


Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Symbole	xv
1. Festlegung der Materialkennwerte = Werkstoffmodell	1
2. Belastungsschema für freie Biegung	2
2.1 Das äußere Biegemoment $M_{(x)}$	2
2.2 Biegeträger mit rein elastischer freier Biegung	2
2.2.1 Inneres Biegemoment $M_{(x)}$	3
2.2.2 Krümmungsradius $\rho_{(x)}$	3
2.2.3 Maximale elastische Biegekraft $\left(\frac{dP}{dZ}\right)_{\max.\text{el.}}$	3
2.2.4 Elastische Biegearbeit $\frac{dW}{dZ}$	4
2.3 Biegeträger mit elastisch-plastischer freier Biegung	4
$\left(\frac{dP}{dZ}\right)_{\max.\text{el.}} \leq \frac{dP}{dZ} \leq \left(\frac{dP}{dZ}\right)_{\max.\text{el. Pl}}$	4
2.3.1 Inneres Biegemoment im Bereich $0 \leq x \leq x_{Pl}$	5
2.3.1.1 Elastischer Bereich $0 \leq \eta \leq \eta_F$	5
2.3.1.2 Plastischer Bereich $\eta_F \leq \eta \leq \frac{h}{2}$	5
2.3.1.3 Elastischer + plastischer Bereich $0 \leq x \leq x_{Pl}, 0 \leq \eta < \frac{h}{2}$	6
2.3.2 Ermittlung von η_F im Bereich $0 \leq x \leq x_{Pl}$	6
2.3.3 Ermittlung von $\rho_{(x)}$ für den Bereich $0 \leq x \leq x_{Pl}$	6
2.3.4 Bestimmung von x_{Pl}	6
2.3.5 Bestimmung von $\left(\frac{dP}{dZ}\right)_{\max.\text{el. Pl}}$	7
2.3.6 Bestimmung von $x_{Pl,\max}$	7
2.3.7 Biegearbeit im Bereich $0 \leq x \leq x_{Pl}$	7
2.3.7.1 Elastischer Bereich $0 \leq \eta \leq \eta_F$	7
2.3.7.2 Plastischer Bereich $\eta_F \leq \eta \leq \frac{h}{2}$	8
2.3.7.3 Elastischer + plastischer Bereich $0 \leq x \leq x_{Pl}$	8
2.3.8 Elastische Biegearbeit im Bereich $x_{Pl} \leq x \leq \left(R + \frac{h}{2}\right)\alpha + \delta H_0$	9
2.3.9 Gesamte Biegearbeit	9
3. Erzwungene Biegung im Bereich $0 \leq x \leq \left(R + \frac{h}{2}\alpha\right)$	11
4. Erzwungene Biegung im Bereich $0 \leq x \leq \left(R + \frac{h}{2}\alpha\right)$	12
Freie elastisch-plastische Biegung im Bereich $0 \leq x_1 \leq x_{1Pl}$	12
Freie elastische Biegung im Bereich $x_{1Pl} \leq x_1 \leq \delta H_0$	12

5. Pressen von Winkeln ∇	15
5.1 Bestimmungen von δH_0	15
5.2 Bestimmung des Stempelweges s	16
5.3 Bestimmung des maximal möglichen Weges s_{\max} und maximal möglichen Biegewinkels α_{\max}	16
5.4 Bestimmung von $\frac{ds}{d\alpha_x}$	16
5.5 Bestimmung der gesamten Hinbiegearbeit mit Reibung	16
5.6 Ermittlung von $d \left(\frac{dW}{d\alpha_x} \right)$	18
5.7 Bestimmung des Stempelpfades $\left(\frac{dP}{dZ} \right)_v$	18
5.8 Maximal zulässiger Wert der Stempelpfades	19
5.9 Praktische Messungen	19
6. Pressen von U-Profilen (ohne Niederhalter) mit großer Schenkellänge	23
6.1 Bestimmung von δH_0	24
6.2 Bestimmung von s	24
6.3 Bestimmung von s_{\max}	24
6.4 Bestimmungen $\frac{ds}{d\alpha_x}$	24
6.5 Bestimmung der Hinbiegearbeit mit Reibung	24
6.6 Bestimmung des Stempelpfades	24
6.7 Praktische Versuche	25
6.7.1 Der zweifache gelagerte Kragträger mit je einer Einzellast am Kragende	25
6.7.2 Ermittlung der Hinbiegearbeit für den plastischen Bereich $\eta_F \leq h \leq \frac{h}{2}$	26
6.7.3 Ermittlung der Hinbiegearbeit für den elastischen Bereich $0 \leq \eta \leq \eta_F$	27
6.7.4 Hinbiegearbeit im elastischen und plastischen Bereich $0 \leq x \leq b$	27
6.7.5 Ermittlung von ρ und η_F	27
6.7.6 Bestimmung von y, y', y'' im Bereich $0 \leq x \leq b$	28
6.7.7 Ermittlung der mittleren zusätzlichen Stempelpfades am Verformungsende ΔP_{\max_1}	28
6.7.8 Ermittlung der mittleren zusätzlichen Stempelpfades am Verformungsende ΔP_{\max_2}	29
6.7.9 Gesamte zusätzliche Stempelpfades am Verformungsende ΔP_{\max}	29
6.7.10 Vergleich mit Meßwerten	30
7. Pressen von Trapezprofilen ∇ (mit Niederhalter) für zwei Schenkel	33
7.1 Bestimmung von δH_0	33
7.2 Bestimmung von s	33
7.3 Bestimmung von $\frac{ds}{d\alpha_x}$	34
7.4 Bestimmung von $\delta H_{0_{\min}}$ und $\alpha_{x_{\min}}$	34
7.5 Stempelweg bei Erreichen von $\alpha_{x_{\min}}$	34
7.6 Arbeitsermittlung im Bereich $0 \leq \alpha_x \leq \alpha_{x_{\min}}$	35
7.7 Arbeitsermittlung im Bereich $\alpha_{x_{\min}} \leq \alpha_x \leq \alpha$	35
7.8 Stempelpfadesverlauf im Bereich $0 \leq \alpha_x \leq \alpha_{x_{\min}}$	35
7.9 Stempelpfadesverlauf im Bereich $\alpha_{x_{\min}} \leq \alpha_x \leq \alpha$	35

7.10 Stempelkraft hervorgerufen durch Niederhalterkraft im Bereich $0 \leq \alpha_x \leq \alpha$	38
7.11 Vergleich mit praktischen Messungen	39
8. Pressen von U-Profilen (ohne Niederhalter) mit kleiner Schenkellänge	40
8.1 Bestimmung von δH_0	40
8.2 Bestimmung der Ausgangslage des zu pressenden Bleches	40
8.3 Bestimmung der Untergesenktiefe s_{\max}^*	41
8.4 Ableitung von s nach α_x	41
8.5 Bestimmung der Biegearbeit	42
8.6 Ermittlung von $d \left(\frac{dW}{dZ} \right)_{B+R}$	43
8.7 Bestimmung des Stempelkraftverlaufes $\left(\frac{dP}{dZ} \right)_v$	44
8.8 Vergleich mit praktischen Messungen	44
9. Biegen von Winkeln mit beweglichem Unterwerkzeug	46
9.1 Bestimmung von δH_0	46
9.2 Bestimmung der Koordinaten des Berührungspunktes x_s und y_s als Funktion von α_x	47
9.3 Zusammenhang zwischen α_x und ϕ_x	47
9.4 Bestimmung der Biegearbeit als Funktion von α_x	47
9.5 Bestimmung von $\frac{d\phi}{d\alpha_x}$	48
9.6 Bestimmung von $\frac{d \left(\frac{dW}{dZ} \right)}{d\alpha_x}$	49
9.7 Bestimmung des äußeren Biegemoments aus der Biegearbeit	49
9.8 Bestimmung der äußeren Biegekraft $\left(\frac{dP}{dZ} \right)^*$	49
9.9 Bestimmung der Vertikalkraft $\left(\frac{dP}{dZ} \right)_v$	50
9.10 Bestimmung der Vertikalkraft vom Stempel $\left(\frac{dP}{dZ} \right)_v^*$	50
9.11 Vergleich mit dem Rechenprogramm Abaqus	50
10. Pressen von Straßenleitschienen 	52
10.1 Bestimmung von δH_0	52
10.2 Bestimmung des Stempelweges s	52
10.3 Bestimmung von δH_2	52
10.4 Bestimmung des Stempelweges s	54
10.5 Zusammenhang von α_{x_1} und α_{x_4}	54
10.6 Bestimmung von $\frac{d\alpha_{x_4}}{d\alpha_{x_1}}$	54
10.7 Bestimmung von $\frac{ds}{d\alpha_{x_1}}$	55
10.8 Bestimmung von s_{\max}	55
10.9 Bestimmung von s_3	55
10.10 Bestimmung von $\alpha_{x_3}^*$	56
10.11 Bestimmung von ΔL_3	56

10.12	Bestimmung von ΔL_4 und ΔL_5	57
10.12.1	Bestimmung von ΔL_4	57
10.12.2	Bestimmung von ΔL_5	57
10.12.3	Bestimmung von $\Delta L_4 - L_5$	58
10.13	Bestimmung von $\frac{d(\Delta L_4 - \Delta L_5)}{d\alpha_{x_3}}$ für $s_3 \leq s \leq s_{\max}$ und $\alpha_{x_3}^* \leq \alpha_{x_3} \leq \alpha_3$	59
10.14	Bestimmung von $\Delta L_2 =$ Länge, die hin- und rückgebogen wird um $\left(\rho_4 + \frac{h}{2}\right)$	59
10.15	Bestimmung von $\frac{d(\Delta L_2)}{d\alpha_{x_1}}$	59
10.16	Bestimmung der Biegearbeit	59
10.17	Biegearbeit im Bereich $0 \leq s \leq s_{\max}$	60
10.18	Biegearbeit im Bereich $s_3 \leq s \leq s_{\max}$ oder $\alpha_{x_1}^* \leq \alpha_x \leq \alpha_3$	62
10.19	Bestimmung der Ableitungen der Biegearbeit nach α_{x_1}	62
10.19.1	$0 \leq s \leq s_{\max}$	62
10.19.2	$s_3 \leq s \leq s_{\max}$ oder $\alpha_{x_1}^* \leq \alpha_{x_3} \leq \alpha_3$	62
10.20	Bestimmung des Stempelkraftverlaufes	63
10.20.1	$0 \leq s \leq s_{\max}$ – ohne Reibung	63
10.20.2	$s_3 \leq s \leq s_{\max}$ oder $\alpha_{x_1}^* \leq \alpha_{x_3} \leq \alpha_3$	64
10.20.3	Bestimmung von $\frac{d\alpha_{x_3}}{d\alpha_{x_3}}$ für $s_3 \leq s \leq s_3 + \rho_2 \cos \alpha_3$	64
10.21	Abschätzung der maximalen Stempelkraft am Verformungsende	65
10.22	Vergleich der Berechnungen mit Preßversuchen	66
10.23	Vergleich der gerechneten mit der gemessenen maximalen Stempelkraft	69
11.	Kaltprofilieren von Bändern	70
11.1	Oberwalze	70
11.1.1	Greifwinkel θ_1	71
11.1.2	Winkel $\theta_{1\psi}$ und $\delta\theta_{1\psi}$	71
11.1.3	Antriebsmoment $Md_{0(\psi)}$ der Oberwalze in Abhängigkeit der Arbeit $\left(\frac{dW}{d\psi}\right)$	71
11.1.4	Antriebsmoment an der Oberwalze mit Reibung $Md_{0(\psi)}$	71
11.1.5	Umfangskraft an der Oberwalze $U_{0(\psi)}$	72
11.1.6	Bestimmung der Anstellkraft P_v für Ober- und Unterwalze	72
11.2	Unterwalze	73
11.2.1	Greifwinkel θ_2	74
11.2.2	Winkel $\theta_{2(\psi)}$ und $d\theta_{2(\psi)}$	74
11.2.3	Antriebsmoment $Md_{u(\psi)}$ an der Unterwalze in Abhängigkeit von $\left(\frac{dW}{d\psi}\right)$	74
11.2.4	Umfangskraft an der Unterwalze	74
11.3	Bestimmung von $\frac{L}{2}$ an der Unterwalze	75
11.4	Bestimmung von ρ_{u_1} für $\frac{B_0}{2} \geq \frac{B_1}{2} + \frac{L}{2} + \rho_2$	76
11.5	Bestimmung von ρ_{u_1} für $\frac{B_0}{2} \leq \frac{B_1}{2} + \frac{L}{2} + \rho_2$	78
11.6	Bestimmung der Verformungslänge ψ_s und vertikaler Weg der Oberwalze s	79
11.7	Bestimmung von δH_0 und r_{u_1} für $\frac{B_0}{2} \geq \frac{B_1}{2} + \frac{L}{2} + \rho_2$	80

11.8	Bestimmung von δH_0 und r_{u1} für $\frac{B_0}{2} \leq \frac{B_1}{2} + \frac{L}{2} + \rho_2$	81
11.9	Bestimmung der Arbeitsanteile $\frac{dW}{d\psi}$	85
11.9.1	Biegung	85
11.9.2	Biegung der Fläche $B_1(r_0 + h)d\theta_{1(\psi)}$ um den Biegeradius $\left(r_0 + \frac{h}{2}\right)$	86
11.9.3	Biegung der beiden Schenkel	87
11.9.4	Bestimmung von $\psi_s = f(\alpha)$	87
11.10	Rechengang für das 1. Verformungsgerüst	87
11.10.1	ψ_{s1}	88
11.10.2	ψ_1	88
11.10.3	$\frac{L}{2} + \rho_2$	88
11.10.4	δH_{01}	88
11.10.5	$\eta_{Fx1=0}$, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6	89
11.10.5.1	ρ_{u1} für $\frac{B_0}{2} \geq \frac{B_1}{2} + \frac{L}{2} + \rho_2$	90
11.10.5.2	ρ_{u1} für $\frac{B_0}{2} \leq \frac{B_1}{2} + \frac{L}{2} + \rho_2$	90
11.10.6	Antriebsarbeit in Abhängigkeit von ψ_1 oder α_x im 1. Verformungsgerüst	90
11.10.7	$M_{d(\psi)\#1}$ im 1. Verformungsgerüst	91
11.10.8	$P_{v(\psi)\#1}$ im 1. Verformungsgerüst	91
11.11	Rechengang für das 2. Verformungsgerüst	91
11.11.1	ψ_{s2}	92
11.11.2	ψ_2	92
11.11.3	$\frac{L_2}{2} + \rho_2$	92
11.11.4	δH_0	92
11.11.5	$\eta_{Fx1=0}$, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 , gleich wie beim 1. Verformungsgerüst	93
11.11.6	Antriebsarbeit in Abhängigkeit von ψ_2 oder α_x	94
11.11.7	$M_{d(\psi)\#2}$	94
11.11.8	$P_{v(\psi)\#2}$	95
11.12	Greifbedingung	95
11.13	Abschätzung des maximalen Biegewinkels α_{max}	97
11.14	Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messungen bei der Herstellung von U-Profilen	101
11.14.1	Die Durchführung der Messungen	101
11.14.2	Diskussion der Ergebnisse	103
12.	Planung von kontinuierlichen Rohr/Profil-Anlagen	108
12.1	Bestimmung des bezogenen Arbeitsverbrauches für die gesamte Bandlänge	108
12.2	Gesamte Antriebsarbeit	111
12.3	Ermittlung der erforderlichen gesamten Antriebsleistung der Umformgerüste	112
12.4	Gerüstanzahl	114
12.5	Schweißeinrichtungen	114
12.6	Kontinuierliches Querteilen von Profilen	115
12.6.1	Beschleunigungs- und Verzögerungsbereiche	116
12.6.2	Rücklaufzeit t_2	117
12.6.3	Schnittzeit t_s	117

12.6.4	Wartezeit t_w	117
12.6.5	Gesamtzeit – Gesamtweg – minimale Schnittlänge	117
12.6.6	Maximale Bandgeschwindigkeit, minimale Schnittlänge, Durchsatzleistung	118
12.6.7	Schnittzeit t_s	118
12.6.8	Erforderliche Sägeblattleistung N_s (kW)	118
12.6.9	Zusammenfassung	120
13.	Bestimmung des kleinsten Biegeradius	121
13.1	Neutrale Faser in der Mitte der Blechdicke	121
13.2	Neutrale Faser außerhalb der Blechmitte	122
13.2.1	Formänderungen im Symmetriebereich	122
13.2.2	Formänderungen außerhalb des Symmetriebereiches	123
13.2.3	Formänderung über die gesamte Blechdicke	124
14.	Rückfederung eines einseitig eingespannten Trägers nach Entlastung	129
14.1	Belastungsfall	129
14.2	Entlastungsfall	130
14.2.1	Frei bewegliche Blechschichten	130
14.2.2	Verbundene Blechschichten	132
14.3	Krümmungsradien im belasteten und entlasteten Zustand	133
14.4	Ermittlung von y'' , y' , y im belasteten Zustand für den Bereich $0 \leq x \leq x_{pl}$	133
14.5	Ermittlung von y , y' , y'' im entlasteten Zustand für den Bereich $0 \leq x \leq x_{pl}$	136
15.	Rückfederung im Werkzeugbereich (erzwungene Biegung)	138
15.1	Belasteter Zustand	138
15.2	Entlasteter Zustand	139
16.	Entstehung von Rollknicken beim Biegen (ohne äußere Zugspannungen)	141
16.1	Werkstoffmodell	141
16.2	Angenommener Biegefall (Verlauf des äußeren Biegemomentes)	142
16.3	Bestimmung des inneren Biegemomentes	143
16.3.1	Rein elastische Biegung	143
16.3.2	Elastisch-plastische Biegung (Bereich 2)	144
16.3.3	Elastisch-plastische Biegung (Bereich 3)	145
16.4	Das innere Biegemoment an der Einspannstelle ($x = 0$) in Abhängigkeit des Krümmungsradiuses bei $x = 0$	146
16.4.1	Elastische Biegung	147
16.4.2	Elastisch-plastische Biegung (Bereich 2)	148
16.4.3	Elastisch-plastische Biegung (Bereich 3)	148
16.5	Schlußfolgerungen	149
16.6	Ermittlung des Grenzwertes $\rho_{2/2}$, sowie Zusammenfassung einiger anderer ausgezeichneten Werte	149
16.6.1	Bestimmung von $\rho_{2/2}$	149
16.6.2	Zusammenstellung von $\rho_{2/1}$, $\rho_{2/3}$, $\rho_{2/4}$	150
16.6.2.1	Übergang von elastischer Biegung in den Bereich 2	150
16.6.2.2	Ende des Bereiches 2	150
16.6.2.3	Krümmungsradius des Bereiches 2 bei Erreichen des Endbiegemomentes $\left(\frac{dM}{dz}\right)_3$	150
16.7	Einfluß der oberen Streckgrenze σ_{0_1} auf $\rho_{2/2}$	151
Literatur	154