Das Phi- Verfahren nach TGL 13503 / 1982

Dipl.- Ing. Björnstjerne Zindler, M.Sc.

www.Zenithpoint.de

Erstellt: 16. Januar 2020 - Letzte Revision: 23. April 2020

Inhaltsverzeichnis

Literatur

[001] TGL 13503 Ausgabe 1982 Teil 1 und 2.

[Dip] Dipl.- Ing. Björnstjerne Zindler, M.Sc. Das Omega- Verfahren nach DIN4114.

1 Nachweis für den mittig gedrückten, einteiligen Stab

Der geforderte Nachweis darf bei planmäßig mittiger Belastung[1] in folgender Form durchgeführt werden: Nachweis

$$\sigma_{vorh} = \frac{F}{A} \leq \sigma_{zul} \cdot \varphi$$

Wobei: [001]

σ_{zul}	für den untersuchten Grenzlastfall und die Festigkeitsklasse des Stahls geltende zulässige Spannung nach TGL 13500 Teil 1
φ	Knickfaktor, abhängig von der Form des Querschnitts und den Eigenspannungen nach TGL 13503 Neu Teil 1 Tabelle 2 abhängig vom bezogenen Schlankheitsgrad $\overline{\lambda}$ oder vom Schlankheitsgrad λ und der Streckgrenze

Zu beachten ist, dass in σ_{zul} aus Tabelle 2 die Sicherheit ν einberechnet ist.

[1] Ein Nachweis des planmäßig außermittig beanspruchten Stabes ist anspruchsvoll. So erweitert sich der Nachweis zu:

$$\sigma_c \cdot (1 + \mu_N \cdot f_N) + \sigma_{bc} \cdot f_M \leq \sigma_{zul} \quad \text{und} \quad \sigma_c \cdot (\mu_N \cdot f_N - 1) + \sigma_{bz} \cdot f_M \leq \sigma_{zul}$$

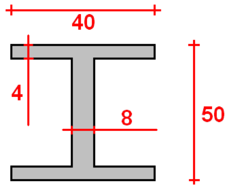
Mit:

σ_c	Absolutwert der Druckspannung
σ_{bc}	Absolutwert der Biege-Druckspannung
σ_{bz}	Absolutwert der Biege-Zugspannung
σ_{zul}	Zulässige Spannung, abhängig vom Grenzlastfall
f_N, f_M	Faktor, der die Vergrößerung der Momente nach Th. II. Ordnung gegenüber Th. I. Ordnung ausdrückt.

2 Beispiel - Bemessung

Bemessung

Gegeben ist ein Profil folgender Form:



[Dip]

Die Trägheitsmomente sind berechenbar über:

$$I_1 = 2 \cdot \frac{40^3 \cdot 4}{12} + \frac{8^3 \cdot (50 - 2 \cdot 4)}{12} = 44.459\text{mm}^4 = I_{\min}$$

Und:

$$I_2 = 2 \cdot \frac{40 \cdot 4^3 + 40 \cdot 4 \cdot \left(\frac{50}{2} - \frac{4}{2}\right)}{12} + \frac{8 \cdot (50 - 2 \cdot 4)^3}{12} = 50.432\text{mm}^4 = I_{\max}$$

Der dazugehörige Trägheitsradius beträgt:

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{44.459}{2 \cdot 40 \cdot 4 + (50 - 2 \cdot 4) \cdot 8}} = 8,23\text{mm}$$

Für den angenommenen Knickfall 2 nach Euler (gelenkig, gelenkig) ergibt sich eine Knicklänge s_k aus der gewählten Stablänge $l = 500$mm von:

$$s_k = \frac{l}{1} = \frac{500}{1} = 500\text{mm}$$

Die belastende Kraft wird mit 120kN angenommen.

2.1 Sicherheiten ν

Nach TGL 13503 Neu Teil 1.

Die Sicherheiten betragen für die einzelnen Lastfälle: Sicherheiten

H	$\nu_r = 1,50$
HZ	$\nu_r = 1,33$
S	$\nu_r = 1,20$

Für den hier nicht betrachteten Ausnahmefall, dass die ideale Knicklast als maßgebend angesehen wird, unter Umgehung des Schlankheitsgrades:

H	$\nu_i = 2,00$
HZ	$\nu_i = 1,78$
S	$\nu_i = 1,60$

2.2 Schlankheitsgrade λ und $\bar{\lambda}$

2.2.1 Grundlagen

Schlankheitsgrade

Der Schlankheitsgrad ist das Verhältnis der Knicklänge zum Trägheitsradius.

$$\lambda = \frac{l}{i}$$

Der bezogene Schlankheitsgrad.

$$\overline{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_S}$$

Hierbei bedeutet:

$$\lambda_S = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_F}}$$

$\Rightarrow$

σ_F N/mm²	λ_S ≈
240	93
300	83
360	76
450	68

Mit:

E	Elastizitätsmodul mit $210 \cdot 10^3$Nmm^{-2}

Dabei gilt:[2]

$\lambda < 10$	Kein Nachweis nötig
$\lambda \leq 150$	Druckstäbe in Brücken des Verkehrsbaus
$\lambda \leq 200$	Füllstäbe, Hilfsstäbe
$\lambda \leq 300$	Allgemeine Grenze für Druckstäbe

2.2.2 Beispiel

Die Schlankheit λ kann berechnet werden:

$$\lambda = \frac{s_k}{i_{\min}} = \frac{500}{8,23} = 60,75$$

Der bezogene Schlankheitsgrad dazu für $\sigma_F = 240$Nmm^{-2}.

$$\overline{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_S} = \frac{60,75}{93} = 0,654$$

[2]Diese Grenze steht nicht explizit in der TGL 15503 Neu Teil 1. Jedoch beginnen die Tabellen des Knickfaktors φ erst ab $\lambda > 10$. Sowie bei der Auswertung des Koeffizienten c_1 bei der Imperfektion μ_N lässt diese Grenze vermuten.

2.3 Entscheidungskriterium geometrisch günstig/ungünstig D

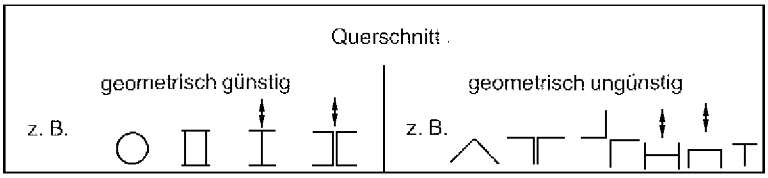
2.3.1 Grundlagen

Diskriminante

Die Festlegung des Kriteriums ist notwendig für die Auswahl der Knickspannungslinie. Die TGL 13503 Neu gibt dafür eine rein grafische Auswahl an und alternativ als numerische Möglichkeit über die Berechnung einer Diskriminante D.

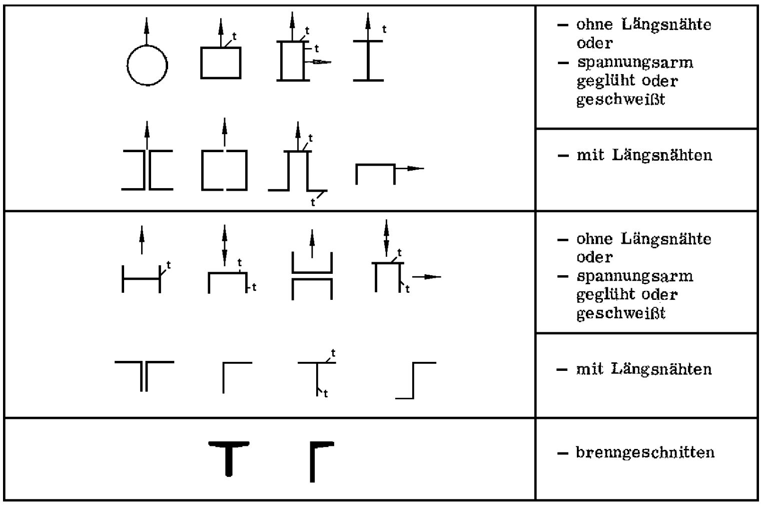
Grafisch über TGL 13503 Teil 1 Tabelle 2

Diese Tabelle nutzt das Kriterium günstig/ungünstig direkt.



Grafisch über TGL 13503 Teil 2 Tabelle 6

Hier ist die Auswahl indirekt eingearbeitet.



Numerisch nach TGL 13503 Teil 2 Abschnitt 6.1.3. Knickfaktoren

Als geometrisch günstig gilt ein Querschnitt dann, wenn gilt:

$$D = \frac{\sqrt{A \cdot I}}{W_{pl}} < 1,15 \qquad \text{oder} \qquad D = \frac{z}{i \cdot \alpha} < 1,15$$

Wobei:

D	Wert des Entscheidungskriteriums
z	Randfaserabstand vom Schwerpunkt aus
α	der Quotient W_{pl}/W_{el} aus dem plastischen bzw. elastischen Widerstandsmoment, auch als Angabe der Systemreserve des Profils

2.3.2 Beispiel

Für die Achse 2-2 (kein Knicken zu erwarten)

Das elastische Widerstandsmoment ist ermittelbar:

$$W_{el,(2-2)} = \frac{I_{\max}}{z} = \frac{50.432}{\frac{50}{2}} = 2.017\text{mm}^3$$

Das plastische Widerstandsmoment ist ermittelbar:

$$W_{pl,(2-2)} = \sum_i A_i \cdot z_i$$

$\Rightarrow$

$$W_{pl,(2-2)} = 2 \cdot \left(40 \cdot 4 \cdot \left(\frac{50}{2} - \frac{4}{2}\right)\right) + 2 \cdot \left(8 \cdot \left(\frac{50}{2} - 4\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{50}{2} - 4\right)\right) = 10.888\text{mm}^3$$

$\Rightarrow$

$$\alpha_{(2-2)} = \frac{10.888}{2.017} = 5,4$$

Damit ist die Diskriminante berechenbar:

$$D_{(2-2)} = \frac{\sqrt{656 \cdot 50.432}}{10.888} = \frac{\frac{50}{2}}{8,768 \cdot 5,4} = 0,528 < 1,15$$

Für die Achse 2 ist das Profil geometrisch günstig.

Für die Achse 1-1 (knickgefährdete Achse)

Das elastische Widerstandsmoment ist ermittelbar:

$$W_{el,(1-1)} = \frac{I_{\min}}{z} = \frac{44.459}{\frac{40}{2}} = 2.223\text{mm}^3$$

Das plastische Widerstandsmoment ist ermittelbar:

$$W_{pl,(1-1)} = \sum_i A_i \cdot z_i$$

$\Rightarrow$

$$W_{pl,(1-1)} = 4 \cdot \left(\frac{40}{2} \cdot 4 \cdot \frac{40}{4}\right) + 2 \cdot \left((50 - 2 \cdot 4) \cdot \frac{8}{2} \cdot \frac{8}{4}\right) = 3.872\text{mm}^3$$

$\Rightarrow$

$$\alpha = \frac{3.872}{2.223} = 1,742$$

Damit ist die Diskriminante berechenbar:

$$D_{(1-1)} = \frac{\sqrt{656 \cdot 44.459}}{3.872} = \frac{\frac{40}{2}}{8,23 \cdot 1,742} = 1,395 > 1,15$$

Für die Achse 1 ist das Profil geometrisch ungünstig.

Auswahl der Knickspannungslinie

Damit ist durch Tabelle 2 nach TGL 13503 Neu Teil 1 die Knickspannungslinie b mit den Koeffizienten $c_1 = 10$ und $c_2 = 320$ gültig.

Mit $\overline{\lambda} = 0,654$ ergibt sich nach Tabelle 1 nach TGL 13503 Neu Teil 1 ein Knickfaktor φ von:

$$\varphi = 0,807$$

Alternativ dazu nach Seite 17 TGL 13503 Neu Teil 1 Tabelle $\sigma_F = 240\text{Nmm}^{-2}$ Knickspannungslinie b für $\lambda = 60,75$:

$$\varphi = 0,804$$

2.4 Imperfektion des gedrückten Stabes μ_N

2.4.1 Grundlagen

Für die Berechnung der Imperfektion[3] gibt die TGL 13503 Neu Teil 1 Abschnitt 9.1 eine Möglichkeit an. Imperfektion

$$\mu_N = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\frac{\sigma_F}{\sigma_F^*}} - c_1}{c_2} = \frac{92,93 \cdot \overline{\lambda} - c_1}{c_2} \approx \frac{93 \cdot \overline{\lambda} - c_1}{c_2} \geq 0$$

Wobei:

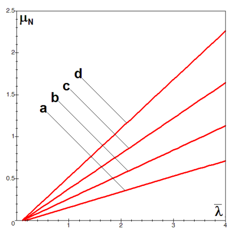
c_1, c_2	abhängig und ablesbar aus der Tabelle der Knickspannungslinien
σ_F	Streckgrenze des benutzten Materials in Nmm^{-2}
σ_F^*	$240\mathrm{Nmm}^{-2}$

2.4.2 Beispiel

Die Imperfektion μ_N ist definiert für $\sigma_F = 240\mathrm{Nmm}^{-2}$:

$$\mu_N = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\frac{\sigma_F}{\sigma_F^*}} - c_1}{c_2} = \frac{60,75 - 10}{320} = 0,159 \geq 0$$

[3]Die grafische Darstellung der Imperfektion μ_N:



2.5 Numerische Bestimmung des Knickfaktors φ

2.5.1 Grundlagen

Knickfaktor

Neben der grafischen Bestimmung des Knickfaktors[4] gibt die TGL 13503 Neu Teil 2 Abschnitt 6.1.3 eine numerische Möglichkeit der Bestimmung von φ an. So gilt:

$$\varphi = p - \sqrt{p^2 - q}$$

Mit:

$$p = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1 + \mu_N}{\overline{\lambda}^2} + 1 \right) \qquad q = \frac{1}{\overline{\lambda}^2}$$

Mit:

μ_N Imperfektion des gedrückten Stabes

2.5.2 Beispiel

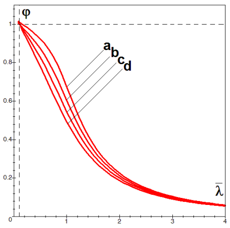
Über die bekannten Werte von μ_N und $\overline{\lambda}$ ist φ ermittelbar.

$$p = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1 + 0,159}{0,654^2} + 1 \right) = 1,855 \qquad q = \frac{1}{0,654^2} = 2,338$$

$\Rightarrow$

$$\varphi = 1,855 - \sqrt{1,855^2 - 2,338} = 0,805$$

[4] Die grafische Darstellung der Knicklinien zwecks Berechnung des Knickfaktors φ:



2.6 Auslenkamplitude des imperfekten Stabes u

2.6.1 Grundlagen

Die Auslenkung des imperfekten Stabes kann informativ nach TGL 13503 Neu Teil 2 Abschnitt 6.1.2 berechnet werden. Auslenkung

$$u = \mu_N \cdot \frac{W_T}{A}$$

Dabei ist W_T das modifizierte Widerstandsmoment nach TGL 13503 Neu Teil 2 Abschnitt 9.1. Dort wird man direkt zur TGL 13500 Neu Teil 2 Abschnitt 2.1.1 umgeleitet.

$$W_T = \frac{W_{el} + W_{pl}}{2} \leq 1,2 \cdot W_{el}$$

2.6.2 Beispiel

Für vorliegendes Beispiel gilt dann:

$$W_{T,(1-1)} = \frac{W_{el,(1-1)} + W_{pl,(1-1)}}{2} \leq 1,2 \cdot W_{el,(1-1)}$$

$\Rightarrow$

$$W_{T,(1-1)} = \frac{2.223 + 3.872}{2} \leq 1,2 \cdot 2.223$$

$\Rightarrow$

$$W_{T,(1-1)} = 3.047,5\text{mm}^3 \geq 2.667,6\text{mm}^3$$

$\Rightarrow$

$$W_{T,(1-1)} = 2.667,6\text{mm}^3$$

$\Rightarrow$

$$u = 0,159 \cdot \frac{2.667,6}{656} = 0,647\text{mm}$$

3 Beispiel - Nachweis

Nachweis

Erfolgt jetzt im Grenzlastfall H durch:

$$\sigma_{vorh} = \frac{F}{A} \leq \sigma_{zul} \cdot \varphi$$

$\Rightarrow$

$$\frac{120.000}{656} \leq 160 \cdot 0,805$$

$\Rightarrow$

$$183\text{Nmm}^{-2} > 129\text{Nmm}^{-2}$$

Der Nachweis ist nicht erfüllt.

4 Anhang

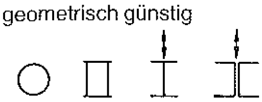
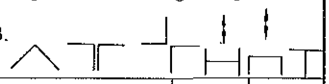
4.1 Werkstoffeigenschaften

Anhang

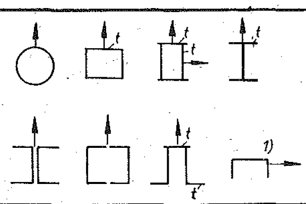
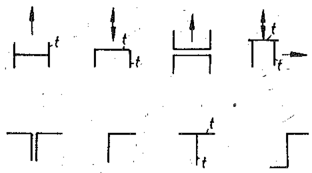
Festigkeitsklasse	Zugfestigkeit σ_B N/mm²	Streckgrenze σ_F N/mm²	Bruchdehnung δ_5 %	Elastizitätsmodul E N/mm²	Schubmodul G N/mm²	Wärmedehnzahl α_t 1/K
S 38/24	380	240	25	210 000	81 000	0,000 012
S 45/30	450	300	22			
S 52/36	520	360	22			
S 60/45	600	450	20			

Nr.	Art der Bauteile oder Schweißnähte	Beanspruchung		S 38/24 Grenzlastfall			S 45/30 Grenzlastfall			S 52/36 Grenzlastfall			S 60/45 Grenzlastfall		
				H	HZ	S	H	HZ	S	H	HZ	S	H	HZ	S
1	Grundwerkstoff in geschraubten, genieteten oder geschweißten Konstruktionen	Zug, Druck	σ_z σ_y	160	180	200	200	225	250	240	270	300	300	338	376
2		Schub	τ	92	104	116	116	131	146	139	156	173	173	195	217
3		mehrachsig, Nachweis nach Formel (3) oder (3a)	σ_z σ_y	180	190	200	225	238	250	270	285	300	338	357	376
4			τ	104	110	116	131	139	146	156	165	173	195	206	217

4.2 Knickspannungslinien

Eigen-spannungen		Querschnitt: geometrisch günstig, z. B.  Knick-spannungslinie	c_1	c_2	Querschnitt: geometrisch ungünstig, z. B.  Knick-spannungslinie	c_1	c_2
gering		a	15	500	b	10	320
hoch	t ≦ 40 mm*[1)]	b	10	320	c	10	220
	t > 40 mm*[1)]	c	10	220	d	10	160

Oder:

Querschnitt und Knickrichtung	Eigenspannungseinfluß	Dicke t mm	Knickspannungslinie
	- ohne Längsnähte oder - spannungsarm geglüht oder geschweißt	-	a
	- mit Längsnähten	≦ 40	b
		> 40	c
	- ohne Längsnähte oder - spannungsarm geglüht oder geschweißt	-	b
	- mit Längsnähten	≦ 40	c
		> 40	d
	- brenngeschnitten	-	c

4.3 Knickfaktor φ über $\bar{\lambda}$

$\bar{\lambda}$	φ für Knickspannungslinie a	b	c	d
0.108		1.000	1.000	1.000
0.15		0.988	0.982	0.975
0.161	1.000			
0.2	0.993	0.973	0.961	0.947
0.25	.983	.958	.940	.919
0.3	.973	.942	.919	.892
0.35	.962	.926	.897	.864
0.4	.950	.910	.874	.836
0.45	.938	.892	.851	.808
0.5	.924	.873	.827	.779
0.55	.909	.852	.802	.751
0.6	.893	.831	.776	.721
0.65	.874	.807	.749	.692
0.7	.853	.782	.721	.662
0.75	.830	.755	.692	.633
0.8	.804	.727	.663	.604
0.85	.775	.697	.634	.575
0.9	.743	.667	.604	.547
0.95	.710	.635	.575	.520
1.0	.676	.604	.546	.494
1.05	.640	.573	.518	.469
1.1	.605	.543	.492	.445
1.15	.571	.514	.466	.422
1.2	.538	.486	.441	.400
1.25	.507	.459	.418	.380
1.3	.477	.434	.396	.361
1.35	.450	.411	.376	.342
1.4	.424	.388	.356	.325
1.45	.400	.368	.338	.309
1.5	.377	.348	.321	.294

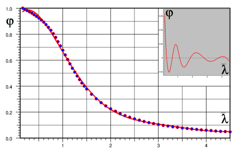
$\bar{\lambda}$	φ für Knickspannungslinie a	b	c	d
1.6	0.337	0.313	0.290	0.267
1.7	.303	.283	.263	.243
1.8	.273	.256	.239	.222
1.9	.248	.233	.218	.203
2.0	.225	.213	.200	.187
2.1	.206	.195	.184	.172
2.2	.188	.179	.169	.159
2.3	.173	.165	.157	.147
2.4	.160	.153	.145	.137
2.5	.148	.142	.135	.128
2.6	.1373	.1317	.1256	.1190
2.7	.1277	.1227	.1172	.1113
2.8	.1191	.1146	.1097	.1043
2.9	.1113	.1073	.1028	.0980
3.0	.1043	.1007	.0966	.0922
3.1	.0979	.0946	.0909	.0869
3.2	.0921	.0891	.0857	.0820
3.3	.0867	.0840	.0809	.0775
3.4	.0819	.0794	.0765	.0734
3.5	.0774	.0751	.0725	.0696
3.6	.0733	.0712	.0688	.0661
3.7	.0695	.0675	.0653	.0628
3.8	.0659	.0642	.0621	.0598
3.9	.0627	.0610	.0591	.0570
4.0	.0597	.0581	.0564	.0544
4.1	.0569	.0554	.0538	.0519
4.2	.0542	.0529	.0514	.0496
4.3	.0518	.0506	.0491	.0475
4.4	.0495	.0484	.0470	.0455
4.5	.0474	.0463	.0451	.0436

[5])

[5]Obwohl eine numerische Berechnungsgrundlage für φ bekannt ist, im Folgenden die Regressionspolynome 6. Grades zur Berechnung des Knickfaktors sowie die grafische Darstellung der Tabellenwerte und der regressierten Funktion, weiterhin die zu erwartende Abweichung zwischen Tabellen- und Regressionswerte.

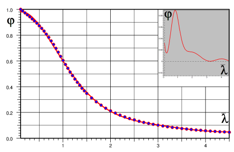
- **Knicklinie a:**

$$\varphi_a = 0,88687 + \frac{\bar{\lambda}}{1,22162} - \frac{\bar{\lambda}^2}{0,71406^2} + \frac{\bar{\lambda}^3}{0,93342^3} - \frac{\bar{\lambda}^4}{1,29255^4} + \frac{\bar{\lambda}^5}{1,81737^5} - \frac{\bar{\lambda}^6}{2,66812^6}$$



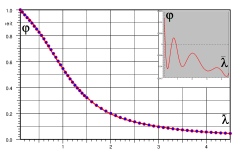
- **Knicklinie b:**

$$\varphi_b = 0,9614 + \frac{\bar{\lambda}}{3,22501} - \frac{\bar{\lambda}^2}{0,86174^2} + \frac{\bar{\lambda}^3}{1,03053^3} - \frac{\bar{\lambda}^4}{1,37746^4} + \frac{\bar{\lambda}^5}{1,89919^5} - \frac{\bar{\lambda}^6}{2,75272^6}$$



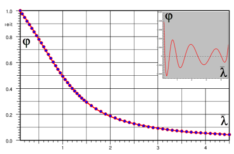
- **Knicklinie c:**

$$\varphi_c = 1,00093 + \frac{\bar{\lambda}}{744,6704} - \frac{\bar{\lambda}^2}{0,99634^2} + \frac{\bar{\lambda}^3}{1,09104^3} - \frac{\bar{\lambda}^4}{1,4114^4} + \frac{\bar{\lambda}^5}{1,91167^5} - \frac{\bar{\lambda}^6}{2,73925^6}$$



- **Knicklinie d:**

$$\varphi_d = 1,03519 \overset{!}{-} \frac{\bar{\lambda}}{3,06801} - \frac{\bar{\lambda}^2}{1,27696^2} + \frac{\bar{\lambda}^3}{1,20656^3} - \frac{\bar{\lambda}^4}{1,49259^4} + \frac{\bar{\lambda}^5}{1,97822^5} - \frac{\bar{\lambda}^6}{2,79876^6}$$



4.4 Knickfaktor φ über λ

Für die Kennlinie d gibt es keine Ablesemöglichkeit über λ in der TGL 13503 Neu Teil 1.

4.4.1 $\sigma_F = 240 \text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie − a

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,998	,996	,994	,992	10
20	,990	,988	,985	,983	,981	,979	,977	,975	,972	,970	20
30	,968	,965	,963	,961	,958	,956	,953	,951	,948	,946	30
40	,943	,940	,937	,935	,932	,929	,926	,923	,920	,916	40
50	,913	,910	,906	,903	,899	,896	,892	,888	,884	,880	50
60	,876	,872	,867	,863	,858	,853	,849	,844	,839	,833	60
70	,828	,823	,817	,811	,806	,800	,794	,787	,781	,775	70
80	,768	,762	,755	,748	,741	,734	,727	,720	,712	,705	80
90	,697	,690	,683	,675	,667	,660	,652	,645	,637	,630	90
100	,622	,614	,607	,600	,592	,585	,577	,570	,563	,556	100
110	,549	,542	,535	,528	,521	,515	,508	,501	,495	,489	110
120	,432	,476	,470	,464	,458	,452	,447	,441	,435	,430	120
130	,424	,419	,414	,409	,404	,399	,394	,389	,384	,379	130
140	,375	,370	,366	,361	,357	,353	,348	,344	,340	,336	140
150	,332	,328	,325	,321	,317	,313	,310	,306	,303	,300	150
160	,296	,293	,290	,286	,283	,280	,277	,274	,271	,268	160
170	,265	,263	,260	,257	,254	,252	,249	,246	,244	,241	170
180	,239	,236	,234	,232	,229	,227	,225	,223	,220	,218	180
190	,216	,214	,212	,210	,208	,206	,204	,202	,200	,198	190
200	,196	,195	,193	,191	,189	,187	,186	,184	,182	,181	200
210	,179	,178	,176	,174	,173	,171	,170	,168	,167	,165	210
220	,164	,163	,161	,160	,159	,157	,156	,155	,153	,152	220
230	,151	,150	,148	,147	,146	,145	,144	,142	,141	,140	230
240	,139	,138	,137	,136	,135	,134	,133	,132	,131	,130	240
250	,129	,128	,127	,126	,125	,124	,123	,122	,121	,120	250
260	,119	,118	,118	,117	,116	,115	,114	,113	,113	,112	260
270	,111	,110	,109	,109	,108	,107	,106	,106	,105	,104	270
280	,103	,103	,102	,101	,101	,100	,099	,099	,098	,097	280
290	,097	,096	,095	,095	,094	,094	,093	,092	,092	,091	290
300	,093										300

[6])

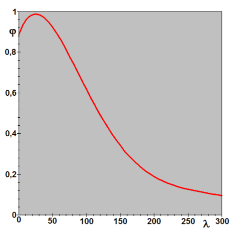
[6]Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 92,92956392$:

$$\varphi_a = 0,88687 + \frac{\lambda/\lambda_S}{1,22162} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,71406^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{0,93342^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,29255^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,81737^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,66812^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_a = 0,88687 + \frac{\lambda}{113,52461} - \frac{\lambda^2}{66,35728^2} + \frac{\lambda^3}{86,74231^3} - \frac{\lambda^4}{120,11611^4} + \frac{\lambda^5}{168,8874^5} - \frac{\lambda^6}{247,94723^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.2 $\sigma_F = 240\text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie − b

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	1,000	,997	,994	,991	,987	,984	,981	,978	,975	,972	10
20	,968	,965	,962	,959	,955	,952	,949	,945	,942	,939	20
30	,935	,932	,928	,925	,921	,918	,914	,910	,907	,903	30
40	,899	,895	,891	,887	,883	,879	,875	,871	,866	,862	40
50	,857	,853	,848	,844	,839	,834	,829	,824	,819	,814	50
60	,809	,804	,799	,793	,788	,782	,777	,771	,765	,759	60
70	,753	,747	,741	,735	,729	,723	,716	,710	,704	,697	70
80	,691	,684	,677	,671	,664	,657	,651	,644	,637	,631	80
90	,624	,617	,611	,604	,597	,590	,584	,577	,571	,564	90
100	,558	,551	,545	,538	,532	,526	,519	,513	,507	,501	100
110	,495	,489	,483	,477	,472	,466	,460	,455	,449	,444	110
120	,439	,433	,428	,423	,418	,413	,408	,403	,398	,394	120
130	,389	,384	,380	,375	,371	,367	,362	,358	,354	,350	130
140	,346	,342	,338	,334	,330	,327	,323	,319	,316	,312	140
150	,309	,305	,302	,299	,295	,292	,289	,286	,283	,280	150
160	,277	,274	,271	,268	,265	,263	,260	,257	,254	,252	160
170	,249	,247	,244	,242	,239	,237	,234	,232	,230	,228	170
180	,225	,223	,221	,219	,217	,215	,213	,211	,209	,207	180
190	,205	,203	,201	,199	,197	,195	,193	,192	,190	,188	190
200	,187	,185	,183	,182	,180	,178	,177	,175	,174	,172	200
210	,171	,169	,168	,166	,165	,163	,162	,161	,159	,158	210
220	,157	,155	,154	,153	,152	,150	,149	,148	,147	,145	220
230	,144	,143	,142	,141	,140	,139	,138	,137	,135	,134	230
240	,133	,132	,131	,130	,129	,128	,127	,126	,125	,124	240
250	,124	,123	,122	,121	,120	,119	,118	,117	,116	,116	250
260	,115	,114	,113	,112	,112	,111	,110	,109	,108	,108	260
270	,107	,106	,105	,105	,104	,103	,103	,102	,101	,101	270
280	,100	,099	,099	,098	,097	,097	,096	,095	,095	,094	280
290	,093	,093	,092	,092	,091	,090	,090	,089	,089	,088	290
300	,088										300

[7])

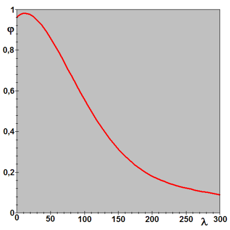
[7] Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 92,92956392$:

$$\varphi_b = 0,9614 + \frac{\lambda/\lambda_S}{3,22501} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,86174^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{1,03053^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,37746^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,89919^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,75272^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_b = 0,9614 + \frac{\lambda}{299,69877} - \frac{\lambda^2}{80,08112^2} + \frac{\lambda^3}{95,7667^3} - \frac{\lambda^4}{128,00676^4} + \frac{\lambda^5}{176,4909^5} - \frac{\lambda^6}{255,80907^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.3 $\sigma_F = 240\text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie – c

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	1,000	,995	,991	,986	,982	,977	,973	,968	,964	,959	10
20	,955	,950	,946	,941	,936	,932	,927	,923	,918	,913	20
30	,909	,904	,899	,895	,890	,885	,880	,875	,870	,865	30
40	,860	,855	,850	,845	,840	,835	,830	,824	,819	,814	40
50	,808	,803	,797	,792	,786	,780	,775	,769	,763	,757	50
60	,751	,745	,739	,733	,727	,721	,715	,709	,703	,697	60
70	,690	,684	,678	,672	,665	,659	,653	,646	,640	,634	70
80	,627	,621	,614	,608	,602	,595	,589	,583	,577	,570	80
90	,564	,558	,552	,546	,540	,534	,528	,522	,516	,510	90
100	,504	,498	,493	,487	,482	,476	,471	,465	,460	,454	100
110	,449	,444	,439	,434	,429	,424	,419	,414	,409	,405	110
120	,400	,395	,391	,386	,382	,377	,373	,369	,365	,361	120
130	,357	,353	,349	,345	,341	,337	,333	,330	,326	,322	130
140	,319	,315	,312	,308	,305	,302	,299	,295	,292	,289	140
150	,286	,283	,280	,277	,274	,271	,268	,266	,263	,260	150
160	,258	,255	,252	,250	,247	,245	,242	,240	,238	,235	160
170	,233	,231	,228	,226	,224	,222	,220	,217	,215	,213	170
180	,211	,209	,207	,205	,204	,202	,200	,198	,196	,194	180
190	,193	,191	,189	,187	,186	,184	,182	,181	,179	,178	190
200	,176	,175	,173	,172	,170	,169	,167	,166	,164	,163	200
210	,162	,160	,159	,158	,156	,155	,154	,152	,151	,150	210
220	,149	,147	,146	,145	,144	,143	,142	,141	,139	,138	220
230	,137	,136	,135	,134	,133	,132	,131	,130	,129	,128	230
240	,127	,126	,125	,124	,123	,122	,122	,121	,120	,119	240
250	,118	,117	,116	,115	,115	,114	,113	,112	,111	,111	250
260	,110	,109	,108	,108	,107	,106	,105	,105	,104	,103	260
270	,102	,102	,101	,100	,100	,099	,098	,098	,097	,096	270
280	,096	,095	,095	,094	,093	,093	,092	,092	,091	,090	280
290	,090	,089	,089	,088	,088	,087	,086	,086	,085	,085	290
300	,084										300

[8])

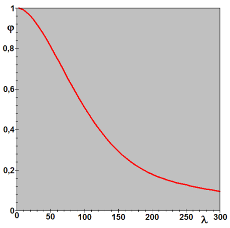
[8]Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 92,92956392$:

$$\varphi_c = 1,00093 + \frac{\lambda/\lambda_S}{744,6704} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,99634^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{1,09104^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,4114^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,91167^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,73925^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_c = 1,00093 + \frac{\lambda}{6.9201,8955} - \frac{\lambda^2}{92,58944^2} + \frac{\lambda^3}{101,38987^3} - \frac{\lambda^4}{131,16079^4} + \frac{\lambda^5}{177,65066^5} - \frac{\lambda^6}{254,55731^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.4 $\sigma_F = 300\text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie $-$ a

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	1,000	1,000	1,000	1,000	,999	,996	,994	,992	,989	,987	10
20	,985	,982	,980	,977	,975	,972	,970	,967	,965	,962	20
30	,959	,957	,954	,951	,948	,945	,942	,939	,936	,933	30
40	,930	,926	,923	,919	,916	,912	,908	,904	,900	,896	40
50	,892	,888	,883	,879	,874	,869	,865	,859	,854	,849	50
60	,843	,838	,832	,826	,820	,813	,807	,800	,793	,787	60
70	,779	,772	,765	,757	,750	,742	,734	,726	,718	,710	70
80	,702	,693	,685	,677	,668	,660	,651	,643	,634	,626	80
90	,617	,609	,601	,592	,584	,576	,568	,560	,552	,544	90
100	,536	,529	,521	,514	,506	,499	,492	,485	,478	,471	100
110	,434	,458	,451	,445	,438	,432	,426	,420	,414	,408	110
120	,403	,397	,392	,386	,381	,376	,371	,366	,361	,356	120
130	,351	,346	,342	,337	,333	,329	,324	,320	,316	,312	130
140	,308	,304	,300	,297	,293	,289	,286	,282	,279	,275	140
150	,272	,269	,266	,262	,259	,256	,253	,250	,247	,244	150
160	,242	,239	,236	,234	,231	,228	,226	,223	,221	,218	160
170	,216	,214	,211	,209	,207	,205	,202	,200	,198	,196	170
180	,194	,192	,190	,188	,186	,184	,182	,181	,179	,177	180
190	,175	,174	,172	,170	,169	,167	,165	,164	,162	,161	190
200	,159	,158	,156	,155	,153	,152	,150	,149	,148	,146	200
210	,145	,144	,142	,141	,140	,139	,137	,136	,135	,134	210
220	,133	,132	,130	,129	,128	,127	,126	,125	,124	,123	220
230	,122	,121	,120	,119	,118	,117	,116	,115	,114	,113	230
240	,112	,111	,110	,110	,109	,108	,107	,106	,105	,105	240
250	,104	,103	,102	,101	,101	,100	,099	,098	,098	,097	250
260	,096	,095	,095	,094	,093	,093	,092	,091	,091	,090	260
270	,089	,089	,088	,088	,087	,086	,086	,085	,085	,084	270
280	,083	,083	,082	,082	,081	,081	,080	,079	,079	,078	280
290	,078	,077	,077	,076	,076	,075	,075	,074	,074	,073	290
300	,073										300

[9])

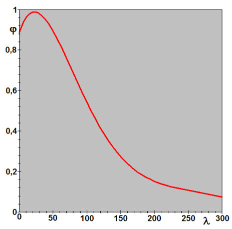
[9]Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 83,11872882$:

$$\varphi_a = 0,88687 + \frac{\lambda/\lambda_S}{1,22162} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,71406^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{0,93342^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,29255^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,81737^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,66812^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_a = 0,88687 + \frac{\lambda}{101,5395} - \frac{\lambda^2}{59,35176^2} + \frac{\lambda^3}{77,58468^3} - \frac{\lambda^4}{107,43511^4} + \frac{\lambda^5}{151,05748^5} - \frac{\lambda^6}{221,77074^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.5 $\sigma_F = 300\text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie − b

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	,996	,993	,989	,986	,982	,979	,975	,971	,968	,964	10
20	,961	,957	,953	,950	,946	,942	,938	,935	,931	,927	20
30	,923	,919	,915	,911	,906	,902	,898	,894	,889	,885	30
40	,880	,875	,871	,866	,861	,856	,851	,846	,841	,835	40
50	,830	,824	,819	,813	,807	,801	,795	,789	,783	,777	50
60	,770	,764	,757	,751	,744	,737	,730	,723	,716	,709	60
70	,702	,695	,687	,680	,673	,665	,658	,650	,643	,635	70
80	,628	,620	,613	,605	,598	,590	,583	,575	,568	,561	80
90	,553	,546	,539	,532	,525	,518	,511	,504	,498	,491	90
100	,484	,478	,471	,465	,459	,453	,447	,441	,435	,429	100
110	,423	,417	,412	,406	,401	,396	,390	,385	,380	,375	110
120	,370	,365	,361	,356	,351	,347	,342	,338	,334	,330	120
130	,325	,321	,317	,313	,309	,306	,302	,298	,294	,291	130
140	,287	,284	,281	,277	,274	,271	,267	,264	,261	,258	140
150	,255	,252	,249	,247	,244	,241	,238	,236	,233	,230	150
160	,228	,225	,223	,220	,218	,216	,213	,211	,209	,207	160
170	,204	,202	,200	,198	,196	,194	,192	,190	,188	,186	170
180	,184	,183	,181	,179	,177	,175	,174	,172	,170	,169	180
190	,167	,165	,164	,162	,161	,159	,158	,156	,155	,153	190
200	,152	,151	,149	,148	,147	,145	,144	,143	,141	,140	200
210	,139	,138	,136	,135	,134	,133	,132	,131	,130	,128	210
220	,127	,126	,125	,124	,123	,122	,121	,120	,119	,118	220
230	,117	,116	,115	,114	,113	,113	,112	,111	,110	,109	230
240	,108	,107	,107	,106	,105	,104	,103	,102	,102	,101	240
250	,100	,099	,099	,098	,097	,096	,096	,095	,094	,094	250
260	,093	,092	,092	,091	,090	,090	,089	,088	,088	,087	260
270	,087	,086	,085	,085	,084	,084	,083	,082	,082	,081	270
280	,081	,080	,080	,079	,079	,078	,078	,077	,077	,076	280
290	,076	,075	,075	,074	,074	,073	,073	,072	,072	,071	290
300	,071										300

[10])

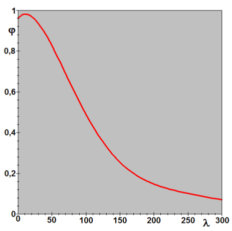
[10]Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 83,11872882$:

$$\varphi_b = 0,9614 + \frac{\lambda/\lambda_S}{3,22501} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,86174^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{1,03053^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,37746^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,89919^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,75272^6}$$

⇒

$$\varphi_b = 0,9614 + \frac{\lambda}{268,05873} - \frac{\lambda^2}{71,62673^2} + \frac{\lambda^3}{85,65634^3} - \frac{\lambda^4}{114,49272^4} + \frac{\lambda^5}{157,85826^5} - \frac{\lambda^6}{228,80259^6}$$

⇒



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.6 $\sigma_F = 300\text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie – c

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	,995	,989	,984	,979	,974	,969	,964	,959	,954	,949	10
20	,944	,939	,934	,929	,923	,918	,913	,908	,903	,897	20
30	,892	,887	,881	,876	,870	,865	,859	,854	,848	,842	30
40	,836	,830	,825	,819	,813	,806	,800	,794	,788	,782	40
50	,775	,769	,762	,756	,749	,743	,736	,729	,722	,715	50
60	,709	,702	,695	,688	,681	,674	,667	,660	,652	,645	60
70	,638	,631	,624	,617	,610	,603	,596	,589	,582	,575	70
80	,568	,561	,554	,547	,540	,534	,527	,520	,514	,507	80
90	,501	,494	,488	,482	,475	,469	,463	,457	,451	,446	90
100	,440	,434	,429	,423	,418	,412	,407	,402	,396	,391	100
110	,386	,381	,377	,372	,367	,362	,358	,353	,349	,344	110
120	,340	,336	,332	,328	,324	,320	,316	,312	,308	,304	120
130	,301	,297	,293	,290	,287	,283	,280	,277	,273	,270	130
140	,267	,264	,261	,258	,255	,252	,249	,246	,244	,241	140
150	,238	,236	,233	,230	,228	,225	,223	,221	,218	,216	150
160	,214	,211	,209	,207	,205	,203	,201	,198	,196	,194	160
170	,192	,190	,189	,187	,185	,183	,181	,179	,178	,176	170
180	,174	,172	,171	,169	,168	,166	,164	,163	,161	,160	180
190	,158	,157	,155	,154	,153	,151	,150	,148	,147	,146	190
200	,144	,143	,142	,141	,139	,138	,137	,136	,135	,133	200
210	,132	,131	,130	,129	,128	,127	,126	,125	,124	,123	210
220	,122	,121	,120	,119	,118	,117	,116	,115	,114	,113	220
230	,112	,111	,110	,109	,109	,108	,107	,106	,105	,104	230
240	,104	,103	,102	,101	,101	,100	,099	,098	,098	,097	240
250	,096	,095	,095	,094	,093	,093	,092	,091	,091	,090	250
260	,089	,089	,088	,088	,087	,086	,086	,085	,085	,084	260
270	,083	,083	,082	,082	,081	,081	,080	,079	,079	,078	270
280	,078	,077	,077	,076	,076	,075	,075	,074	,074	,073	280
290	,073	,072	,072	,072	,071	,071	,070	,070	,069	,069	290
300	,068										300

[11])

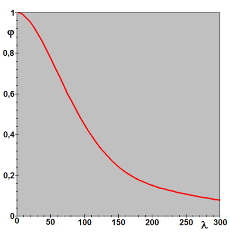
[11] Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 83,11872882$:

$$\varphi_c = 1,00093 + \frac{\lambda/\lambda_S}{744,6704} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,99634^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{1,09104^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,4114^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,91167^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,73925^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_c = 1,00093 + \frac{\lambda}{6.1896,05704} - \frac{\lambda^2}{82,81451^2} + \frac{\lambda^3}{90,68586^3} - \frac{\lambda^4}{117,31377^4} + \frac{\lambda^5}{158,89558^5} - \frac{\lambda^6}{227,68298^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.7 $\sigma_F = 360 \text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie − a

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	1,000	1,000	1,000	,998	,996	,993	,990	,988	,985	,983	10
20	,980	,977	,975	,972	,969	,966	,963	,960	,958	,954	20
30	,951	,948	,945	,942	,938	,935	,931	,928	,924	,920	30
40	,916	,912	,908	,904	,900	,895	,891	,886	,881	,876	40
50	,871	,865	,860	,854	,848	,842	,836	,829	,823	,816	50
60	,809	,801	,794	,786	,779	,771	,763	,754	,746	,737	60
70	,729	,720	,711	,702	,693	,684	,674	,665	,656	,647	70
80	,637	,628	,619	,610	,600	,591	,582	,573	,565	,556	80
90	,547	,539	,530	,522	,514	,506	,498	,490	,482	,475	90
100	,467	,460	,453	,446	,439	,432	,425	,419	,412	,406	100
110	,400	,394	,388	,382	,376	,371	,365	,360	,355	,349	110
120	,344	,339	,335	,330	,325	,320	,316	,312	,307	,303	120
130	,299	,295	,291	,287	,283	,279	,275	,272	,268	,265	130
140	,261	,258	,255	,251	,248	,245	,242	,239	,236	,233	140
150	,230	,227	,224	,222	,219	,216	,214	,211	,209	,206	150
160	,204	,202	,199	,197	,195	,193	,190	,188	,186	,184	160
170	,182	,180	,178	,176	,174	,172	,171	,169	,167	,165	170
180	,163	,162	,160	,158	,157	,155	,154	,152	,150	,149	180
190	,147	,146	,145	,143	,142	,140	,139	,138	,136	,135	190
200	,134	,132	,131	,130	,129	,128	,126	,125	,124	,123	200
210	,122	,121	,120	,119	,117	,116	,115	,114	,113	,112	210
220	,111	,110	,109	,108	,108	,107	,106	,105	,104	,103	220
230	,102	,101	,101	,100	,099	,098	,097	,096	,096	,095	230
240	,094	,093	,093	,092	,091	,090	,090	,089	,088	,088	240
250	,087	,086	,086	,085	,084	,084	,083	,082	,082	,081	250
260	,081	,080	,079	,079	,078	,078	,077	,077	,076	,075	260
270	,075	,074	,074	,073	,073	,072	,072	,071	,071	,070	270
280	,070	,069	,069	,068	,068	,067	,067	,067	,066	,066	280
290	,065	,065	,064	,064	,063	,063	,063	,062	,062	,061	290
300	,061										300

[12])

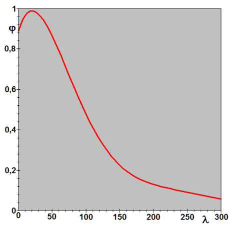
[12]Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 75,87667121$:

$$\varphi_a = 0,88687 + \frac{\lambda/\lambda_S}{1,22162} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,71406^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{0,93342^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,29255^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,81737^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,66812^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_a = 0,88687 + \frac{\lambda}{92,69246} - \frac{\lambda^2}{54,18054^2} + \frac{\lambda^3}{70,8248^3} - \frac{\lambda^4}{98,07439^4} + \frac{\lambda^5}{137,89599^5} - \frac{\lambda^6}{202,44806^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.8 $\sigma_F = 360 \text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie − b

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	,993	,989	,985	,981	,977	,974	,970	,966	,962	,958	10
20	,954	,950	,946	,941	,937	,933	,929	,925	,920	,916	20
30	,911	,907	,902	,897	,892	,888	,883	,878	,872	,867	30
40	,862	,856	,851	,845	,840	,834	,828	,822	,815	,809	40
50	,803	,796	,789	,783	,776	,769	,762	,754	,747	,740	50
60	,732	,724	,717	,709	,701	,693	,685	,677	,669	,661	60
70	,653	,644	,636	,628	,620	,611	,603	,595	,587	,579	70
80	,571	,563	,555	,547	,539	,531	,524	,516	,508	,501	80
90	,494	,486	,479	,472	,465	,458	,452	,445	,439	,432	90
100	,426	,419	,413	,407	,401	,396	,390	,384	,379	,373	100
110	,368	,363	,357	,352	,347	,343	,338	,333	,328	,324	110
120	,319	,315	,311	,307	,302	,298	,294	,290	,287	,283	120
130	,279	,276	,272	,268	,265	,262	,258	,255	,252	,249	130
140	,246	,242	,239	,237	,234	,231	,228	,225	,223	,220	140
150	,217	,215	,212	,210	,207	,205	,203	,200	,198	,196	150
160	,194	,191	,189	,187	,185	,183	,181	,179	,177	,175	160
170	,173	,171	,170	,168	,166	,164	,163	,161	,159	,158	170
180	,156	,154	,153	,151	,150	,148	,147	,145	,144	,143	180
190	,141	,140	,139	,137	,136	,135	,133	,132	,131	,130	190
200	,128	,127	,126	,125	,124	,123	,121	,120	,119	,118	200
210	,117	,116	,115	,114	,113	,112	,111	,110	,109	,108	210
220	,107	,106	,106	,105	,104	,103	,102	,101	,100	,100	220
230	,099	,098	,097	,096	,096	,095	,094	,093	,093	,092	230
240	,091	,090	,090	,089	,088	,088	,087	,086	,086	,085	240
250	,084	,084	,083	,082	,082	,081	,081	,080	,079	,079	250
260	,078	,078	,077	,077	,076	,075	,075	,074	,074	,073	260
270	,073	,072	,072	,071	,071	,070	,070	,069	,069	,068	270
280	,068	,067	,067	,066	,066	,066	,065	,065	,064	,064	280
290	,063	,063	,063	,062	,062	,061	,061	,061	,060	,060	290
300	,059										300

[13])

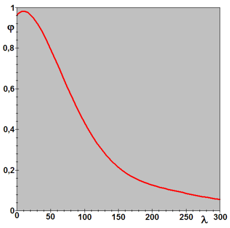
[13] Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 75,87667121$:

$$\varphi_b = 0,9614 + \frac{\lambda/\lambda_S}{3,22501} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,86174^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{1,03053^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,37746^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,89919^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,75272^6}$$

⇒

$$\varphi_b = 0,9614 + \frac{\lambda}{244,70302} - \frac{\lambda^2}{65,38596^2} + \frac{\lambda^3}{78,19319^3} - \frac{\lambda^4}{104,51708^4} + \frac{\lambda^5}{144,10422^5} - \frac{\lambda^6}{208,86723^6}$$

⇒



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.9 $\sigma_F = 360 \text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie – c

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	,990	,984	,979	,973	,968	,962	,956	,951	,945	,940	10
20	,934	,929	,923	,917	,912	,906	,900	,894	,888	,882	20
30	,877	,871	,864	,858	,852	,846	,840	,833	,827	,820	30
40	,814	,807	,800	,793	,787	,780	,773	,766	,758	,751	40
50	,744	,737	,729	,722	,714	,707	,699	,692	,684	,676	50
60	,669	,661	,653	,645	,637	,630	,622	,614	,606	,599	60
70	,591	,583	,576	,568	,560	,553	,545	,538	,531	,523	70
80	,516	,509	,502	,495	,488	,481	,474	,468	,461	,454	80
90	,448	,442	,435	,429	,423	,417	,411	,405	,400	,394	90
100	,389	,383	,378	,373	,367	,362	,357	,352	,347	,343	100
110	,338	,333	,329	,324	,320	,316	,312	,307	,303	,299	110
120	,295	,292	,288	,284	,280	,277	,273	,270	,266	,263	120
130	,260	,256	,253	,250	,247	,244	,241	,238	,235	,232	130
140	,230	,227	,224	,221	,219	,216	,214	,211	,209	,206	140
150	,204	,202	,199	,197	,195	,193	,191	,189	,187	,184	150
160	,182	,180	,179	,177	,175	,173	,171	,169	,167	,166	160
170	,164	,162	,161	,159	,157	,156	,154	,153	,151	,150	170
180	,148	,147	,145	,144	,142	,141	,140	,138	,137	,136	180
190	,134	,133	,132	,131	,129	,128	,127	,126	,125	,124	190
200	,122	,121	,120	,119	,118	,117	,116	,115	,114	,113	200
210	,112	,111	,110	,109	,108	,107	,106	,105	,105	,104	210
220	,103	,102	,101	,100	,100	,099	,098	,097	,096	,096	220
230	,095	,094	,093	,093	,092	,091	,090	,090	,089	,088	230
240	,088	,087	,086	,086	,085	,084	,084	,083	,082	,082	240
250	,081	,081	,080	,079	,079	,078	,078	,077	,077	,076	250
260	,075	,075	,074	,074	,073	,073	,072	,072	,071	,071	260
270	,070	,070	,069	,069	,068	,068	,067	,067	,067	,066	270
280	,066	,065	,065	,064	,064	,063	,063	,063	,062	,062	280
290	,061	,061	,061	,060	,060	,059	,059	,059	,058	,058	290
300	,058										300

[14])

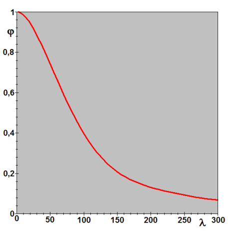
[14] Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 75,87667121$:

$$\varphi_c = 1,00093 + \frac{\lambda/\lambda_S}{744,6704} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,99634^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{1,09104^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,4114^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,91167^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,73925^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_c = 1,00093 + \frac{\lambda}{5.6503,1111} - \frac{\lambda^2}{75,59896^2} + \frac{\lambda^3}{82,78448^3} - \frac{\lambda^4}{107,09233^4} + \frac{\lambda^5}{145,05116^5} - \frac{\lambda^6}{207,84517^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.10 $\sigma_F = 450 \text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie − a

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	1,000	1,000	,997	,994	,991	,988	,986	,983	,980	,977	10
20	,974	,971	,967	,964	,961	,958	,954	,951	,947	,944	20
30	,940	,936	,932	,928	,924	,920	,915	,911	,906	,901	30
40	,896	,891	,886	,880	,875	,869	,863	,857	,850	,843	40
50	,836	,829	,822	,814	,806	,798	,789	,781	,772	,763	50
60	,754	,744	,735	,725	,715	,705	,695	,684	,674	,664	60
70	,653	,643	,633	,622	,612	,602	,592	,582	,572	,562	70
80	,552	,542	,533	,524	,514	,505	,497	,488	,479	,471	80
90	,463	,455	,447	,439	,431	,424	,417	,410	,403	,396	90
100	,389	,383	,376	,370	,364	,358	,352	,346	,341	,335	100
110	,330	,325	,319	,314	,310	,305	,300	,295	,291	,287	110
120	,282	,278	,274	,270	,266	,262	,258	,255	,251	,247	120
130	,244	,240	,237	,234	,231	,227	,224	,221	,218	,215	130
140	,213	,210	,207	,204	,202	,199	,197	,194	,192	,189	140
150	,187	,184	,182	,180	,178	,176	,173	,171	,169	,167	150
160	,165	,163	,162	,160	,158	,156	,154	,152	,151	,149	160
170	,147	,146	,144	,143	,141	,139	,138	,136	,135	,134	170
180	,132	,131	,129	,128	,127	,125	,124	,123	,122	,120	180
190	,119	,118	,117	,116	,114	,113	,112	,111	,110	,109	190
200	,108	,107	,106	,105	,104	,103	,102	,101	,100	,099	200
210	,098	,097	,096	,096	,095	,094	,093	,092	,091	,091	210
220	,090	,089	,088	,087	,087	,086	,085	,085	,084	,083	220
230	,082	,082	,081	,080	,080	,079	,078	,078	,077	,076	230
240	,075	,075	,075	,074	,073	,073	,072	,072	,071	,071	240
250	,070	,070	,069	,068	,068	,067	,067	,066	,066	,065	250
260	,065	,064	,064	,063	,063	,063	,062	,062	,061	,061	260
270	,060	,060	,059	,059	,059	,058	,058	,057	,057	,057	270
280	,056	,056	,055	,055	,055	,054	,054	,054	,053	,053	280
290	,052	,052	,052	,051	,051	,051	,050	,050	.050	,049	290
300	,049										300

[15])

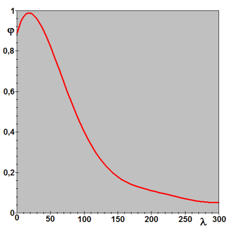
[15] Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 67,86615789$:

$$\varphi_a = 0,88687 + \frac{\lambda/\lambda_S}{1,22162} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,71406^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{0,93342^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,29255^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,81737^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,66812^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_a = 0,88687 + \frac{\lambda}{82,90666} - \frac{\lambda^2}{48,46051^2} + \frac{\lambda^3}{63,34763^3} - \frac{\lambda^4}{87,7204^4} + \frac{\lambda^5}{411,0274^5} - \frac{\lambda^6}{181,07505^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.11 $\sigma_F = 450 \text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie – b

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	,988	,984	,980	,975	,971	,967	,962	,958	,953	,949	10
20	,944	,939	,935	,930	,925	,920	,915	,910	,905	,900	20
30	,895	,889	,884	,878	,872	,867	,861	,854	,848	,842	30
40	,835	,829	,822	,815	,808	,801	,793	,786	,778	,770	40
50	,762	,754	,746	,738	,729	,721	,712	,703	,694	,685	50
60	,676	,667	,658	,649	,640	,631	,621	,612	,603	,594	60
70	,585	,576	,567	,558	,549	,540	,531	,523	,514	,506	70
80	,498	,490	,482	,474	,466	,458	,451	,443	,436	,429	80
90	,422	,415	,408	,402	,395	,389	,382	,376	,370	,364	90
100	,358	,353	,347	,342	,336	,331	,326	,321	,316	,311	100
110	,307	,302	,298	,293	,289	,284	,280	,276	,272	,268	110
120	,264	,261	,257	,253	,250	,246	,243	,239	,236	,233	120
130	,230	,227	,224	,221	,218	,215	,212	,209	,207	,204	130
140	,201	,199	,196	,194	,191	,189	,187	,184	,182	,180	140
150	,178	,176	,173	,171	,169	,167	,165	,163	,162	,160	150
160	,158	,156	,154	,153	,151	,149	,148	,146	,144	,143	160
170	,141	,140	,138	,137	,135	,134	,132	,131	,130	,128	170
180	,127	,126	,124	,123	,122	,121	,119	,118	,117	,116	180
190	,115	,114	,112	,111	,110	,109	,108	,107	,106	,105	190
200	,104	,103	,102	,101	,100	,099	,098	,098	,097	,096	200
210	,095	,094	,093	,092	,092	,091	,090	,089	,088	,088	210
220	,087	,086	,085	,085	,084	,083	,083	,082	,081	,081	220
230	,080	,079	,079	,078	,077	,077	,076	,075	,075	,074	230
240	,074	,073	,072	,072	,071	,071	,070	,070	,069	,069	240
250	,068	,068	,067	,067	,066	,066	,065	,065	,064	,064	250
260	,063	,063	,062	,062	,061	,061	,060	,060	,060	,059	260
270	,059	,058	,058	,058	,057	,057	,056	,056	,056	,055	270
280	,055	,054	,054	,054	,053	,053	,053	,052	,052	,052	280
290	,051	,051	,051	,050	,050	,050	,049	,049	,049	,048	290
300	,048										300

[16])

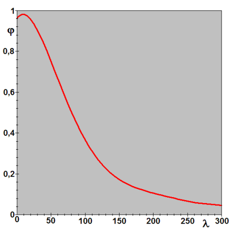
[16] Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 67,86615789$:

$$\varphi_b = 0,9614 + \frac{\lambda/\lambda_S}{3,22501} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,86174^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{1,03053^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,37746^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,89919^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,75272^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_b = 0,9614 + \frac{\lambda}{218,86904} - \frac{\lambda^2}{58,48298^2} + \frac{\lambda^3}{69,93811^3} - \frac{\lambda^4}{93,48292^4} + \frac{\lambda^5}{128,89073^5} - \frac{\lambda^6}{186,81653^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.

4.4.12 $\sigma_F = 450\text{Nmm}^{-2}$, Kennlinie – c

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
10	,983	,977	,971	,965	,958	,952	,946	,940	,933	,927	10
20	,921	,915	,908	,902	,895	,889	,882	,875	,869	,862	20
30	,855	,848	,841	,834	,827	,819	,812	,805	,797	,789	30
40	,782	,774	,766	,758	,750	,742	,734	,725	,717	,708	40
50	,700	,691	,683	,674	,666	,657	,648	,640	,631	,622	50
60	,613	,605	,596	,587	,579	,570	,562	,553	,545	,537	60
70	,529	,520	,512	,504	,497	,489	,481	,474	,466	,459	70
80	,452	,444	,437	,430	,424	,417	,410	,404	,398	,391	80
90	,385	,379	,373	,367	,362	,356	,351	,345	,340	,335	90
100	,330	,325	,320	,315	,310	,306	,301	,297	,293	,288	100
110	,284	,280	,276	,272	,268	,264	,261	,257	,253	,250	110
120	,246	,243	,240	,237	,233	,230	,227	,224	,221	,218	120
130	,215	,213	,210	,207	,205	,202	,199	,197	,194	,192	130
140	,190	,187	,185	,183	,180	,178	,176	,174	,172	,170	140
150	,168	,166	,164	,162	,160	,159	,157	,155	,153	,151	150
160	,150	,148	,146	,145	,143	,142	,140	,139	,137	,136	160
170	,134	,133	,132	,130	,129	,127	,126	,125	,124	,122	170
180	,121	,120	,119	,118	,116	,115	,114	,113	,112	,111	180
190	,110	,109	,108	,107	,106	,105	,104	,103	,102	,101	190
200	,100	,099	,098	,097	,096	,095	,095	,094	,093	,092	200
210	,091	,090	,090	,089	,088	,087	,087	,086	,085	,084	210
220	,084	,083	,082	,082	,081	,080	,080	,079	,078	,078	220
230	,077	,076	,076	,075	,075	,074	,073	,073	,072	,072	230
240	,071	,071	,070	,069	,069	,068	,068	,067	,067	,066	240
250	,066	,065	,065	,064	,064	,063	,063	,063	,062	,062	250
260	,061	,061	,060	,060	,059	,059	,059	,058	,058	,057	260
270	,057	,057	,056	,056	,055	,055	,055	,054	,054	,054	270
280	,053	,053	,052	,052	,052	,051	,051	,051	,050	,050	280
290	,050	,049	,049	,049	,048	,048	,048	,048	,047	,047	290
300	,047										300

[17])

LaTeX 2_ε

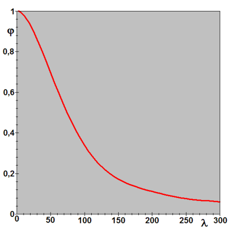
[17] Aus Abschnitt 4.3 und mit $\lambda_S = 67,86615789$:

$$\varphi_c = 1,00093 + \frac{\lambda/\lambda_S}{744,6704} - \frac{\lambda^2/\lambda_S^2}{0,99634^2} + \frac{\lambda^3/\lambda_S^3}{1,09104^3} - \frac{\lambda^4/\lambda_S^4}{1,4114^4} + \frac{\lambda^5/\lambda_S^5}{1,91167^5} - \frac{\lambda^6/\lambda_S^6}{2,73925^6}$$

$\Rightarrow$

$$\varphi_c = 1,00093 + \frac{\lambda}{5.0537,91894} - \frac{\lambda^2}{67,61777^2} + \frac{\lambda^3}{74,04469^3} - \frac{\lambda^4}{95,7863^4} + \frac{\lambda^5}{129,7377^5} - \frac{\lambda^6}{185,90237^6}$$

$\Rightarrow$



Im Bereich $\lambda \leq 50$ ist mit größeren Abweichungen zu rechnen.