $\lambda =$	$\lambda =$	$\lambda =$	$\lambda =$	$\lambda =$	$\lambda =$
M [g/mol]	28,014	31,998	44,009	28,01	18,005	39,448		
γ [Vol % = Mol %]	N ₂ 78,08%	O ₂ 20,95%	CO ₂ 0,04%	CO 28,01	H ₂ O 18,005	Ar 39,448		
20°C, 60%	77,00%	20,66%	0,04%		1,38%	0,92%		
0,7	0,9	1	1,1	1,2	1,4			
66,70%	69,07%	71,13%	71,62%	72,04%	72,71%			
		1,75%	3,22%	5,57%				
8,27%	11,49%	10,52%	9,70%	8,40%				
13,42%	4,12%							
19,09%	17,71%	16,54%	15,26%	14,18%	12,45%			
0,80%	0,83%	0,85%	0,86%	0,86%	0,87%			
$c_{p,20^\circ}$ [J/kg K]	1002,4	1009,7	1138,8	1099,9	1082,4	1076,2	1070,9	1062,6
M [g/mol]	28,961	28,811	26,194	27,659	28,293	28,337	28,374	28,433
R [J/kg K]	287,09	288,59	317,42	300,61	293,87	293,42	293,04	292,42

Ideales Gas: bei 0°C
1013 mbar

$$1 \text{ mol} \cong 22,4 \text{ l}$$

$$1 \text{ m}^3 \cong 44,64 \text{ mol}$$

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

R: spez. Gaskonstante [J / kg K]

T: absolute Temperatur [K]

ρ : Dichte [kg / m³]

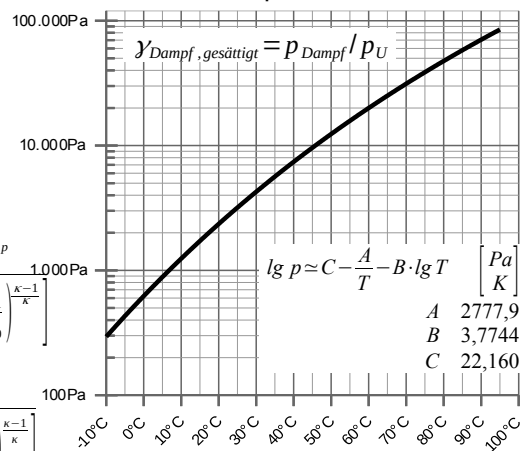
p: Druck [Pa]

$$R_G = 8,3145 \text{ [J / mol K]} \quad \text{allg. Gaskonst.}$$

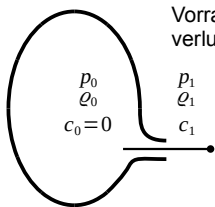
$$R = R_G \cdot 1000 / M \text{ [J / kg K]} \quad \text{spez. Gaskonst.}$$

Umgebungsbedingungen

Dampfdruckkurve Wasser



Auströmvorgänge:



Vorraussetzung: ideales Gas, stationäre, isentrope u. verlustfreie Strömung (vgl. auch: S.26, Hydrostatik)

Isentropenexponent: $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - R}$
 $R = c_p - c_v = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot c_p$

Auströmggeschwindigkeit: $c = \sqrt{\frac{2 \kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}$

Massenstrom: $\dot{m} = A \cdot \sqrt{2 \cdot p_0 \cdot \rho_0} \cdot \Psi$

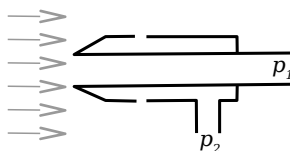
Ausflussfunktion: $\Psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}$

Schallgeschwindigkeit: $c_a = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}$

Machzahl: $Ma = \frac{c}{c_a}$

Grundgleichung der Gasdynamik: $\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$

Pitot-Rohr



$$c = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$

Luftdruck [mbar] bei h [m über NN]:

$$p \approx p_0 \cdot (1 - h / 44308)^{5,255}$$

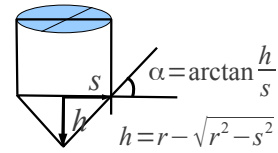
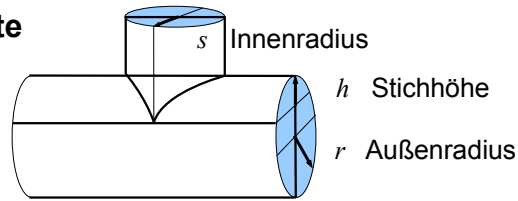
	0	200	400	750	1000
1013	989	966	926	899	

$$1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa} \approx 10,2 \text{ mm WS}$$

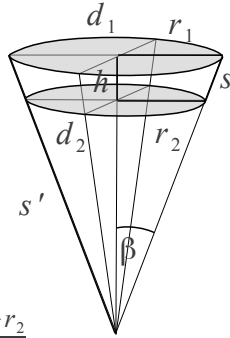
$$1 \text{ mm WS} = 9,81 \text{ Pa} \approx 0,1 \text{ mbar}$$

verschiedenes ***

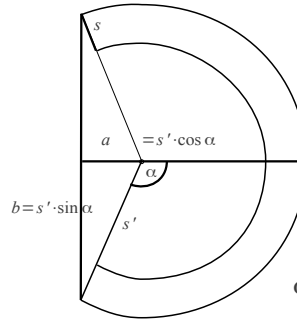
Zylinderschnitte



Kegelmantel



$$\tan \beta = \frac{r_1 - r_2}{h}$$



$$s = \sqrt{h^2 + \frac{(d_1 - d_2)^2}{4}}$$

$$s' = \frac{r_1}{r_1 - r_2} \cdot s$$

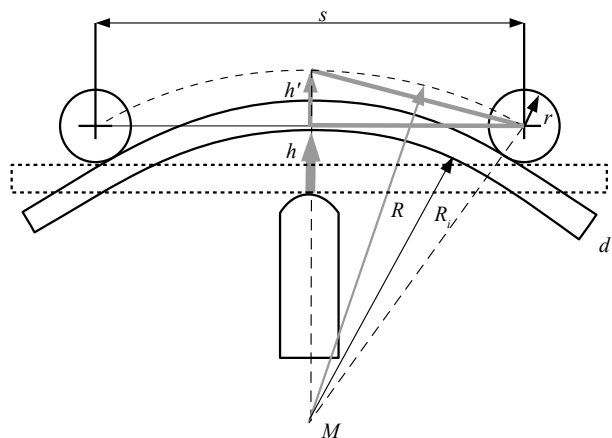
$$\alpha = 90^\circ \cdot \frac{d_1}{s'} = 90^\circ \cdot \frac{(d_1 - d_2)}{s}$$

für $\beta = 45^\circ$: $r_1 - r_2 = h$ $s = \sqrt{2} \cdot h$ $s' = \sqrt{2} \cdot r_1$ $2\alpha = 254^\circ 33,5' = 270^\circ - 15^\circ 26,5'$

Biegen von Radien

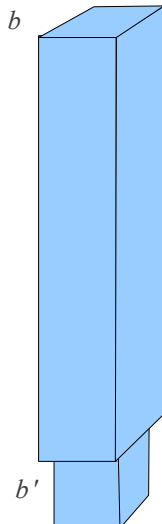
$$h' = h = R - \sqrt{R^2 - \frac{s^2}{4}}$$

$$R_i = R - (d + r)$$



Massenkalkulation/Stabilität

von gegossenen Glasstelen



$$b \simeq \frac{1}{10} \cdot H \rightarrow m \simeq 25 \text{ kg} \cdot H^3 [m]$$

$$b \simeq \frac{1}{5} \cdot H \rightarrow m \simeq 100 \text{ kg} \cdot H^3 [m]$$

für Glyphen/ Ziffern:

$$b \simeq \frac{1}{5} \cdot H \rightarrow m \simeq 175 (\pm 20\%) \text{ kg} \cdot H^3 [m]$$

nötige Breite b' :

$$\sigma_b = \frac{F \cdot L}{W} ; W = \frac{b^3}{6} ; \sigma_b \simeq 6 \text{ N/mm}^2$$

$$b' [cm] \simeq \sqrt[3]{M [Nm]} (+15\%, -13\%)$$

$$\text{sei } M = F \cdot L [Nm] \simeq 1000 \cdot L [m]^2$$

$$\rightarrow b' [cm] \simeq 10 \cdot L [m]^{\frac{2}{3}}$$

$$m [kg] = 25 \cdot L [m]^{\frac{7}{3}} \cdot X$$

1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18	
1	1,0080	1	H	3	6,94	4	9,0122	19	39,098	20	40,078	21	44,956	37	85,468	38	87,620	39	88,906	55	132,91	56	137,33	57	138,91	87	(223)	88	(226)	89	(227)	90	(227)	91	(227)
Wasserstoff		Lithium		Beryllium		Natrium		Kalium		Calcium		Scandium		Rubidium		Strontium		Yttrium		Caesium		Barium		Lanthan		Francium		Radium		Actinium		Oganesson			
2,2	0,09	0,98	0,53	1,57	1,85	0,93	0,97	1,31	1,74	0,82	0,86	1,0	1,55	1,36	2,98	0,82	1,53	0,95	2,63	1,22	4,47	0,79	1,90	0,89	3,59	1,1	6,15	0,7	2,89	5,5	1,1	10,1	?		
1	1,0080	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
2	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
3	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
4	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
5	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
6	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
7	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
8	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
9	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
10	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
11	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
12	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
13	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
14	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
15	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
16	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
17	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
18	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
19	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
20	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
21	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
22	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
23	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
24	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
25	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
26	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
27	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
28	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
29	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
30	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
31	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
32	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
33	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
34	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
35	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
36	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
37	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
38	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
39	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
40	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
41	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
42	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
43	He	3	Li	4	Be	11	Na	12	Mg	19	K	20	Ca	37	Rb	38	Sr	55	Y	87	Cs	88	Ba	89	La	91	Fr	92	Ra	93	Ac	118	Og	?	
44	He	3	Li	4	Be	11																													

Stöchiometrisches Rechnen

molare Masse einer Verbindung:

$$M_{(x,y)} = N_x \cdot M_x + N_y \cdot M_y$$

m	Masse [kg]
M	molare Masse [g/mol]
n	Anzahl [mol]
N	Anzahl chem. Elemente innerhalb e. Verbindung

Mol. Anzahl einer Verbindung
einer bestimmten Masse:

$$n_x [\text{mol}] = \frac{1000 \cdot m [\text{kg}]}{M_x [\text{g/mol}]}$$

Anteile e. Gemisches:

$$p_x [\%_{\text{Gew.}}] = 100 \cdot \frac{m_x}{\sum m_i}$$

molare Anteile e. Gemisches:

$$q_x [\%_{\text{mol}}] = 100 \cdot \frac{n_x}{\sum n_i} = 100 \cdot \frac{\frac{m_x}{M_x}}{\sum \frac{m_i}{M_i}} = 100 \cdot \frac{\frac{p_x}{M_x}}{\sum \left(\frac{p_i}{M_i} \right)}$$

Masse e. Anteils e. Gemisches:

$$m_x [\text{kg}] = m_{\text{gesamt}} \cdot \frac{p_x}{100} = m_{\text{gesamt}} \cdot \frac{q_x \cdot M_x}{\sum (q_i \cdot M_i)}$$

Ersatz e. Stoffes in äquivalenter Menge:

$$n_A \parallel x \cdot n_B \rightarrow m_A = m_B \cdot \frac{M_A}{x \cdot M_B}$$

Rohstoffe für Glas und Glasfarben

	Chromophore
	Me ⁺ -oxide
	Me ⁺⁺ -oxide
	Me ⁺⁺⁺ -oxide
	sonstige

chem. Bezeichnung	Trivialname	Summenformel	mol-gewicht
Aluminiumhydroxid	Tonerdehydrat	Al(OH) ₃	78
Aluminiumoxid	Tonerde, Korund	Al ₂ O ₃	101,96
Antimonchlorid		SbCl ₃	228,11
Antimonoxid		Sb ₂ O ₃	291,5
Arsentrioxid	Arsenik	As ₂ O ₃	197,84
Bariumcarbonat		BaCO ₃	197,34
Bariumoxid		BaO	153,32
Bariumsulfat	Baryt, Blanc fixe	BaSO ₄	253,41
Blei(II,IV)-oxid	Mennige, Minium	Pb ₃ O ₄	685,57
Blei(II)-oxid	Massicot	PbO	223,19
Bleicarbonat, bas.	Bleiweiß	2 PbCO ₃ x Pb(OH) ₂	775,63
Bortrioxid	Borsäure	B ₂ O ₃	69,62
Cadmiumselenid	Cadmiumrot	CdSe	191,36
Cadmiumsulfid	Cadmiumgelb	CdS	144,48
Calciumborat		CaO x B ₂ O ₃ x 2H ₂ O	161,73
Calciumfluorid	Flussspat, Fluorit	CaF ₂	78,08
Calciumhydroxid	gelöschter Kalk	Ca(OH) ₂	74,1
Calciumkarbonat	Kalk, Kreide	CaCO ₃	100,09
Calciumoxid	gebrannter Kalk	CaO	56,08

chem. Bezeichnung	Trivialname	Summenformel	mol-gewicht
Calciumphosphat	Kalkphosphat	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	310,18
Calciumtartrat	Weinstein	$\text{CaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$	188,2
Chrom-III-Oxid	Chromoxidgrün, stumpf	Cr_2O_3	151,99
Eisen-II Oxid	Eisenoxydul	FeO	71,85
Eisen-II-III-Oxid	Eisenhammerschlag	Fe_3O_4	231,54
Eisen-III-Oxid	Eisenoxidrot	Fe_2O_3	159,7
Fluor		F	18,99
Gold-III Chlorid		AuCl_3	303,33
Kali-Feldspat		$\text{K}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{SiO}_2$	556,76
Kaliumcarbonat	Pottasche, calz.	K_2CO_3	138,2
Kaliumchlorid		KCl	74,55
Kaliumdichromat		$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	294,19
Kaliumhydrogen-carbonat	Pottasche	KHCO_3	100,12
Kaliumhydrogentartrat	Weinstein	$\text{KC}_4\text{H}_5\text{O}_6$	188,18
Kaliumnitrat	Kalisalpeter	KNO_3	101,11
Kaliumoxid		K_2O	94,2
Kalk-Feldspat		$\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$	278,24
Kaolin		$\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$	240,145
Knochenasche		$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \times \text{CaO}$	986,62
Kobaltcarbonat		CoCO_3	118,94
Kobaltoxid		Co_3O_4	240,8
Kohlenstoff	Kohle	C	12,011
Kupfer-I Oxid	Kupferoxydul, Kupferoxid, rot	Cu_2O	143,09
Kupfer-II Oxid	Kupferoxid, schwarz	CuO	79,545
Lepidolith		$\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3[(\text{F},\text{OH})_2](\text{Al},\text{Si})\text{Si}_3\text{O}_{10}]$	383,46
Lithiumcarbonat		Li_2CO_3	73,89
Lithiumchlorid		LiCl	42,39
Lithiumoxid		Li_2O	29,88
Lithium-Aluminiumsilikat	Spodumen	$\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	186,09
Magnesiumcarbonat	Magnesit, Magnesia alba	MgCO_3	84,31
Magnesiumoxid	gebrannte Magnesia	MgO	40,32
Magnesiumsilikathydrat	Talkum, Steatit	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	379,3
Mangan-II-III Oxid		Mn_2O_3	228,81
Mangan-IV Oxid	Braunstein	MnO_2	86,94
Mangancarbonat		MnCO_3	114,95
Mullit		$3\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$	426,05
Natriumcarbonat	Soda, calz.	Na_2CO_3	105,99
Natriumcarbonat-Dekahydrat	Kristallsoda	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10 \text{H}_2\text{O}$	286,09
Natriumchlorid	Kochsalz	NaCl	58,44
Natriumhexafluorosilikat		Na_2SiF_6	188,06
Natriumhydrogencarbonat	Natron	NaHCO_3	84,06
Natriumnitrat	Salpeter	NaNO_3	84,99
Natriumoxid		Na_2O	61,98
Natriumsulfat	Glaubersalz	Na_2SO_4	142,04
Natriumtetraborat	Borax	$\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \times 8 \text{H}_2\text{O}$	381,37
Natriumthiosulfat	Fixiersalz	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 5\text{H}_2\text{O}$	248,18
Natron-Feldspat		$\text{Na}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{SiO}_2$	524,54
Nephelin		$3\text{Na}_2\text{O} \times \text{K}_2\text{O} \times 4\text{Al}_2\text{O}_3 \times 8\text{SiO}_2$	1168,65
Phosphorpentoxid	Phosphorsäure	P_2O_5	141,94
Schwefel		S	32,065
Schwefeltrioxid		SO_3	80,06
Silbernitrat		AgNO_3	169,87
Siliziumdioxid	Quarz, Silica	SiO_2	60,08
Titandioxid	Titanweiß	TiO_2	79,87
Trinatriumaluminiumhexafluorit	Kryolith	Na_3AlF_6	209,66
Ulexit		$\text{Na}_2\text{O} \times 2\text{CaO} \times 5\text{B}_2\text{O}_3 \times 16\text{H}_2\text{O}$	810,48
Zinkoxid	Zinkweiß	ZnO	81,39
Zinkselenid		ZnSe	144,33
Zinn-II Oxid	Zinnoxidul	SnO	134,7
Zinn-IV oxid	Zinnasche	SnO_2	150,71
Zinnchlorid	Zinnsalz	$\text{SnCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$	225,74
Zirkonsilikat		$\text{Zr}[\text{SiO}_4]$	183,3

Färbungen in alkalireichen Glasuren (nach W. MATTHES: Keram. Glasuren)

Glasur Bsp. Seger F.: 0,55 – 0,8 Me⁺; 0,2 – 0,45 Me⁺⁺; 0,16 – 0,74 Al₂O₃; 1,9 – 2,9 SiO₂
 Brand bei SK 08a - 03a (940°C – 1040°C)

Antimonoxid	2%	gelblichweiß, transp.
	6%	weißlich, halb opak
	10%	weiß, deckend
Chromoxid	0,5%	gelb – leuchtend gelbgrün
	1%	hellchromgrün
	4%	dunkelchromgrün
Kobaltoxid	0,1%	hell – mittelblau
	1%	mittel – dunkelultramarinblau
	4%	schwarzviolettblau
Eisenoxid	0,5%	gelblich transp.
	2%	hellgelb transp.
	4%	hellgelb
	6%	braungelb
	8%	mttl.- dkl.braun, halbpak
Kupferoxid	1%	hellblau
	2%	kupferblau
	6%	grünblau, transp.
	10%	schwarzgrün – grünschwartz
Manganoxid	0,5%	hellvioletttrötl. - hellviolettbraun
	2%	violett – violettbraun
	4%	purpurbraunviolett – dkl.violettbraun
Nickeloxid	0,5%	grauviolett – hellgraubraun
	2%	dkl.grau – braungrau, dkl.braun
	4%	schwarzbraun – schwarzgrau
Rutil	5%	gelbl.braun, halbpak
	10%	beigegelbl. - graubräunl., opak
Zinnoxid	in alkalireichen Glasuren farblos, bei höherem Me ⁺⁺ Anteil:	
	4%	weißl. halbpak
	6– 8%	deckend

Wasserlöslichkeit einiger Salze:

g wasserfreier Stoff auf 100 ml Wasser bei 20°C

Na ₂ B ₄ O ₇ x 10 H ₂ O	4,9	B ₂ O ₃	3,6	KMnO ₄	6,4
NaCl	35,9	AgNO ₃	220,0	K ₂ CrO ₄	63,7
Na ₂ CO ₃ x 10 H ₂ O	21,5	Cu(NO ₃) ₂	137,8	CuSO ₄ x 5H ₂ O	20,8
NaNO ₃	88,0	KNO ₃	31,5	CuCl ₂	62,0
NaOH x H ₂ O	108,0	KOH x 2H ₂ O	112,0	FeCl ₃	92,0

Zusammensetzung von rohen Tonen, Gesteinsmehle und Aschen

[nach W. MATTHES: Keramische Glasuren]

Tone und Gesteinsmehle	Li ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅
Bentonit		3,5	1,3	3,9	4,2	16,8	55,3	4,3	0,3	
mol %		4,16%	1,02%	7,12%	5,52%	12,14%	67,79%	1,98%	0,28%	
Jäger Ton weiß-HF		0,2	1,8	0,5	0,2	22,3	66,3	1,2	1,2	
mol %		0,23%	1,38%	0,90%	0,26%	15,81%	79,79%	0,54%	1,09%	
Jäger Kaolin		0,1	2,3	0,2	0,1	36,5	48	0,75	0,03	
mol %		0,14%	2,04%	0,42%	0,15%	29,96%	66,87%	0,39%	0,03%	
Jäger Ton gelbbrennend		0,8	0,7	0,9	1,5	24,7	62	1,6		
mol %		0,95%	0,55%	1,65%	1,98%	17,90%	76,24%	0,74%		
Jäger Ton rotbrennend		1,1	1,5	0,4	0,4	24,1	54,1	11,2		
mol %		1,41%	1,27%	0,79%	0,57%	18,79%	71,60%	5,58%		
Keupermergel, CH		1,2	2,9	7,6	9,8	11,5	35,5	4	1	
mol %		1,68%	2,67%	16,32%	15,13%	9,77%	51,17%	2,17%	1,08%	
Ockerton LR-G		1,2	2	0,4	0,3	22,1	45,7	28,1	0,8	
mol %		1,59%	1,74%	0,81%	0,44%	17,78%	62,39%	14,43%	0,82%	
Eisenberger Engobeton		1,1	4,1	2,8	0,8	19	50,5	12,3	1	
mol %		1,41%	3,45%	5,51%	1,13%	14,77%	66,64%	6,11%	0,99%	
Kalifeldspat-Jäger		3	11,9	0,1	0,2	18,4	66	0,08		
mol %		3,31%	8,65%	0,17%	0,24%	12,36%	75,23%	0,03%		
Nephelin-Syenit-Kanada		9,8	4,6	0,1	0,7	23,3	60,7	0,07		
mol %		10,82%	3,34%	0,17%	0,85%	15,64%	69,14%	0,03%		
Spodumen	7	0,2	0,5			26	66	0,14		
mol %	14,66%	0,20%	0,33%			15,97%	68,78%	0,05%		
Bimsmehl		6,4	3,08	0,4	2,6	23,7	59,7	2,66		
mol %		7,20%	2,28%	0,69%	3,23%	16,20%	69,24%	1,16%		
Basaltmehl TK		2	2,7	9,6	11,6	13,9	44,8	11,1	2,5	
mol %		2,17%	1,93%	15,99%	13,89%	9,16%	50,09%	4,67%	2,10%	
Granitmehl		0,1	0,7	2,3	2,9	17,8	57,6	9,7	0,88	0,25
mol %		0,12%	0,56%	4,31%	3,90%	13,18%	72,38%	4,59%	0,83%	0,13%
Portlandzement		0,2	0,8	2,3	64,8	4,8	20,4	2,8	0,12	
mol %		0,20%	0,52%	3,50%	70,89%	2,89%	20,83%	1,08%	0,09%	
Stubensandstein				1,32	30,81	1,28	43,36			
mol %				2,49%	41,73%	0,95%	54,82%			

Asche von	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	P ₂ O ₅
Apfelbaum	1,9	11,8	5,5	70,9		2,7			4,5
mol %	1,88%	7,67%	8,35%	77,41%		2,75%			1,94%
Ahorn	6,4	6,3	11,6	28,4	0,7	13,8	2,4	0,4	4,5
mol %	8,25%	5,34%	22,98%	40,44%	0,55%	18,34%	1,20%	0,37%	2,53%
Birke	9	22,6	14,3	29,6		11,5	1,3	0,3	7,9
mol %	9,51%	15,72%	23,24%	34,58%		12,54%	0,53%	0,23%	3,65%
Buche	8,3	24,3	8,2	42		3,9	0,6	4,5	6,2
mol %	8,88%	17,10%	13,48%	49,65%		4,30%	0,25%	3,43%	2,90%
Buchsbaum	8,3	19,8	14	30,1		12,6	1,1	0,3	7,1
mol %	8,94%	14,03%	23,18%	35,83%		14,00%	0,46%	0,23%	3,34%
Eichenholz	9,1	14	12	30	0,1	15,3	2,4	0,1	13,1
mol %	9,84%	9,96%	19,95%	35,85%	0,07%	17,07%	1,01%	0,08%	6,19%
Esche	7,7	16	12	25,5	0,6	23,3	3,9	0,4	7
mol %	8,18%	11,19%	19,60%	29,95%	0,39%	25,54%	1,61%	0,30%	3,25%
Fichte	5,5	7,4	5,5	29,6		1,8	0,2	0,5	3,7
mol %	9,92%	8,78%	15,25%	59,00%		3,35%	0,14%	0,64%	2,91%
Herbstlaub		2,7	5,3	18,1	4,3	56,5	1,2		2,6
mol %		1,92%	8,81%	21,64%	2,83%	63,06%	0,50%		1,23%
Heu, gewaschen		0,206	0,075	0,714	0,13	0,876			
mol %		10,29%	3,75%	35,68%	6,50%	43,78%			
Kiefer	8,6	26,5	6,3	25	0,4	10	4	5,1	8,9
mol %	10,36%	21,01%	11,67%	33,30%	0,29%	12,43%	1,87%	4,38%	4,68%
Kirschbaum	1,8	21,6	8,7	30,2		24,9	2,6		7,6
mol %	1,94%	15,32%	14,41%	35,98%		27,69%	1,09%		3,58%
Pflaume	5,2	56,9	9,3	6,4		1,3	5,2		12,1
mol %	7,16%	51,53%	19,68%	9,74%		1,85%	2,78%		7,27%
Riedgras	6,6	36,6	6,3	9,4		11			6,3
mol %	10,18%	37,13%	14,93%	16,02%		17,50%			4,24%
Schilf, gewaschen	0,12	0,232	0,148	0,532	0,036	5,4			
mol %	1,86%	3,59%	2,29%	8,23%	0,56%	83,49%			
Schilfrohr	0,3	8,6	1,3	6		7,4			2,1
mol %	1,30%	24,45%	8,64%	28,66%		32,99%			3,96%
Walnuss	4,9	14,7	6,6	40	0,1	16,7	1,3	0,4	6,4
mol %	5,46%	10,77%	11,30%	49,23%	0,07%	19,19%	0,56%	0,32%	3,11%
Weizenstroh	2,8	11,5	5,2	6,1		66,2			5,4
mol %	2,92%	7,90%	8,35%	7,04%		71,32%			2,46%

Zusammensetzung verschiedener historischer und moderner Gläser

Angaben in Mol-% aus den gegebenen Glassätzen (ohne Berücksichtigung möglicher Abbrandverluste!) überlieferter Rezepte oder aus chemischen Analysen besonders der modernen wie auch der archäologischen Gläser. Die Segerformel bezieht sich zur besseren Vergleichbarkeit nur auf die glasbildende Oxide unter Verzicht auf die Chromophoren.

Oxide [Mol-%]	WMF Alabaster	WMF-Lithalin	WMF-Goldrubin	WMF-Goldrubin II	WMF-Kupferrubin	WMF-Selenrubin	WMF-Goldtopas	Gibbs regular crystal	Gibbs Core Vessel Blue	Gibbs Bone Ash Opal	Gibbs Fluorine Opal	PolyTJ-1893-Kohlelgb	PolyTJ-1893-Kupferrubin I	PolyTJ-1893-Kupferrubin II	PolyTJ-1893-Emailglas I	PolyTJ-1893-Emailglas II	PolyTJ-1893-Emailglas III	PolyTJ-1893-Emailglas IV	PolyTJ-1893-Kryolithglas I	PolyTJ-1893-Kryolithglas II	
Li ₂ O																					
Na ₂ O	1.78%	11.39%	1.40%	1.59%	16.84%	11.80%	1.41%	15.62%	15.75%	14.20%	13.53%	0.22%	4.25%	4.14%	0.26%	0.88%	1.91%	10.33%	6.48%	9.74%	
K ₂ O	13.93%	1.33%	11.07%	7.33%	0.63%	3.84%	11.07%	1.89%	0.88%	1.72%	1.00%	12.98%	6.31%	9.06%	4.75%	6.53%	5.56%	4.31%		0.25%	
MgO	4.50%																				
CaO					8.44%			8.66%	8.73%	9.75%	5.54%	6.40%			15.05%	3.07%	2.86%		2.72%	4.00%	
BaO									1.92%	1.18%	0.48%										
PbO			11.66%	19.48%			11.74%			0.39%			5.62%	7.30%	2.99%	12.66%	14.66%	4.75%	0.62%		
ZnO		6.18%				7.68%		1.91%	0.18%	2.61%	4.04%					3.90%	2.18%				
B ₂ O ₃		0.53%	2.80%	3.18%	1.51%	10.32%	2.81%	1.19%	1.20%	1.82%	1.23%	0.45%	8.50%	8.29%	0.53%	1.76%	3.82%	4.13%	2.70%		
Al ₂ O ₃		3.20%						1.09%	1.10%	3.35%	4.02%				0.81%	0.80%	0.77%	1.97%	4.99%	4.33%	
SiO ₂	0.13 %		0.63%	0.24%			0.22%		0.00%						3.50%	3.21%	2.99%	1.76%			
As ₂ O ₃			0.32%																		
SiO2	71.67%	55.83%	70.98%	67.35%	70.49%	65.03%	71.28%	69.63%	70.22%	61.91%	49.05%	71.09%	71.21%	69.46%	67.09%	66.18%	64.30%	72.75%	82.48%	81.68%	
CdSe						0.25%															
CdS						0.22%															
Cr ₂ O ₃																					
FeO														0.58%							
Fe ₂ O ₄		0.76%			0.05%																
Fe ₂ O ₃																					
F	5.07%	19.20%			1.08%					2.12%	20.80%								6.59%	8.11%	20.06%
AuCl ₃			0.02%	0.02%																	
Co ₃ O ₄										0.01%											
C																					
Cu ₂ O		0.82%			0.47%							5.33%	0.91%								
CuO													0.75%	1.17%							
MnO ₂													2.46%								
P ₂ O ₅															5.02%	1.02%	0.95%				
TiO ₂	1.99%									0.76%	0.30%										
S												2.66%									
SO ₃	0.93%																				
AgNO ₃										0.05%											
ZnSe						0.87%															
SnO																					
SnO ₂		0.76%	1.13%	0.81%	0.48%		1.14%						0.32%	0.64%							
	0.202	0.189	0.241	0.284	0.259	0.233	0.242	0.281	0.275	0.3	0.246	0.196	0.162	0.205	0.231	0.27	0.272	0.194	0.098	0.14	
Seger	0.777	0.673	0.517	0.314	0.674	0.671	0.515	0.624	0.605	0.536	0.591	0.674	0.653	0.644	0.217	0.274	0.275	0.755	0.66	0.714	
formel	0.223	0.327	0.483	0.686	0.326	0.329	0.485	0.376	0.395	0.464	0.409	0.326	0.347	0.356	0.783	0.726	0.725	0.245	0.34	0.286	
	0.007	0.197	0.155	0.12	0.058	0.443	0.139	0.081	0.084	0.172	0.214	0.023	0.526	0.404	0.21	0.213	0.279	0.405	0.784	0.309	
	3.547	2.952	2.942	2.371	2.72	2.789	2.943	2.479	2.556	2.061	1.995	3.626	4.404	3.387	2.909	2.448	2.367	3.751	8.399	5.838	

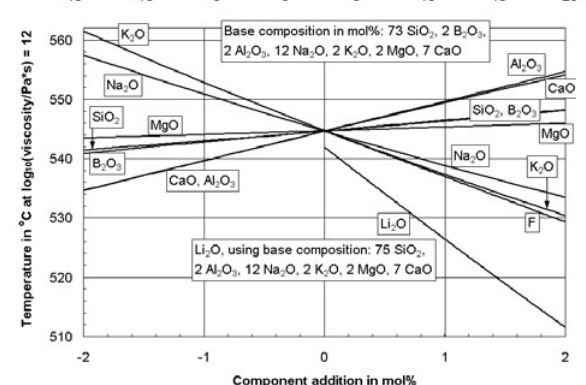
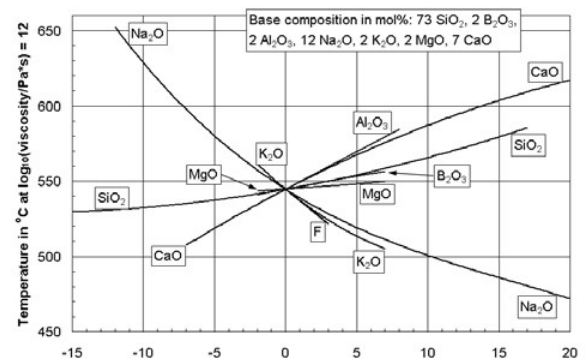
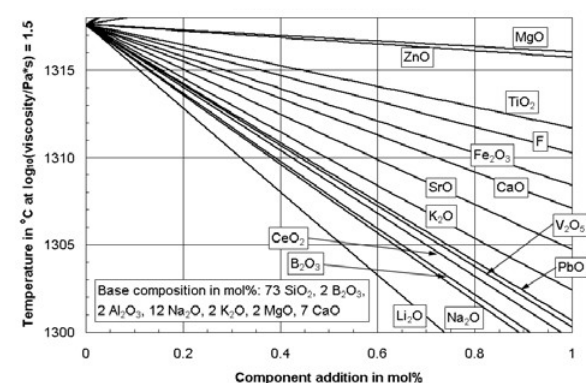
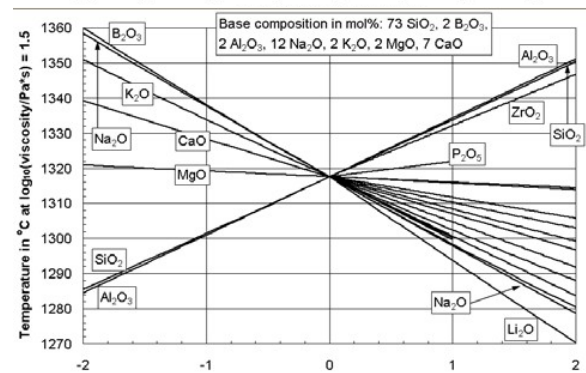
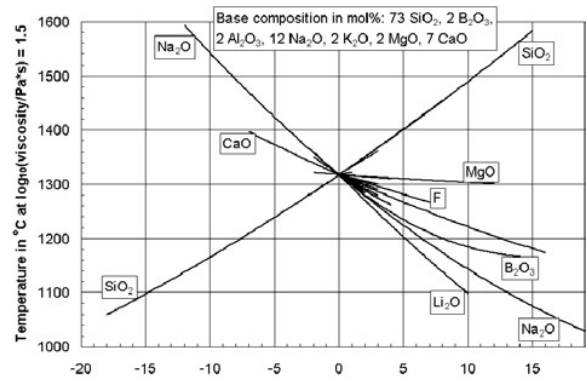
Berechnungen nach Zusammensetzung

Temperaturen [°C] einer bestimmten Viskosität [Pa s] nach Zusammensetzung [mol%]
[nach A. FLÜGEL, 2007]

$$T[^\circ\text{C}] = \sum [c_i \cdot p_i + [\sum c_{ik} \cdot p_i \cdot p_k + \sum c_{ikm} \cdot p_i \cdot p_k \cdot p_m]]$$

	lg η = 12	lg η = 6,6	lg η = 1,5
Konstante	624,829	939,479	1824,497
Li ₂ O	-11,571	-25,075	-30,336
(Li ₂ O) ²	0,27802	0,46012	0,22499
(Li ₂ O) ³	-0,00258		
Na ₂ O	-12,854	-19,051	-30,61
(Na ₂ O) ²	0,35785	0,32209	0,27887
(Na ₂ O) ³	-0,00418	-0,00208	
K ₂ O	-12,46	-20,659	-31,907
(K ₂ O) ²	0,39706	0,58116	0,61234
(K ₂ O) ³	-0,00538	-0,00937	-0,006662
MgO	1,141	0,93	-5,038
CaO	6,84	-1,791	-17,453
(CaO) ²	-0,08269		0,12038
BaO	-1,11	-3,385	-18,931
PbO	-4,349	-8,871	-21,349
SrO	1,388	-2,191	-17,292
TiO ₂	3,864	-2,862	-10,323
ZrO ₂	8,927	12,425	10,173
ZnO		-1,065	-6,28
B ₂ O ₃	-1,121	-4,366	-22,347
(B ₂ O ₃) ²		-0,17367	0,60376
Al ₂ O ₃	4,929	5,812	19,341
F	-8,123	-9,328	-11,739
Fe ₂ O ₃	-8,453	-11,013	-13,611
MnO ₂			-17,05
B ₂ O ₃ ×Na ₂ O	0,38413	0,32005	-0,28237
B ₂ O ₃ ×K ₂ O		0,42514	-0,2789
B ₂ O ₃ ×Li ₂ O		0,39626	-0,16843
B ₂ O ₃ ×CaO	-0,20958	-0,24066	
B ₂ O ₃ ×Al ₂ O ₃	-0,3338		
Al ₂ O ₃ ×Na ₂ O		0,08442	-0,23085
Al ₂ O ₃ ×K ₂ O		0,48055	
Al ₂ O ₃ ×Li ₂ O			-0,38421
Al ₂ O ₃ ×CaO	-0,13741		-0,93909
Na ₂ O×K ₂ O	0,06169	0,15519	0,58773
Na ₂ O×Li ₂ O	0,08558	0,20781	0,20691
Na ₂ O×CaO	-0,10283	0,09392	0,19254
K ₂ O×Li ₂ O	0,17538	0,46938	0,24924
K ₂ O×MgO	0,27425	0,26354	0,59449
K ₂ O×CaO	0,2247	0,47564	0,29628
MgO×CaO	-0,21563	-0,15553	-0,17394
CaO×Li ₂ O	-0,8817		
Al ₂ O ₃ ×Na ₂ O×B ₂ O ₃		-0,033573	
Al ₂ O ₃ ×Na ₂ O×CaO	0,013868	-0,00678	0,03362
Na ₂ O×CaO×MgO		-0,012589	

Gültigkeit und Fehlerabschätzung siehe:
www.glassproperties.com/viscosity

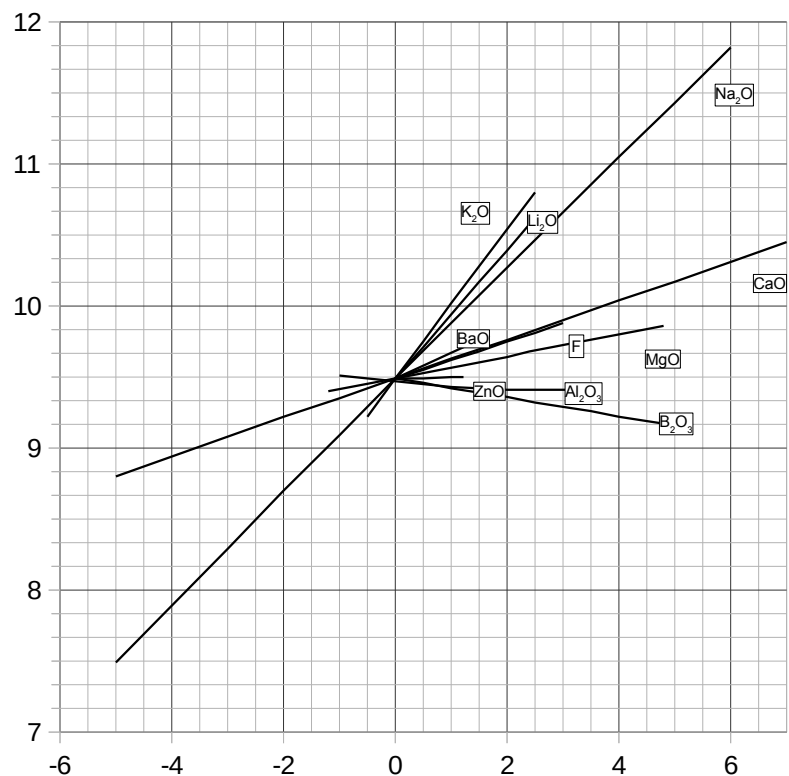


Wärmeausdehnung nach A.FLÜGEL, 2007

$$\alpha [x 10^{-6} / K] = \sum [c_i \cdot p_i + [\sum c_{ik} \cdot p_i \cdot p_k]] [mol\%]$$

Konstante	1,7672
Li ₂ O	0,1896
(Li ₂ O) ²	0,003242
Na ₂ O	0,4545
(Na ₂ O) ²	-0,00120
K ₂ O	0,532
(K ₂ O) ²	-0,00171
MgO	0,0499
CaO	0,1682
SrO	0,1717
BaO	0,3077
Al ₂ O ₃	-0,0641
(Al ₂ O ₃) ²	0,006473
B ₂ O ₃	0,0465
ZrO ₂	-0,0591
TiO ₂	-0,0138
ZnO	0,0102
PbO	0,1345
F	0,1305
Na ₂ O*CaO	-0,00258
Na ₂ O*B ₂ O ₃	-0,00564
Na ₂ O*Li ₂ O	0,018869
CaO*MgO	0,002627
CaO*B ₂ O ₃	-0,00268
CaO*BaO	-0,01196
K ₂ O*B ₂ O ₃	-0,01268

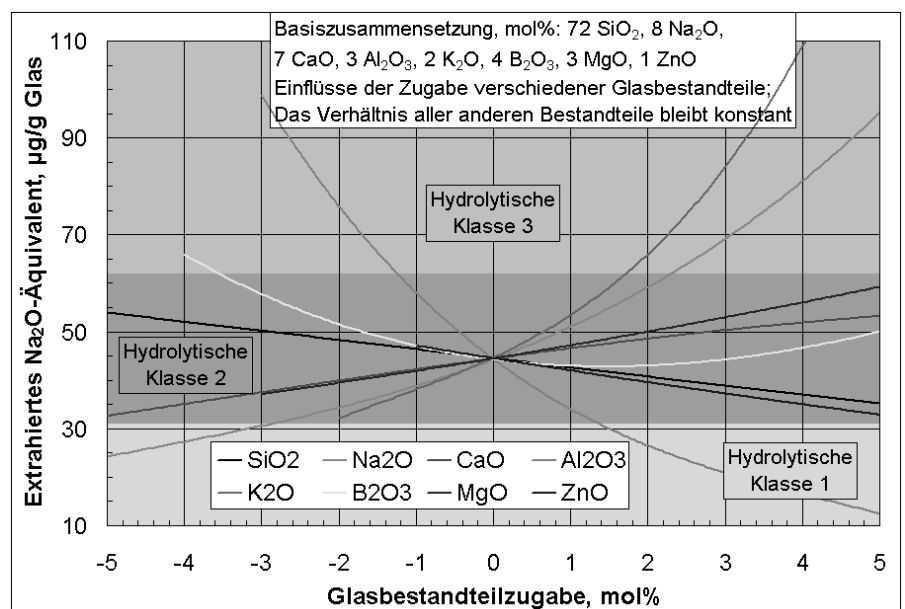
Varianten mit Jäger Sintermehl:
72,39 SiO₂; 13,62 Na₂O; 10,67 CaO;
1,34 Al₂O₃; 0,56 K₂O; 1,42 MgO

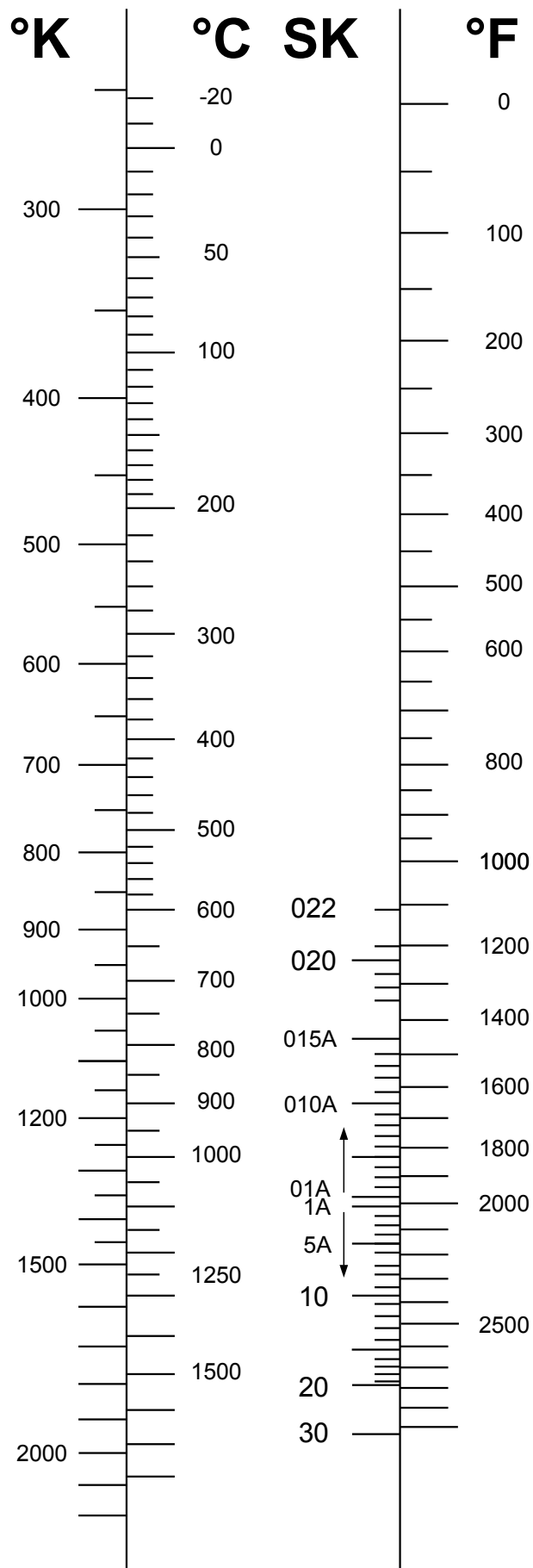


chemische Beständigkeit nach A.FLÜGEL, 2007

siehe auch:
www.glassproperties.com

mit entsprechenden Tabellen-
kalkulationen, incl. Gültigkeits-
bereiche und Fehlerabschätzungen





© 2026 RAGAN ARNOLD

www.ragan-arnold.de
e-mail: ragan-arnold@web.de

Lenzhalde 31
73732 Esslingen
Tel./Fax : 0711 37 57 25

Atelier: Wasenstr.4
73666 Baltmannsweiler-
Hohengehren
mobil : 0176 5040 15 36