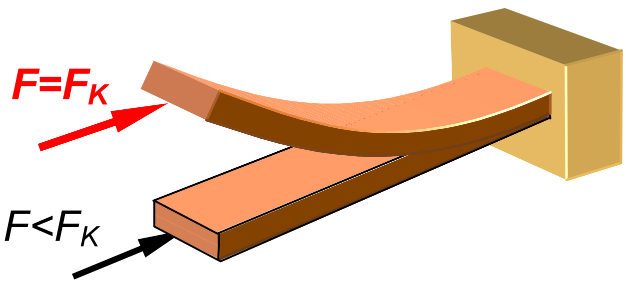
Großübung Stabilität, elastische Knickung, Eulerfälle

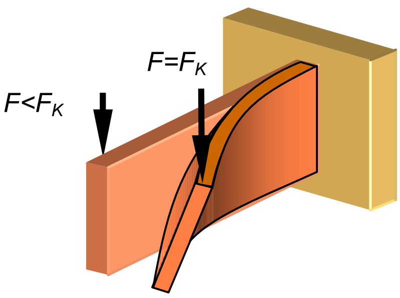
Ein druckbeanspruchter gerader Stab kann seine Funktion (Gleichgewicht mit gerader Stabachse) verlieren, auch wenn die im Stab vorhandene Druckspannung σ_d noch wesentlich kleiner als die zulässige Druckspannung ist, d. h. wenn gilt

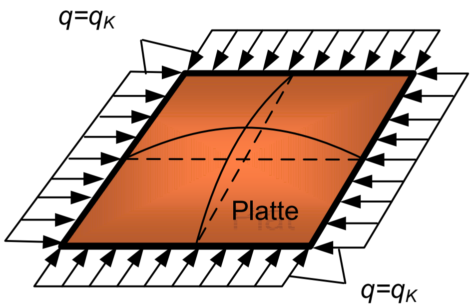
$$\sigma_d < \sigma_{d_{zul}}$$

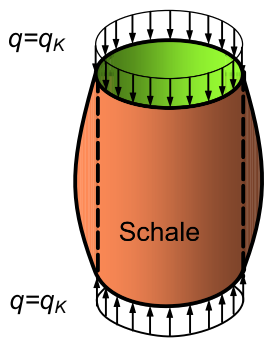
Der Stab verliert seine Funktion, indem er bei einer bestimmten **kritischen Kraft** $F = F_K$ plötzlich instabil wird und eine neue Gleichgewichtslage mit gekrümmter Stabachse annimmt. Dieser Vorgang wird **Knicken** eines Stabes oder kurz **Stabknickung** genannt.



Solche Instabilitäten treten auch bei anderen Tragwerken unter Druckbelastungen auf und sind sehr gefährlich! Einige Beispiele sind hier zusammengestellt. (Kippen, Beulen, Drill-, Biegedrillknicken)





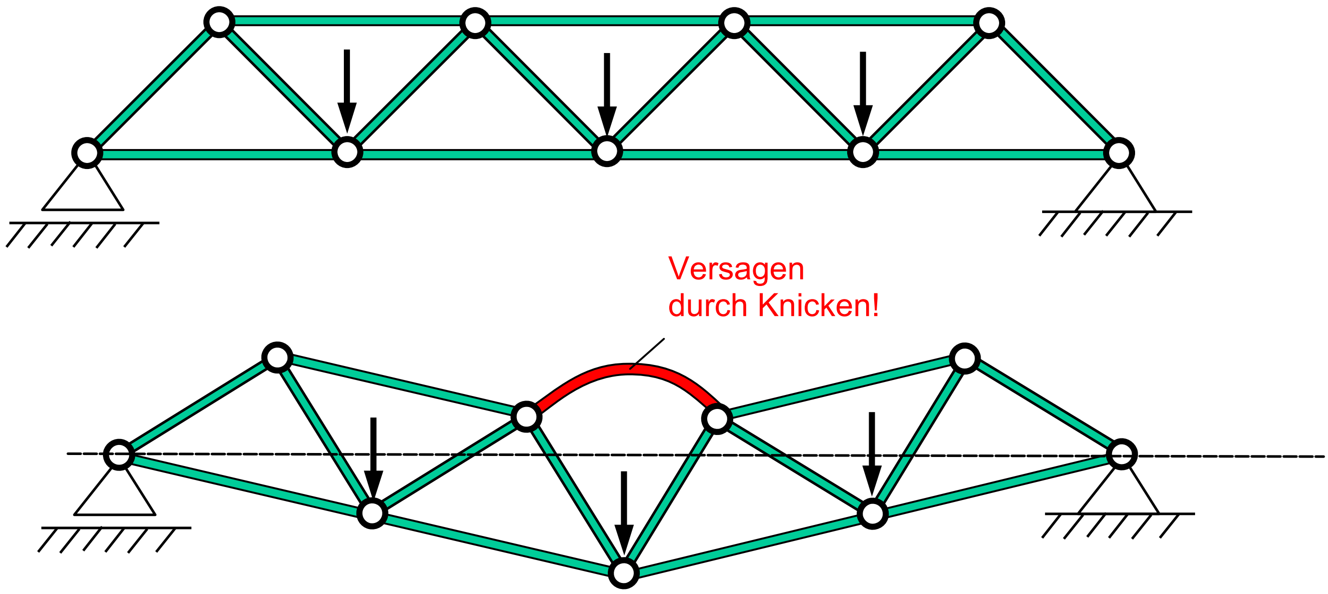


Kippen eines brettartigen Balkens

Beulen von Flächentragwerken (Platte, Schale)

Die Stabilität von komplexen Bauwerke, z. B. von Brücken, Kränen, Dachkonstruktionen usw. aus Fachwerkstäben, ist durch eine ausreichende Sicherheit gegen Knicken der auf Druck belasteten Stäbe zu gewährleisten.

Das Versagen (Knicken) eines Druckstabes kann zum Versagen der gesamten Konstruktion führen.

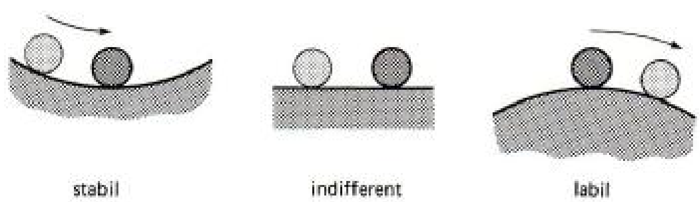


Die große Bedeutung der Stabilität wird dadurch unterstrichen, dass der Nachweis der Stabilität für viele Bereiche der Technik durch Normen und Vorschriften verbindlich geregelt ist!

Zur Untersuchung von Stabilitätsproblemen ist das Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen am deformierten System erforderlich, wobei die Deformationen noch als klein angenommen werden dürfen (**Theorie 2. Ordnung**).

Folgende Gleichgewichtslagen werden unterschieden.

- stabiles Gleichgewicht: das Objekt kehrt nach einer kleinen Auslenkung in seine Ausgangslage zurück
- labiles Gleichgewicht: das Objekt kehrt nach einer kleinen Auslenkung nicht in seine Ausgangslage zurück, sondern nimmt eine neue stabile Lage ein
- indifferentes Gleichgewicht: jede Lage ist eine Gleichgewichtslage



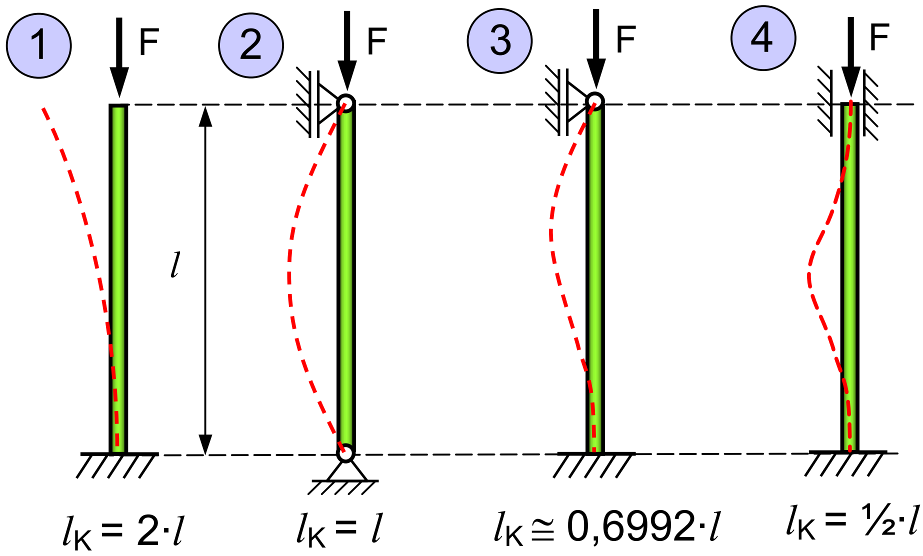
Im weiteren wollen wir uns auf die Eulerfälle und elastisches Knicken beschränken.

Die Eulerfälle

Typische Stabilitätsprobleme stellen auf Druck belastete Stäbe dar. Es wird ermittelt, wann ein gerader Stab unter einer in Richtung der Stabachse des unverformten Bauteils wirkenden richtungstreuen Kraft versagt. Die hierbei mögliche maximale Belastung ist die kritische Last die zum Versagen der Konstruktion führt, wobei die maximal zulässige Druckspannung für das Bauteil dabei nicht erreicht werden muss.

Für die folgenden vier typischen Lagerungsfälle gilt mit $EI = konst.$

$$\boxed{F_K = \frac{\pi^2 EI}{l_K^{\ 2}}}$$



Knicklängen l_K für die vier EULER-Fälle mit Biegelinie für die kritische Kraft

In Abhängigkeit von den Lagerungen und den Flächenträgheitsmomenten bezüglich der Biegeachsen müssen für einen Knickstab möglicherweise mehrere Stabilitätsuntersuchungen angestellt werden.

Spannungsberechnung

Für Druckstäbe ist neben dem Knicken (schlanke Stäbe) noch das Versagen durch Quetschen (gedrungene Stäbe) möglich.

Folgende Größen werden definiert:

Trägheitsradius $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ $(i_y,\ i_z)$

Schlankheitsgrad $S = \frac{l_K}{i} = \lambda$ $(S_y,\ S_z)$, in der Literatur meist mit λ bezeichnet

Die kritische (Knick)spannung berechnet sich zu

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A} = \frac{\pi^2 EI}{l_K{}^2 A} = \pi^2 E \frac{i^2}{l_K{}^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

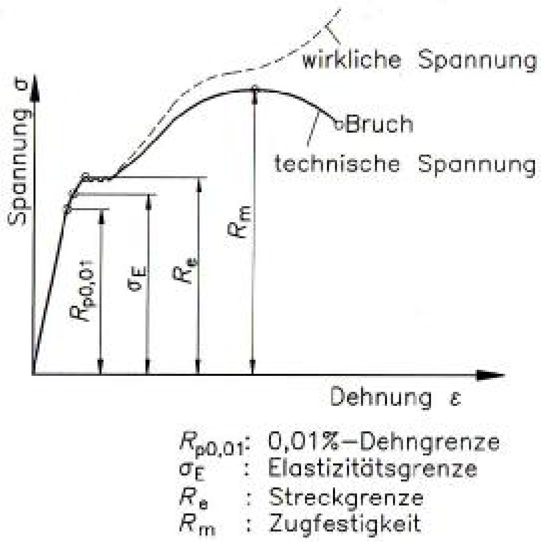
$$\sigma_K < \sigma_{d_{zul}}$$

Die **Eulerhyperbel** gilt bis zur Druck-Proportionalitätsgrenze σ_{dP}.

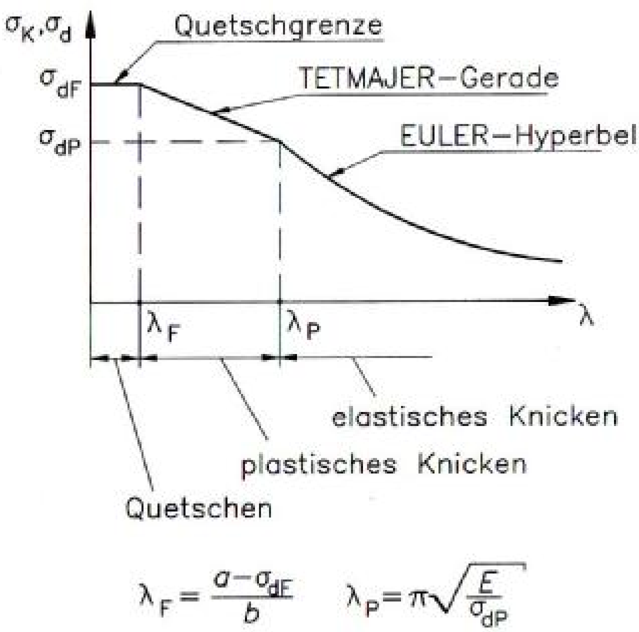
Der zugehörige Schlankheitsgrad $\lambda_P = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{dP}}}$ ist ein Materialparameter.

für

$\lambda > \lambda_P$	elastisches Knicken (Euler - Hyperbel)
$\lambda < \lambda_P$	plastisches Knicken (Tetmayer - Gerade, Näherung)
$\lambda < \lambda_F$	Quetschen



Spannungs-Dehnungs-Diagramm von S235



Hinweis: $\sigma_P = R_p$; $\sigma_F = R_e$; $\sigma_B = R_m$

Tetmayer-Gerade

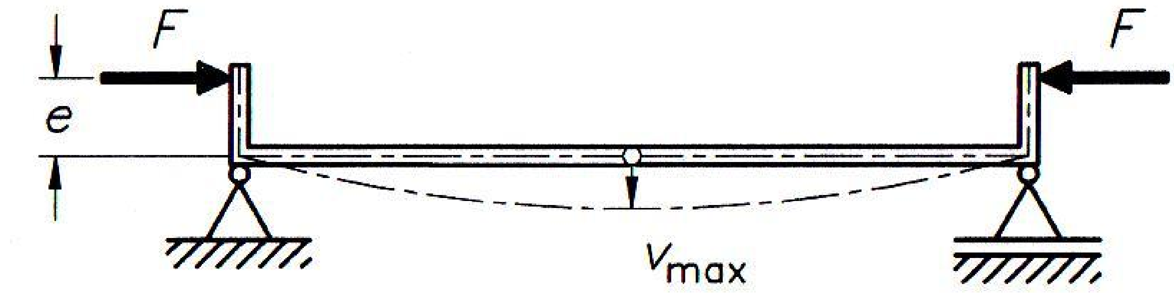
Im Bereich $\lambda_F < \lambda < \lambda_P$ gilt für die Berechnung der Knickspannung näherungsweise die Tetmajer-Gerade. Die Entscheidung, ob elastisches oder plastisches Knicken vorliegt, hängt vom vorhandenen Schlankheitsgrad ab.

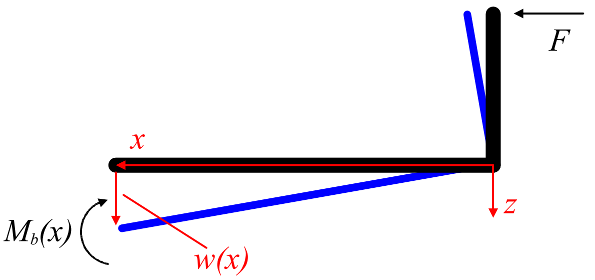
$$\boxed{\sigma_K = a - b\,S = a - b\,\lambda}$$

$a,\ b$ sind Werkstoffkonstanten

Werkstoff	E [N/mm²]	λ_P	a [N/mm²]	b [N/mm²]
S235 (St37)	210000	104	310,0	1,140
E295 (St50) E335 (St60)	210000	89	335,0	0,620
5%-Ni-Stahl	210000	86	470,0	2,300
Nadelholz	10000	100	29,3	0,194
Grauguß	100000	80	$\sigma_K = 776 - 12\,\lambda + 0{,}053\,\lambda^2$	

Beispiel: Stab der Länge l mit Exzentrizität e





Annahme:
e << Stablänge l

Gleichgewicht am verformten Bauteil $\quad M_b(x) = F(e + w(x))$

Differentialgleichung der Biegelinie $\quad -M_b = EI\, w''(x)$

$$EI\, w''(x) + F(e + w(x)) = 0$$

$$w''(x) + \frac{F}{EI} w(x) = \frac{-F}{EI} e$$

Abkürzung: $\frac{F}{EI} = \kappa^2$

inhomogene gewöhnliche lineare Differentialgleichung 2. Ordnung für $w(x)$

$$w''(x) + \kappa^2 w(x) = -\kappa^2 e$$

homogene Lösung

$$w = C_1 \cos(\kappa\, x) + C_2 \sin(\kappa\, x)$$

$$w' = -C_1 \kappa \sin(\kappa\, x) + C_2 \kappa \cos(\kappa\, x)$$

$$w'' = -C_1 \kappa^2 \cos(\kappa\, x) - C_2 \kappa^2 \sin(\kappa\, x)$$

partikuläre Lösung, Störgliedansatz entsprechend der rechten Seite

$$w_p = C_3$$
$$w_p' = 0$$
$$w_p'' = 0$$

einsetzen liefert $C_3 = -e$

Gesamtlösung $w = C_1 \cos(\kappa\, x) + C_2 \sin(\kappa\, x) + C_3$

Randbedingungen
$$\begin{array}{ll} w(x=0)=0 & 0 = C_1 + C_3 \\ w'(x=l)=0 & 0 = C_1 \cos(\kappa\, l) + C_2 \sin(\kappa\, l) + C_3 \end{array}$$

Es ergeben sich:
$$C_1 = -C_3 = e$$
$$C_2 = e\frac{-\cos(\kappa\, l)+1}{\sin(\kappa\, l)}$$

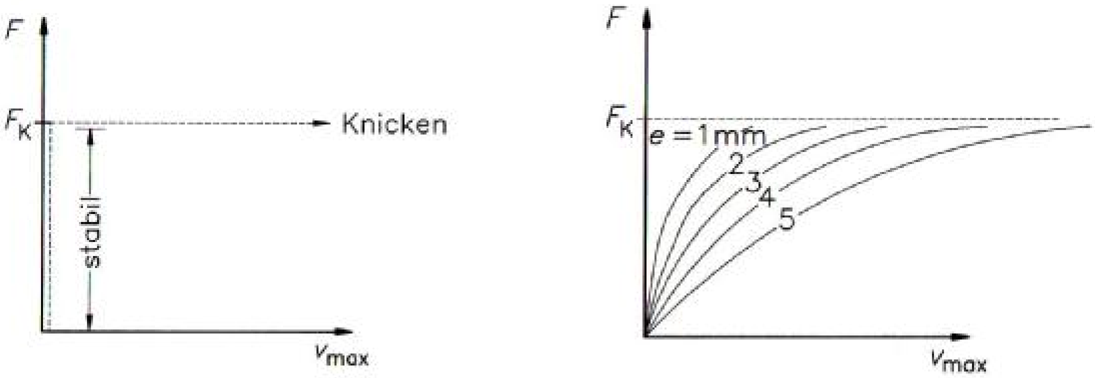
Verschiebungsfunktion $w(x) = e\left(\cos(\kappa\, x) + \dfrac{-\cos(\kappa\, l)+1}{\sin(\kappa\, l)}\sin(\kappa\, x) - 1\right)$

Der **„klassische“ Euler-Fall 2** liegt vor für $e = 0$. Dann ist die DGL homogen, $C_3 = 0$. Es folgt $C_1 = 0$ und C_2 sin($\kappa\ l$) $= 0$. Das heißt, es ist entweder $C_2 = 0$ oder sin($\kappa\ l$) $= 0$.

Hieraus ergibt sich $\boxed{\kappa\, l = n\pi}$

Mit der oben eingeführten Abkürzung ist dann $F_K = \dfrac{\pi^2 n^2}{l^2} EI$

Das Versagen tritt bei der kleinsten kritischen Last auf, also bei n = 1.
Für jede vorhandene Exzentrizität tritt die Verformung sofort auf (Bild links $e = 0$, rechts $e \neq 0$).



Stabverformung bei steigender Last

Mit der selben Vorgehensweise können andere Knickfälle berechnet werden.

In Anlehnung an die Formel $F_K = \frac{\pi^2}{l^2} EI$ für der Euler-Fall 2 werden die Knicklasten durch

$$\boxed{F_K = \frac{\pi^2}{l_K^{\,2}} EI}$$

beschrieben (siehe oben).
Der Euler-Fall 2 wird oft als „Grundfall“ mit der Knicklänge $l_K = l$ bezeichnet. Die Knicklänge entspricht einer „Verformungshalbwelle“ (halbe Sinuswelle).

weitere Beispiele

Welche zulässige Druckkraft kann ein Winkelstahl 60 x 10 aus S235 (St37) bei einer Länge von 1,4 m übertragen, wenn eine Knicksicherheit von s_K=4 gefordert wird? Die Berechnung soll für den Euler-Fall 2 (Grundfall) erfolgen.

Bestimmung des Schlankheitsgrades um festzustellen, ob die Euler-Fälle anwendbar sind.

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

aus der Tabelle für L-Profil $\qquad i_{min}$ = 1,15 cm

Damit ist $\lambda = \frac{l_K}{i} = \frac{140\,cm}{1{,}15\,cm} = 122 > 104$ $\qquad$ Werkstoff S235 (St37) $\lambda_P = 104$

Es handelt sich um elastisches Knicken, Eulerfälle sind anwendbar.

$$F_{d\,zul} = \frac{\pi^2 EI}{s_K l^2}$$ mit $I = I_{\min} = I_\zeta = 14{,}6\,cm^4$ aus Tabelle für L-Profil (DIN 1028)

$$F_{d\,zul} = \frac{\pi^2 \cdot 2{,}1 \cdot 10^7 \frac{N}{cm^2} \cdot 14{,}6\,cm^4}{4 \cdot 140^2\,cm^2} = 38{,}6 \cdot 10^3\,N$$

Die zulässige Druckkraft beträgt 38,6 kN.

Kann ein einseitig eingespanntes Rohr (Länge = 150 cm) mit einem Innendurchmesser vom 100 mm und einer Wandstärke von 10 mm eine Druckkraft von 150 kN aufnehmen, wenn eine Knicksicherheit von 5 gefordert wird? Als Werkstoff wird S235 verwendet.

Bestimmung des Schlankheitsgrades um festzustellen, ob die Euler-Fälle anwendbar sind.

$$\lambda = \frac{l_K}{i} \qquad l_K = 2\,l$$

Trägheitsmoment, Querschnittsfläche, Trägheitsradius, Schlankheitsgrad

$$A = \frac{\pi}{4}\left(D^2 - d^2\right) = \frac{\pi}{4}\left(12^2 - 10^2\right)cm^2 = 34{,}56\,cm^2$$

$$I = \frac{\pi}{64}\left(D^4 - d^4\right) = \frac{\pi}{64}\left(12^4 - 10^4\right)cm^4 = 527\,cm^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 3{,}91\,cm$$

$$\lambda = \frac{l_K}{i} = \frac{2\,l}{i} = \frac{2 \cdot 150}{3{,}91} = 76{,}8$$

Der berechnete Schlankheitsgrad liegt im Bereich $60 < \lambda < 104$ (Bereich, in dem für S235 die Tetmajer-Gerade gilt). Es handelt sich um plastisches Knicken. Mit den Werkstoffkonstanten gemäß Tabelle gilt:

$$\sigma_K = (a - b \cdot \lambda) = (310 - 1{,}14 \cdot 76{,}8)\frac{N}{mm^2} = 222\,\frac{N}{mm^2}$$

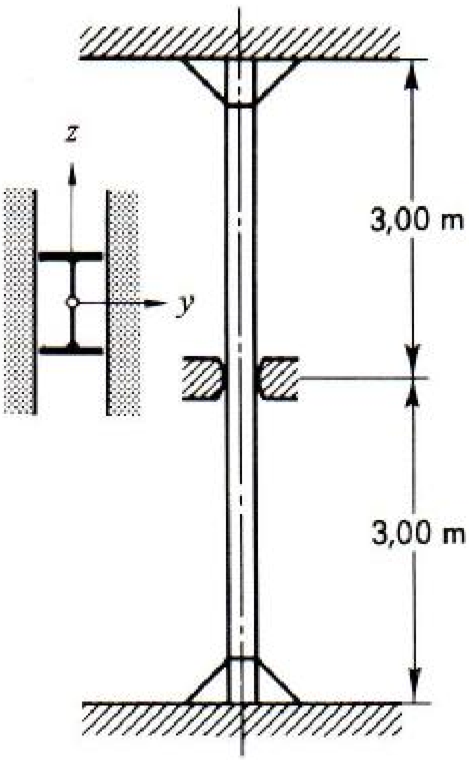
Die zur Zerstörung führende Druckkraft ist

$$F_K = \sigma_K \cdot A = 222\frac{N}{mm^2} \cdot 3456\,mm^2 = 768{,}7\,kN$$

$$F_{d\,zul} = \frac{F_K}{s_K} = \frac{768{,}7\,kN}{5} = 153\,kN > 150\,kN$$

Die vorgesehene Belastung ist möglich.

Ein Doppel-T Träger wird gemäß Skizze als Säule verwendet. Anschläge verhindern in der Mitte das Ausknicken in y-Richtung, jedoch nicht in z-Richtung. Die Knotenbleche oben und unten sollen wie eine Einspannung für die y-Richtung wirken. In z-Richtung seien an den Stabenden Winkeländerungen möglich, deshalb soll hier der Eulerfall 2 der Berechnung zugrunde gelegt werden.
Es ist zu prüfen, ob eine Belastung von 12 kN bei einer Sicherheit von 4 möglich ist. Als Werkstoff wird S235 verwendet.



Daten für Doppel-T 100 nach DIN 1025

$$A = 10{,}6\,cm^2$$
$$i_y = 4{,}01\,cm$$
$$i_z = 1{,}07\,cm$$

Das Ausknicken ist in zwei Richtungen möglich. Beide Fälle werden untersucht und müssen die notwendige Sicherheit gegen Knickung haben. Die kritischen Knicklängen ergeben sich aus den Lagerungen der Säule.

$$l = 300\,cm$$

$$E = 210000\frac{N}{mm^2}$$

Knicken in y-Richtung (Biegung um z-Achse)

Euler-Fall 3 für die halbe Säule (eingespannt – gelenkig)

$$\lambda = \frac{l_{Kz}}{i_z} \approx \frac{0{,}7 \cdot l}{i_z} = \frac{0{,}7 \cdot 300\,cm}{1{,}07\,cm} = 196{,}3 > \lambda_P$$

also elastisches Knicken, mit $\lambda = \frac{l_K}{i}$ und $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ folgt

$$F_K = \frac{\pi^2 EI}{l_K^{\,2}} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \frac{N}{mm^2} \cdot 1060\,mm^2}{196{,}3^2} = 57{,}014\,kN$$

Knicksicherheit $\underline{s_K = \frac{F_{K\,vorh}}{F_{K\,zul}} = \frac{57{,}014\,kN}{12\,kN} = 4{,}75}$

Knicken in z-Richtung (Biegung um y-Achse)

Euler-Fall 2 (Grundfall) für die ganze Säule (gelenkig – gelenkig)

$$\lambda = \frac{l_{Ky}}{i_y} = \frac{l}{i_y} = \frac{600\,cm}{4{,}01\,cm} = 149{,}6 > \lambda_P$$

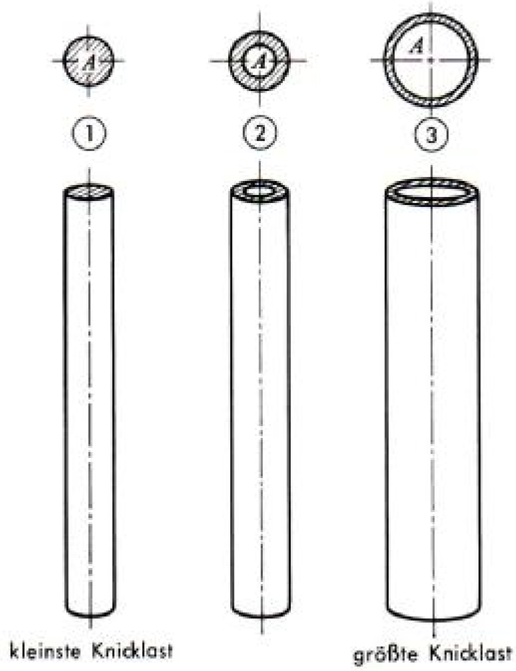
also ebenfalls elastisches Knicken

$$F_K = \frac{\pi^2 EI}{l_K^{\,2}} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \frac{N}{mm^2} \cdot 1060\,mm^2}{149{,}6^2} = 98{,}166\,kN$$

Knicksicherheit $\underline{s_K = \frac{F_{K\,vorh}}{F_{K\,zul}} = \frac{98{,}166\,kN}{12\,kN} = 8{,}18}$

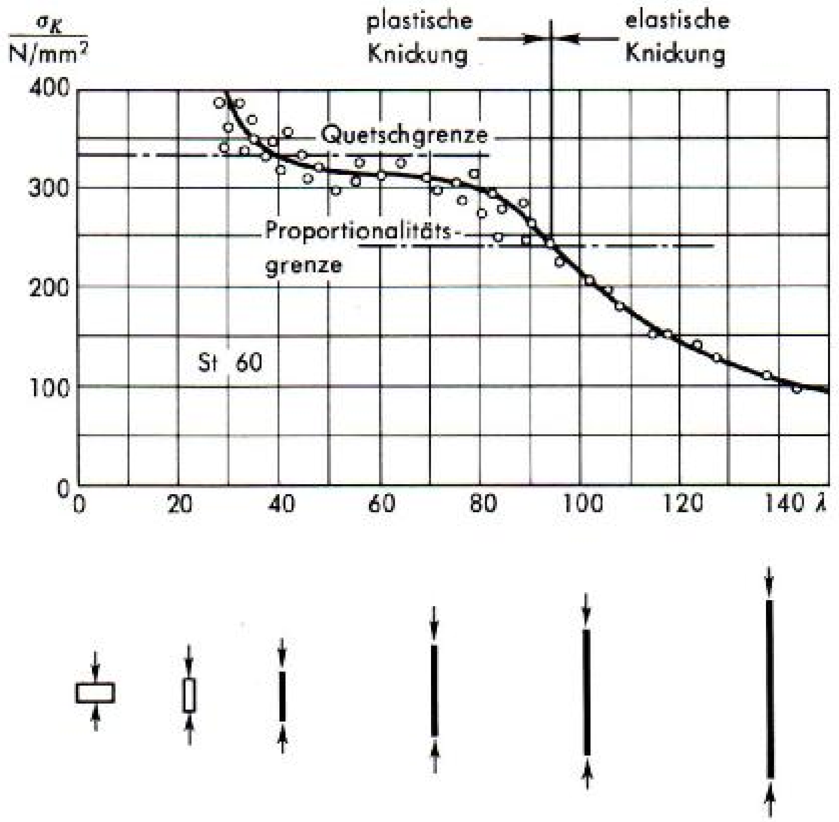
Die geforderte Knicksicherheit von 4 ist in beiden Fällen gegeben.

Anhang



Länge	$l_1 = l_2 = l_3$
Querschnittsfläche	$A_1 = A_2 = A_3$
Trägheitsmoment	$I_1 < I_2 < I_3$
Schlankheitsgrad	$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$
Knicklast	$F_{K1} < F_{K2} < F_{K3}$

Einfluss der Geometrie auf die kritische Last (gleiche Länge, gleiche Querschnittsfläche, gleiche Randbedingungen)

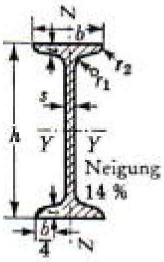


gedrungen ← → schlank

Knickspannung in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad für E335 (St60)

Querschnittswerte für warmgewalzte Normprofile aus Stahl

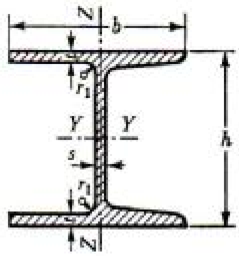
Auszug aus DIN 1025



Warmgewalzte I-Träger

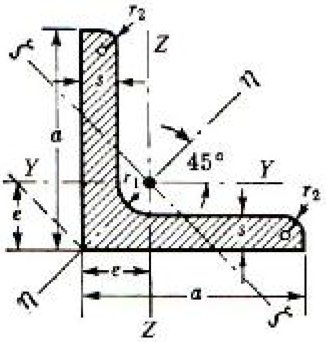
← **schmale I-Träger** (I-Reihe) | **I-Breitflanschträger** → Reihe HE-B (IPB-Reihe)

S_y = Statisches Moment des halben Querschnitts



Kurzzeichen	Abmessungen in mm						Querschnitt	Masse	Für die Biegeachse						
									Y-Y			Z-Z			
I	h	b	s	t	r_1	r_2	A cm²	m kg/m	I_y cm⁴	W_y cm³	i_y cm	I_z cm⁴	W_z cm³	i_z cm	S_y cm³
Schmale I-Träger (I-Reihe)															
80	80	42	3,9	5,9	3,9	2,3	7,58	5,95	77,8	19,5	3,20	6,29	3,00	0,91	11,4
100	100	50	4,5	6,8	4,5	2,7	10,6	8,32	171	34,2	4,01	12,2	4,88	1,07	19,9
120	120	58	5,1	7,7	5,1	3,1	14,2	11,2	328	54,7	4,81	21,5	7,41	1,23	31,8
140	140	66	5,7	8,6	5,7	3,4	18,3	14,4	573	81,9	5,61	35,2	10,7	1,40	47,7
160	160	74	6,3	9,5	6,3	3,8	22,8	17,9	935	117	6,40	54,7	14,8	1,55	68,0
180	180	82	6,9	10,4	6,9	4,1	27,9	21,9	1450	161	7,20	81,3	19,8	1,71	93,4
200	200	90	7,5	11,3	7,5	4,5	33,5	26,3	2140	214	8,00	117	26,0	1,87	125
220	220	98	8,1	12,2	8,1	4,9	39,6	31,1	3060	278	8,80	162	33,1	2,02	162
240	240	106	8,7	13,1	8,7	0,2	46,1	36,2	4250	354	9,59	221	41,7	2,20	206
260	260	113	9,4	14,1	9,4	5,6	53,4	41,9	5740	442	10,4	288	51,0	2,32	257
280	280	119	10,1	15,2	10,1	6,1	61,1	48,0	7590	542	11,1	364	61,2	2,45	316
300	300	125	10,8	16,2	10,8	6,5	69,1	54,2	9800	653	11,9	451	72,2	2,56	381
320	320	131	11,5	17,3	11,5	6,9	77,8	61,0	12510	782	12,7	555	84,7	2,67	457
340	340	137	12,2	18,3	12,2	7,3	86,8	68,1	15700	923	13,5	674	98,4	2,80	540
360	360	143	13,0	19,5	13,0	7,8	97,1	76,2	19610	1090	14,2	818	114	2,90	638
380	380	149	13,7	20,5	13,7	8,2	107	84,0	24010	1260	15,0	975	131	3,02	741
400	400	155	14,4	21,6	14,4	8,6	118	92,6	29210	1460	15,7	1160	149	3,13	857
425	425	163	15,3	23,0	15,3	9,2	132	104	36970	1740	16,7	1440	176	3,30	1020
450	450	170	16,2	24,3	16,2	0,7	147	115	45860	2040	17,7	1730	203	3,43	1200
475	475	178	17,1	25,6	17,1	10,3	163	128	56480	2380	18,6	2090	235	3,60	1400
500	500	185	18,0	27,0	18,0	10,8	180	141	68740	2750	19,6	2480	268	3,72	1620
550	550	200	19,0	30,0	19,0	11,9	213	167	99180	3610	21,6	3490	349	4,02	2120
600	600	215	21,6	32,4	21,6	13,0	254	199	139000	4630	23,4	4670	434	4,30	2730
I-Breitflanschträger mit parallelen Flanschflächen (IPB-Reihe)															
100	100	100	6	10	12		26,0	20,4	450	89,9	4,16	167	33,5	2,53	52,1
120	120	120	6,5	11	12		34,0	26,7	864	144	5,04	318	52,9	3,06	82,6
140	140	140	7	12	12		43,0	33,7	1510	216	5,93	550	78,5	3,58	123
160	160	160	8	13	15		54,3	42,6	2490	311	6,78	889	111,	4,05	177
180	180	180	8,5	14	15		65,3	51,2	3830	426	7,66	1360	151	4,57	241
200	200	200	9	15	18		78,1	61,3	5700	570	8,54	2000	200	5,07	321
220	220	220	9,5	16	18		91,0	71,5	8090	736	9,43	2840	258	5,59	414
240	240	240	10	17	21		106	83,2	11260	938	10,3	3920	327	6,08	527
260	260	260	10	17,5	24		118	93,0	14920	1150	11,2	5130	395	6,58	641
280	280	280	10,5	18	24		131	103	19270	1380	12,1	6590	471	7,09	767
300	300	300	11	19	27		149	117	25170	1680	13,0	8560	571	7,58	934
320	320	320	11,5	20,5	27		161	127	30820	1930	13,8	9240	616	7,57	1070
340	340	300	12	21,5	27		161	134	36660	2160	14,6	9690	646	7,53	1200
360	360	300	12,5	22,5	27		181	142	43190	2400	15,5	10140	676	7,49	1340
400	400	300	13,5	24	27		198	155	57680	2880	17,1	10820	721	7,40	1620
450	450	300	14	26	27		218	171	79890	3550	19,1	11720	781	7,33	1990
500	500	300	14,5	28	27		239	187	107200	4290	21,2	12620	842	7,27	2410

Auszug aus DIN 1028



Warmgewalzter gleichschenkliger rundkantiger Winkelstahl

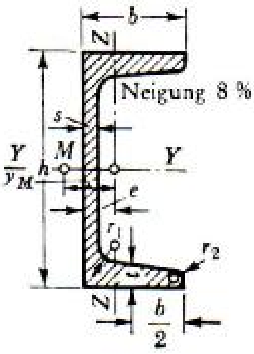
I = Trägheitsmoment
W = Widerstandsmoment
i = $\sqrt{I/A}$ Trägheitshalbmesser
$r_2 = r_1/2$ (auf halbe mm gerundet)

} bezogen auf die zugehörige Biegeachse

Abmessungen in mm			Querschnitt	Masse		Für die Biegeachse							
						Y-Y = Z-Z			$\eta - \eta$		$\zeta - \zeta$		
a	s	r_1	A cm²	m kg/m	e cm	I_y cm⁴	W_y cm³	i_y cm	I_η cm⁴	i_η cm	I_ζ cm⁴	W_ζ cm³	i_ζ cm
20	3	3,5	1,12	0,88	0,60	0,39	0,28	0,59	0,62	0,74	0,15	0,18	0,37
	4		1,45	1,14	0,64	0,48	0,35	0,58	0,77	0,73	0,19	0,21	0,36
25	3	3,5	1,42	1,12	0,73	0,79	0,45	0,75	1,27	0,95	0,31	0,30	0,47
	4		1,85	1,45	0,76	1,01	0,58	0,74	1,61	0,93	0,40	0,37	0,47
	5		2,26	1,77	0,80	1,18	0,69	0,72	1,87	0,91	0,50	0,44	0,47
30	3	5	1,74	1,36	0,84	1,41	0,65	0,90	2,24	1,14	0,57	0,48	0,57
	4		2,27	1,78	0,89	1,81	0,86	0,89	2,85	1,12	0,76	0,61	0,58
	5		2,78	2,18	0,92	2,16	1,04	0,88	3,41	1,11	0,91	0,70	0,57
35	4	5	2,67	2,10	1,00	2,96	1,18	1,05	4,68	1,33	1,24	0,88	0,68
	5		3,28	2,57	1,04	3,56	1,45	1,04	5,63	1,31	1,49	1,10	0,67
	6		3,87	3,04	1,08	4,14	1,71	1,04	6,50	1,30	1,77	1,16	0,68
40	4	6	3,08	2,42	1,12	4,48	1,56	1,21	7,09	1,52	1,86	1,18	0,78
	5		3,79	2,97	1,16	5,43	1,91	1,20	8,64	1,51	2,22	1,35	0,77
	6		4,48	3,52	1,20	6,33	2,26	1,19	9,98	1,49	2,67	1,57	0,77
45	5	7	4,30	3,38	1,28	7,83	2,43	1,35	12,4	1,70	3,25	1,70	0,87
	7		5,86	4,60	1,36	10,4	3,31	1,33	16,4	1,67	4,39	2,29	0,87
50	5	7	4,80	3,77	1,40	11,0	3,05	1,51	17,4	1,90	4,59	2,32	0,98
	6		5,69	4,47	1,45	12,8	3,61	1,50	20,4	1,89	5,24	2,57	0,96
	7		6,56	5,15	1,49	14,6	4,15	1,49	23,1	1,88	6,02	2,85	0,96
	9		8,24	6,47	1,56	17,9	5,20	1,47	28,1	1,85	7,67	3,47	0,97
55	6	8	6,31	4,95	1,56	17,3	4,40	1,66	27,4	2,08	7,24	3,28	1,07
	8		8,23	6,46	1,64	22,1	5,72	1,64	34,8	2,06	9,35	4,03	1,07
	10		10,01	7,90	1,72	26,3	6,97	1,62	41,4	2,02	11,3	4,65	1,06
60	6	8	6,91	5,42	1,69	22,8	5,29	1,82	36,1	2,29	9,43	3,95	1,17
	8		9,03	7,09	1,77	29,1	6,88	1,80	46,1	2,26	12,1	4,84	1,16
	10		11,1	8,69	1,85	34,9	8,41	1,78	55,1	2,23	14,6	5,57	1,15
65	7	9	8,70	6,83	1,85	33,4	7,18	1,96	53,0	2,47	13,8	5,27	1,26
	9		11,0	8,62	1,93	41,3	9,04	1,94	65,4	2,44	17,2	6,30	1,25
	11		13,2	10,3	2,00	48,8	10,8	1,91	76,8	2,42	20,7	7,31	1,25
70	7	9	9,40	7,38	1,97	42,4	8,43	2,12	67,1	2,67	17,6	6,31	1,37
	9		11,9	9,34	2,05	52,6	10,6	2,10	83,1	2,64	22,0	7,59	1,36
	11		14,3	11,2	2,13	61,8	12,7	2,08	97,6	2,61	26,0	8,64	1,35

Auszug aus DIN 1026

Warmgewalzter rundkantiger [-Stahl

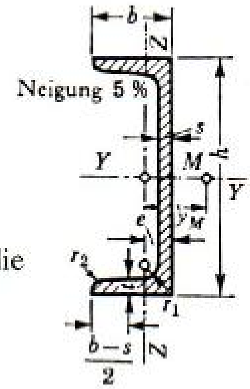


← Profil für
$h \leq 300$ mm

Profil für →
$h > 300$ mm

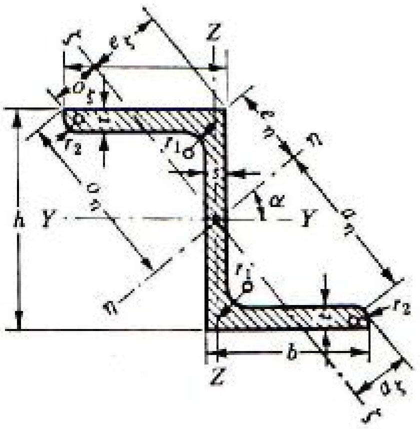
I = Trägheitsmoment
W = Widerstandsmoment
$i = \sqrt{I/A}$ Trägheitshalbmesser
} bezogen auf die zugehörige Biegeachse

y_M = Abstand des Schubmittelpunktes M von der Z-Z-Achse



Kurz-zeichen	Abmessungen in mm						Quer-schnitt	Masse			Für die Biegeachse					
											Y-Y			Z-Z		
[	h	b	s	t	r_1	r_2	A cm^2	m kg/m	e cm	y_m cm	I_y cm^4	W_y cm^3	i_y cm	I_z cm^4	W_z cm^3	i_z cm
30×15	30	15	4	4,5	4,5	2	2,21	1,74	0,52	0,74	2,53	1,69	1,07	0,38	0,39	0,42
30	30	33	5	7	7	3,5	5,44	4,27	1,31	2,22	6,39	4,26	1,08	5,33	2,68	0,99
40×20	40	20	5	5	5	2,5	3,51	2,75	0,65	0,98	7,26	3,63	1,44	1,06	0,78	0,55
40	40	35	5	7	7	3,5	6,21	4,87	1,33	2,32	14,1	7,05	1,50	6,68	3,08	1,04
50×25	50	25	6	6,5	6,5	3	5,50	4,32	0,82	1,26	18,0	7,18	1,81	2,94	1,75	0,73
50	50	38	5	5	7	3,5	7,12	5,59	1,37	2,47	26,4	10,6	1,92	9,12	3,75	1,13
60×30	60	30	6	6	6	3	6,46	5,07	0,91	1,50	31,6	10,5	2,21	4,51	2,16	0,84
65	65	42	5,5	7,5	7,5	4	9,03	7,09	1,42	2,60	57,5	17,7	2,52	14,1	5,07	1,25
80	80	45	6	8	8	4	11,0	8,64	1,45	2,67	106	26,5	3,10	19,4	6,36	1,33
100	100	50	6	8,5	8,5	4,5	13,5	10,6	1,55	2,93	206	41,2	3,91	29,3	8,49	1,47
120	120	55	7	9	9	4,5	17,0	13,4	1,60	3,03	364	60,7	4,62	43,3	11,1	1,59
140	140	60	7	10	10	5	20,4	16,0	1,75	3,37	605	86,4	5,45	62,7	14,8	1,75
160	160	65	7,5	10,5	10,5	5,5	24,0	18,8	1,84	3,56	925	116	6,21	85,3	18,3	1,89
180	180	70	8	11	11	5,5	28,0	22,0	1,92	3,75	1350	150	6,95	114	22,4	2,02
200	200	75	8,5	11,5	11,5	6	32,2	25,3	2,01	3,94	1910	191	7,70	148	27,0	2,14
220	220	80	9	12,5	12,5	6,5	37,4	29,4	2,14	4,20	2690	245	8,48	197	33,6	2,30
240	240	85	9,5	13	13	6,5	42,3	33,2	2,23	4,39	3600	300	9,22	248	39,6	2,42
260	260	90	10	17,5	14	7	48,3	37,9	2,36	4,66	4820	371	9,99	317	47,7	2,56
280	280	95	10	15	15	7,5	53,3	41,8	2,53	5,02	6280	448	10,9	399	57,2	2,74
300	300	100	10	16	16	8	58,8	46,2	2,70	5,41	8030	535	11,7	495	67,8	2,90
320	320	100	14	17,5	17,5	8,75	75,8	59,5	2,60	4,82	10870	679	12,1	597	80,6	2,81
350	350	100	14	16	16	8	77,3	60,6	2,40	4,45	12840	734	12,9	570	75,0	2,72
380	380	102	13,34	16	16	11,2	79,7	62,6	2,35	5,43	15730	826	14,1	613	78,4	2,78
400	400	110	14	18	18	9	91,5	71,8	2,65	5,11	20350	1020	14,9	846	102	3,04

Auszug aus DIN 1027



Warmgewalzter rundkantiger ⅂-Stahl

I = Trägheitsmoment	}	bezogen auf die
W = Widerstandsmoment	}	die zugehörige
$i = \sqrt{I/A}$ Trägheitshalbmesser	}	Biegeachse

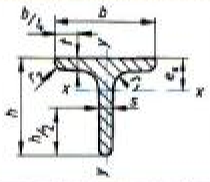
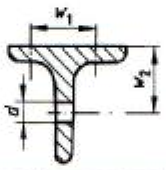
Kurzzeichen	Abmessungen in mm						Querschnitt	Masse	Lage der Achse	Abstände in cm von den Achsen η - η und ζ - ζ					
⅂	h	b	s	t	r_1	r_2	A cm^2	m kg/m	η - η tg α	o_η	o_ζ	e_η	e_ζ	a_η	a_ζ
30	30	38	4	4,5	4,5	2,5	4,32	3,39	1,655	3,86	9,58	0,61	1,39	3,54	0,87
40	40	40	4,5	5	5	2,5	5,43	4,26	1,181	4,17	0,91	1,12	1,67	3,82	1,19
50	50	43	5	5,5	5,5	3	6,77	5,31	0,939	4,60	1,24	1,65	1,89	4,21	1,49
60	60	45	5	6	6	3	7,91	6,21	0,779	4,98	1,51	2,21	2,04	4,56	1,76
80	80	50	6	7	7	3,5	11,1	8,71	0,588	5,83	2,02	3,30	2,29	5,35	2,25
100	100	55	6,5	8	8	4	14,5	11,4	0,492	6,77	2,43	4,34	2,50	6,24	2,65
120	120	60	7	9	9	4,5	18,2	14,3	0,433	7,75	2,80	5,37	2,70	7,16	3,02
140	140	65	8	10	10	5	22,9	18,0	0,385	9,72	3,18	6,39	2,89	8,08	3,39
160	160	70	8,5	11	11	5,5	27,5	21,6	0,357	9,74	3,51	7,39	3,09	9,04	3,72
180	180	75	9,5	12	12	6	33,3	26,1	0,329	10,7	3,86	8,40	3,27	9,99	4,08
200	200	80	10	13	13	6,5	38,7	30,4	0,313	11,8	4,17	9,39	3,47	11,0	4,39

Kurzzeichen	Für die Biegeachse												Zentrifugalmoment
	Y - Y			Z - Z			η - η			ζ - ζ			
⅂	I_y cm^4	W_y cm^3	i_y cm	I_z cm^4	W_z cm^3	i_z cm	I_η cm^4	W_η cm^3	i_η cm	I_ζ cm^4	W_ζ cm^3	i_ζ cm	I_{yz} cm^4
30	5,96	3,97	1,17	13,7	3,80	1,78	18,1	4,69	2,04	1,54	1,11	0,60	7,35
40	13,5	6,75	1,58	17,6	4,66	1,80	28,0	6,72	2,27	3,05	1,83	0,75	12,2
50	26,3	10,5	1,97	23,8	5,88	1,88	44,9	9,76	2,57	5,23	2,76	0,88	19,6
60	44,7	14,9	2,38	30,1	7,09	1,95	67,2	13,5	2,81	7,60	3,73	0,98	28,8
80	109	27,3	3,13	47,4	10,1	2,07	142	24,4	3,58	14,7	6,44	1,15	55,6
100	222	44,4	3,91	72,5	14,0	2,24	270	39,8	4,31	24,6	9,26	1,30	97,2
120	402	67,0	4,70	106	18,8	2,42	470	60,6	5,08	37,7	12,5	1,44	158
140	676	96,6	5,43	148	24,3	2,54	768	88,0	5,79	56,4	16,6	1,67	239
160	1060	132	6,20	204	31,0	2,72	1180	121	6,57	79,5	21,4	1,70	349
180	1600	178	6,92	270	38,4	2,84	1760	164	7,26	110	27,0	1,82	490
200	2300	230	7,71	357	47,6	3,04	2510	213	8,06	147	33,4	1,95	674

I_{yz}-Werte sind für das eingezeichnete Koordinatensystem negativ. Werte und Vorzeichen dieser Tabelle entsprechen DIN 1027.

Auszug aus DIN EN 10055, DIN 1024

T-Stahl, warmgewalzt, rundkantig nach DIN EN 10055: 1995-12

Abmessungen	Anreißmaße nach DIN 997	Kurzbezeichnung/Benennungen
		T-Profil EN 10055 – T40 – Stahl EN 10025 – S235JR b Fußbreite alle anderen Benennungen wie bei I-Trägern $r_1 = s$ $r_2 = s/2$ Steg-, Fußneigung 2%

Kurzz. T	b mm	h mm	$s=t$ mm	w_1 mm	w_2 mm	d mm	S cm^2	m' kg/m	e_x cm	I_x cm^4	W_x cm^3	i_x cm	I_y cm^4	W_y cm^3	i_y cm
30	30	30	4	17	17	4,3	2,26	1,77	0,85	1,72	0,80	0,87	0,87	0,58	0,62
35	35	35	4,5	19	19	4,3	2,97	2,33	0,99	3,10	1,23	1,04	1,57	0,90	0,73
40	40	40	5	21	22	6,4	3,77	2,96	1,12	5,28	1,84	1,18	2,58	1,29	0,83
50	50	50	6	30	30	6,4	5,66	4,44	1,39	12,1	3,36	1,46	6,06	2,42	1,03
60	60	60	7	34	35	8,4	7,94	6,23	1,66	23,8	5,48	1,73	12,2	4,07	1,24
70	70	70	8	38	40	11	10,6	8,32	1,94	44,5	8,79	2,05	22,1	6,32	1,44
80	80	80	9	45	45	11	13,6	10,7	2,22	73,7	12,8	2,33	37,0	9,25	1,65
100	100	100	11	60	60	13	20,9	16,4	2,74	179	24,6	2,92	88,3	17,7	2,05
120	120	120	13	70	70	17	29,6	23,2	3,28	366	42,0	3,51	178	29,7	2,45
140	140	140	15	80	75	21	39,9	31,3	3,80	660	64,7	4,07	330	47,2	2,88