

**Untersuchungen zum Aushalsen von Rohren
mit starrem Werkzeug unter besonderer
Berücksichtigung der Vorlochgeometrie**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Cornelius Hentrich
geb. am 08.11.1965 in Gernrode / Eichsfeld

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Friedhelm Lierath
PD Dr.-Ing. habil. Winfried Petzold
Prof. Dr.-Ing. habil. Adolf Neubauer

Promotionskolloquium am 21.06.2002

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während und nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Herrn PD Dr.-Ing. habil. W. Petzold gilt mein besonderer Dank für die Anregung zu dieser Arbeit, die wissenschaftliche Betreuung mit den wertvollen Hinweisen und Anmerkungen sowie für die Anfertigung des Gutachtens.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. A. Neubauer für seine Anregungen sowie die Übernahme des Gutachtens und der damit verbundenen kritischen Durchsicht dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. F. Lierath, dem Direktor des Instituts für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, danke ich ebenfalls für die Übernahme des Gutachtens.

Allen Kollegen und Mitarbeitern des Institutes, insbesondere dem Leiter der Abteilung Umform- und Zerteiltechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Eichhorn danke ich für die gute Zusammenarbeit und die zahlreichen fachlichen Diskussionen. Besonders danke ich auch Herrn Dipl.-Ing. K. Leipelt und den Mitarbeitern der Institutswerkstatt für die tatkräftige Unterstützung.

Mein Dank richtet sich auch an die studentischen Hilfskräfte bzw. Diplomarbeiter Herrn Dipl.-Ing. O. Reinhardt, Herrn Dipl.-Ing. H. Masuch, Herrn Dipl.-Ing. M. Meier und Herrn Dipl.-Ing. K.-H. Mögling für ihren Beitrag zu dieser Arbeit.

Weiterhin danke ich den Industrievertretern in den Arbeitskreisen zu meinen Forschungsprojekten, vor allen Herrn Dipl.-Ing. T. Kühne sowie der Fa. ECKOLD, Herrn Dipl.-Ing. T. Linzen, Herrn Dipl.-Ing. W. Hunger und Herrn Dipl.-Ing. (FH) E. Walter für die vertrauensvolle und engagierte Mitarbeit. Der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) und der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) danke ich für die finanzielle Unterstützung.

Ferner möchte ich Herrn Dipl.-Ing. V. Keck (DaimlerChrysler AG) danken, der mich im Bemühen um die Fertigstellung dieser Arbeit immer wieder bestärkt hat.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Cordula, meinem Sohn Maximilian, meiner Tochter Magdalena und meinen Eltern. Sie haben meine Bemühungen stets mit viel Geduld unterstützt.

Waiblingen, im September 2002

Cornelius Hentrich

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Formelzeichen und Symbole	IV
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Aushalsen von Rohren	4
2.1.1 T-Drill-Verfahren	5
2.1.2 Aushalsen mit Elastomerkern	6
2.1.3 Aushalsen mit Kugeln	8
2.1.4 Aushalsen mit Aushalsstempel	9
2.1.4.1 Aushalsen runder Durchzüge	9
2.1.4.2 Aushalsen unrunder Durchzüge	15
2.1.5 Fazit	16
2.2 Kragenziehen in ebenen Blechen	17
2.2.1 Kragenziehen runder Kragen	17
2.2.1.1 Umformvorgang beim Kragenziehen	17
2.2.1.2 Spannungen und Formänderungen beim Kragenziehen	18
2.2.1.3 Verfahrensgrenzen für das Kragenziehen	20
2.2.1.4 Umformkraft beim Kragenziehen	24
2.2.1.5 Endteileigenschaften gezogener Kragen	25
2.2.2 Kragenziehen unrunder Kragen	27
2.3 Resümee	30
3 Zielsetzung	33

4	Untersuchungseinrichtungen und Versuchsparameter	35
4.1	Maschinen und Werkzeuge	35
4.1.1	Versuchsanlage zum Aushalsen	35
4.1.2	Versuchswerkzeuge	36
4.1.3	Vorlochfertigung	38
4.1.4	Messgrößen, Messverfahren	40
4.1.4.1	Messen der Prozessparameter	40
4.1.4.2	Messen der geometrischen Ausgangs- und Endteileigenschaften	41
4.1.4.3	Ermitteln der Werkstoffeigenschaften	42
4.1.4.4	Messen der Formänderungen	42
4.2	Versuchsparameter	45
4.2.1	Rohr- und Aushalungsabmessungen	45
4.2.2	Versuchswerkstoffe	48
4.2.2.1	Auswahl der Versuchswerkstoffe	48
4.2.2.2	Mechanische Kennwerte	48
4.2.2.3	Fließkurven	52
4.3	Prozesssimulation mit der FEM	53
5	Prozessanalyse und Ergebnisse	57
5.1	Umformvorgang	57
5.2	Spannungen und Formänderungen	58
5.3	Endteileigenschaften	66
5.3.1	Kaltverfestigung an der Aushalsung	66
5.3.2	Geometrische Abweichungen an Aushalsungen	67
5.3.2.1	Zylindrizität der Aushalsungswand	69

5.3.2.2 Kanteneinfall	72
5.3.2.3 Ebenheit des Aushalungsrandes	74
5.4 Vorlochgeometrie	75
5.4.1 Vorlochabmessungen	75
5.4.2 Vorlochform - Aufweitungskoeffizient k	85
5.5 Technologische Bedingungen beim Aushalsen	96
5.5.1 Charakterisierung der Verfahrensgrenze beim Aushalsen	96
5.5.2 Einflussfaktoren auf die Verfahrensgrenzen	99
5.5.2.1 Vorlochbearbeitung	99
5.5.2.2 Werkzeuggestaltung	101
5.5.2.3 Reibungsbedingungen	105
5.5.2.4 Maximales Aufweitverhältnis	107
5.5.2.5 Maximale Aushalsungshöhe	109
5.6 Umformkraft	110
6 Zusammenfassung und Ausblick	115
7 Literaturverzeichnis	118
Anhang	128
A.1 CNC-Programm zum Vorlochfräsen von Korbbogenellipsen	
A.2 CNC-Programm für das Vorlochfräsen einer Ellipse	
A.3 CNC-Programm für das Vorlochfräsen einer aufgeweiteten Ellipse	
A.4 Makro zur Vorlochberechnung für unrunde Aushalsungen durch Abwicklung	

Formelzeichen und Symbole

a	[mm]	große Ellipsenachse
a_{\min}	[mm]	Größe der Ellipsenachse a beim max. Aufweitverhältnis
a'	[mm]	anteilige Vorlochbreite für rechteckige Kragen
a_x	[mm]	Kathete zur Winkelberechnung
a_0	[mm]	Vorlochbreite
a_1	[mm]	Breite des Kragens
A_g	[%]	Gleichmaßdehnung
A_{g0}	[%]	Bruchdehnung
AV_{\square}	[-]	Aufweitverhältnis für rechteckige Kragen
AV_O	[-]	Aufweitverhältnis für runde Kragen
AV_{RAH}	[-]	Aufweitverhältnis für runde Rohraushalsungen
$AV_{RAH \max}$	[-]	Max. Aufweitverhältnis für runde Rohraushalsungen
b	[mm]	kleine Ellipsenachse
b_A	[mm]	Innere Aushalsungslänge unrunder Rohraushalsungen
c_x	[mm]	Abstand des Matrizenradiusmittelpunktes von der Rohrmitte
c_m	[-]	Anstieg der Geradengleichung zur Aushalsungshöhenberechnung
c_n	[-]	Konstante der Geradengleichung zur Aushalsungshöhenberechnung
C_1 bis C_4	[-]	Konstanten zur Berechnung der Aushalsungshöhe bzw. Vorlochachsen
d_A	[mm]	Aushalsungsinnendurchmesser
d_a	[mm]	Kragenaußendurchmesser
d_M	[mm]	Matrizendurchmesser
d_R	[mm]	Rohrinnendurchmesser
d_{Ra}	[mm]	Rohraußendurchmesser
d_{St}	[mm]	Stempeldurchmesser
d_0	[mm]	Vorlochdurchmesser
$d_{0 \min}$	[mm]	minimaler Vorlochdurchmesser
d_1, d_i	[mm]	Krageninnendurchmesser
$d_{i \max}$	[mm]	maximal erreichbarer Krageninnendurchmesser
F	[N]	Umformkraft
F_A	[N]	Axialkraft
F_G	[N]	Gegenhalterkraft
H	[mm]	Aushalsungshöhe
$H(a)$	[mm]	Aushalsungshöhe in Richtung der Vorlochachse a

$H(b)$	[mm]	Aushalsungshöhe in Richtung der Vorlochachse b
$H(a)_{\max}$	[mm]	maximale Aushalsungshöhe in Richtung der Vorlochachse a
H_p	[mm]	im Experiment gemessene Aushalsungshöhe
H_{th}	[mm]	mit den geometrischen Ausgangsgrößen berechnete Aushalsungshöhe
h	[mm]	Kragenhöhe
h_{\max}	[mm]	maximale Kragenhöhe
k	[-]	Aufweitungskoeffizient für aufgeweitete Ellipse
k_f	[MPa]	Fließspannung
$k_{f(\varphi=0)}$	[MPa]	Fließgrenze
l	[mm]	Länge der mittleren Faser der Aushalsungswand
l_a	[mm]	Teillänge der mittleren Faser in der Aushalsungswand
l_A	[mm]	Innere Aushalsungsbreite unrunder Rohraushaltungen
l_K	[mm]	Kalibrierlänge am Aushalsstempel
l_r	[mm]	Teillänge der mittleren Faser am Matrizenradius
$m_{k\ dRa}$	[-]	Anteil des Rohrdurchmessers am Anstieg zur Aufweitungskoeffizientenberechnung
$m_{k\ dA/dR}$	[-]	Anteil des Aufweitverhältnisses am Anstieg zur Berechnung des Aufweitungskoeffizienten
$m_{k\ Wst}$	[-]	Anteil des Werkstoffes am Anstieg zur Berechnung des Aufweitungskoeffizienten
n	[-]	Verfestigungsexponent
n'	[-]	differenzieller Verfestigungsexponent
n_k	[-]	Konstante zur Aufweitungskoeffizientenberechnung
$n_{k\ dRa}$	[-]	Anteil des Rohrdurchmessers an der Konstante zur Berechnung des Aufweitungskoeffizienten
$n_{k\ dA/dR}$	[-]	Anteil des Aushalsverhältnisses an der Konstante zur Berechnung des Aufweitungskoeffizienten
$n_{k\ s0}$	[-]	Anteil der Blechdicke an der Konstante zur Berechnung des Aufweitungskoeffizienten
$n_{k\ Wst}$	[-]	Anteil des Werkstoffes an der Konstante zur Berechnung des Aufweitungskoeffizienten
$n_{k\ Reib}$	[-]	Anteil der Reibung an der Konstante zur Berechnung des Aufweitungskoeffizienten
r	[-]	senkrechte Anisotropie
r_{0°	[-]	senkrechte Anisotropie in Walzrichtung
r_{45°	[-]	senkrechte Anisotropie 45° zur Walzrichtung

r_{90°	[-]	senkrechte Anisotropie quer zur Walzrichtung
r_A	[mm]	innerer Aushalungsradius
$r(a)$	[mm]	kleiner Verrundungsradius für Vorlochellipse
$r(b)$	[mm]	großer Verrundungsradius für Vorlochellipse
r_e	[mm]	Eckenradius am Kragen
r_{e0}	[mm]	Vorlocheckenradius
r_E	[mm]	kleiner Radius der Vorlochellipse
r_{KR}	[mm]	Kantenradius des Ziehrings
r_M	[mm]	Kantenradius der Matrize
r_R	[mm]	Matrizenradius (Rohrhalbmesser)
r_{Ra}	[mm]	Außenradius der Rohrhalbschale
r_{St}	[mm]	Kugelradius am Aushalsstempel
r_0	[mm]	Vorlochradius
r_1	[mm]	Radius des Kragens
r_z	[mm]	Vorlochradius in einem Zwischenstadium
R_a	[μm]	Mittenrauhwert
R_m	[MPa]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[MPa]	0,2 % - Dehngrenze
R_{St}	[mm]	Radius des Stempels
R_0	[mm]	Ausgangsradius für das Volumenelement
R_z	[μm]	Rauhtiefe
s_0	[mm]	Ausgangsblechdicke
t	[s]	Umformzeit
u_z	[mm]	Ziehspalt zwischen Stempel und Matrize
x	[mm]	Koordinatenachse für Vorlochachsenberechnung
x_a	[mm]	Messpunktastand
x_k	[mm]	Korrekturmaß zur Vorlochberechnung
w	[mm]	Aushalsweg
y	[mm]	Koordinatenachse für Vorlochachsenberechnung
α	[$^\circ$]	umlaufender Winkel zur Ellipsenberechnung
α_A	[$^\circ$]	Startwinkel zur Ellipsenberechnung
α_E	[$^\circ$]	Endwinkel zur Ellipsenberechnung
β	[$^\circ$]	Bogenwinkel der abgewickelten Aushalsungswand

γ	[°]	Positionswinkel des Matrizenradius zur Rohrmitte
ν	[°]	Umformgeschwindigkeit
φ	[-]	logarithmische Formänderung
φ_B	[-]	Bruchformänderung
φ_g	[-]	logarithmische Hauptformänderung nach Tresca
φ_{gl}	[-]	logarithmische Gleichmaßdehnung
φ_n	[-]	logarithmische Formänderung in Blechdickenrichtung
$\varphi_{n \max}$	[-]	maximale Blechdickenänderung (logarithmische Formänderung)
φ_r	[-]	radiale logarithmische Formänderung
φ_t	[-]	tangentiale logarithmische Formänderung
$\varphi_{t \max}$	[-]	maximale tangentielle Formänderung
φ_v	[-]	logarithmische Vergleichsformänderung nach von Mises
$\varphi_{v \max}$	[-]	maximale Vergleichsformänderung
μ	[-]	Reibungskoeffizient
σ_m	[MPa]	Mittlere Spannung
σ_n	[MPa]	Normalspannung
σ_r	[MPa]	Radialspannung
$\sigma_{r \max}$	[MPa]	Maximale Radialspannung
σ_t	[MPa]	Tangentialspannung
ΔH	[mm]	Höhendifferenz am Aushalsungsrand
Δr	[-]	planare (ebene) Anisotropie
Δs_0	[mm]	Ausgangsblechdickendifferenz

1 Einleitung

In zunehmenden Maße zeigt sich in der metallverarbeitenden Industrie der Trend zu kleineren Losgrößen bei steigender Teilevielfalt, erhöhten Qualitätsforderungen und kürzeren Entwicklungszeiten bis zur Serienreife, dem sogenannten Time-to-market. Die Unternehmen sind deshalb gefordert durch eine Steigerung der Flexibilität und Produktivität sowie durch den Einsatz innovativer Technologien bei gleichzeitiger Verbesserung der Produkteigenschaften Einsparungspotentiale hinsichtlich Kosten und Zeit auszuschöpfen. In der Umformtechnik geht dieser Trend u. a. mit der Entwicklung von Near-Net-Shape- und Net-Shape-Technologien einher. Diese Technologien tragen mit der Schaffung von endkonturnahen oder endkonturgleichen Bauteileigenschaften zu einer Verlagerung größerer Wertschöpfungsanteile in den umformtechnischen Teil der Prozesskette bei [1].

Für Rohrverzweigungen werden im Apparate-, Anlagen- und Metallleichtbau anstelle von gegossenen oder geschweißten T-Stücken in zunehmenden Maße Aushalsungen eingesetzt. Diese werden auch in längeren Rohren je nach Rohrwerkstoff und -wanddicke durch Kalt- oder Warmumformung angebracht. In jüngster Zeit besteht zunehmend Bedarf an Rohraushalsungen im Fahrzeugleichtbau, besonders bei Space-Frame-Konstruktionen im Karosseriebau [2] oder im Abgasbereich von Verbrennungsmotoren. Weiterhin besteht in der industriellen Praxis Bedarf an rechteckigen Aushalsungen, z. B. für Messöffnungen an Kaminrohren [3].

Hauptvorteile der Aushalsungen bestehen in strömungsgünstigen Übergängen, geringerem Gewicht und einem geringeren Verzug am Rohr durch die Schweißung am Aushalsungsrand. Angestrebt wird eine Aushalsung mit möglichst großer Aushalsungshöhe und geringen Form-, Maß- und Lageabweichungen. Entscheidenden Einfluss u. a. auf die Ebenheit des Aushalsungsrandes und auf die erreichbare Aushalsungshöhe beim Kaltaushalsen von Rohren besitzt die Vorlochgeometrie am Rohr. Von der Auslegung der Größe und Form der Vorlochgeometrie sowie von deren Herstellung bzw. Bearbeitung hängt in starkem Maße das Umformergebnis ab.

Während in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen zum Kragenziehen an ebenen Blechen, das dem Rohraushalsen verwandt ist, durchgeführt wurden, fehlt beim Aushalsen von Rohren eine ausreichende wissenschaftliche Durchdringung. Es bestehen u. a. Defizite in der Beschreibung des Spannungs- und Formänderungszustandes von Aushalsungen, in der Berechnung der Abmessungen der Vorlochgeometrie und der Umformkraft. Es ist keine analytische Berechnungsmethode für die Form einer anforde-

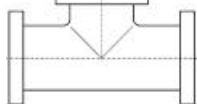
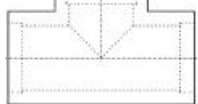
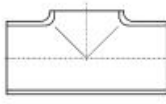
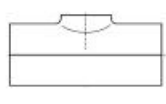
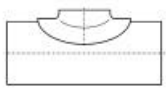
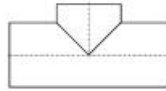
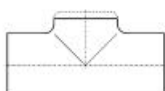
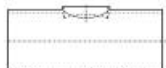
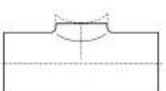
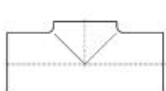
rungsgerechten Vorlochgeometrie bekannt, so dass die Auslegung der Vorlochgeometrie bisher im Trial-and-Error-Vorgehen erfolgt. Außerdem ist das Umformergebnis, mit der relativ großen Ebenheitsabweichung des Aushalsungsrandes, durch die bekannte Vorlochformgestaltung nicht weiter zu verbessern. Deshalb ist bisher in den meisten Fällen eine mechanische Nachbearbeitung am Aushalsungsrand nach dem Umformen notwendig.

Um dieses spanende Nachbearbeiten entfallen zu lassen und die Aushalsung als Net-Shape-Bauteil zu gestalten, ist die Dimensionierung der Ausgangsteile, speziell der Vorlochgeometrie und der Prozessparameter für den Umformvorgang des Aushalsens von großer Bedeutung.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist eine grundlegende Verfahrensanalyse zum Kalt-aushalsen von Rohren, in deren Ergebnis eine wissenschaftlich-technische Basis für die fertigungs- und werkstoffgerechte Prozessgestaltung für das Aushalsen entsteht. Als Verfahrensvariante wird das Aushalsen mit Aushalsstempel und Matrize als translatorisches Kaltumformverfahren untersucht. Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen zu den Verfahrensparametern und –grenzen münden in verallgemeinernden Berechnungsansätzen und Konstruktionshinweisen. Der Schwerpunkt der Arbeit besteht in der Entwicklung einer Berechnungsvorschrift für eine anforderungsgerechte Gestaltung der Vorlochform zum Aushalsen, die vor allem eine erhebliche Reduzierung der geometrischen Abweichung der Aushalsung ermöglicht.

2 Stand der Technik

Das Aushalsen von Rohren stellt ein Verfahren dar, mit dem Rohrverzweigungselemente hergestellt werden. Durch das jeweilige Herstellungsverfahren besitzen Rohrverzweigungselemente spezielle Eigenschaften. Die Auswahl eines Rohrverzweigungselementes, im Folgenden auch als T-Stück bezeichnet, richtet sich nach den jeweiligen Anforderungen an das Bauteil selbst und nach dem gewählten Fügeverfahren mit dem die Rohrverzweigung mit einem weiteren Rohr verbunden wird. Es werden T-Stücke aus Rohr, T-Stücke aus gefügten Blechhalbschalen und massive T-Stücke eingesetzt (Tabelle 2.1).

T-Stück massiv		T-Stücke aus gefügten Blechhalbschalen	
Guss-Fitting 	Vollmaterial gebohrt 	Vertikal gefügt 	Horizontal gefügt 
T-Stücke aus Rohr - mehrteilig			
Gefügter Sattelstutzen 		Geschweißtes T-Stück 	
T-Stücke aus Rohr - einteilig			
IHU-Fitting 	Flow-Drill-Anschluss 	Ausdrückung 	Aushalsung 

*) zu untersuchende Variante fett hervorgehoben

Tabelle 2.1: Arten von Rohrverzweigungen (T-Stücken)

Zum Verschrauben mit Rohrleitungen werden vornehmlich gegossene T-Stücke oder sogenannte Fittings verwendet. In der Hochdrucktechnik werden u.a. für Hydraulikleitungen massive, durch Bohren von Vollmaterial hergestellte, T-Stücke eingesetzt. Mit dem Innenhochdruckumformen (IHU) werden ebenfalls Fittings z. B. für Abgas-Krümmen oder für den Heizungsanlagenbau in sehr großen Stückzahlen [4 u. a.], teilweise mit Mehrfachwerkzeugen für bis zu zwanzig Fittings hergestellt. Beim IHU wird durch das Aufbringen eines Innendruckes und das axiale Nachschieben der Rohrenden ein Dom am Rohr angeformt, dessen Kappe nach dem Umformen abgetrennt wird.

Rohrverzweigungen an langen Rohren können mit dem Flow-Drill-Verfahren (Bild 2.1) erzeugt werden, indem mit einem Fließformwerkzeug eine Öffnung am Rohr geschaffen

und durch die fortschreitende Axialbewegung des Werkzeuges die Abzweigung geformt und deren Rand planiert wird.

Wie beim Flow-Drill-Verfahren werden Ausdrückungen an Rohren ebenfalls ohne vorangehendes Einbringen einer Ausgangsöffnung hergestellt [5]. Das Rohr wird partiell von außen über der Position eines Spitzstempels erwärmt. Der von einem Schubkeilgetriebe angetriebene Stempel durchstößt die Rohrwand und formt die Ausdrückung. Der Rand der Ausdrückung wird anschließend spanend nachbearbeitet.

Weiterhin können Rohrverzweigungen durch das Fügen eines Sattelstützens oder eines Abzweigungsrohres (geschweißtes T-Stück) auch an langen Rohrleitungen hergestellt werden. Beim geschweißten T-Stück ist vor allem das komplizierte Verschweißen mit der anspruchsvollen Kehlnahtlage [6] problematisch, die durch den Einsatz von Fittingen oder durch umgeformte Aushalsungen entfällt.

Aushalsungen können ebenfalls an langen Rohren und ggf. an bestehenden Rohrsystemen angebracht werden. Sie besitzen gegenüber den anderen Rohrverzweigungen u. a. Vorteile hinsichtlich Gewicht, Strömungsverhalten, Oberflächenqualität und Schweißnahtlage.

2.1 Aushalsen von Rohren

Das Aushalsen von Rohren wird z. B. im Rohrleitungsbau der Lebensmittel- und chemischen Industrie, der Fahrzeugindustrie sowie der Luft- und Raumfahrt angewendet.

Die umformende Herstellung von Aushalsungen an Rohren erfolgt durch Aufstellen eines Randes an einem zuvor in die Rohrwand eingebrachten Vorloch. Der Umformprozess ist mit dem des Ziehens von Kragen in ebenen Blechen vergleichbar, das in der Literatur als Bördeln, Tütenziehen, Biegen von Innenborden, Durchziehen usw. beschrieben wird. Im Folgenden wird das Aufstellen von Kragen in Blechen, wie in DIN 8584 [7] vorgegeben, als Kragenziehen bezeichnet. Das Ziehen eines Durchzuges am Rand eines vorgearbeiteten Ausschnittes in Rohren bzw. Rohrhalbschalen [5] wird als Aushalsen bezeichnet.

Eine Besonderheit beim Aushalsen von Rohren gegenüber dem Kragenziehen stellt die gewölbte Ausgangsform des Rohres dar. Um einen ebenen Aushalsungsrand nach dem Umformen zu erhalten, ist eine elliptische Vorlochgestalt erforderlich. Das Einbringen

des Vorloches in das Rohr wird u. a. durch Lochen, Fräsen oder Wasserstrahlschneiden [8] vorgenommen.

Verfahren	Anwendung	Vorloch	Randbeschneiden		Matrize		Umformtemperatur		Antrieb der Umformmaschine in der Praxis
		<i>mit</i>	<i>mit</i>	<i>ohne</i>	<i>mit</i>	<i>ohne</i>	<i>kalt</i>	<i>warm</i>	
1. Manuelles Aushalsen	Aushalsen mit Bördeleisen	X	X			X		X	manuell (Hammer)
2. Aushalsen mit rotierendem Werkzeug	T-Drill-Verfahren	X	X			X	X		Spindeltrieb (elektrisch oder manuell)
3. Aushalsen mit Kunststoffkern	Aushalsen mit Elastomeren	X		X	X		X		Hydraulische Axialzylinder
4. Aushalsen mit starrem Werkzeug	4.1 Aushalsen mit Kugeln	X		X	X	X	X	X	Keilstempel oder hydraulische Extrusion
	4.2 Aushalsen mit Aushalsstempel	X		X	X		X	X	Hydraulikzylinder, Keilschieber, Handspindelpresse

*) zu untersuchende Variante fett hervorgehoben

Tabelle 2.2: Verfahren zum Herstellen von Aushalsungen

Für die Geometrieerzeugung beim Rohraushalsen finden sich in der Literatur eine Reihe von technischen Lösungen (Tabelle 2.2), die im Folgenden näher beschrieben werden. Auf das manuelle Warmaushalsen mit Bördeleisen [9], das die älteste Methode zum Formen einer Aushalsung darstellt, wird nicht weiter eingegangen, da es in der modernen industriellen Praxis nicht mehr anzutreffen ist.

Nichtradiale Aushalsungen [10], die außermittig am Rohr angeordnet sind, schräge Aushalsungen [11] und in das Rohrrinnere geformte Rohrverzweigungen [12] werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

2.1.1 T-Drill-Verfahren

Das T-Drill-Verfahren (LARIKKA-Prinzip) [13 bis 16] ist ein partielles Umformverfahren. In einer Spezialmaschine beginnt der Verfahrensablauf mit dem Fräsen des elliptischen Vorloches (Bild 2.1) durch einen kegelförmigen Stirnfräser oder durch ein CNC-Fräsen mit Schaftfräser.



Bild 2.1: Prozessstufen des T-Drill-Verfahrens [17]

Das Aktivelement des Umformwerkzeuges stellen zwei Spreizstifte dar, die von außen in die gefräste Ausgangsöffnung [18, 19] eingebracht werden. Die Fertigung der Aushalsung erfolgt durch eine Rotationsbewegung des Spreizstiftwerkzeuges, die mit einer translatorischen Auszugsbewegung überlagert ist.

Es wird ein unebener Kragenrand in Kauf genommen, der nach erfolgter Umformung spanend nachgearbeitet wird. Dies geschieht auf Kosten der Aushalsungshöhe, so dass die Verwertbarkeit der Aushalsung verringert wird.

Im handwerklichen Bereich (Kälteanlagenbau usw.) werden Aushalsvorrichtungen (z.B. Fa. Rothenberger) eingesetzt, die nach dem gleichen Wirkprinzip arbeiten. Abweichend zu den T-Drill-Maschinen wird nur ein Formwerkzeug (Stift) eingesetzt, der mit einer Handspindel angetrieben wird und die Aushalsung formt.

2.1.2 Aushalsen mit Elastomerkern

Das Umformen mit Elastomeren, auch als Gummipressen oder Flexforming bezeichnet, wird in der Rohrumformung zum Aufweiten [20] aber auch zum Aushalsen von Rohren eingesetzt. Zum Aushalsen mit Elastomer wird ein Innendruck im Rohr durch einen Elastomerkern aufgebracht. Als Ausgangsteil wird ein Rohr mit Vorloch eingesetzt. Dieses Ausgangsteil wird in einem längsgeteilten Formwerkzeug gespannt, dessen Gravur als Matrize ausgebildet ist. In das Ausgangsrohr wird seitlich der zylindrische Elastomerkern, der aus Kautschuk oder Polyurethan (PUR) besteht, eingeschoben. Eine Presse bringt auf das Formwerkzeug eine Zuhaltkraft auf, während über zwei Stempel der Elastomerkern mit Axialkräften beaufschlagt wird (Bild 2.2).

Dieser weicht an der Matrizenöffnung im Formwerkzeug aus und formt dabei am darunterliegenden Vorloch die Aushalsung aus. Ein radialer Gegenstempel in der Matrizenöff-

nung wirkt auf den ausquellenden Elastomer. Dadurch werden das Umformergebnis und das Zurückweichen des Elastomers in seine ursprüngliche Form nach dem Zurückziehen der Axialstempel verbessert. Das Verfahren besitzt den Vorteil, dass ein Kalibrieren der Aushalsung in der Gravur möglich ist. Durch den flexiblen Elastomerkern wird erreicht, dass sowohl die Rohr- als auch die Aushalsungswand an die Gravur angelegt und dadurch die Zylinderformabweichung signifikant verbessert wird.

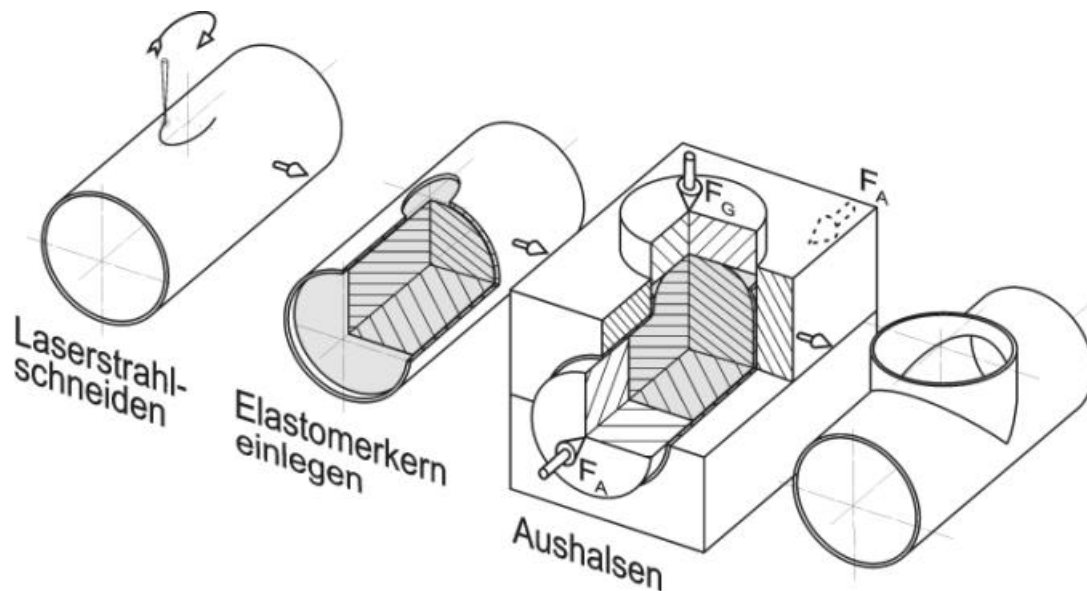


Bild 2.2: Fertigungsfolge beim Aushalsen mit Elastomerkern

Das Verfahren wird vornehmlich für das Aushalsen von sehr dünnwandigen Kaminrohren ($s_0 < 0,8$ mm) eingesetzt (Bild 2.3) und ist auch für das Aushalsen unrunder Durchzüge geeignet.

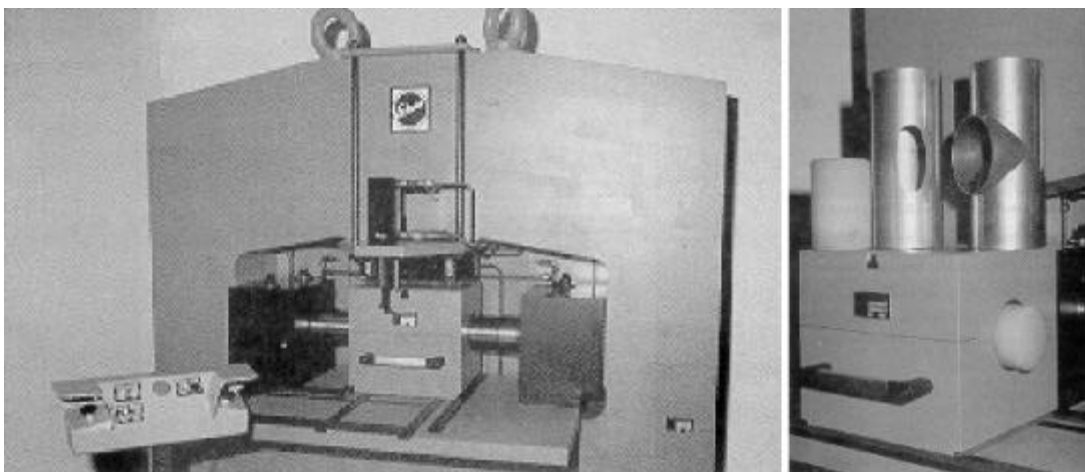


Bild 2.3: Umformmaschine für das Aushalsen mit Elastomerkern [21]

Das Umformen mit Elastomerkern kann auch für das Lochen des Vorloches zum Aushalsen eingesetzt werden. Dazu wird die außen am Rohr anliegende Matrize mit einer scharfkantigen Gravur als Schneidmatrize ausgeführt, die die Form des Vorloches besitzt. Durch das Aufbringen des Innendruckes weitet sich das Rohr im Bereich dieser Gravur auf und wird schließlich an der Schneidmatrize gelocht [22].

2.1.3 Aushalsen mit Kugeln

Beim Aushalsen mit Kugeln stellt eine Stahlkugel den Aushalsstempel dar. Das Aushalsen mit Kugeln [23] zählt zu den gut automatisierbaren Lösungen. In einer Presse wird in einer geteilten Matrize das Rohr eingespannt (Bild 2.4).

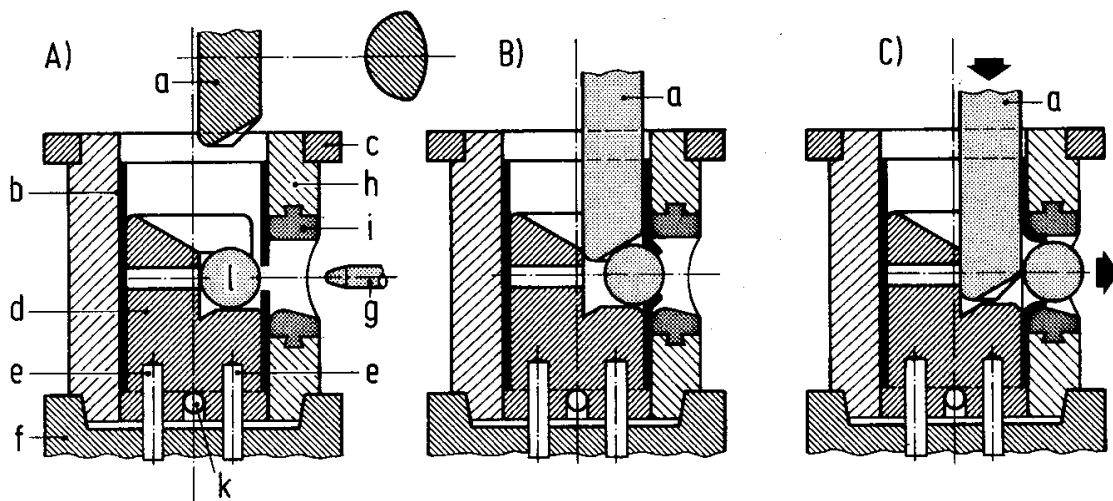


Bild 2.4: Aushalsen durch Auspressen einer Kugel [23]

Mit einem Fangstift (g) wird das Vorloch zur Aushalsmatrize (i) ausgerichtet. Die Aushalskugel wird im Rohr am Vorloch positioniert. Anschließend presst ein Keilstempel (a) die Aushalskugel (l) durch das Vorloch in der Rohrwand und durch die Aushalsmatrizenöffnung, so dass die Aushalsung geformt wird. Diese Verfahrensvariante findet Einsatz bei der Herstellung von Tretlagergehäusen für Fahrräder [24].

Das Aushalsen mit Kugeln wird auch durch hydraulische Extrusion beschrieben [13]. Für eine prozesssichere Verfahrensdurchführung wird jedoch eine spezielle Vorlochform benötigt, so dass kein ebener Aushalsungsrand hergestellt werden kann und ggf. ein Beschneiden des Aushalsungsrandes erforderlich ist.

2.1.4 Aushalsen mit Aushalsstempel

2.1.4.1 Aushalsen runder Durchzüge

Ein großes Einsatzspektrum bietet das Aushalsen mit Aushalsstempel, das sowohl als Kalt- als auch als Warmumformverfahren ausgeführt wird. Ein Vorteil des Aushalsens mit Aushalsstempel besteht darin, dass Aushalsungen an sehr langen Rohren oder bestehenden Rohranlagen angebracht werden können. Beim Aushalsen wird der Aushalsstempel seitlich in das Rohr eingeschoben und unter dem zuvor eingebrachten Vorloch positioniert. Anschließend wird der Aushalsstempel durch das Vorloch herausgezogen oder gepresst, wobei die Aushalsung geformt wird.

Das Warmaushalsen mit Aushalsstempel für dickwandige Rohraushalsungen wird vor allem im Kraftwerksbau eingesetzt [25 bis 28]. Ziel ist es, die bei der Warmumformung günstigeren Umformeigenschaften des Werkstoffes für die Erzeugung größerer Aushalsungshöhen zu nutzen. Dazu zählt auch der geringere Umformkraftbedarf. Die Erwärmung der Umformzone zum Warmaushalsen erfolgt durch Gasbrenner [29 bis 31] oder Induktion [32]. Wegen einer besseren Zugänglichkeit für Induktoren oder Gasbrenner wird beim Warmaushalsen an Rohren und Blechhalbschalen u. a. das Auspressen des Aushalsstempels mit Schubkeilgetriebe [9] o. ä. eingesetzt (Bild 2.5). Bei sehr großen Rohren kann zum Auspressen ein Hydraulikzylinder mit dem Aushalsstempel direkt in das Rohr eingestellt werden. Die Herstellung von Aushalsungen mit dem Aushalsverhältnis $d_A/d_R = 1$ ist mit dem Auspressen des Aushalsstempels nicht möglich. Aus diesem Grund und weil das Auspressen zum hier betrachteten Kaltaushalsen dünnwandiger Rohre nur bedingt geeignet ist, wird diese Verfahrensvariante im Folgenden nicht weiter betrachtet.

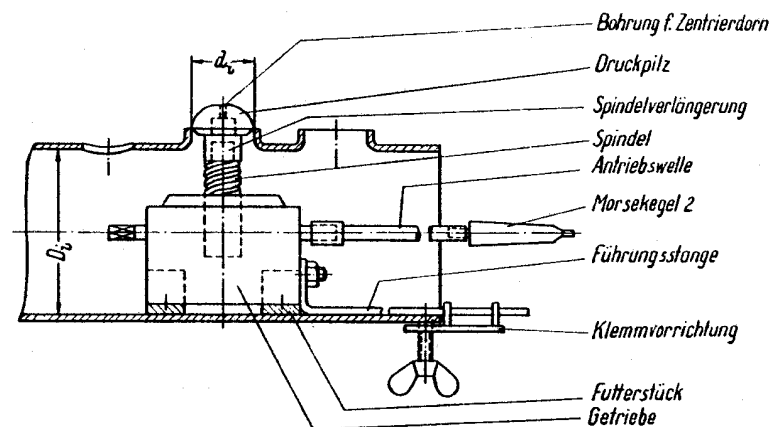


Bild 2.5: Auspressen des Aushalsstempels durch Schubkeilgetriebe [9]

Beim Herausziehen des Stempels wird für die Einleitung der Zugkraft in den Aushalsstempel dieser mit dem Zuganker entweder verschraubt oder durch geeignete Schnellspannsysteme [33] verbunden. Das Aufbringen der Umformkraft wird durch unterschiedliche technische Lösungen erreicht. Die weiteste Verbreitung findet die Krafteinleitung durch Hydraulikzylinder.

Die größte Formgenauigkeit, besonders bei dünnwandigen Rohren, wird durch den Einsatz einer über dem Vorloch positionierten Matrize erreicht [34], auf die sich der Hydraulikzylinder beim Herausziehen des Aushalsstempels abstützt. Diese Verfahrensvariante kommt auch bei den Untersuchungen dieser Arbeit zum Einsatz.

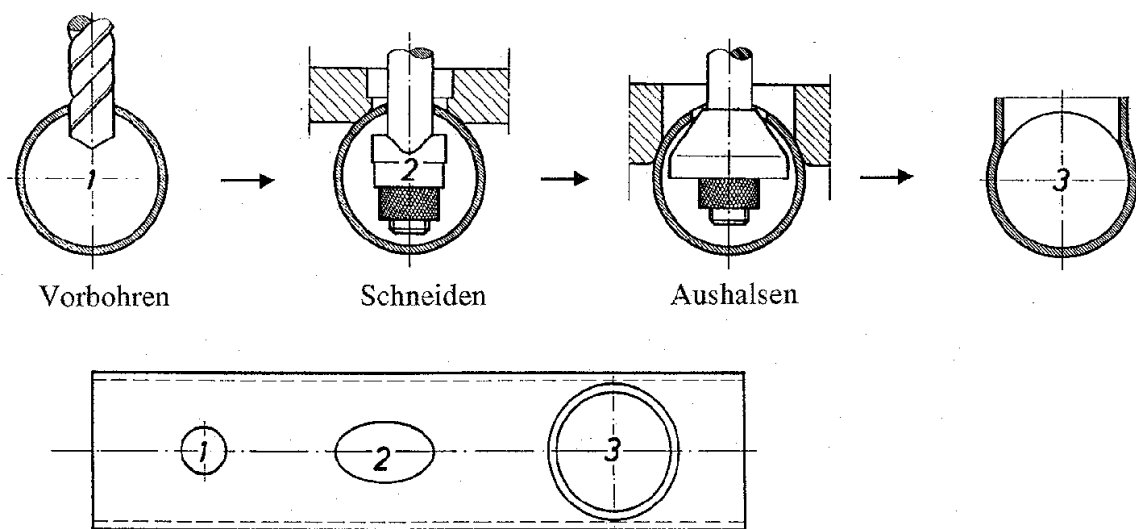


Bild 2.6: Fertigungsfolge beim Aushalsen [35]

In der industriellen Praxis findet die Vorlochherstellung durch Lochen eine breite Anwendung. Zum Ankoppeln eines Zugankers an den Lochstempel muss jedoch eine Bohrung vorhanden sein, die üblicherweise mit einem Spiralbohrer eingebracht wird. Bild 2.6 zeigt die Fertigungsfolge beim Aushalsen mit Aushalsstempel und Matrize.

Ausreichende systematische Untersuchungen zum Aushalsen an Rohren wurden bisher nicht durchgeführt. FOSTER beschreibt in [11] die Fertigung von T-Stücken durch Kaltaushalsen für die Flugzeug- und Raketentechnik. Experimentell wurde die Machbarkeit von schrägen Rohranschlussstutzen (45°) nachgewiesen.

Erste Untersuchungen zur Wanddickenänderung beim Aushalsen von Rohrhalbschalen wurden von NASS [36 bis 38] für größere Rohrwanddicken durchgeführt. Außerdem wurde bei diesen Untersuchungen die Machbarkeit von Aushalsungen mit gleichem Aus-

halsungsinwenddurchmesser wie der Rohrinwenddurchmesser ($d_A/d_R = 1$) mit dem Ziel überprüft, das Einreißen des Aushalsungsrandes zu vermeiden.

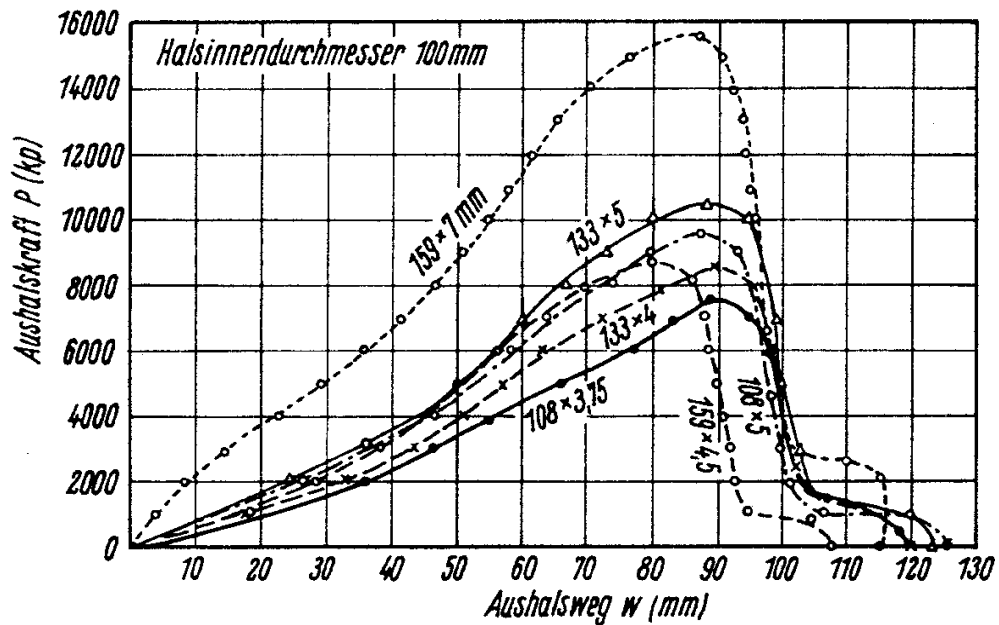


Bild 2.7: Kraft-Weg-Verlauf beim Rohraushalsen unterschiedlicher Rohrabmessungen, Rohrwerkstoff St35.29 [36]

Weiterhin wurde die Beeinflussung des Aushalskraft-Aushalsweg-Verlaufes durch die Rohrabmessung (Bild 2.7) und den Aushalsungsdurchmesser (Bild 2.8) beschrieben.

Vorschriften zur Berechnung der Umformkraft werden nicht angegeben.

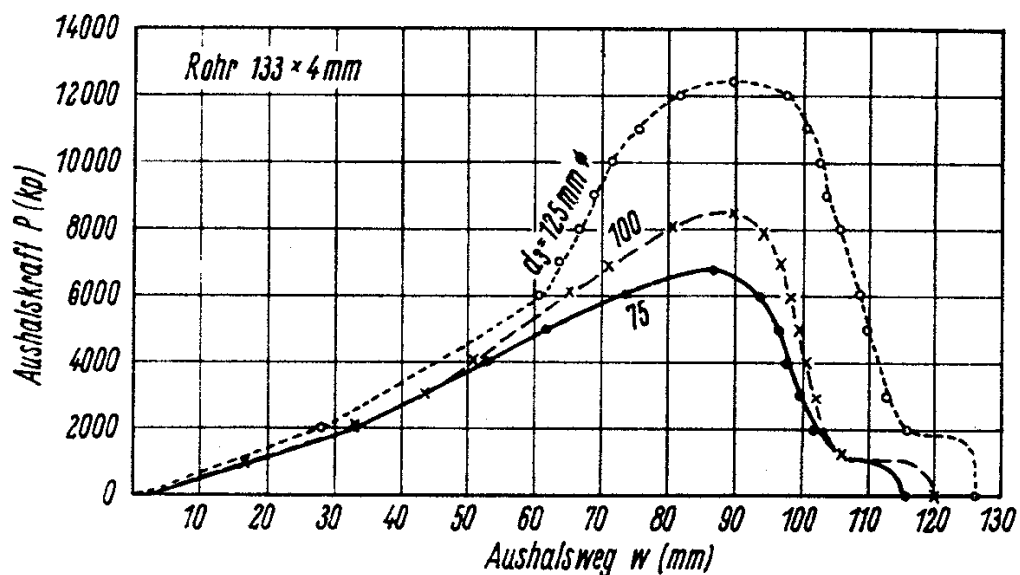


Bild 2.8: Kraft-Weg-Verlauf für unterschiedliche Aushalsungsdurchmesser, Rohrwerkstoff St35.29 [36]

In den Untersuchungen von NASS [36] wird das elliptische Vorloch mit einer Korbbo- genkonstruktion beschrieben. Die Vorlochachsen werden aus den geometrischen Aus- gangsrößen ohne Berücksichtigung der Matrizenradien und der Rohrwandstärke ermit- telt (Bild 2.9).

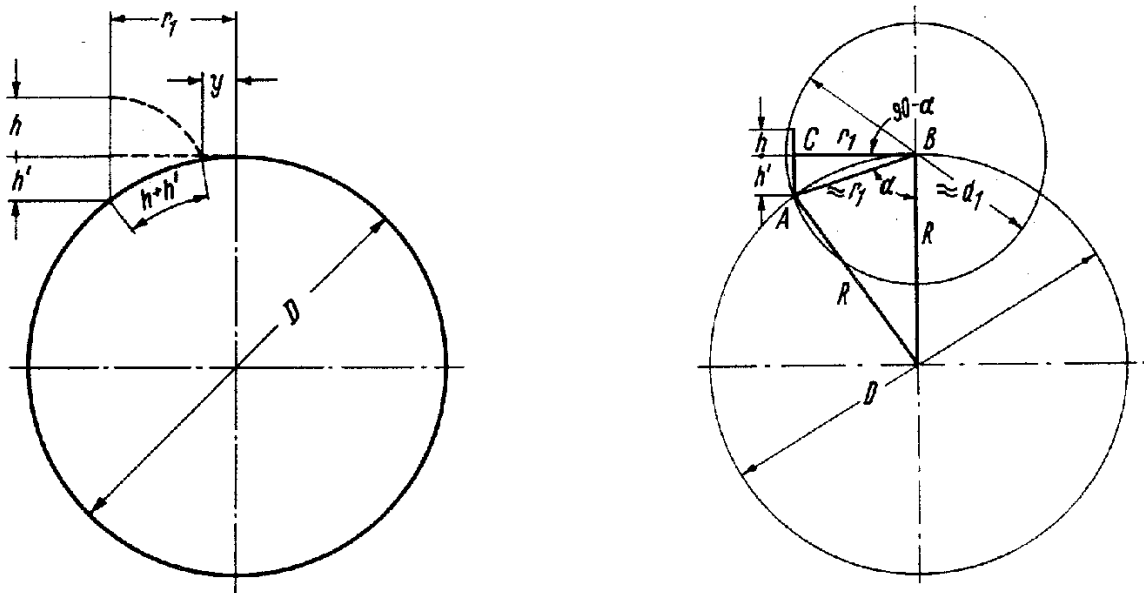


Bild 2.9: Ermitteln der Vorlochachsen aus den geometrischen Ausgangsrößen [36]

Zusätzlich wird zur Berechnung der Vorlochhalbachsen (hier x und y) ein Nomogramm für die Bestimmung der bezogenen Ellipsenachsen x/r_1 und y/r_1 notwendig (Bild 2.10).

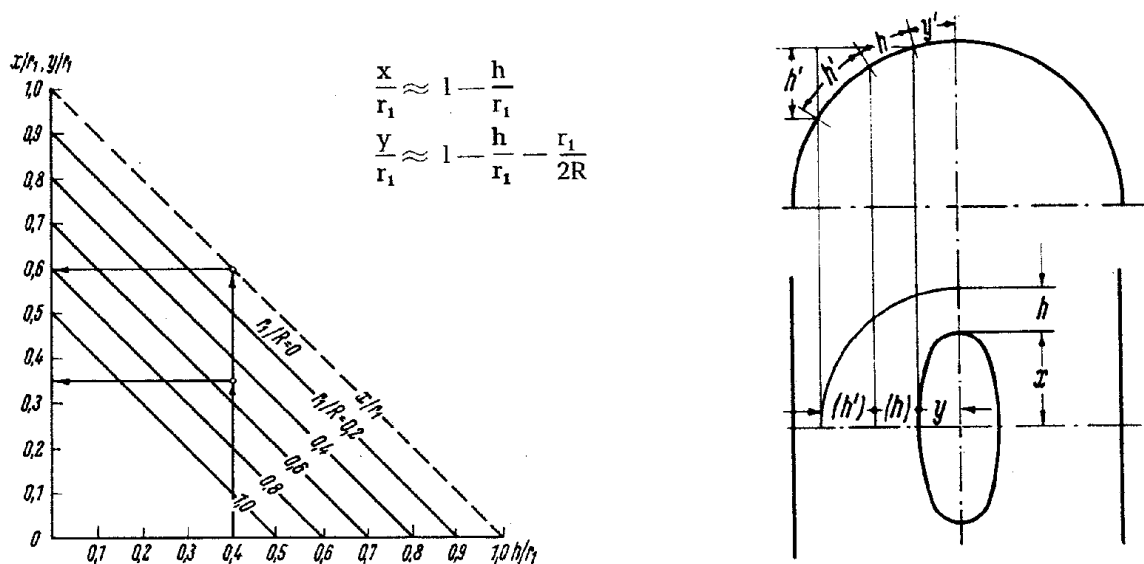


Bild 2.10: Konstruktionsvorschrift für die Korbbogenellipse [36]

Die auf diese Weise ermittelte Vorlochform entspricht einer angenäherten Ellipse, die aus vier Radien zusammengesetzt ist (Korbbogenkonstruktion). In den von NASS [36] geschilderten Untersuchungen wird die so konstruierte Vorlochgeometrie als Schablone ausgeschnitten und zum Anreißern auf der Rohroberfläche abgewickelt.

Eine weitere Konstruktionsvorschrift für eine Vorlochschablone, jedoch zum Warmaushalen, wird von EHRENBURG [9] angegeben. Es werden empirische Berechnungsvorschriften für die Bestimmung der Ellipsenachsen angegeben:

$$a = d_a - 1,4s_1 - 1,1H + (-0,854 s_1 d_a / D_a + 7) \tag{2.1}$$

$$b = 2 \left(\frac{\pi b}{360} (D_a - s_1) + (1 - 2a)(1 - a) \left(90 - \frac{b}{180} \right) \operatorname{ptg} \left(90 + \frac{b}{2} \right) \right) \left(H + s_1 / 2 + (D_a - s_1 / 2) (1 - \cos b) \right) \tag{2.2}$$

mit $\sin b = (d_a - 0,85 s_1) / (D_a - s_1)$. (2.3)

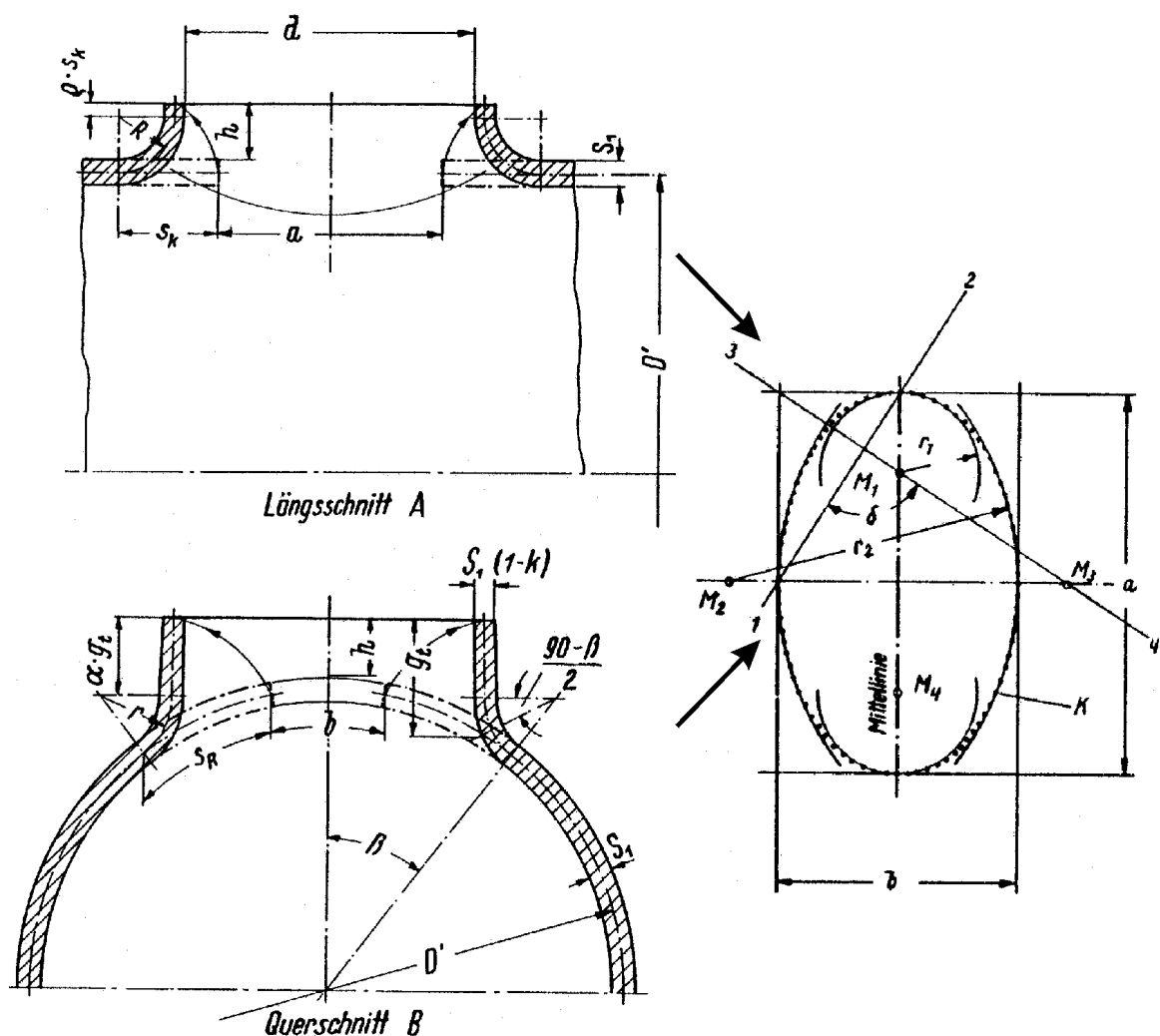


Bild 2.11: Korbbogenkonstruktion nach EHRENBURG [9]

Die Vorlochform wird mit einer Konstruktionsvorschrift für eine Korbbogenellipse α ermittelt (Bild 2.11). Die Korbbogenellipse besteht aus vier Radien, wobei jeweils die Radien gleicher Größe gegenüberliegen.

Die Größe der Radien ist von den jeweils vorzugebenden Ellipsenachsen abhängig. Sie resultieren aus einer Konstruktionsvorschrift, bei der die Endpunkte der Vorlochachsen durch eine Linie verbunden werden. Senkrecht darauf stehend geht eine zweite Linie durch den Schnittpunkt eines durch die Vorlochachsen gebildeten Rechteckes. An den jeweiligen Achsendurchgängen dieser zweiten Linie befindet sich der Mittelpunkt der Vorlochradien, deren Radius so durch die Entfernung zwischen Mittelpunkt des Kreises und Ende der Vorlochachse festgelegt ist. Durch die am Vorloch vorhandenen Unstetigkeitsstellen in den Radienübergängen wird die Größe der Zipfelbildung am Aushalsungsrand verstärkt, so dass von einer relativ großen Ebenheitsabweichung auszugehen ist und ein Beschneiden der Aushalsungskante erforderlich wird. Außerdem besteht bei dieser Vorlochbestimmung nur die Möglichkeit der konstruktiven Bestimmung. Da die Vorlochachse b im Bogenmaß vorliegt, muss die Übertragung auf das Rohr mit Hilfe einer Schablone erfolgen. Es findet dabei ein Abwickeln der Vorlochsablone auf das Rohr statt.

Diese Vorlochbestimmungsmethode wurde für die VorloCHFertigung durch Brennschneiden zum Warmaushalsen von Rohren mit größeren Wanddicken (bis 30 mm) entwickelt. Der Aushalsvorgang wird nur mit dem Aushalsstempel ohne Matrize ausgeführt. Deshalb ist der Matrizenradius auch nicht in den Berechnungsvorschriften für die Vorlochachsen a und b berücksichtigt, so dass eine große Ebenheitsabweichung erwartet wird. Für das nach dem Warmaushalsen notwendige Beschneiden und Fasen des Aushalsungsrandes werden spezielle Brennschneidvorrichtungen vorgestellt.

EHRENBERG [9] hat Untersuchungen zur Aushalsstempelform (Kegel und Halbkugel) mit Blick auf deren Einfluss auf das Abkühlungsverhalten der Aushalsung betrachtet (Bild 2.12). Aus diesen theoretischen Betrachtungen heraus wird die Empfehlung gegeben, bei geringen Rohrwanddicken die Kegelform und bei größeren Rohrwanddicken die Halbkugelform einzusetzen.

Zur Verringerung und zur besseren Verteilung der Formänderungen in der Aushalsungswand wird eine Aushalsstempelform beschrieben, die zunächst der Vorlochellipse gleicht und dann in eine zylindrische Form übergeht. Sowohl zu dieser Stempelform als auch zur

Kegel- und Halbkugelform werden nur die experimentellen Untersuchungen zum Warmaushalsen beschrieben.

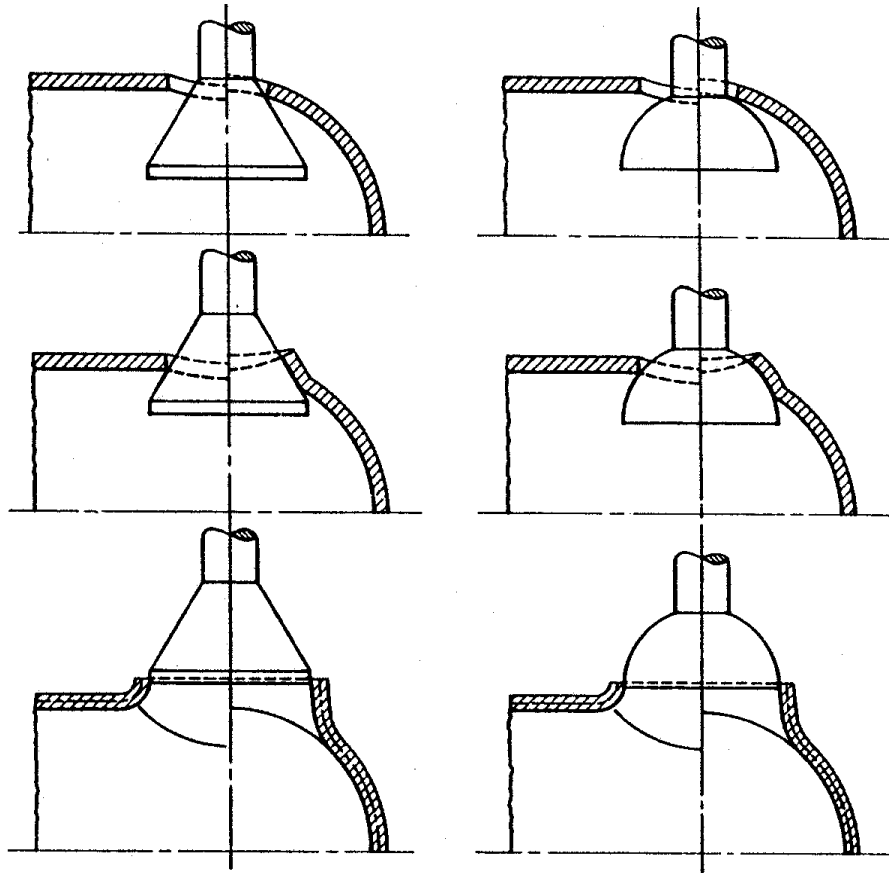


Bild 2.12: Prozessstadien beim Einsatz kegel- bzw. halbkugelförmiger Stempel [9]

Die Verfahrensvariante Warmaushalsen sowie das Nachbearbeiten des Aushalsungsrandes werden im Weiteren nicht weiter betrachtet.

2.1.4.2 Aushalsen unrunder Durchzüge

Zum Aushalsen unrunder Durchzüge an Rohren oder gewölbten Blechteilen werden in der Literatur keinerlei Aussagen getroffen. In einer umfangreichen Patentrecherche wurden neben den geschützten Verfahrensvarianten zum Aushalsen [39 bis 50] keine weiteren Erkenntnisse zum Aushalsen unrunder Durchzüge gefunden. In [3] ist lediglich eine Rohraushalsung mit rechteckigem Querschnitt an einem Kaminrohr dargestellt. Da die Höhe dieser Aushalsung der Rohrform folgt, wird kein ebener Aushalsungsrand erreicht (Bild 2.13).

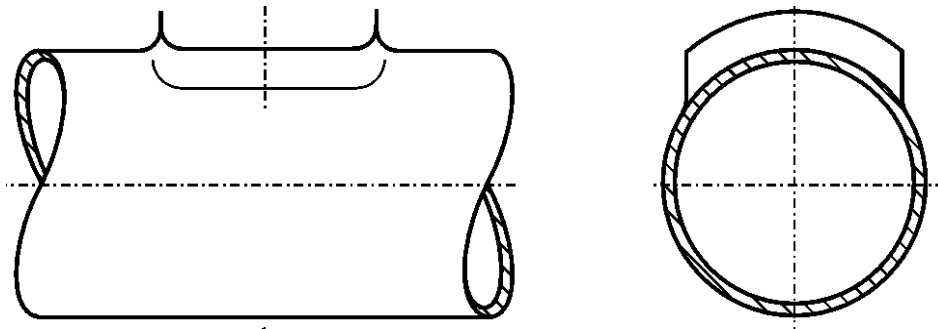


Bild 2.13: Rechteckige Aushalsung mit sattelförmigem Aushalsungsrand

Um einen ebenen Anschluss als Rohrverzweigungselement zu erzielen, ist ein zusätzlicher Profilrohrabschnitt notwendig, der angeschweißt werden muss. In der industriellen Praxis besteht aber die Anforderung rechteckige Rohraushalsungen mit ebenen Rand gerade bei derartigen Kaminrohren für eine Messöffnung einzusetzen.

Weiterer Bedarf für unrunde Aushalsungen in der Praxis werden bei Leichtbauanwendungen (Space-Frame) und Rohren für Abgasteile gesehen.

2.1.5 Fazit

Für die in dieser Arbeit durchzuführenden theoretischen und experimentellen Untersuchungen zum Aushalsen ist die als Stand der Technik recherchierte Gestaltung der Vorlochgeometrie ungeeignet und nicht hinreichend genau. Ebenfalls ist keine hinreichende Genauigkeit bei der Berechnung der Vorlochachsen gegeben, da der Einfluss des Matrizenradius, der Rohrwandstärke und die verfahrensbedingte Abweichung der Aushalsungshöhe gegenüber der theoretischen Aushalsungshöhe nicht berücksichtigt wird. Grundlegende wissenschaftlich/theoretische Betrachtungen zum Umformvorgang, den auftretenden Spannungen und Formänderungen, den Endteileigenschaften und zur Berechnung der Verfahrenskenngrößen wurden bisher nicht durchgeführt.

Es ist bekannt, dass demgegenüber umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen beim Kragenziehen in ebenen Blechen durchgeführt wurden. Da die Randbedingungen beim Umformen für dieses Verfahren mit dem Aushalsen verwandt sind, wird im Folgenden auch der Stand der Technik für das Kragenziehen ausgewertet.

2.2 Kragenziehen in ebenen Blechen

Das Kragenziehen in ebenen Blechen findet in der industriellen Praxis breite Anwendung. Beispielsweise wird das Verfahren im Automobilbau für die Herstellung von Verstärkungen an Rohbauteilen, von Aufnahmen für Achslager oder von Naben für Lamellenträger eingesetzt.

Beim Kragenziehen in ebenen Blechen treten vergleichbare Beanspruchungen wie beim Aushalsen auf. Der Unterschied liegt in den durch das Ausgangsteil Rohr bedingten quantitativ abweichenden Werten für die Blechdickenverringering, den Kraftbedarf, die erreichbare Aushalsungshöhe sowie in der erforderlichen elliptischen Vorlochgeometrie beim Aushalsen.

Auf das Aushalsen sind die beim Kragenziehen ebener Bleche gewonnenen Erkenntnisse bezüglich des Formänderungsverlaufes, der Blechdickenverringering, des Aushalsverhältnisses und des Kraftbedarfs nicht uneingeschränkt übertragbar.

Aufgrund der hohen wissenschaftlichen Durchdringung des Kragenziehens mit ggf. übertragbaren Teilergebnissen zur Werkzeuggestaltung, zur Vorlochbehandlung u.a. wird diese Auswertung des Standes der Technik einbezogen.

2.2.1 Kragenziehen runder Kragen

2.2.1.1 Umformvorgang beim Kragenziehen

Im Mittelpunkt der bekannten Forschungsaktivitäten stand vor allem das Kragenziehen runder Kragen in ebenen Blechen [37, 32, 51 bis 65 u.a.].

Zur grundsätzlichen Beschreibung der Umformung wird von einem Kragenziehvorgang mit Flachbodenstempel und Matrize (Bild 2.14) ausgegangen. Das gelochte Ausgangsteil liegt über der Matrize und wird so umgeformt, dass der Durchmesser des Vorloches bei Verringerung der Wanddicke des Kragens vergrößert wird. Die Werkstoffelemente werden im Bereich des Stempelradius einer zweifachen Biegung unterzogen. Zwischen dem Stempelradius und dem Vorlochrand wirkt ein Biegemoment, das ein Abheben des Werkstoffes von der Stirnfläche des Stempels verursacht [67]. Der Umformabschnitt zwischen Stempelradius und Matrizenradius stellt den sich ständig vergrößernden Übergang zum räumlich gekrümmten Bereich an der Matrizenrundung dar.

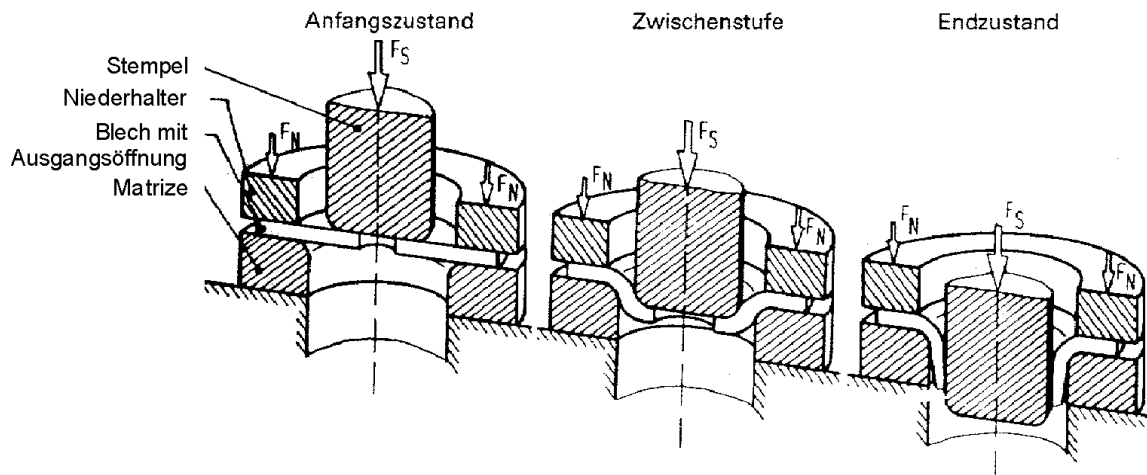


Bild 2.14: Kragenziehen in ebenem Blech [66]

Der Kragen ist ausgeformt, wenn der Stempelradius den Vorlochrand passiert hat und die Kragenwand am zylindrischen Teil des Stempels anliegt bzw. der Stempel nicht mehr im Eingriff ist. In der Praxis wird meist ein Nieder- bzw. Festhalter eingesetzt, der ein Nachfließen von Werkstoff aus der Kragenumgebung und ein Verformen dieses Bereiches durch Abheben des Materials von der Matrizenoberfläche verhindert.

2.2.1.2 Spannungen und Formänderungen beim Kragenziehen

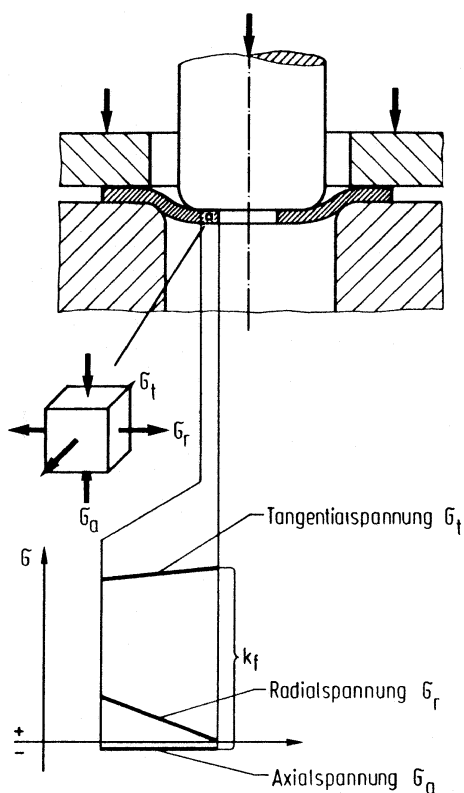


Bild 2.15: Spannungen unter der Stempelstirnfläche [68]

Das Kragenziehen gehört zu den Zugdruckumformverfahren [6]. Während des Umformvorganges kommt es innerhalb der Umformzone zu unterschiedlichen Beanspruchungen der Werkstückelemente. Unter der Stirnfläche des Stempels werden die Werkstückelemente gegenüber dem Stempel relativ verschoben (Bild 2.15), so dass durch die tangentielle Dehnung des Werkstoffes und eine gleichzeitige Verringerung der Blechdicke die Vorlochöffnung größer wird, bis schließlich der Kragen nach dem Passieren des Stempels ausgeformt ist. Die Formänderungen werden durch tangentielle und radiale Zugspannungen

gen hervorgerufen. Dabei ist die Radialspannung am Lochrand gleich null, im Bereich des Stempelradius r_{St} aber erreicht sie ihren maximalen Wert. Die Tangentialspannung weist ihre maximale Größe am Lochrand auf.

Die Normalspannung (Axialspannung) kann bei kleinen Blechdicken vernachlässigt werden. Ein Grenzwert für die Normalspannung wird aber bei dem Verhältnis $d_0/s_0 < 40$ erreicht. Dann beeinflusst die Flächenpressung im Lochbereich den Spannungszustand so, dass größere Grenzaufweitverhältnisse erreicht werden.

Die Größe der Blechdickenreduzierung am aufgeweiteten Lochrand ist aus konstruktiver Sicht von Bedeutung. Wird ein reibungsfreier zweiachsiger Spannungszustand angenommen, lässt sich die Blechdicke am Kragenrand unter der Annahme, dass die Umfangsdehnung am Vorlochrand zu gleichen Formänderungen in radialer und axialer Richtung führt ($\dot{\epsilon} = 2\dot{\epsilon}_n$), mit folgender Gleichung [69] zu jedem Zeitpunkt der Umformung berechnen:

$$s(r) = s_0 \cdot \sqrt{r_0/r}. \quad (2.4)$$

Unter der Annahme, dass die Blechdickenabnahme zum Vorloch hin linear verläuft, kann die Wanddicke am Kragenrand überschlägig berechnet werden [69]:

$$s_{min} = s_0 \cdot \sqrt{r_0/r_1}. \quad (2.5)$$

Experimentelle Untersuchungen von NASS [37, 38] und DEH [70] haben eine Abhängigkeit der Wanddickenreduktion von den Einflussfaktoren Aufweitverhältnis, Blechdicke, Reibungskoeffizient und Werkzeuggeometrie ergeben. Für größere Ausgangsblechdicken wurden von DEH [70] mit folgender Gleichung genauere Werte für die minimale Blechdicke am Kragenrand berechnet:

$$s_1 = s_0 (d_0/d_1)^{(2-c)/(1+c)}, \quad (2.6)$$

$$\text{mit } c = (r_1 - s_0)/r_1. \quad (2.7)$$

Für die Fertigungsvorbereitung zum Kragenziehen ist es wichtig, die Kragenhöhe und die Umformkraft berechnen zu können. Unter der Annahme, dass die Formänderung in radialer Richtung gleich null ist, berechnet sich die Kragenhöhe aus den geometrischen Größen für Kragen im ebenen Blech [71] nach der Gleichung

$$h = (d_1 - d_0)/2 + 0,43 \cdot r_M + 1,22 \cdot s_0. \quad (2.8)$$

Da diese Berechnungsvorschrift nicht die tatsächlichen Formänderungen am Kragenrand berücksichtigen, treten am Bauteil kleinere Kragenhöhen als berechnet auf.

SCHLAGAU hat in [69] eine weitergehende ausführliche Analyse vorliegender Berechnungsvorschriften zur Berechnung der Kragenhöhe vorgenommen und die größte Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Kragenhöhen aber mit

$$h = ((d_M - d_0)/2) + 0,4 \cdot r_{KR} + 0,2 \cdot s_0. \quad (2.9)$$

ermittelt.

2.2.1.3 Verfahrensgrenzen für das Kragenziehen

Aus konstruktiver Sicht stellt die erreichbare Kragenhöhe das Hauptkriterium für die Verfahrensgrenze beim Kragenziehen dar. Die erreichbare Kragenhöhe hängt von einer Vielzahl von Verfahrensparametern ab [72]:

$$h_{\max} = f(d_i, d_0, s_0, r_M, \mu, \text{Werkstoff, Werkzeugform, ...}). \quad (2.10)$$

Die Verfahrensgrenze ist durch das Werkstoffversagen mit einem Einreißen der Kragewand vom Vorlochrand zum Fuß des Kragens gekennzeichnet. Eine charakteristische Kenngröße für die Verfahrensgrenze ist das Grenzaufweitverhältnis:

$$K_{\max} = d_i / d_{0\min}. \quad (2.11)$$

Dabei ist d_i der Krageninnendurchmesser und $d_{0\min}$ der minimal mögliche Vorlochdurchmesser. Das Grenzaufweitverhältnis hängt in starkem Maße vom Umformvermögen des Werkstoffes, der Vorlochbeschaffenheit und dem bezogenen Vorlochdurchmesser d_0/s_0 ab [73, 74].

Nach [69] ist im Versagensgebiet des Kragens $\dot{\epsilon}_r = 0$ und damit:

$$\mathbf{s}_r = \frac{1}{2}\mathbf{s}_t. \quad (2.12)$$

Unter diesen Bedingungen entspricht die maximale Blechdickenänderung bis zum Erreichen der Einschnürung $\varphi_{n \max}$ der Gleichmaßdehnung φ_{gl} aus dem einachsigen Zugversuch:

$$\mathbf{j}_{n \max} = n = \mathbf{j}_{gl}. \quad (2.13)$$

Die maximal erreichbare tangentielle Formänderung $\varphi_{t \max}$ beträgt nach 2.12. und 2.13 somit:

$$\mathbf{j}_{t \max} = 2 \mathbf{j}_{gl}. \quad (2.14)$$

und wird beim Grenzaufweitverhältnis K_{\max} (Glg. 2.11) erreicht, so dass folgt:

$$\mathbf{j}_{t \max} = \ln(d_i / d_{0min}). \quad (2.15)$$

Mit Glg. 2.14 und 2.15 kann deshalb zusammengefasst werden:

$$\ln K_{\max} = 2 \mathbf{j}_{gl}, \quad (2.16)$$

und damit das Grenzaufweitverhältnis K_{\max} aus der Gleichmaßdehnung φ_{gl} berechnet werden:

$$K_{\max} = e^{2\varphi_{gl}}. \quad (2.17)$$

Die Rissbildung am Vorlochrand wird durch die Kerbwirkung an senkrechten Riefen der Vorlochkante begünstigt. Durch die Wahl eines alternativen Vorlochbearbeitungsverfahrens zum üblicherweise eingesetzten Lochen kann eine größere Kragenhöhe erzielt werden [23, 75, 76 u.a.] Bild 2.16 zeigt, dass mit dem Bohren der Vorlöcher größere Aufweitverhältnisse (d_i/d_0) erzielbar sind als mit dem Lochen. Größere Aufweitverhältnisse sind auch durch Verfahren erreichbar, deren Bearbeitungsspuren oder Riefen nur in Umfangsrichtung der Vorlochkante verlaufen. Dazu zählen die Verfahren Reiben, Schleifen und Fräsen.

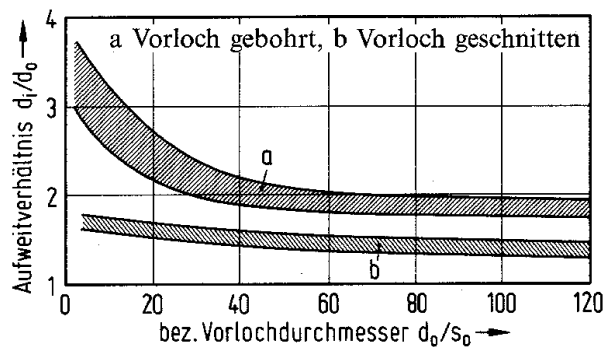


Bild 2.16: Maximales Aufweitverhältnis verschiedener Vorlochfertigungsverfahren [77]

SCHLAGAU [69] stellt aber fest, dass die Verfahrensgrenze beim Kragenziehen stärker durch die verfahrensbedingte Verfestigung der Schnittflächen, als durch die Gratbildung beim Lochen bestimmt wird. Die Beseitigung der Kaltverfestigung an der Vorlochschnittkante durch eine Glühbehandlung ermöglicht somit größere Aufweitverhältnisse.

Beim Rohraushalsen ist eine Glühbehandlung der Vorlochschnittkante, z. B. durch Induktionserwärmung oder mit Hilfe von Gasbrennern bekannt. In den folgenden Untersuchungen wird ein Glühen der Vorlochkante nicht betrachtet. Stattdessen wird bei scher-

geschnittenen Vorlöchern ein manuelles Beschleifen der Vorlochschnittkante durchgeführt.

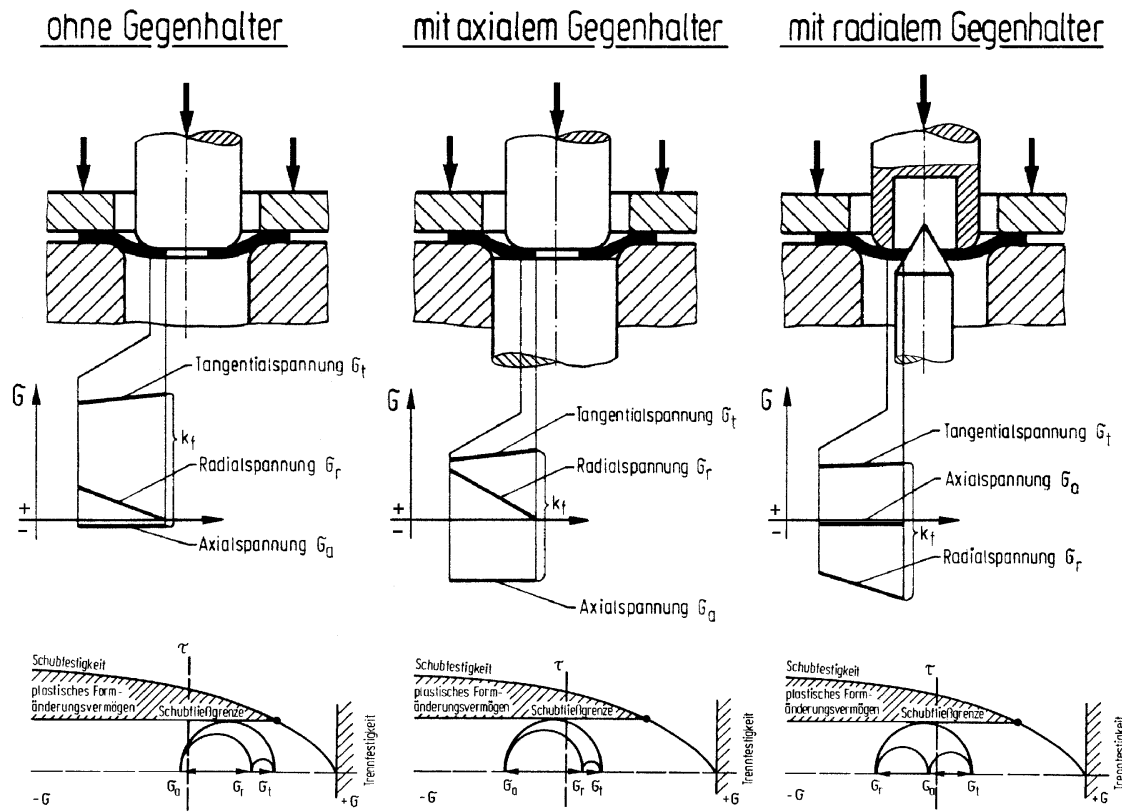


Bild 2.17: Überlagerung von Druckspannungen nach SCHLAGAU [69]

Eine Vergrößerung der Kragenhöhe ist in gewissen Grenzen auch durch stempelseitige Gratlage oder durch Veränderung der Werkzeugform, der Verfahrensdurchführung oder des Spannungszustandes (Bild 2.17), möglich [78 bis 82].

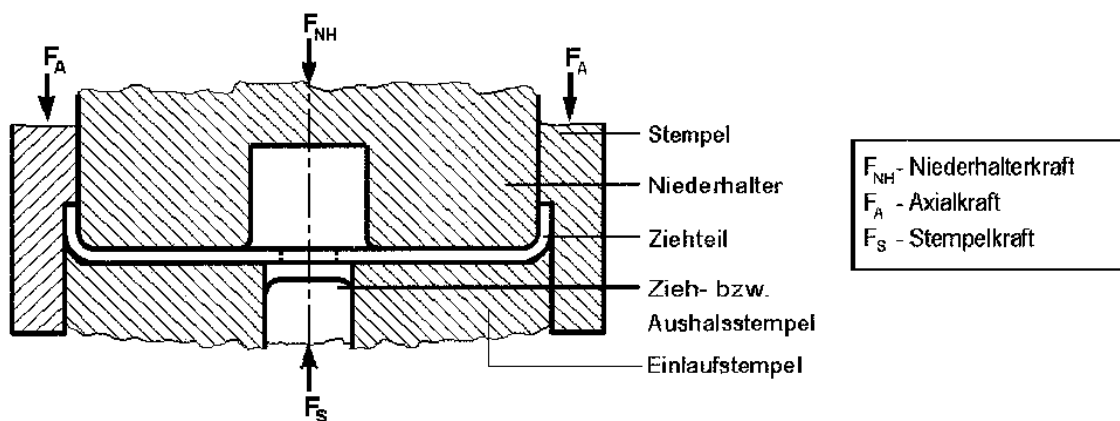


Bild 2.18: Druckspannungsüberlagerung beim Kragenziehen durch Nachschieben von Werkstoff [83]

Eine Möglichkeit die Verfahrensgrenzen durch Einleiten radialer Druckspannungen zu erweitern besteht darin, als Ausgangsteil ein Tiefziehteil einzusetzen und am Rand der

Zarge eine Axialkraft so einzuleiten, dass ein Nachschieben von Material während des Kragenziehens erfolgt (Bild 2.18). Dadurch kann die erreichbare Kragenhöhe nahezu verdoppelt werden [83].

Beim Aushalsen von Rohren ist eine Überlagerung von Druckspannungen durch Nachschieben von Werkstoff nur bedingt möglich, da die Aushalsung nur einseitig am Rohr angeordnet ist. Eine axiale oder eine radiale Druckspannungsüberlagerung wie beim Kragenziehen, scheidet beim Rohraushalsen an der sich während der Umformung dreidimensional im Raum ändernden Vorlochform. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine Druckspannungsüberlagerung für das Rohraushalsen nicht betrachtet.

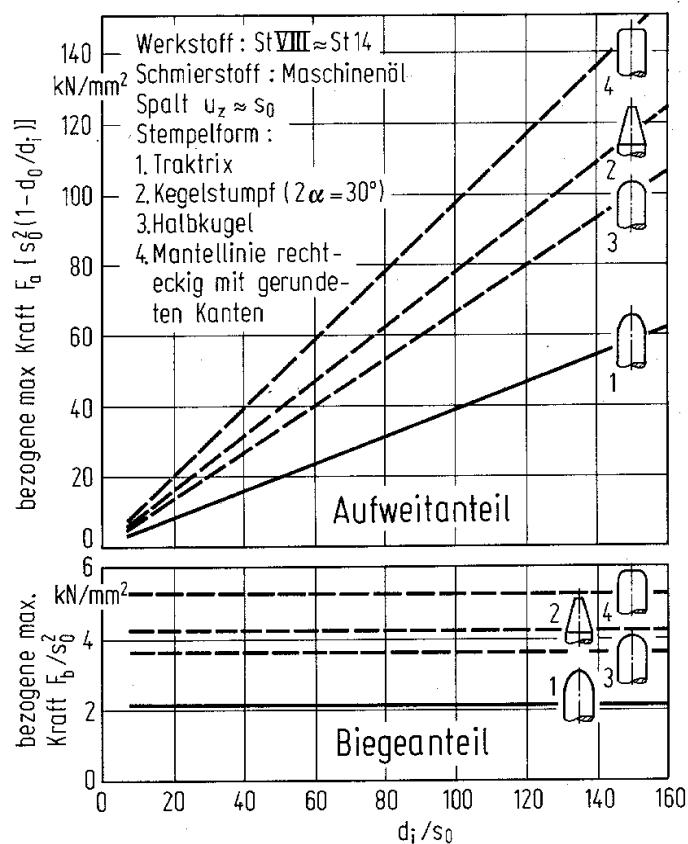


Bild 2.19: Abhängigkeit der bezogenen Kraft von der Stempelform [84]

Zur Steigerung der erreichbaren Kragenhöhe durch eine optimierte Stempelform beim Kragenziehen wurden mehrere umfangreiche Untersuchungen durchgeführt [55, 74, 85 bis 93 u. a.]. Der Einfluss der Stempelform auf das Grenzziehverhältnis wird als gering eingeschätzt [84], jedoch werden mit Flachbodenstempeln geringere Aufweitverhältnisse als mit den anderen Stempelformen erreicht (ca. -20%). Die Stempelform besitzt desweiteren erheblichen Einfluss auf die Umformkraft. Der geringste Kraftbedarf ist beim Ein-

satz von traktrixförmigen Kragenziehstempeln (Bild 2.19) sowohl im Aufweit- als auch im Biegeanteil erforderlich.

Die Stempelform besitzt desweiteren auch Einfluss auf die Form- und Lagetoleranzen des Kragens. Beim Kragenziehen mit Kegestempel entsteht eine nach außen leicht kegelige Kragenwand während nach dem Kragenziehen mit Halbkugelstempeln eine nach innen leicht kegelige Kragenwand entsteht. Die geringste Zylinderformabweichung des Kragens entsteht beim Ziehen mit traktrixförmigen Stempeln [23].

2.2.1.4 Umformkraft beim Kragenziehen

Zur Berechnung der Umformkraft werden in der Literatur verschiedene Berechnungsgleichungen angegeben. Durch experimentelle Untersuchungen ermittelte DEH [70] die Näherungsgleichung

$$F = C_3 \cdot k_f \cdot d_1 \cdot s_0, \quad (2.18)$$

wobei keinerlei Angaben zur Bestimmung der Konstante C_3 gemacht werden.

Nach POPOV [72] wird die Umformkraft beim Kragenziehen nach der Beziehung

$$F = 2\mathbf{p} \cdot r_1 \cdot s \cdot \sigma_{rmax} \cdot \sin \mathbf{a} \quad (2.19)$$

berechnet, wobei mit σ_{rmax} die berechnete maximale Radialspannung eingeht.

ROMANOWSKI [73] gibt zur Berechnung die Gleichung

$$F = 1,1\mathbf{p} \cdot R_{p0,2} \cdot s \cdot (d_1 - d_0) \quad (2.20)$$

an und berücksichtigt neben der Streckgrenze des Werkstoffs auch den Vorloch- und den Kragendurchmesser. Die verwendete Stempelform, die Größe des Ziehspaltes und der Reibungseinfluss werden in keiner dieser Berechnungsvorschriften in geschlossener Form berücksichtigt.

Für das Ziehen runder Kragen in ebenen Blechen existieren mittlerweile Untersuchungen zur Simulation des Kraft-Weg-Verlaufs [94, 95] und Programmpakete, die auf Grundlage der bekannten Berechnungsmöglichkeiten eine Kragendimensionierung und Parameterbestimmung ermöglichen [96].

Die ermittelten Berechnungsgleichungen für den Kraftbedarf beim Kragenziehen beruhen auf Untersuchungen an rotationssymmetrischen Kragen unter Einsatz rotationssym-

metrischer Stempel. Eine Übertragbarkeit auf das Aushalsen von Rohren ist durch die unterschiedliche Größe und Form der Kontaktzone zwischen Stempel und Werkstück nicht gegeben.

2.2.1.5 Endteileigenschaften gezogener Kragen

Gezogene Kragen weisen neben den funktionellen und stofflichen Eigenschaften besondere geometrische Endteileigenschaften auf. Die Idealform des Kragens ist ein senkrecht zur Blechoberfläche stehender Hohlzylinder, dessen Wanddicke der Ausgangsblechdicke des Bleches entspricht. In der Praxis weist ein gezogener Kragen gegenüber der Idealform verfahrensbedingte Form-, Maß- und Lageabweichungen auf [97].

Dazu zählen die Form- und Maßabweichungen wie Rundheit des Kragens, Randeinfall, Ebenheit des Kragenrandes, Blechdickenverringerung, Kanteneinfall usw. (Bild 2.19).

Je nach Größe des Ziehspaltes u_z wird zwischen weiten ($d_i > 5 s_0$) und engen ($d_i < 5 s_0$) Kragen unterschieden. Je enger der Ziehspalt gewählt wird, desto besser ist die Zylindrizität des Kragens.

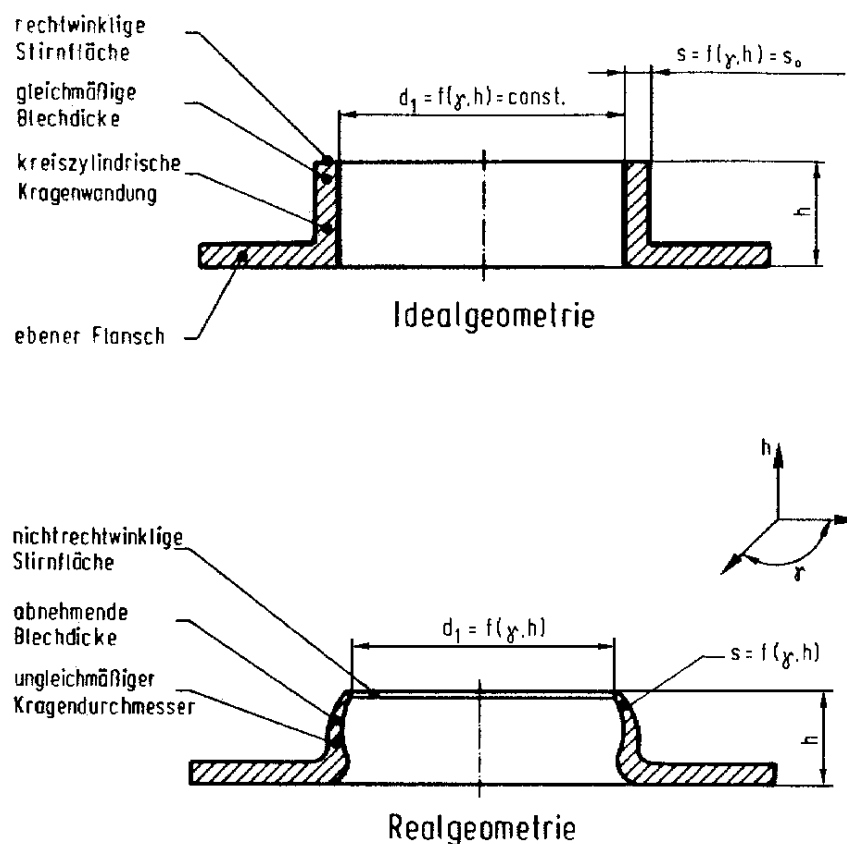


Bild 2.20: Form-, Maß- und Lageabweichungen am Kragen [69]

Wird ein Ziehspalt gewählt, der kleiner als die Blechdicke der Kragenwand ist, kann diese beim Kragenziehvorgang auch abgestreckt werden [78, 85]. Auf Kosten einer weiteren Blechdickenverringering können dadurch vor allem rückfederungsbedingte Form- und Maßabweichungen, wie z. B. die Zylindrizität positiv beeinflusst und größere Kragenhöhen erzielt werden. Das Abstrecken der Kragenwand ist auch durch einen zweiten Zug nach dem Kragenziehen möglich.

Der Kanteneinfall am Kragenrand, der in Bild 2.20 als nichtrechtwinklige Stirnfläche bezeichnet ist, tritt in Abhängigkeit von der gewählten Werkzeugform auf. Für unterschiedliche Stempelformen sind unterschiedliche Winkelstellungen des Kragenrandes zu verzeichnen (Bild 2.21), die eine versetzte Lage der Kragenstirnfläche Orthogonalebene des Kragens verdeutlicht [81, 98, 99].

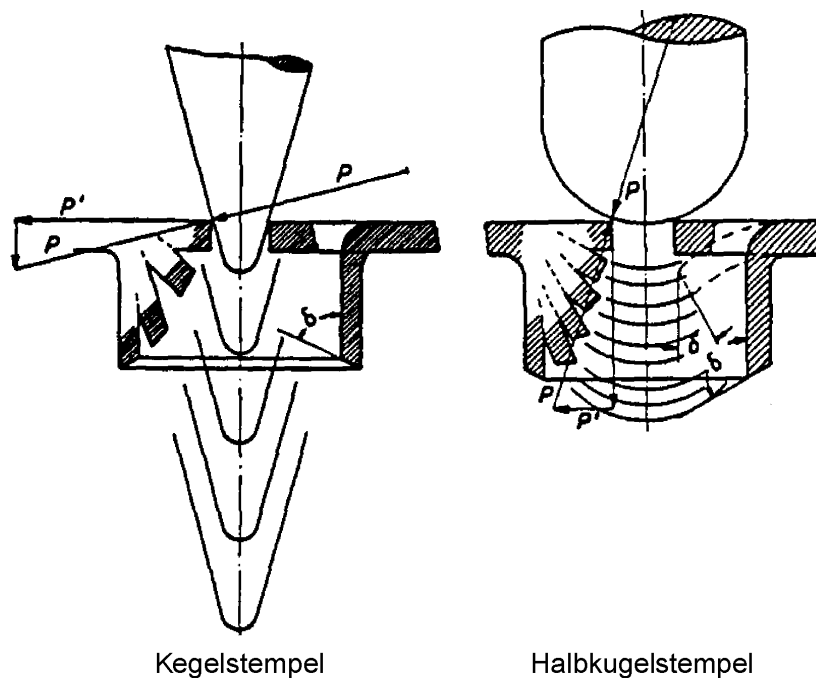


Bild 2.21: Ausrichtung des Kragenrandes in Abhängigkeit von der Stempelform [98]

Das Ziehen von Kragen ist auch ohne ein zuvor eingebrachtes Vorloch möglich, indem ein kegelförmiger Spitzstempel eingesetzt wird. Beim Eindringen in das Blech wird so eine Öffnung erzeugt, die im weiteren Fortgang der Stempelbewegung zum Kragen aufgeweitet wird [79, 86, 87, 92, 100, 101 u. a.]. Die so ausgeformten Kragen sind aber zu meist nicht rissfrei. Diese Verfahrensvariante, für Rohrverzweigungselemente als Ausdrücken bezeichnet (s. Pkt. 2), wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

2.2.2 Kragenziehen unrunder Kragen

Das Kragenziehen unrunder Durchzüge in ebenen Blechen mit verschiedenen Querschnittsformen ist in der industriellen Praxis Stand der Technik. Die jeweilige Querschnittsform wird vom entsprechenden Verwendungszweck bestimmt. Einsatzgebiete ergeben sich als Versteifungs- und Konstruktionselemente im Fahrzeugbau oder als An-schlusselemente an Rohren und Hohlprofilen für Trägerbaugruppen oder in medienführenden Anlagen (z. B. Flansche).

Die Erkenntnisse zum Kragenziehen kreisrunder Durchzüge in ebenen Blechen die eine Berechnung der Größen Kragenhöhe, Vorlochdurchmesser, Umformkraft usw. ermöglichen sind aufgrund veränderter Beanspruchungsverhältnisse beim Ziehen unrunder Kragen nicht uneingeschränkt übertragbar.

Erste Untersuchungen zum Kragenziehen unrunder Kragen in ebenen Blechen wurden von REMENIK und RUDMAN [102] durchgeführt. Zur Ermittlung der maximalen Kragenhöhe rechteckiger Durchzüge wird in Abhängigkeit von den geometrischen Einflussgrößen folgende Berechnungsvorschrift angegeben:

$$h_{max} = r_e - r_{e0} + 0,43 r_M + 0,72 s_0. \quad (2.21)$$

Darin ist jedoch nicht der minimale Eckenradius der Ausgangsöffnung r_{e0min} berücksichtigt, von dessen Wert das Erreichen der maximalen Kragenhöhe abhängt. Es muss deshalb festgestellt werden, dass in Glg. 2.21 nur die geometrischen Ausgangsgrößen zur Berechnung der Kragenhöhe verwendet werden.

Das Aufweitverhältnis wird in [102] für rechteckige Kragen aus den Eckenradien der Ausgangsöffnung und des Kragens beschrieben, das im Vergleich zum Grenzaufweitverhältnis runder Durchzüge um 10 % kleiner sein soll:

$$AV_{\square} = r_{e0} / r_e = 0,9 AV_O \quad (2.22)$$

Demgegenüber stellt ULLI [58] fest, dass das Aufweitverhältnis der zusammengesetzten Eckenradien quadratischer Kragen in ebenen Blechen dem Aufweitverhältnis rotations-symmetrischer Kragen entspricht, wobei die Eckenradien kleiner als die Längen der Kragenseiten sind.

GRAF und HOFMANN [103] beschreiben das Aufweitverhältnis umgekehrt mit:

$$AV_{\square} = r_e / r_{e0} \quad (2.23)$$

Für eine Vielzahl von Werkstoffen und Verfestigungszuständen wurde experimentell das Grenzaufweitverhältnis $AV_{\square_{max}}$ ermittelt, mit dem der minimale Eckenradius der Ausgangsöffnung bestimmt werden kann:

$$r_{eomin} = r_e / AV_{\square_{max}} \quad (2.24)$$

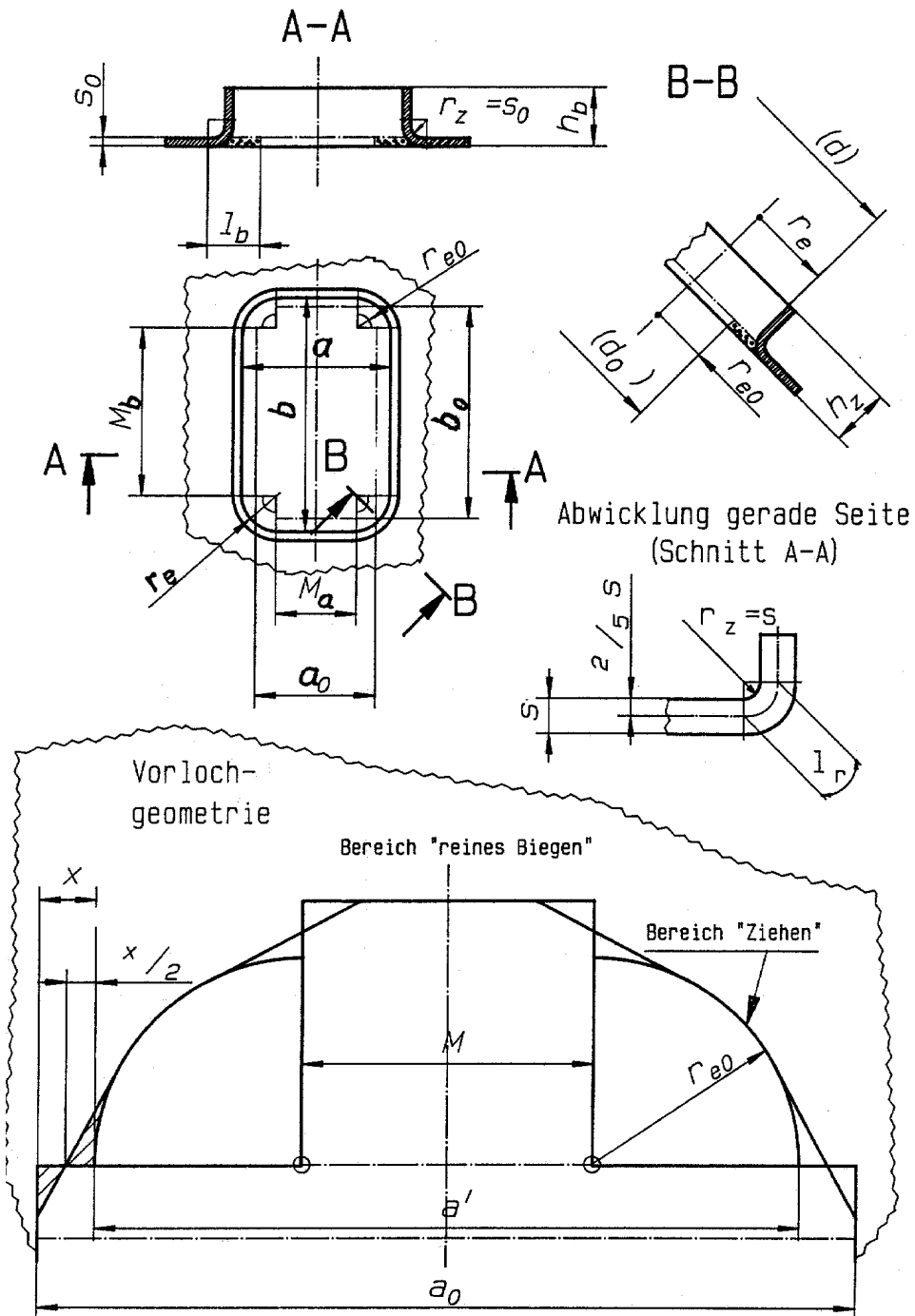


Bild 2.22: Vorlochgestaltung zum Ziehen rechteckiger Kragen [104]

Für die Bestimmung der Geometrie der Ausgangsöffnung und die Berechnung der maximalen Kragenhöhe wird die Kragwand in Bereiche mit unterschiedlich auftretenden Werkstoffbeanspruchungen unterteilt. Es wird zwischen den Eckenbereichen (Bereich "Ziehen" - z) und den geraden Seiten (Bereich "reines Biegen" - b) unterschieden. Bild 2.22 zeigt die Vorgehensweise zur Vorlochbestimmung.

Der Eckenradius des Vorloches r_{e0} wird entsprechend dem Vorlochdurchmesser beim Kragenziehen runder Kragen bestimmt:

$$r_{e0} = r_e / AV_0. \quad (2.25)$$

Die Breite der Ausgangsöffnung a_0 ergibt sich demnach aus der Gleichung:

$$a_0 = a' + 0,3 s_0 - 2r_e + 2r_{e0}. \quad (2.26)$$

Da es sich um Kragen in ebenen Blechen handelt, ist für die Berechnung von b_0 analog vorzugehen.

Der für die Tangentenkonstruktion zwischen dem Vorlocheckenradius und den geraden Kanten des Vorloches benötigte Wert für x ergibt sich bei Deckungsgleichheit der Mittelpunkte von r_e und r_{e0} zu:

$$x = 0,15 s_0. \quad (2.27)$$

Die Berechnung der maximalen Kragenhöhe orientiert sich an den Eckenbereichen, in denen der Versagensfall zu erwarten ist.

Unter der Annahme dass $r_z = u_z = s_0$ ist, wird für die Berechnung der maximalen Kragenhöhe folgende Gleichung angegeben:

$$h_{max} = 1,65 s_0 + r_e - r_{e0} \min. \quad (2.28)$$

In [105] beschreiben FISCHER und HENTSCHEL das Ziehen von Langloch- und Rechteckkragen in ebenen Blechen. Es wird festgestellt, dass für Langlochkragen größere maximale Kragenhöhen als für rechteckige Kragen realisierbar sind. Deutlich wird dies durch größere Aufweitverhältnisse für Langlochkragen, wobei das Aufweitverhältnis durch die Aushalsungsbreite a_1 und die Vorlochbreite a_0 , anstelle der Eckenradien beschrieben wird:

$$AV = a_1 / a_0. \quad (2.29)$$

Für die Kragenhöhe h gilt die Berechnungsformel

$$h = (a_1 - a_0) / 2 + z. \quad (2.30)$$

Dabei stellt z einen jeweils von der Blechdicke abhängenden Korrekturfaktor dar. Sein Wert wird bei 1 mm Blechdicke mit 2 und bei 1,25 mm mit 2,25 angegeben. Zur Gestaltung der Ausgangsöffnung für Langlochkragen ist eine prinzipielle Vorlochform dargestellt, die nicht näher beschrieben wird.

Weitergehende Hinweise zur Verfahrensgestaltung für die Herstellung rechteckiger Durchzüge in ebenen Blechen werden lediglich von ULLI [58] gemacht, der den Versagensfall für die Kragenecken beschreibt und die Notwendigkeit besonderer Maßnahmen zur Steuerung des Werkstoffflusses bei der Werkzeugkonstruktion erwähnt.

In allen ausgewerteten Forschungsarbeiten basiert die Bestimmung der Vorlochgeometrie für unrunde Krage an ebenen Blechen auf der Abwicklung der Kragewand in die Blechebene, wobei die Kragenhöhe vorgegeben ist. Die sich einstellenden unterschiedlichen Formänderungen beim Aufstellen des Krages in den geraden Bereichen und in den Eckenbereichen werden für die Vorlochbestimmung bei GRAF/HOFMANN [106] durch die Unterscheidung zwischen den Bereichen "Ziehen" (Eckenbereich) und "Biegen" (gerade Seite) berücksichtigt. Der Werkstoffeinfluss wird durch das aus Nomogrammen entnehmbare maximale Aufweitverhältnis [103] und den daraus berechenbaren kleinsten Eckenradius r_{e0min} der Ausgangsöffnung berücksichtigt.

Weitere Untersuchungen befassen sich mit nicht ganz durchgezogenen unrunder Krage [102, 107] oder Kragenansätzen [108, 109] (Lochaufweitverfahren), die hier nicht betrachtet werden sollen.

2.3 Resümee

Rohrverzweigungen werden in zunehmenden Maße mit Aushalsungen ausgeführt. Aushalsungen weisen Vorteile gegenüber gegossenen oder geschweißten Rohrverzweigungen wegen ihrer strömungsgünstigen Übergänge, dem geringeren Gewicht und einem geringeren Verzug am Rohr durch die Schweißung am Aushalsungsrand auf. Vorteilhaft ist weiterhin, dass Aushalsungen auch in langen Rohren angebracht werden können, so dass die Anzahl der Fügstellen im Rohrleitungsbau gesenkt werden kann.

Große Verbreitung findet das Aushalsen von Rohren im Apparate- und Anlagenbau für die Nahrungsmittelindustrie, die Papierverarbeitung, die chemische Industrie und im Kaminbau. In jüngster Zeit gibt es Bestrebungen Rohraushalsungen im Fahrzeugleichtbau für Space-Frame-Konstruktionen einzusetzen. Weitere neue Einsatzgebiete für Aus-

halsungen bestehen in medienführenden Anlagen, wie im Abgasbereich von Verbrennungsmotoren. In der industriellen Praxis besteht zunehmend Bedarf an rechteckigen Aushalsungen z. B. für Messöffnungen an Kaminrohren.

In der industriellen Anwendung wird eine Aushalsung mit möglichst großer Aushalsungshöhe und geringen Form-, Maß- und Lageabweichungen angestrebt. Auf dieses Umformergebnis hat u. a. die Vorlochgestaltung entscheidenden Einfluss. Von der Auslegung ihrer Größe und Form sowie von ihrer Herstellung bzw. Bearbeitung hängt in starkem Maße die erreichbare Aushalsungshöhe und die Ebenheit des Aushalsungsrandes ab.

Für das Rohraushalsen wurden in Auswertung des Standes der Technik u.a. Defizite hinsichtlich der technologischen Prozessgestaltung zu den Parametern

- Vorlochgestaltung und -berechnung
- Verfahrensgrenzen
- Werkzeuggestaltung
- Umformkraft
- Endteileigenschaften (Form-, Maß- und Lagetoleranzen, Aushalsungshöhe)

identifiziert, die erheblichen Einfluss auf eine erfolgreiche Verfahrensgestaltung besitzen. Zusätzlich wurde der Stand der Technik zum Kragenziehen ausgewertet und geprüft, inwieweit Ergebnisse auf das Aushalsen von Rohren übertragbar sind. Zum Kragenziehen in ebenen Blechen existiert ein hoher Kenntnisstand u. a. bezüglich der Berechnung der Verfahrensparameter

- Umformkraft
- Vorlochdurchmesser
- Kragenhöhe
- Blechdickenverringern.

Weiterhin liegen umfangreiche Ergebnisse zur Werkzeuggestaltung, zur Bearbeitung des Vorloches und zur Verbesserung des Umformergebnisses durch Druckspannungsüberlagerung vor. Diese Ergebnisse sind aufgrund unterschiedlicher Ausgangsteile sowie Werkzeugformen und dem daraus resultierenden unterschiedlichen Spannungs- und Formänderungszustand nicht unmittelbar auf das Rohraushalsen übertragbar.

Die Form-, Maß- und Lagetoleranzen des Endteiles beim Umformen werden von verfahrens-, werkzeug- und werkstoffbedingten Parametern beeinflusst [110]. Zu den Formtole-

ranzen zählt beim Rohraushalsen im Besonderen die Ebenheit des Aushalsungsrandes, die entscheidend von der Vorlochform und –größe beeinflusst wird. An diese Ebenheit des Aushalsungsrandes werden zunehmend erhöhte Anforderungen gestellt, die vor allem aus den Anforderungen durch neue Rohrwerkstoffe und neue Schweißverfahren für das Fügen der Aushalsung mit dem Abzweigrohr resultieren. Z. B. ist für das Laserschweißen ohne Zusatzwerkstoff eine Spaltbreite von $\leq 0,4$ mm einzuhalten, die einen entsprechend ebenen Aushalsungsrand voraussetzt. Mit den nach dem Stand der Technik bekannten Methoden zur Berechnung und Gestaltung der Vorlochform und –größe ist diese Forderung nach Verbesserung des Umformergebnisses nicht zu erreichen.

Untersuchungen zum Aushalsen rechteckiger Durchzüge an Rohren sind nicht bekannt. Hinweise zur Machbarkeit unrunder Rohraushalsungen mit ebenem Aushalsungsrand wurden nicht gefunden.

3 Zielsetzung

Da der Kenntnisstand zur fertigungstechnologischen Verfahrensvorbereitung beim Aushalsen von Rohren unzureichend ist und keine systematischen Untersuchungen zur Vorlochgeometrie insbesondere zur Berechnung der Vorlochform vorliegen, besteht die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit in der Schaffung von Berechnungsgrundlagen für die Vorlochparameter runder Aushalsungen. In diesem Zusammenhang ist eine systematische, wissenschaftliche Verfahrensanalyse durchzuführen, um eine Wissensbasis zur weiteren Optimierung der Verfahrenstechnologie zu schaffen. Für rechteckige Aushalsungen an Rohren ist die Machbarkeit nachzuweisen.

Es sind Untersuchungen zum translatorischen Kaltaushalsen von Rohren mit starrem Aushalsstempel unter besonderer Berücksichtigung der Vorlochgestaltung erforderlich, die die erhöhten Anforderungen an die Bauteilqualität und eine effektive Prozessgestaltung berücksichtigen. Im Vordergrund steht die Schaffung von Verfahrensgrundlagen, die die Herstellung der Aushalsung als sogenanntes Net-shape-Bauteil ermöglichen. Das bedeutet, dass auf eine spanende Nachbearbeitung der Aushalsungskante u. a. durch eine Verbesserung der Ebenheit verzichtet wird.

Für die Umsetzung dieser Zielstellung ergeben sich folgende Arbeitsschwerpunkte:

- Analyse des Spannungs- und Formänderungszustandes von Aushalsungen
- Untersuchung auftretender Form-, Maß- und Lagetoleranzen
- Untersuchungen zu den Verfahrensgrenzen
- Untersuchungen zu den Vorlochparametern
- Entwickeln einer Berechnungsmethode für die Vorlochgröße und die elliptische Vorlochform
- Entwickeln einer Berechnungsmöglichkeit für die Aushalsungshöhe und die Umformkraft
- Untersuchungen zur Herstellbarkeit von unrunder Rohraushalsungen.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen können nicht alle möglichen Kombinationen zwischen Aushalsungs- und Rohrabmessungen, Werkstoffen, Werkzeugformen, Vorlochbearbeitungsverfahren usw. überprüft werden. Um den Versuchsaufwand zu reduzieren, ist eine sinnvolle Auswahl der jeweils zu variierenden Versuchsparameter zu treffen.

Damit die Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse in die Praxis gewährleistet ist, sind bei den experimentellen Untersuchungen in der industriellen Praxis übliche Rohr- und Aushalungsabmessungen sowie Werkstoffe für dünnwandige Aushalungen zu berücksichtigen. Für die Versuchsanlage soll eine konventionelle, in der Praxis übliche Umformmaschine mit dazugehörigem Werkzeugsystem zum Aushalsen von Rohren mit starrem Aushalsstempel eingesetzt werden.

4 Untersuchungseinrichtungen und Versuchsparameter

4.1 Maschinen und Werkzeuge

4.1.1 Versuchsanlage zum Aushalsen

Für die experimentellen Untersuchungen kommt die mobile Ausschneid- und Aushalsanlage MAR 120/HAT 550 der Fa. Eckold GmbH & Co. KG, St. Andreasberg zum Einsatz (Bild 4.1). Diese besteht aus einem Druckerzeugungsaggregat, dem hydraulisch betätigten Arbeitszylinder und den auswechselbaren Werkzeugeinsätzen. Die Anlage wurde durch Sensoren sowie ein Messverstärkersystem zum Messen der Prozessparameter Aushalskraft und Aushalsweg ergänzt.

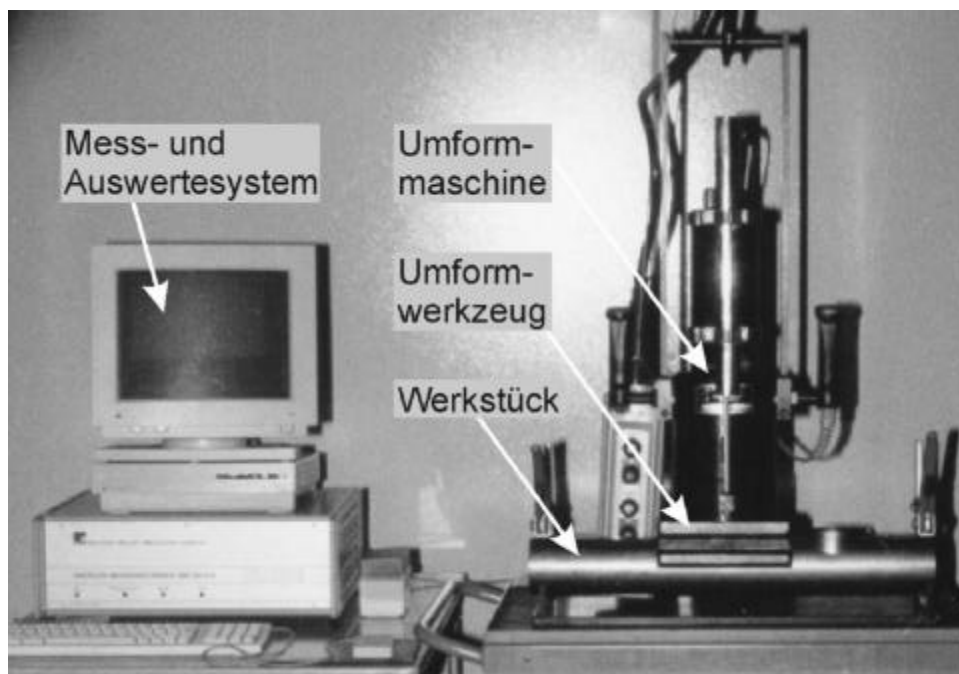


Bild 4.1: Versuchsanlage zum Rohraushalsen

Der Aushalsstempel wird über einen Zuganker mit dem Arbeitszylinder lösbar verbunden. An den Dorn wird der Arbeitszylinder, der an einer speziellen Hubvorrichtung befestigt ist, angeflanscht. Durch Auslösen der Hubbewegung des Hydraulikzylinders wird der Aushalsstempel aus dem Rohr herausgezogen und formt die Aushalsung in der Aushalsmatrize. Dabei stützt sich der Arbeitszylinder auf der Aushalsmatrize ab.

Beim Druckerzeugungsaggregat handelt es sich um eine Kolbenpumpe, die für den Arbeitszylinder einen Hydraulikdruck von bis zu 550 bar bereitstellt. Der Rückhub in die Ausgangsstellung wird durch eine Rückstellfeder ausgeführt.

4.1.2 Versuchswerkzeuge

Die Werkzeugaktivelemente zum Rohraushals bestehen aus Aushalsmatrize und Aushalsstempel (Bild 4.2). Für den Aushalsvorgang wird die Aushalsmatrize auf das Rohr aufgesetzt und durch eine Zentrierscheibe, die in Form und Größe der elliptischen Ausgangsöffnung entspricht, zum schon gefertigten Vorloch positioniert. Der Aushalsstempel wird auf einem Werkzeugschlitten seitlich in das Rohr eingebracht und durch den Zuganker mit der Matrize verschraubt. Nach dem Anflanschen des Arbeitszylinders wird durch Herausziehen des Aushalsstempels die Aushalsung gefertigt. Bei Verwendung unterschiedlicher Vorlochformen erfolgt die Positionierung der Aushalsmatrize am Rohr nicht mit einer Vorlochzentrierscheibe, sondern mit einem Zentrierstift. In einer Entfernung von 80 mm zur Vorlochmitte wird eine Zentrierbohrung in die Rohrwand gebohrt, in die der Zentrierstift eingreift.

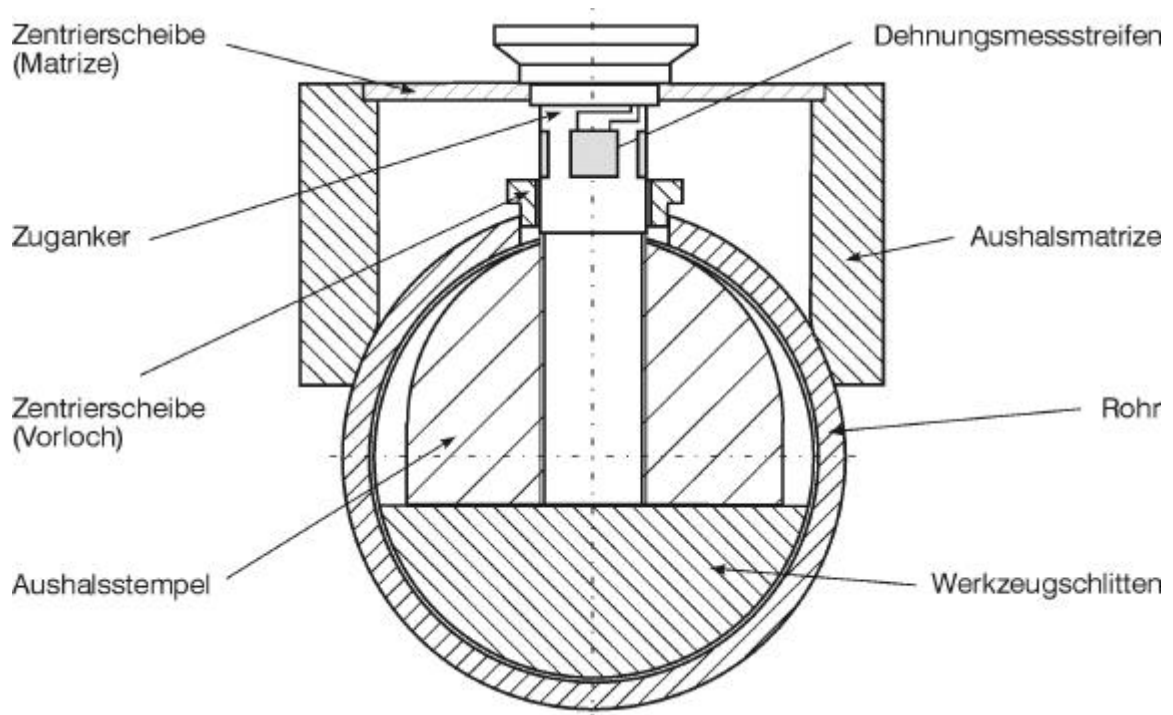


Bild 4.2: Aufbau des Rohraushalswerkzeuges

Mit der Aushalsanlage kann auch das Schneiden der Vorlöcher ausgeführt werden. Der Aushalsstempel wird durch einen Schneidstempel und die Aushalsmatrize durch eine Schneidmatrize ersetzt (Bild 4.3). Voraussetzung dafür ist, dass für das Einschrauben des Zugankers zuvor eine Öffnung in das Rohr gebohrt wurde.



Bild 4.3: Schneid- und Aushalswerkzeuge für das Rohraushalsen

Es werden kegel- und halbkugelförmige Aushalsstempel mit einer Kalibrierlänge von 10 mm eingesetzt. Einen Sonderfall stellen die Aushalsstempel für Aushalsungen dar, deren Innendurchmesser dem Rohrinne Durchmesser entspricht ($d_A/d_R = 1$).



Bild 4.4: Spreizkegelwerkzeuge für Rohraushalsungen der Abmessung $d_A/d_R = 1$

Hier kommen Spreizkegelwerkzeuge (Bild 4.4) zum Einsatz, die ein Einschieben des Aushalsstempels in das Rohr ermöglichen. Diese dreiteiligen Werkzeuge bestehen aus einem Kegeldorn und zwei, durch eine Ringfeder gehaltenen Werkzeugbacken. Diese Werkzeuge erreichen ihren Nenndurchmesser erst nach dem Anlegen der Werkzeugoberfläche an die Rohrwand.

Für das Aushalsen von Rohrhalbschalen wird ein Festhalter eingesetzt, der das Positionieren und Fixieren des Werkstückes unter der Aushalsmatrize ermöglicht. (Bild 4.5).

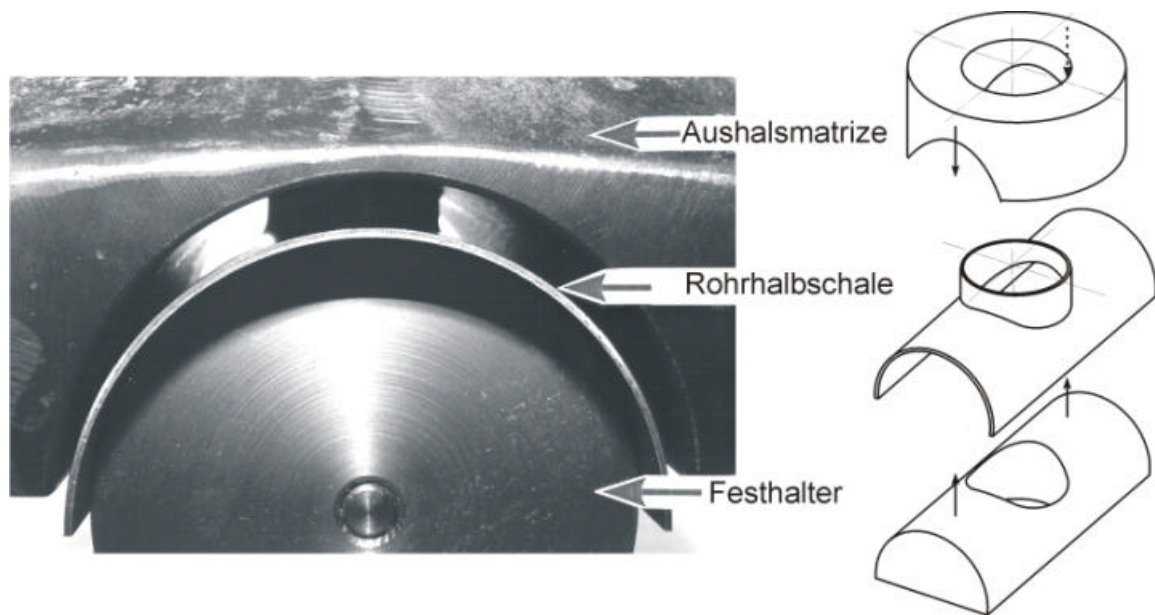


Bild 4.5: Werkzeugaufbau zum Aushalsen gewölbter Blechteile

Durch diesen Festhalter wird auch ein Nachfließen von Werkstoff in die Umformzone und eine weitergehende Deformation des Blechteiles in der Aushalsungsumgebung verhindert.

4.1.3 VorloCHFertigung

In der industriellen Praxis erfolgt die Vorlochherstellung zum Rohraushalsen u. a. mit Hilfe von Schneidwerkzeugeinsätzen. Der Einsatz dieses schnellen und kostengünstigen VorloCHFertigungsverfahrens ist nur sinnvoll, wenn keine Änderungen der Vorlochgeometrie notwendig sind. Eine Anwendung von schergeschnittenen Vorlöchern macht durch die erforderliche häufige Veränderung der Vorlochgeometrie eine dementsprechende Veränderung der Schneidwerkzeuge notwendig und würde somit sehr hohe Werkzeugkosten nach sich ziehen. Für die Versuche, bei denen die Vorlochform und -größe zu verändern sind, kommen daher gefräste Vorlöcher zum Einsatz (Bild 4.6), die in der industriellen Praxis auch vermehrt eingesetzt werden (vgl. Pkt. 2.1.1).

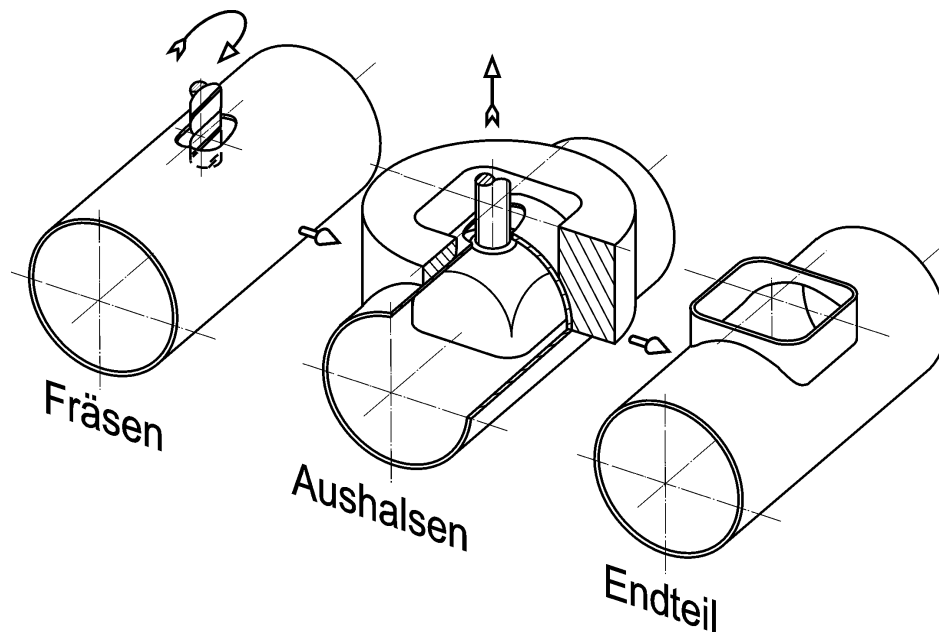


Bild 4.6: Einsatz des Vorlochfräsens beim Aushalsen von Rohren

Für die experimentellen Untersuchungen erfolgt das Fräsen der Vorlöcher auf einer CNC-Fräsmaschine MAHO MH 600 - E2 (Steuerung Philips 432). Für jede untersuchte Vorlochform wird ein speziell entwickeltes Parameterprogramm eingesetzt, das die Eingabe bzw. Änderung der Vorlochgeometriedaten direkt an der CNC-Steuerung der Fräsmaschine ermöglicht (Korbbogenellipse: Anhang A1, Elliptisches Vorloch: Anhang A2).

Als Fräser werden Schaftfräser mit 6 mm bzw. 10 mm Außendurchmesser eingesetzt. Das Fräsen der Vorlöcher in Stahlwerkstoffe erfolgt mit TiCN-beschichteten Schaftfräsern. Als Kühlschmierstoff wird eine wasserbasierte Emulsion verwendet.

Beim Fräsen der Vorlöcher in Aluminiumrohre bzw. Blechhalbschalen wird mit Hartmetallfräsern und Druckluftkühlung gearbeitet.

Die Vorlöcher wurden bei längsnahtgeschweißten Rohren gegenüberliegend der Rohrschweißnaht angeordnet.

Zum Entgraten der Vorlochkanten an der Rohraußenoberfläche und an der Rohrinnenoberfläche kommen Schleppentgratwerkzeugen der Fa. NOGA zum Einsatz. Die dadurch angebrachte Fase liegt in Abhängigkeit von der Ausgangsblechdicke und vom Werkstoff zwischen $0,3 \times 45^\circ$ und $0,7 \times 45^\circ$. Der Start- und Endpunkt des Entgratschnittes befindet sich jeweils quer zur Rohrlängsachse (in Vorlochachse b). Ein manuelles Beschleifen der Vorlochkante erfolgt nur bei den zu Vergleichszwecken untersuchten schergeschnittenen (gelochten) Vorlöchern.

Für vergleichende Untersuchungen zur Verfahrensgrenze werden auch laser- und wasserstrahlgeschnittene Vorlöcher zum Aushalsen eingesetzt. Mit einem CO₂-Laser werden die laserbrenngeschnittenen und mit einem Nd-YAG-Laser die laserschmelzgeschnittenen Vorlöcher hergestellt. Das Wasserstrahlschneiden für die Vorlochherstellung wird sowohl mit als auch ohne Abrasivmittelzusätze eingesetzt.

4.1.4 Messgrößen, Messverfahren

4.1.4.1 Messen der Prozessparameter

Für das Messen der Prozessparameter Aushalsweg und Aushalskraft war die Installation zusätzlicher Sensoren an der Versuchsanlage [111] erforderlich (Bild 4.7).



Bild 4.7: Sensoren an der Umformmaschine

Zum Messen der Aushalskraft wurden auf den Zugankern, die jeweils in Krafteinleitungsrichtung angeordnet sind und mit dem Aushalsstempel verschraubt werden, Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert. Diese Kraftaufnehmer wurden auf einer Zug-Druck-Prüfmaschine ZD 40 des VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig und einem zusätzlichen Kraftmessring C6 der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) Darmstadt (Genauigkeitsklasse 0,5) kalibriert.

Das Messen des Aushalsweges erfolgte parallel zur Bewegungsachse an der Umformmaschine. Dazu wurde ein induktiver Wegaufnehmer IWT 402 der Fa. RFT angebracht (Nennkennwert 100 mm; Genauigkeitsklasse 0,5).

Der induktive Wegaufnehmer IWT 402 und der DMS-Kraftaufnehmer wurden in Verbindung mit dem Messverstärkersystem DMC 9012 A (2 DMV 55) der Fa. HBM, Darmstadt, eingesetzt (Genauigkeitsklasse 0,05). Das Ansteuern des Messverstärkers sowie das Erfassen und Auswerten der Messungen erfolgte mit der Software BEAM 2.2 auf einem AppleMacintosh PC LCII.

4.1.4.2 Messen der geometrischen Ausgangs- und Endteileigenschaften

Die Überprüfung der Ausgangsteileigenschaften, wie Vorlochgröße (Rohrdurchmesser, Ellipsenachsen a und b, ...) erfolgt mit einem Digitalmessschieber der Fa. MITUTOYO (Genauigkeit $\pm 0,01$ mm). Zum Messen der Wanddicke am Ausgangsmaterial und an der Aushalsung wird eine Bügelmessschraube mit Kugelköpfen verwendet (Genauigkeit $\pm 0,01$ mm).

Zu den geometrischen Endteileigenschaften zählen Größen wie

- Aushalsungshöhe
- Aushalsungsdurchmesser
- Wanddickenverlauf
- Formtoleranzen der Aushalsung
 - Rundheit
 - Geradheit
 - Zylinderform
 - Ebenheit
- Maß- und Lageabweichungen.

Die Messung der geometrischen Endteileigenschaften erfolgt mit einer 3-D-Koordinatenmeßmaschine PMM 866 der Fa. LEITZ, Wetzlar (Messunsicherheit $(0,8 + L/400) \mu\text{m}$).

Zur Erfassung der Aushalsungshöhe durch Messen des Abstandes zwischen Rohrscheitel und Aushalsungsrand werden vier Messpunkte gewählt, wobei an zwei sich gegenüberliegenden Messpunkten jeweils die den Vorlochachsen zuzuordnenden Aushalsungshöhen $H(a)$ und $H(b)$ gemessen werden (vgl. Bild 4.12).

4.1.4.3 Ermitteln der Werkstoffeigenschaften

Die Werkstoffeigenschaften umfassen die stofflichen Bauteileigenschaften vor und nach der Umformung. Die Festigkeitskennwerte und die Fließkurve vor der Umformung wurden im Zugversuch nach DIN EN 10002 [111] mit einer Universalprüfmaschine der Fa. WOLPERT (Nennkraft 100 kN) aufgenommen (Genauigkeitsklasse: Wegmessung 0,5; Kraftmessung 0,2).

Zur Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften nach der Umformung wurden Härtemessungen mit einem Kleinlasthärtemessgerät der Fa. ZWICK (Genauigkeitsklasse 0,5) durchgeführt. Zum Verringern der Messfehler wurden Mehrfachmessungen (3-fach) und eine Mittelwertbildung vorgenommen. Besonders für die Härtemessungen, bei denen der subjektive Messfehler durch die Prüfkraftaufbringung bis zu 1% betragen kann, waren die Mehrfachmessungen erforderlich.

4.1.4.4 Messen der Formänderungen

Die Analyse der Formänderungen und Spannungen setzt die Festlegung von Koordinatenrichtungen für die Werkstückelemente voraus. Durch den Biegevorgang beim Aushalsen ändern die Werkstückelemente ihre Richtung. Bestehen bleibt die Normalrichtung, deren Lage immer in Blechdickenrichtung definiert ist. Am oberen Rohrscheitel bleibt die tangentielle Richtung der Werkstückelemente, die die Umfangsrichtung darstellt, ebenfalls bestehen (Bild 4.8).

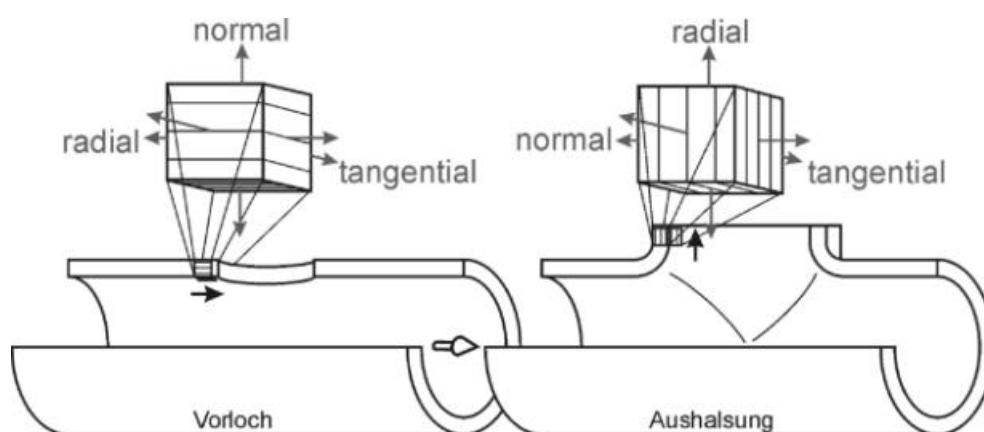


Bild 4.8: Orientierungsänderung der Werkstückelemente durch das Aushalsen am oberen Rohrscheitel (Bereich 0°)

Als radiale Richtung wird die ursprüngliche Orientierung der Werkstückelemente zur Vorlochmitte am unverformten Rohr bezeichnet. Die Definition für die radiale Richtung der Werkstoffelemente wird auch an der fertigen Aushalsung beibehalten.

Für die Orientierung der Werkstückelemente im Bereich quer zur Rohrlängsrichtung (Bereich 90°) besteht die Schwierigkeit, dass die tangentiale bzw. radiale Richtung der Werkstückelemente der Rohrwand nicht mit der tangentialen bzw. radialen Richtung der Werkstückelemente an der Aushalsung übereinstimmt. Deshalb gilt die Annahme, dass die Werkstoffelemente um das Vorloch positioniert sind und somit deren tangentiale Richtung auch tangential zum Vorloch und nicht wie anzunehmen wäre tangential zur Rohroberfläche verläuft (Bild 4.9).

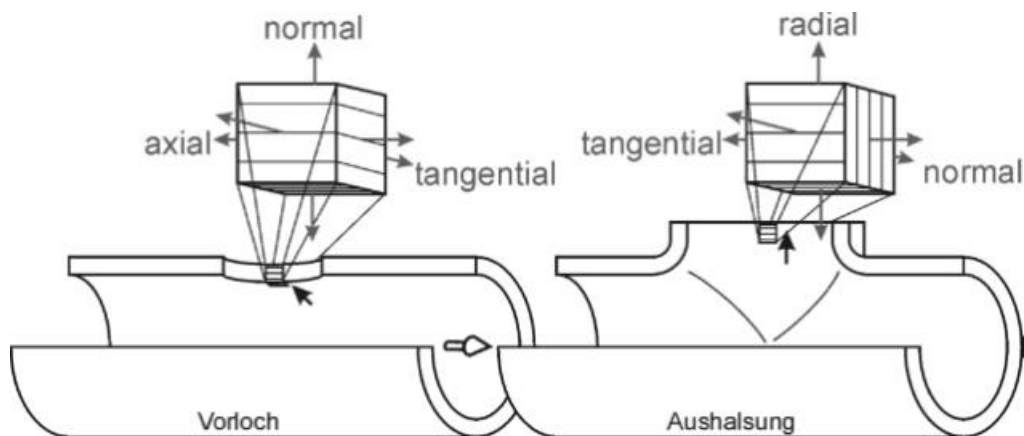


Bild 4.9: Orientierungsänderung der Werkstückelemente durch das Aushalsen im Bereich quer zur Rohrachse (Bereich 90°)

Die radiale Richtung ist demzufolge im ursprünglichen Zustand immer auf die Vorlochmitte ausgerichtet und an der Aushalsung in Richtung des Aushalsungsrandes.

Zum Messen der Formänderungen an der Aushalsung wurden experimentelle Formänderungsanalysen mit Hilfe der Messrastertechnik durchgeführt. Dazu wurden in die Rohroberfläche ineinandergreifende Kreisraster mit 2,5 mm Kreisdurchmesser elektrochemisch eingeätzt [112]. Am Rohr wurden drei Bereiche markiert, in denen das Ausmessen der Kreisraster an der Aushalsung erfolgte (Bild 4.10).

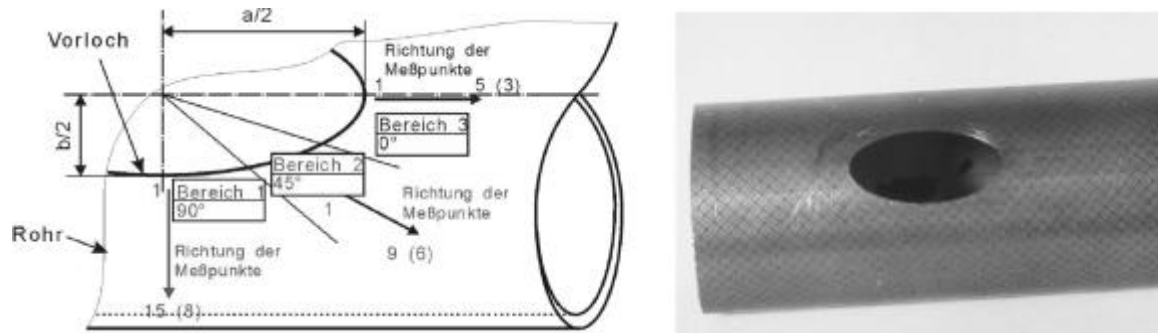


Bild 4.10: Probenvorbereitung für die Formänderungsanalyse

Die Messungen für die Formänderungsanalyse wurden im vormarkierten Bereich jeweils vom Rand zum Fuß der Aushalsung durchgeführt (Bild 4.11). Außerdem wurde auch der Formänderungsverlauf am Aushalsungsrand bestimmt.

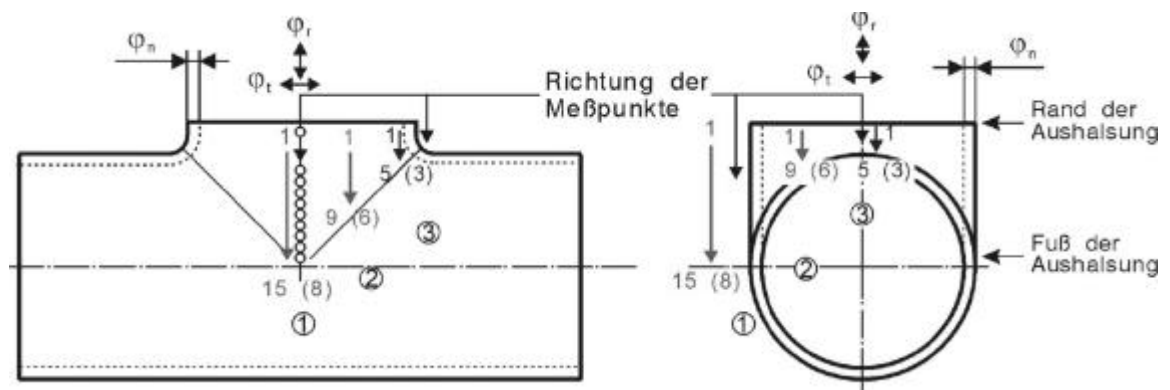


Bild 4.11: Vorgehensweise beim Ausmessen für die Formänderungsanalyse

Die Umformgrade wurden aus den gemessenen Dehnungen der Kreisraster berechnet.

$$\varphi_t = \varphi_1 = \ln l_1/l_0 \quad (4.1)$$

$$\varphi_r = \varphi_2 = \ln l_2/l_0 \quad (4.2)$$

$$\varphi_n = \varphi_3 = \ln s_1/s_0 \quad (4.3)$$

Es wird zwischen dem Umformgrad φ_t in tangentialer (Umfangs-) Richtung, φ_r in radialer Richtung und φ_n in Blechdickenrichtung unterschieden.

4.2 Versuchsparameter

4.2.1 Rohr- und Aushalungsabmessungen

Die Rohrabmessungen für die Untersuchungen wurden nach der Häufigkeit Ihrer Anwendung für Aushalsoperationen in der industriellen Praxis ausgewählt. Es handelt sich dabei, in Verbindung mit dem entsprechenden Rohrwerkstoff, um Rohre für die chemische Industrie, die Papierindustrie, die Lebensmittelindustrie und den Gerüstbau. Entscheidend für die Auswahl waren die Größen Rohraußendurchmesser, Rohrwanddicke und Aushalungsdurchmesser (Bild 4.12).

Aus den zu untersuchenden Blechen werden Rohrhalbschalen mit gleichem Außenradius hergestellt, wie die Rohre aufweisen. Ebenso wird der gleiche Aushalungsaußendurchmesser verwendet. Die Wahl der Blechdicken und Werkstoffe der Rohrhalbschalen orientiert sich an den Erfordernissen im Rohbau für PKW-Karosserien.

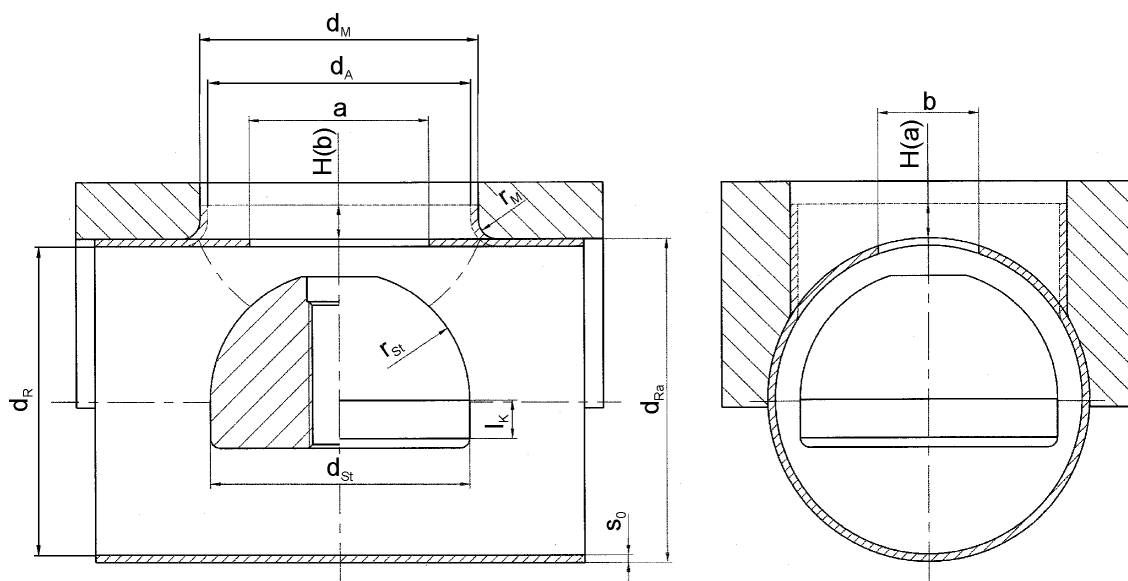


Bild 4.12: Geometrische Werkzeug- und Werkstückengrößen

Die Größe der Aushalungsdurchmesser wird durch das vorgegebene Aushalungsverhältnis d_A/d_R , dem Verhältnis zwischen Aushalungsinnendurchmesser und Rohrdurchmesser festgelegt. Dadurch können die Aushalungsbedingungen zwischen unterschiedlichen Rohrdurchmessern (Bild 4.13) bzw. Rohrschalenhalbmessern vergleichbar gemacht werden.



Bild 4.13: Rohraushalsungen $d_A/d_R = 0,8$ mit dazugehörigen Aushalsstempeln

Ergänzend zu den Untersuchungen an runden Aushalsungen wurden auch rechteckige Aushalsungen betrachtet. Die experimentellen Untersuchungen wurden mit einer quadratischen Aushalsung (Bild 4.14) und unterschiedlichen Aushalsstempelformen durchgeführt.



Bild 4.14: Quadratische Aushalsung und dazugehörige Ausgangsöffnung

In den Untersuchungen wurden nur Aushalsungen betrachtet, bei denen kein Abstrecken der Wanddicke durch die Werkzeuggestaltung vorgenommen wird (weiter Ziehspalt: $u_Z \geq s_0$). und der Aushalsungsdurchmesser mindestens das 5-fache der Wanddicke (weite Aushalsung: $d_{Aa} \geq 5s_0$) besitzt (Tabelle 4.1).

Werkstück		
Ausgangsformen	a) Rohre b) Rohrhalschalen	
Rohrwerkstoffe	X 6 CrNiMoTi 17122 X 5 CrNi 1810 St 14 St 35 ZStE 250i AlMg 4 Mn	Wst.-Nr.: 1.4571 Wst.-Nr.: 1.4301 Wst.-Nr.: 1.0338 Wst.-Nr.: 1.0308 Wst.-Nr.: 1.0349 Wst.-Nr.: 3.3545
Rohrinnendurchmesser d_R	50 mm; 52,6 mm; 66 mm; 80 mm; 81 mm; 104 mm	
Wanddicke s_0	0,8 mm; 1 mm, 1,2 mm; 1,5 mm, 1,7 mm; 1,8 mm, 2 mm;	
Vorlochherstellung	a) Lochen b) Fräsen	c) Laserstrahlschneiden d) Wasserstrahlschneiden
Vorlochform	a) Korbbogenellipse b) Ellipse c) Aufgeweitete Ellipse	
Werkzeug		
Aushalsungsform	Rund	quadratisch
Matrizendurchmesser d_M	46,5 mm; 55 mm; 72 mm; 85 mm;	72 x 72 mm
Aushalsverhältnis d_A/d_R	0,43; 0,5; 0,67; 0,85; 1	0,83
Stempeldurchmesser d_{St}	$d_{St} = d_M - 2(s_0 + 0,25)$	67,5 x 67,5 mm
Matrizenradius r_M	5 mm	
Stempelform	a) Halbkugel b) Kegel	
Kalibrierlänge l_K	10 mm	
Ziehspalt u_Z	$u_Z = s_0 + 0,25$ mm	
Oberflächenqualität	$R_a \approx 0,4$ μ m	
Umformmaschine	1-fachwirkende hydraulische Presse	
Umformbedingungen		
Werkzeuggeschwindigkeit	4 bis 7 mm/s	
Umformtemperatur	Raumtemperatur	
Schmierstoff	a) CMT Pressolube 2-20, Fa. Wintershall b) CMT Pressolube 1-88, Fa. Wintershall	

Tabelle 4.1: Versuchsplan

4.2.2 Versuchswerkstoffe

4.2.2.1 Auswahl der Versuchswerkstoffe

Die experimentellen Untersuchungen werden an längsnahtgeschweißten Stahl- und Edelstahlrohren sowie an Rohrhalbschalen durchgeführt. Für die Versuche wurden solche Werkstoffe ausgewählt, die in der Praxis häufig Anwendung für Funktionselemente mit Aushalsungen finden. Bei den Rohrwerkstoffen zählen dazu X 6 CrNiMoTi 17122, St 35, AlMg 4 Mn und bei den Blechwerkstoffen St 14 (DC 04) und AlMg 4 Mn.

Die Rohre aus dem Werkstoff X6 CrNiMoTi 17122 wurden im Zustand k1, also ungeglüht und gebeizt, der St 35 normalisierend geglüht (nbk) und die naturharte Aluminiumlegierung AlMg 4 Mn im Zustand G28 (geglüht) eingesetzt. Ziel der nach der Rohrherstellung durchgeführten Wärmebehandlung ist die Beseitigung der vom Rohrherstellungsprozess resultierenden typischen Eigenspannungen- und Kaltverfestigungen.

Für Referenzversuche wurde auch der höherfeste, quasiisotrope Werkstoff ZStE 250i von der Preussag Stahl AG sowie der Edelstahl X 5 CrNi 1810 und ein nahtloses Rohr St 35 eingesetzt. Ein direkter Vergleich von Aushalsergebnissen an nahtlosen und geschweißten Rohren sowie eine Anordnung der Aushalsung in der Schweißnaht war nicht vorgesehen.

Die als ebene Bleche bezogenen Werkstoffe St 14, AlMg 4 Mn, ZStE 250i und X 5 CrNi 1810 wurden zu Rohrhalbschalen weiterverarbeitet. Für das Wölben dieser Halbschalen erfolgte zuerst ein Anbiegen der Blechkanten im Gesenk und anschließend ein Dreiwalzenbiegen. Die Rohrhalbschalen aus AlMg 4 Mn-Blech wurden nach dem Runden wärmebehandelt, um die Kaltverfestigung durch den Biegevorgang zu beseitigen.

4.2.2.2 Mechanische Kennwerte

Die mechanischen Werkstoffkennwerte werden mit Zugversuchen nach DIN EN 10002 [113] aufgenommen. Die mechanischen Kennwerte sind in Tabelle 4.2 für die Rohrwerkstoffe und in Tabelle 4.3 für die Blechwerkstoffen zusammenfassend dargestellt.

Zur Klärung des Einflusses der Anisotropie auf die Ebenheit des Aushalsungsrandes ist die Ermittlung der planaren Anisotropie Δr notwendig. Die genaue Determinierung von umformtechnisch relevanten Rohrwerkstoffkennwerten, wie r- und n- Wert des Rohres

ist mit dem Zugversuch für Rohrwerkstoffe nach DIN 17457 [114], bei dem ungerichtete Zugproben eingesetzt werden, nicht möglich. Die Ermittlung von r - und n -Wert kann nur mit dem einachsigen Zugversuch an Flachzugproben realisiert werden.

Rohrwerkstoffe	d_{Ra}	s_0	$R_{p0,2}$	R_m	A_g	A_{g0}	r	n
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[-]	[-]
X 6 CrNiMoTi 17122	108	2	224,6	348,4	16,8	21,8	0,42	0,1356
	84	3	112,3	174,2	8,4	10,9	0,21	0,0678
	84	2	168,4	261,3	12,6	16,3	0,31	0,1017
	70	2	140,4	217,7	10,5	13,6	0,26	0,0848
	54	2	154,4	239,5	11,6	15,0	0,29	0,0932
X 5 CrNi 1810	70	2	511,7	718,2	26,2	33,4	0,84	0,1996
	70	1	338,2	655,9	40,4	45,9	0,85	0,3542
St 35	108	2	126,0	186,5	10,0	17,2	0,44	0,0916
	85	2	63,0	93,3	5,0	8,6	0,22	0,0458
	70	2	94,5	139,9	7,5	12,9	0,33	0,0687
	55	1,7	78,8	116,6	6,2	10,8	0,28	-
AlMg 4 Mn	55	1,2	154	305	17,3	18	0,8	0,39

Tabelle 4.2: Festigkeitskennwerte der Rohrwerkstoffe

Deshalb wurden aus der Rohrwand in Längsrichtung, gegenüberliegend zur Schweißnaht, Proportionalzugproben entnommen und im Gegensatz zur DIN 17457 flach gerichtet. Durch den begrenzten Rohrumfang war eine Entnahme von Flachzugproben in Querrichtung (90°) und in 45° -Richtung nicht möglich. Dadurch kann Δr auch nicht für Rohre bestimmt werden. Da die Werte der planaren Anisotropie Δr für die eingesetzten Bleche vorliegen, wurde der Einfluss von Δr auf die Ebenheit des Aushalungsrandes an Aushalungen in Rohrhalschalen untersucht.

Zur Beschreibung des Umformverhaltens bzw. des Stoffflusses wird neben den Größen wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung und Verfestigungsexponent auch die senkrechte Anisotropie r herangezogen. Diese stellt für einachsig gedehnte Flachzugproben das Verhältnis der logarithmischen Breitenformänderung zur logarithmischen Dickenformänderung dar:

$$r = \varphi_b / \varphi_n \quad (4.4)$$

mit

$$\varphi_b = \ln b_0 / \ln b_1 \quad (4.5)$$

und
$$\varphi_n = \ln s_0 / \ln s_1. \quad (4.6)$$

Mit Werten von $r > 1$ wird der Blechdickenabnahme ein relativ großer Widerstand entgegengesetzt und das Fließen in Blechbreitenrichtung begünstigt.

Blechwerkstoffe	WR	$R_{p0,2}$	R_m	A_g	A_{g0}	r	Δr	n
	[°]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]
St 14; $s_0=1,5$ mm	0	136,2	239,2	23	47,5	2,21	0,8	0,2253
	45	181,6	316,1	22,3	41,1	1,53		0,2052
	90	202,8	250	16,4	39,9	2,45		0,1502
St 14; $s_0=1,2$ mm	0	128,7	237,6	22,8	45,7	2,17	1,04	0,2506
	45	203,2	339	22,1	38,8	1,24		0,2023
	90	196,8	318,7	22,3	45,6	2,39		0,2089
St 14; $s_0=0,8$ mm	0	163,7	226,9	20,5	42,9	1,56	0,245	0,2962
	45	233,5	381,3	21,5	38,5	1,42		0,1963
	90	159,8	221,6	19,3	42,3	1,77		0,2816
ZStE 250i; $s_0=1,5$ mm	0	280,6	393,9	19,3	34,4	0,93	0,075	0,182
	45	290,3	400,3	18,8	34,5	1		0,1779
	90	295,4	401,3	19,3	32,2	1,22		0,1753
ZStE 250i; $s_0=1,2$ mm	0	257,3	375,8	19,7	34,1	0,93	0,055	0,184
	45	269	378,8	19,1	33,9	1,02		0,1804
	90	273,1	382	19,1	33,6	1,22		0,1797
ZStE 250i; $s_0=0,8$ mm	0	270,7	391,1	20,2	33,2	0,97	-0,025	0,2
	45	280,6	393,4	20,8	34,3	1,11		0,2007
	90	291,1	397,8	20,8	33,1	1,2		0,2005
AlMg 4 Mn; $s_0=1,8$	0	125,5	289,6	19,6	20,2	0,77		0,2539
AlMg 4 Mn; $s_0=1,5$	0	146,8	301,9	18,9	19,7	0,58		0,249
AlMg 4 Mn; $s_0=1,2$	0	147,5	297,6	19,1	20,8	0,69	-0,275	0,2619
X 5 CrNi 1810; $s_0=1$	0	342,8	674,77	44,2	48,4	0,82		0,3595

Tabelle 4.3: Festigkeitskennwerte der Blechwerkstoffe

Die planare Anisotropie Δr beschreibt die unterschiedlichen Verformungseigenschaften der Blechwerkstoffe in Bezug zur Walzrichtung. Je geringer der Δr -Wert, desto kleiner ist die zu erwartende Zipfelbildung beim Tief- bzw. Kragenziehen [115]. Der eingesetzte isotrope Werkstoff ZStE 250i weist Werte von $\Delta r \approx 0$ auf, während beim St14 die planare Anisotropie sehr viel größer ist ($\Delta r_{St14} \geq 0,245$).

Das Verfestigungsverhalten des Werkstoffes wird durch den Verfestigungsexponenten n charakterisiert. Unter Annahme der Volumenkonstanz und nur im einachsigen Spannungszustand kann n für die Berechnung der Gleichmaßdehnung durch die Gleichung

$$n = \varphi_{gl}, \quad (4.7)$$

herangezogen werden bzw. mit der im Zugversuch ermittelten Gleichmaßdehnung das Verfestigungsverhalten beschrieben werden. Es ist jedoch bekannt, dass der n -Wert je nach Werkstofftyp in Abhängigkeit von der Dehnung veränderlich ist [116]. Die übliche Angabe des n -Wertes bei 15 – 20 % bleibender Dehnung ist mitunter nicht aussagekräftig genug und kann durch die Angabe des differentiellen Verfestigungsexponenten n' vervollständigt werden:

$$n' = d \ln k_f / d \ln \varphi. \quad (4.8)$$

Für die Versuchsauswertung zum Aushalten erscheint der differentielle Verfestigungsexponent wenig aussagekräftig, da die Schwankungen des hauptsächlich bei kleineren Dehnungen auftreten [102]. Deshalb wird der differentielle Verfestigungsexponent bei den vorliegenden Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

Zusätzlich zu den durch die Rohr- bzw. Halbschalenherstellung eingebrachten Kaltverfestigungen werden die Rohrzugproben beim Richten weiter verfestigt. Dies führt zu geänderten Werkstoffeigenschaften, insbesondere zur Erhöhung der Streckgrenze. Deshalb sind die so ermittelten mechanischen Kennwerte nicht mit den eigentlichen Rohrkennwerten identisch. Diese Tatsache wurde bei der Versuchsauswertung entsprechend berücksichtigt, so dass z. B. bei den Werten für Zugfestigkeit und Streckgrenze jeweils die Angaben des Rohrherstellers verwendet wurden.

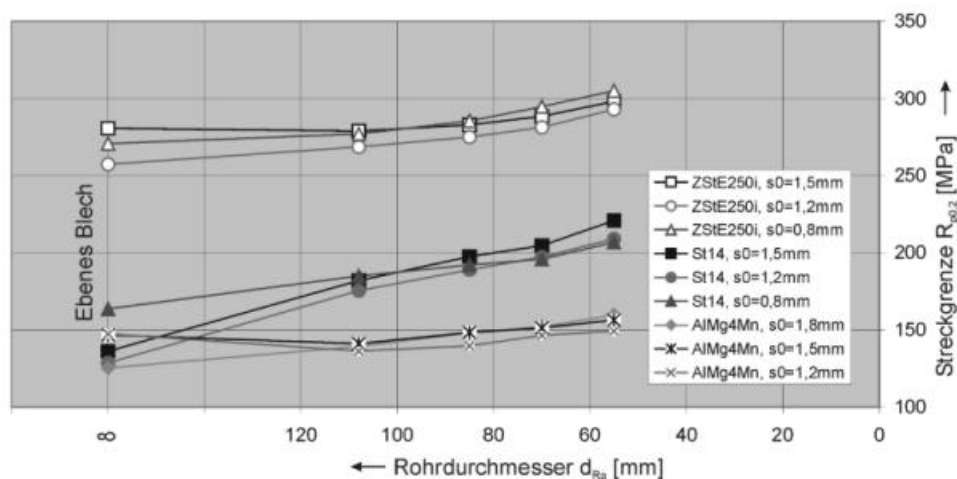


Bild 4.14: Festigkeitskennwerte der Blechwerkstoffe

Bei den Rohrhalschalen ist die Streckgrenze $R_{p0,2}$ größer als die der ebenen Ausgangsbleche und steigt auch im Durchschnitt mit kleiner werdendem Rohrdurchmesser (Bild 4.14). Das annähernd gleichgroße Niveau der Streckgrenze bei Rohrhalschalen aus AlMg 4 Mn-Blechen im Vergleich zum ebenen Blech ist auf die durchgeführte Glühbehandlung zurückzuführen.

Ursache für den dennoch vorhandenen leichten Anstieg der Streckgrenzenwerte bei kleiner werdendem Rohrdurchmesser ist das Richten des Probenmaterials zu Flachzugproben. Das stärkere Ansteigen der Streckgrenze bei kleiner werdendem Rohrdurchmesser für Halbschalen aus St 14-Blechen gegenüber Halbschalen aus ZStE 250 i-Blechen hat seine Ursache in den höheren Verfestigungsexponenten der St 14-Bleche (s. Tabelle 4.3).

4.2.2.3 Fließkurven

Mit der Fließkurve wird die Abhängigkeit der Fließspannung k_f vom Hauptumformgrad (logarithmische Dehnung) dargestellt.

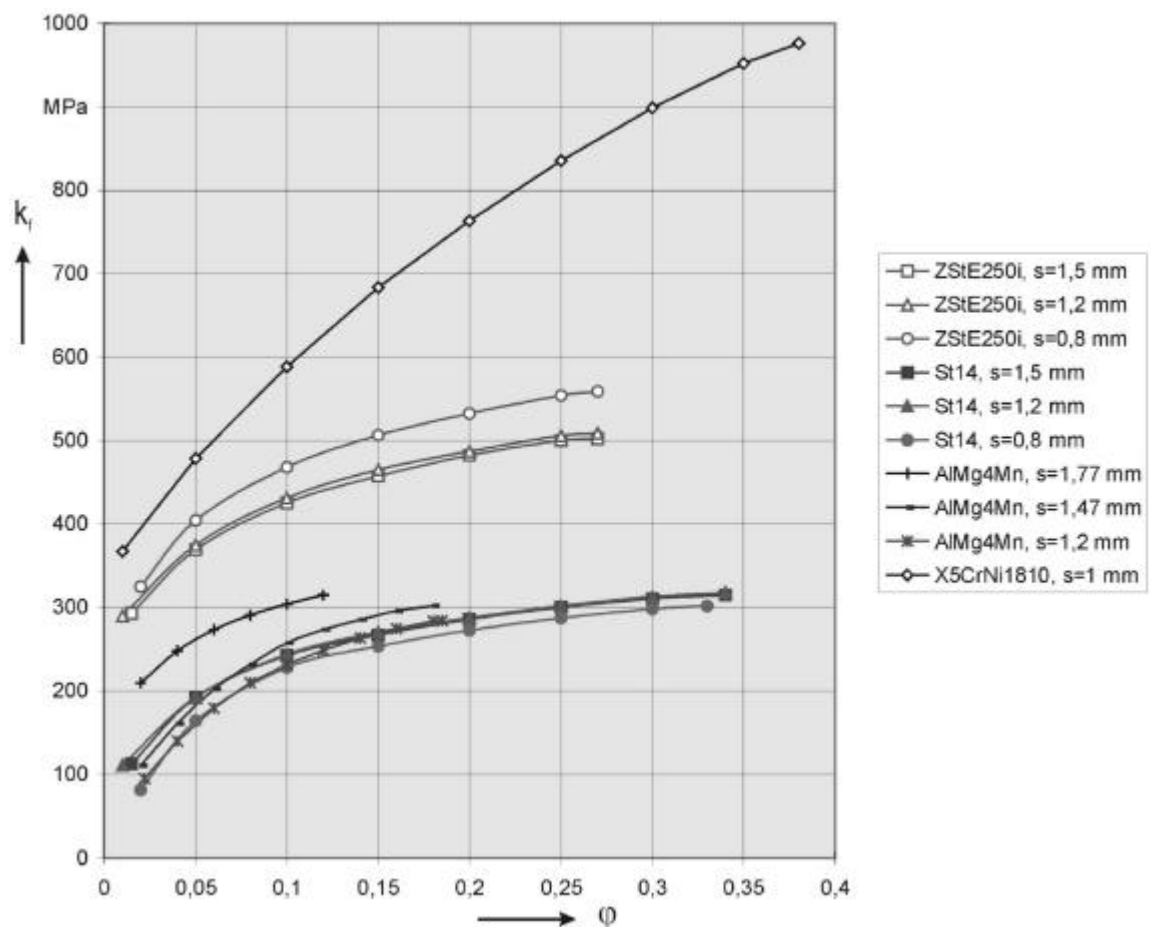


Bild 4.15: Fließkurven der Blechwerkstoffe (in Walzrichtung)

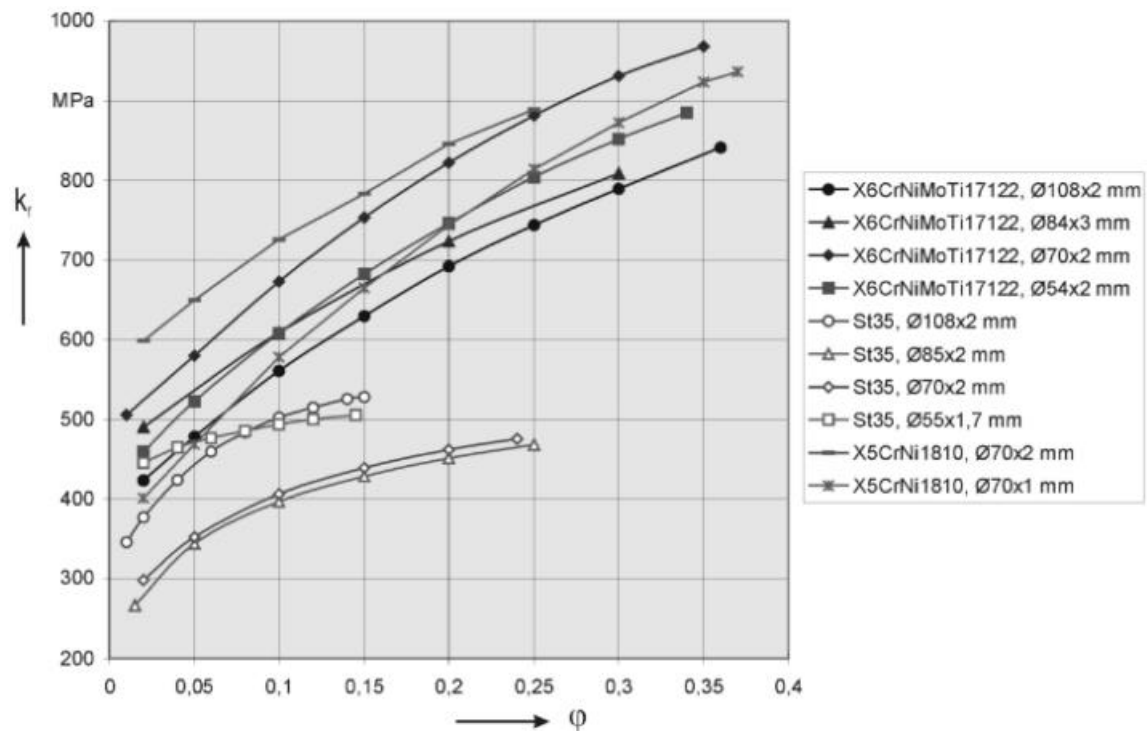


Bild 4.16: Fließkurven der Rohrwerkstoffe (in Walzrichtung)

In Bild 4.15 sind die Fließkurven der eingesetzten Blechwerkstoffe und in Bild 4.16 die Fließkurven der Rohrwerkstoffe dargestellt. Deutlich ist in beiden Diagrammen das größere Umformvermögen und das ausgeprägte Verfestigungsverhalten der Edelstahlwerkstoffe, besonders des X5 CrNi 1810 gegenüber dem Baustahl und der untersuchten Aluminiumlegierung zu erkennen.

4.3 Prozesssimulation mit der FEM

Die Prozesssimulation mit der Finiten Elemente Methode (FEM) stellt in der Umformtechnik ein Werkzeug dar, mit dem fertigungstechnische Problemstellungen analysiert werden können. Mit der FEM werden dabei Prozessdaten näherungsweise numerisch berechnet, die u.a. Rückschlüsse auf die Spannungs- und Formänderungsgeschichte, bis hin zur Analyse der Deformationspfade ausgewählter Elemente im FLD (Forming Limit Diagram) [117] ermöglichen.

Das Wesen der FEM besteht im Unterteilen eines Kontinuums in einzelne Elemente mit begrenzter Anzahl, die an den Knotenpunkten miteinander verbunden sind. Bei strukturellen Vorgängen, wie dem Umformen eines Körpers, wird die relative Bewegung dieser Knoten als Wirkung von inneren und äußeren Lasten berechnet. Über diese

Knotenverschiebungen können die Formänderungen ermittelt und mit Hilfe des Stoffgesetzes Rückschlüsse auf die Spannungen gezogen werden [118 bis 122]. Da die FEM ein Näherungsverfahren darstellt, ist es erforderlich den realen Prozess und die Randbedingungen in geeigneter Form im Modell abzubilden. Bei umformtechnischen Aufgabenstellungen betrifft dies vor allem die Abbildung der Reibungsbedingungen und der Werkstoffeigenschaften des umzuformenden Bauteils [123].

Mit der Modellerstellung wird der reale Prozess idealisiert, indem Vereinfachungen und Abgrenzungen getroffen werden. Durch ein derartiges Idealisieren wird zwar der Aufwand für die eigentliche numerische Berechnung begrenzt, jedoch muss das Ergebnis hinreichend genau sein. Um diese Genauigkeit zu überprüfen, ist ein sogenanntes Kalibrieren des Modells erforderlich, indem die Berechnungsergebnisse der FEM mit realen Versuchsergebnissen verglichen werden und das FEM-Modell entsprechend angepasst wird.

Als FEM-Software kommt das kommerzielle FEM-Programmsystem MARC K6.1 mit integriertem Pre-, Main- und Postprocessing (MENTAT) zum Einsatz. Das Programmsystem besitzt folgende Eigenschaften [123]:

- Ausrichtung auf Lösung nichtlinearer Problemstellungen
 - Große Verschiebungen bzw. Rotationen
 - Hinterlegung elastisch-plastischer, starrplastischer, u.a. Materialgesetze
 - Kontakt bzw. Reibung mehrerer Körper (verformbar/starr)
- Adaptive Netzverfeinerung
- Automatischer Kontaktalgorithmus (spezielle Kontaktelemente nicht erforderlich)
- Möglichkeit des direkten Zugriffs auf den Lösungsalgorithmus (Flexibilität).

Mit Blick auf das Ziel der FEM-Prozesssimulation in der vorliegenden Arbeit, den Werkstofffluss zu analysieren und Rückschlüsse auf eine Verbesserung der Werkzeuggestaltung zu ziehen, wird das Kalibrieren durch Vergleich der Aushaltungshöhen, der Wanddicken und der Vergleichsformänderungen zwischen Experiment und FEM-Berechnung vorgenommen. Nach dem Kalibrieren ergab der Vergleich zwischen den gemessenen Werten im Experiment und den berechneten Werten aus der FEM eine Abweichung von $\leq \pm 5\%$, die in diesem Toleranzband als zufriedenstellend angesehen wird.

Die Vergleichsformänderungen aus der Formänderungsanalyse, die der Vergleichsdehnung in der FEM-Simulation entsprechen [124], werden nach folgender Gleichung berechnet:

$$\mathbf{j}_v = \sqrt{(2/3)(\mathbf{j}_1^2 + \mathbf{j}_2^2 + \mathbf{j}_3^2)}. \quad (4.7)$$

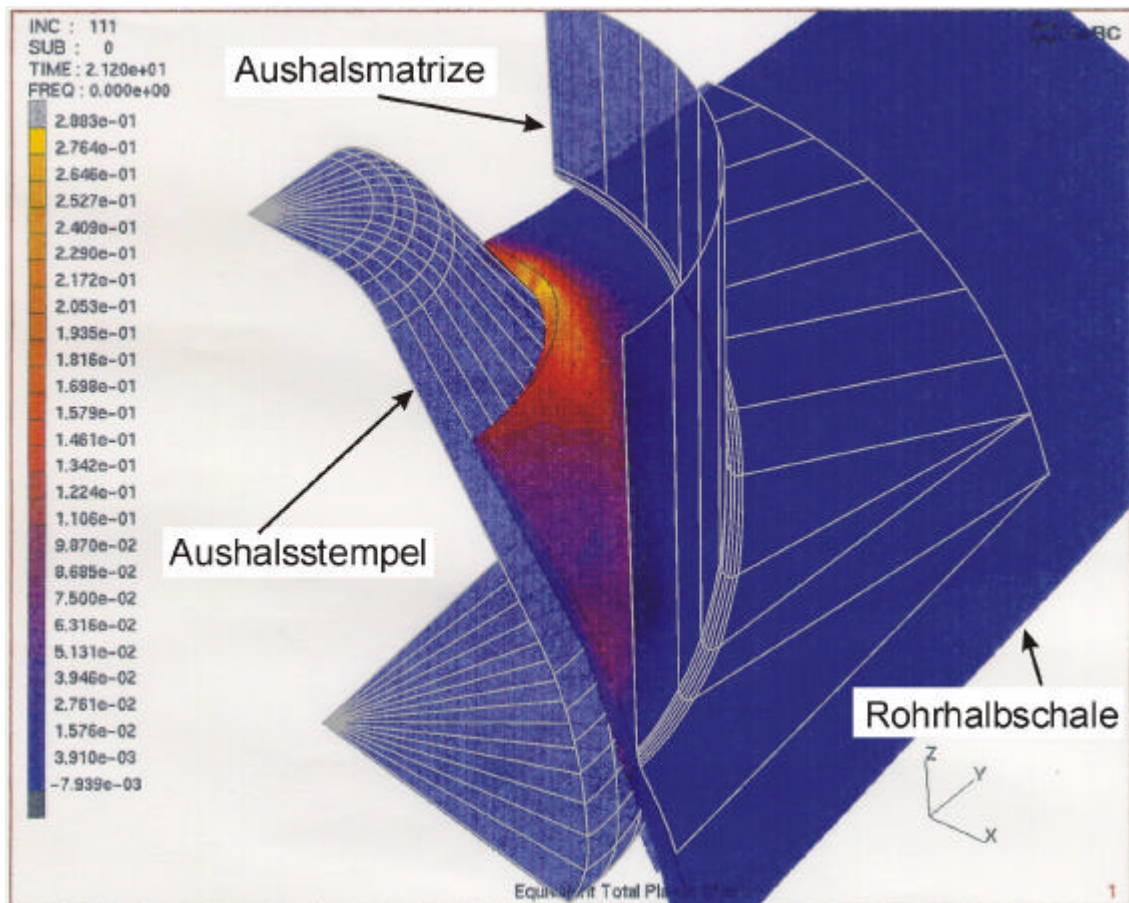


Bild 4.17: Werkzeuge und Werkstück des FEM-Modells (Rohraushalsung $d_A/d_R = 0,8$)

Für die Modellerstellung werden folgende Abgrenzungen und Vereinfachungen getroffen:

- statische Prozesse bei konstanter Raumtemperatur
 - Geschwindigkeits- und Temperatureinflüsse werden nicht betrachtet
 - Implizite Zeitintegrationsmethode
- Axialsymmetrische Oberflächen bzw. Werkzeug- und Werkstückgeometrien im Modell

- Werkzeuge sind aus Geraden- und Kreisbogenabschnitten („rigid bodies“) zusammengesetzt
- Werkstück ist mit 4-Knoten-Elementen und Integrationspunkten beschrieben
- Elastisch-plastisches Stoffgesetz mit Fließbedingung nach v. Mises
- Fließkurve multilinear, mit Stützstellen aus dem Zugversuch
- Fließkurvenapproximation nach der LUDWIK-Gleichung [125]
- Vorlochherstellungsverfahren werden nicht berücksichtigt (kein Remeshing)
- Netzverfeinerung zum Vorlochrand hin
- Keine Berücksichtigung von rohrspezifischen Eigenschaften, wie Schweißnaht und Vorverfestigung.

Bild 4.17 zeigt die Werkzeug- und Werkstückanordnung im FEM-Modell für das Ausheben von Rohren. Zur Begrenzung der CPU-Zeit wurde im Modell mit nur einem Viertel der axialsymmetrischen Teilung gerechnet [133]. Außerdem wurde die untere Rohrhalbschale nicht betrachtet, da diese nicht in die Umformung einbezogen ist.

5 Prozessanalyse und Ergebnisse

5.1 Umformvorgang

Das Aushalsen von Rohren erfolgt durch Herausziehen eines zuvor seitlich in das Rohr eingebrachten Aushalsstempels durch ein ausgeschnittenes Vorloch (Bild 5.1), mit dessen elliptischer Geometrie ein ebener Aushalsungsrand angestrebt wird.

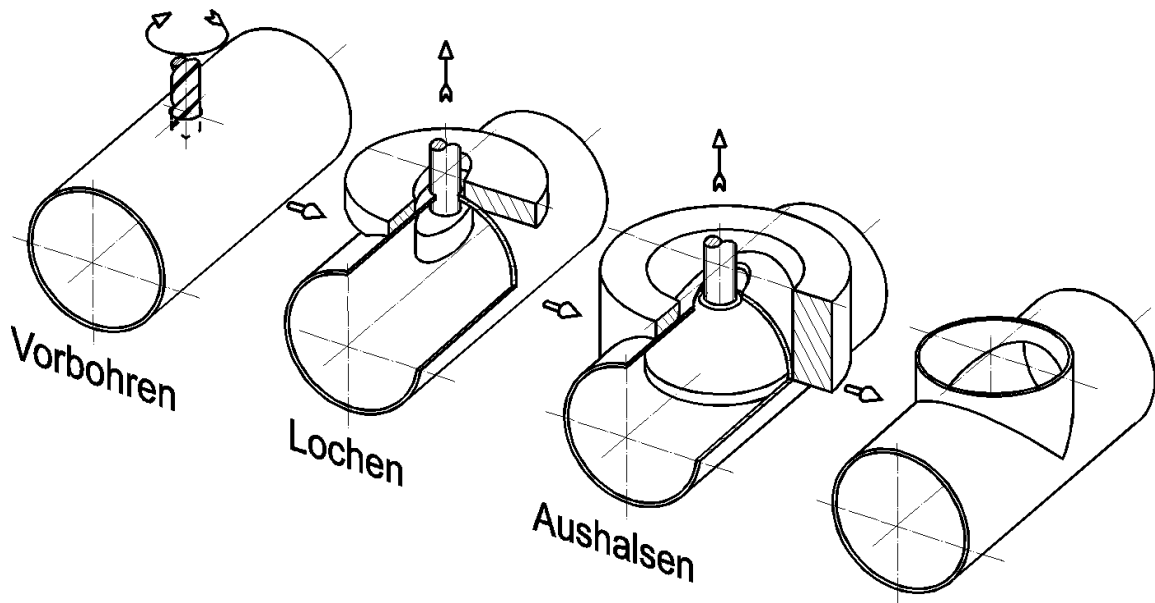


Bild 5.1: Prozessschritte beim Aushalsen

Der Umformvorgang beim Aushalsen von Rohren oder Rohrhalbschalen ist aufgrund der Form des Ausgangsteiles über dem Umfang der Aushalsung inhomogen. Im Gegensatz zum Kragenziehen in ebenen Blechen, setzt beim Aushalsen von Rohren, bei Verwendung rotationssymmetrischer Kegel- oder Halbkugelwerkzeuge, die Umformung zuerst im Bereich der kleinen Ellipsenachse ein. Von diesen Bereichen aus, wo der erste Werkzeug-Werkstück-Kontakt stattfindet, erfolgt ein fortschreitendes Ausbreiten der Kontaktzone bis zum vollständigen Anliegen des umzuformenden Materials am Werkzeug (Bild 5.2). Nach diesem Anlegen beginnt das eigentliche Ausformen der Aushalsung. Durch die gewölbte Ausgangsform des Rohres und die Aushalsstempelform kommt es zu einem Hin- und Rückbiegen der Werkstückelemente.



Bild 5.2: Umformstadien des Aushalsprozesses (Kegelstempel)

Die Bereiche an der Rohroberkante, wo im Versagensfall der Aushalsungsrand einreißt, werden zuletzt umgeformt.

5.2 Spannungen und Formänderungen

Beim Rohraushalsen liegen ähnliche Beanspruchungsverhältnisse wie beim Kragenziehen in ebenen Blechen vor. Dabei handelt es sich jeweils um einen instationären Umformvorgang mit mehrachsigem Spannungs- und Formänderungszustand [126]. Betrachtet man den Beginn der Umformung, so entsteht mit der Krafteinwirkung des Werkzeuges in der Umformzone eine radiale Zugspannung σ_r , die eine tangentielle Zugspannung σ_t hervorruft. In dieser Phase des Umformvorganges ist der Wert der radialen Zugspannung σ_r an der Matrizenrundung am größten, verringert sich zur Lochkante hin und erreicht am Lochrand den Wert "Null".

Die tangentielle Zugspannung σ_t stellt die größte Normalspannung dar. Bei zunehmender Umformung wird die tangentielle Zugspannung σ_t aufgrund der anwachsenden Kontaktzone und der fortschreitenden Verfestigung des Materials größer. Ihr Betrag ist am Lochrand am größten und fällt mit kleiner werdendem Abstand zur Matrizenrundung ab.

Da sich die Zugspannungen σ_r und σ_t während des Umformvorganges innerhalb der Umformzone ändern, liegt ein inhomogener Spannungszustand vor, wobei die radiale Zugspannung σ_r durch Haftreibung mitunter so groß wie die tangentielle Zugspannung σ_t

werden kann. Außerdem wirkt in Blechdickenrichtung eine Druckspannung σ_n , die durch die Flächenpressung zwischen Rohrwand und Aushalsstempel entsteht (Bild 5.3).

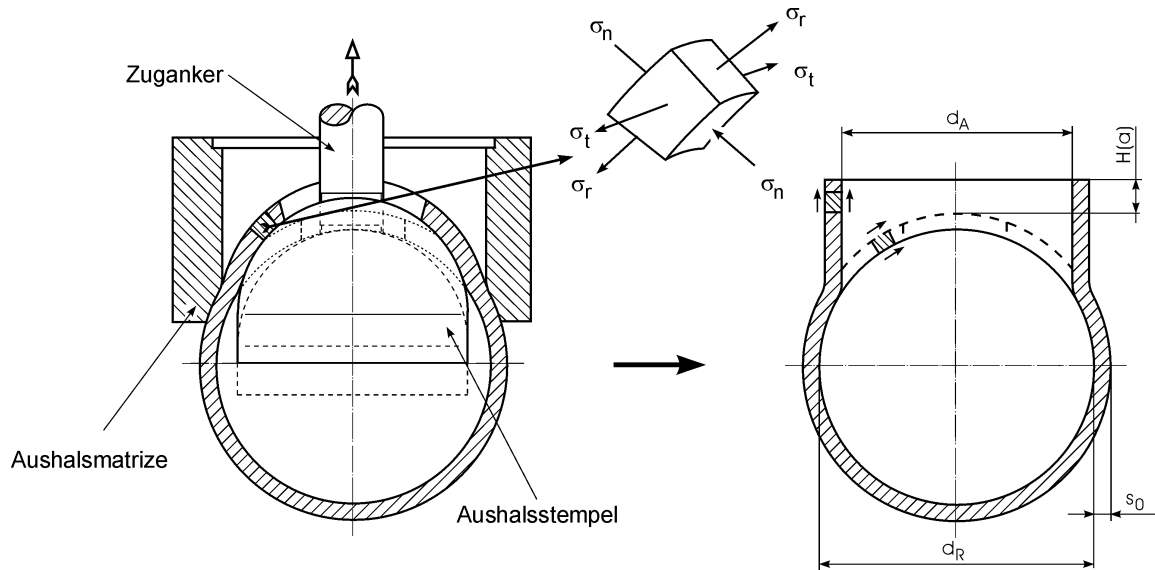


Bild 5.3: Spannungszustand beim Rohraushalsvorgang

Der Vergleich der Normalspannungen zeigt, dass die axiale Druckspannung σ_n bei kleinen Wanddicken vernachlässigt werden kann ($\sigma_n = 0$), so dass näherungsweise von einem ebenen Spannungszustand ausgegangen werden kann.

Weiterhin wirken Reibschubspannungen in den Randschichten der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück. Als Fließbedingung ergibt sich nach der Schubspannungshypothese von TRESCA:

$$s_V = s_{max} - s_{min} = s_t - s_n = k_f @ s_t \quad (5.1)$$

Der Spannungszustand an den einzelnen Werkstoffelementen beim Kragenziehen in ebenen Blechen ist über dem Umfang des Kragens gleich. Beim Aushalsen von Rohren liegt auf Grund der Form des Rohres und des Vorloches noch zusätzlich ein unterschiedlicher Spannungs- und Formänderungszustand über dem Umfang der Aushalsung vor.

Um einen ebenen Aushalsungsrand bei Rohraushalsungen zu erzielen, ist der Einsatz eines elliptischen Vorloches erforderlich. Am oberen Rohrscheitel (in Rohrlängsachsenrichtung) wird wegen der elliptischen Vorlochgeometrie weniger Material in die Umformung einbezogen als quer dazu (Bild 5.4), so dass die tangentielle Aufweitung am oberen Rohrscheitel (im Bereich der Vorlochachse a) am größten ist. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch das Aufweiten des kleinsten Vorlochradius r_E zum Aushalsungsradius r_A .

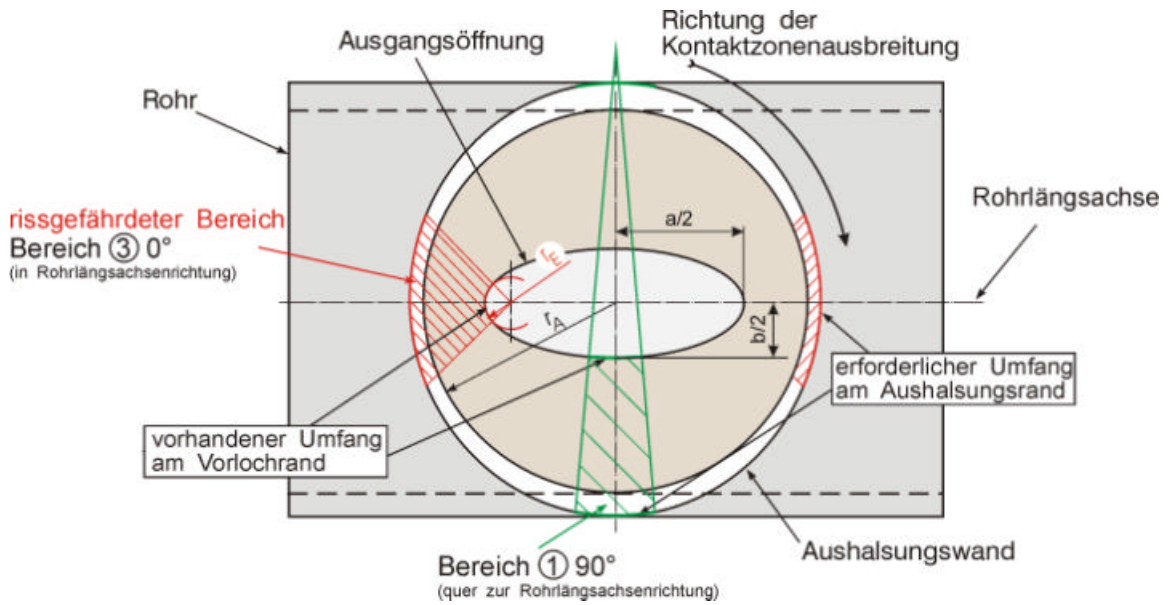


Bild 5.4: Aufweiten des Vorloches zur Rohraushalsung in den Vorlochachsen

Durch das elliptische Vorloch und die zylindrische Form des Ausgangsrohres ist zudem die Kontaktzonenausbreitung zwischen Aushalsstempel und Rohrwand über dem Aushalsweg diskontinuierlich (vgl. Pkt. 5.1).



Bild 5.5: Mit der FEM berechnete Vergleichsformänderungsverteilung

Es herrschen über dem Aushalungsumfang erst die gleichen Kontaktbedingungen vor, wenn die umzuformende Rohrwand komplett am Aushalsstempel anliegt. In den zuletzt umgeformten Bereichen am oberen Rohrscheitel entstehen die größten Formänderungen (Bild 5.5).

In diesen beiden gegenüberliegenden Bereichen liegt die größte Rissgefahr vor. Der Versagensfall zeigt sich in diesem Bereich am oberen Rohrscheitel durch Einreißen der Aushalsungswand vom oberen Rand zum Fuß. Je höher die Aushalsungshöhe gewählt wird (durch kleinere Vorlochabmessungen), desto größer sind die Formänderungen in der Aushalsungswand.

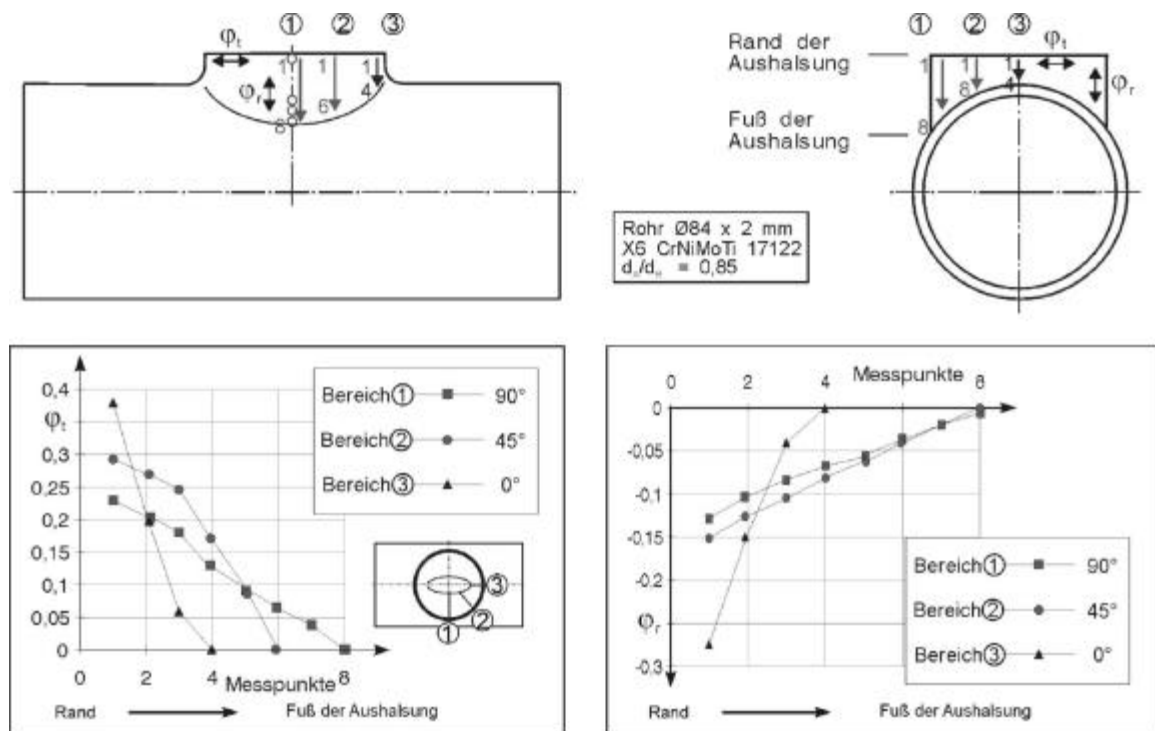


Bild 5.6: Formänderungsverteilung in der Aushalsungswand

Die in Bild 5.6 dargestellten Formänderungen sind in Umfangsrichtung (φ_t) und in radialer Richtung (φ_r) unterschiedlich groß. Die Formänderungen steigen vom Fuß zum Rand der Aushalsung betragsmäßig an. Die größten tangentialen Formänderungen an dieser Aushalsung, bei der als Vorloch eine Ellipse eingesetzt wurde, liegen im Bereich 3 (0°) mit $\varphi_{t \max} = 0,38$ vor.

Für Aushalsverhältnisse von $d_A/d_R = 1$ ist im Gegensatz zu kleineren Aushalsverhältnissen am Fuß der Aushalsung eine Umformung mit relativ großen Formänderungen festzustellen (Bild 5.7). Diese partielle Umformung hat ihre Ursache in einer abweichenden Kontaktzonenausbreitung, da mit den eingesetzten Spreizkegelwerkzeugen die Umfor-

mung nicht am Vorlochrand, sondern linienförmig entlang der Rohrwand quer zur Rohrlängsachsenrichtung beginnt. Dadurch ergibt sich auch eine bis zu 0,3 mm größere Aushalsungshöhe für $H(b)$ als bei Aushalsverhältnissen von $d_A/d_R < 1$.

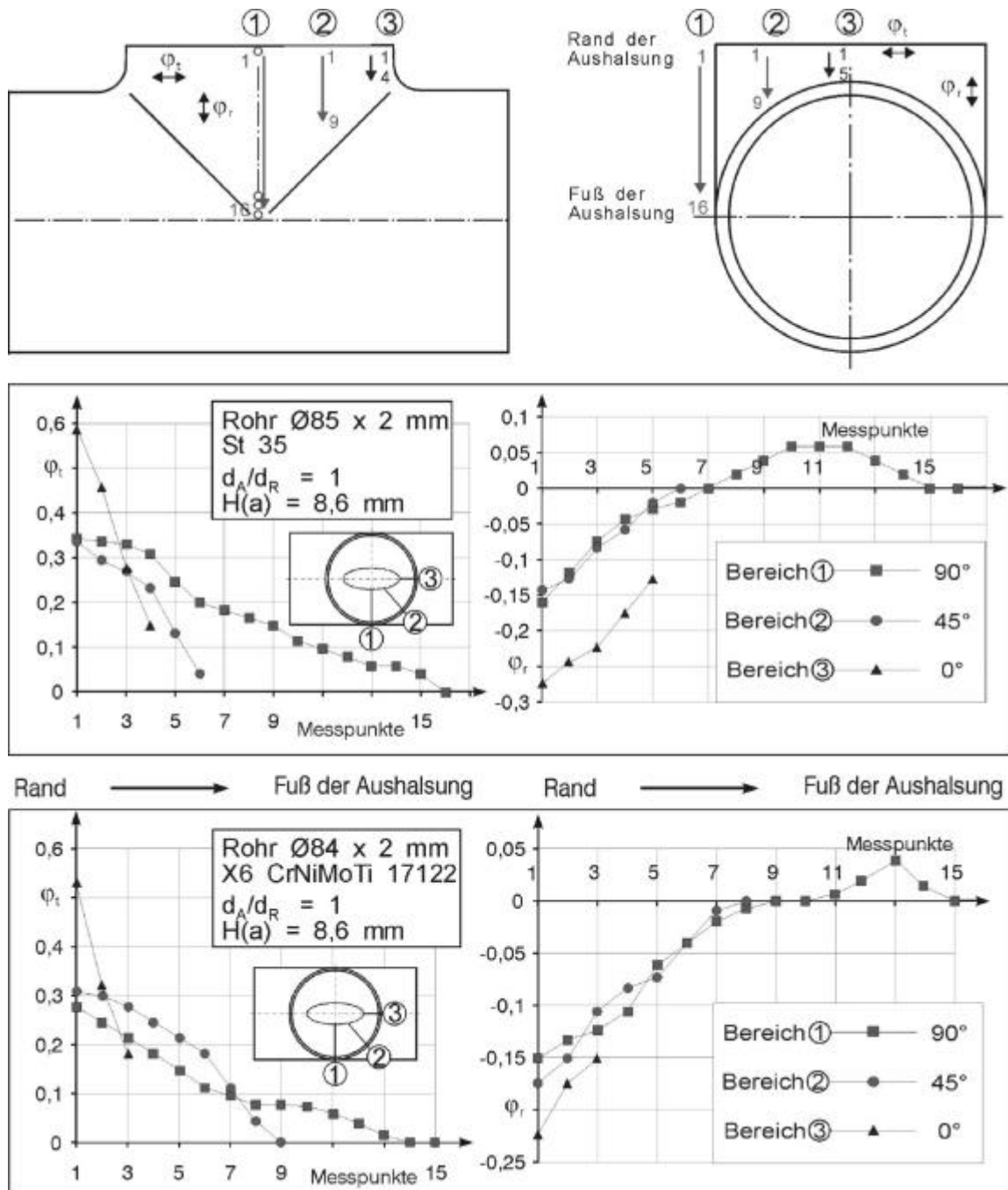


Bild 5.7: Formänderungsverteilung für Aushalsverhältnisse $d_A/d_R = 1$

Am Aushalsungsrand liegen die Volumenelemente in Umfangsrichtung ausschließlich gedehnt und in radialer Richtung gestaucht vor. In Normalrichtung werden die Volumenelemente ebenfalls gestaucht, so dass eine Blechdickenreduktion an der Aushalsung ein-

tritt. Die größten Formänderungen φ_n treten wie bei φ_r und φ_t im Bereich 3 (0°) (in Rohrlängsachsenrichtung) am Aushalsungsrand auf (Bild 5.8).

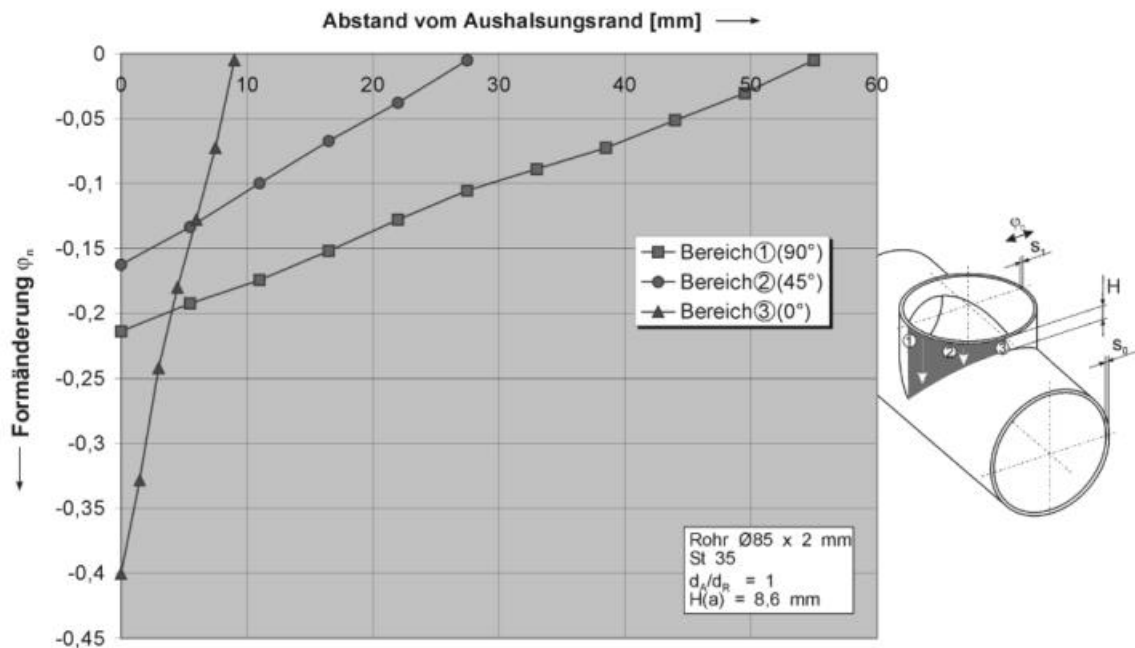


Bild 5.8: Formänderungsverteilung φ_n in der Aushalsungswand

Die Analyse der Formänderung φ_n über dem Umfang des Aushalsungsrandes zeigt ein Abfallen der Formänderungsbeträge für φ_n im Bereich 2 (45°) und die größten Formänderungsbeträge im Bereich 3 (0°) am oberen Rohrscheitel (Bild 5.9).

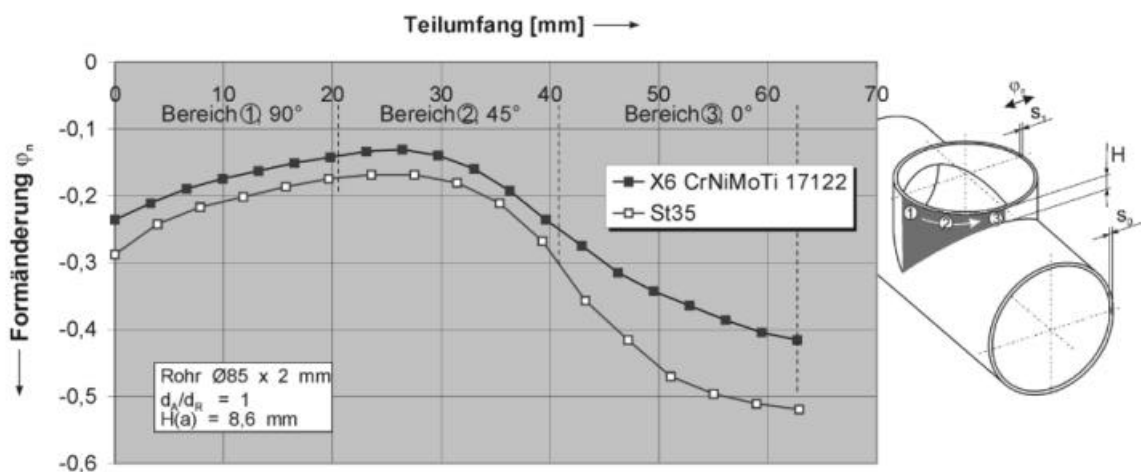


Bild 5.9: Formänderungsverteilung φ_n am Umfang des Aushalsungsrandes

Die größeren Formänderungsbeträge für φ_n beim St 35 lassen sich auf die geringeren Werte der senkrechten Anisotropie r und die Formänderungsverteilung über dem Aushal-

sungsumfang auf den geringeren Verfestigungsexponenten n für den Ausgangswerkstoff St 35 gegenüber dem Werkstoff X 6 CrNiMoTi 17122 zurückführen.

Die Formänderungsanalysen von Aushalsungen zeigen für unterschiedliche Rohrwerkstoffe qualitativ die gleichen Abhängigkeiten. Der Vergleich der Formänderungsbeträge erbringt quantitativ charakteristische Unterschiede, die von den Umformeigenschaften der jeweiligen Werkstoffe abhängen. Die Gegenüberstellung der einzelnen Formänderungen (φ_t , φ_r , φ_n) mit den dazugehörigen, im einachsigen Zugversuch aufgenommenen Werkstoffkenngrößen (n , r , Δr) spiegelt das Ergebnis der Formänderungsanalyse nicht vollständig wieder. Dies liegt im abweichenden Verformungsverhalten eines polykristallinen Werkstoffes im mehrachsigen Spannungszustand begründet. Die Beziehung zwischen Verfestigungsexponent n und maximalen Formänderungen, wie er mit $\varphi_{n \max} = n$ bzw. $\varphi_{t \max} = 2n$ in [71] für bestimmte Werkstoffe beim Kragenziehen unter der Annahme das $\varphi_r = 0$ beschrieben wird, ist für das Rohraushalsen nicht verwendbar. Beim Rohraushalsen ist $\varphi_r \neq 0$.

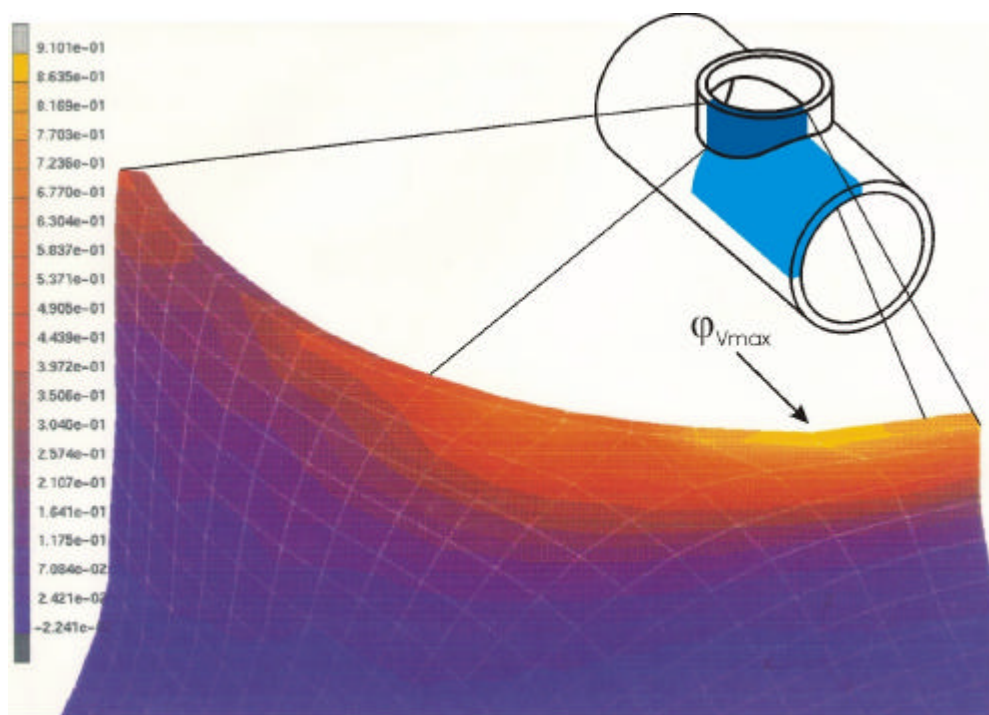


Bild 5.10: Vergleichsformänderungen am Aushalsungsrand (mit der FEM berechnet)

Die Vergleichsformänderung φ_v zeigt am Aushalsungsrand einen ähnlichen Verlauf wie φ_n . Die größten Formänderungsbeträge für φ_v treten in Rohrlängsachsenrichtung auf (Bereich 3 (0°)), wobei die mit der FEM berechneten absoluten Maxima der Vergleichsformänderungen links und rechts des oberen Rohrscheitels auftreten (Bild 5.10).

Dieser diskontinuierliche Verlauf der Vergleichsformänderungen am Aushalungsrand ist zum einen auf die sich während der Umformung ändernden Werkzeug-Werkstück-Kontaktbedingungen aber auch auf die Gestaltung der Vorlochform zurückzuführen. Beim Einsatz einer geänderten Vorlochform ändern sich die Formänderungen in der Aushalungswand qualitativ und quantitativ.

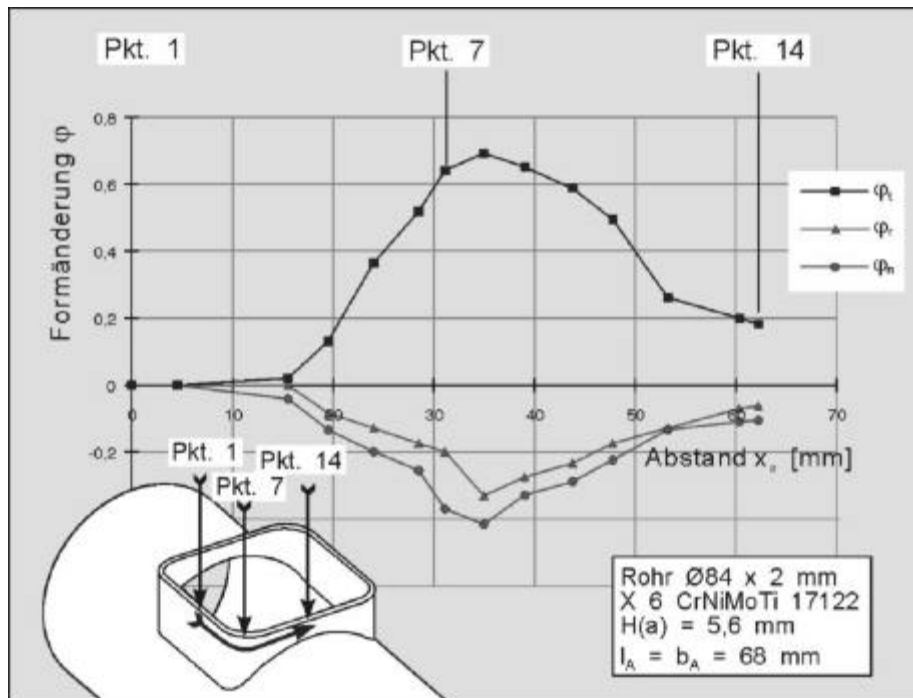


Bild 5.11: Formänderungsanalyse am Aushalungsrand einer quadratischen Aushalung

Im Gegensatz zur Formänderungsanalyse von runden Aushalungen zeigt die Formänderungsanalyse einer mit kegeligem Aushalstempel umgeformten quadratischen Aushalung im Bereich quer zur Rohrlängsachsenrichtung nahezu keine messbare Formänderung (Bild 5.11, Pkt. 1 u. 2), da der Aushalstempel in diesem Bereich linienförmig an der Rohrwand anliegt. Es erfolgt in diesem Bereich kein Aufweiten im eigentlichen Sinne, sondern nur ein Aufstellen der Aushalungswand (Biegen). Der Einfluss der gewölbten Rohrform auf die Formänderungen in der Aushalung wird vor allem im Bereich der Eckenradien deutlich. In Richtung zum oberen Rohrscheitel hin treten im Eckenbereich aufgrund der größeren tangentialen Aufweitung die größten Formänderungen auf. Aufgrund der quadratischen Aushalungsform weist der Aushalungsrand direkt am oberen Rohrscheitel (Bild 5.11, Pkt. 14) vergleichsweise geringe Formänderungen auf, die jedoch bedeutend größer sind als im Bereich quer zur Rohrlängsachsenrichtung (Bild 5.11, Pkt. 1).

5.3 Endteileigenschaften und Bauteilqualität

5.3.1 Kaltverfestigung an der Aushalsung

Die Verteilung der Kaltverfestigung in der Aushalsungswand korrespondiert mit der festgestellten Formänderungsverteilung in der Aushalsungswand. Im Gegensatz zu den rissgefährdeten Bereichen existieren an der Aushalsung Bereiche in denen das Umformvermögen noch nicht erschöpft ist.

Homogene Werkstoffeigenschaften am Ausgangsrohr vorausgesetzt, können die durch das Aushalsen hervorgerufenen Kaltverfestigungen durch Mikrohärtemessungen quantifiziert werden. Analog zur Formänderungsverteilung steigt die Kaltverfestigung in der Aushalsungswand vom Fuß zum Rand der Aushalsung an (Bild 5.12).

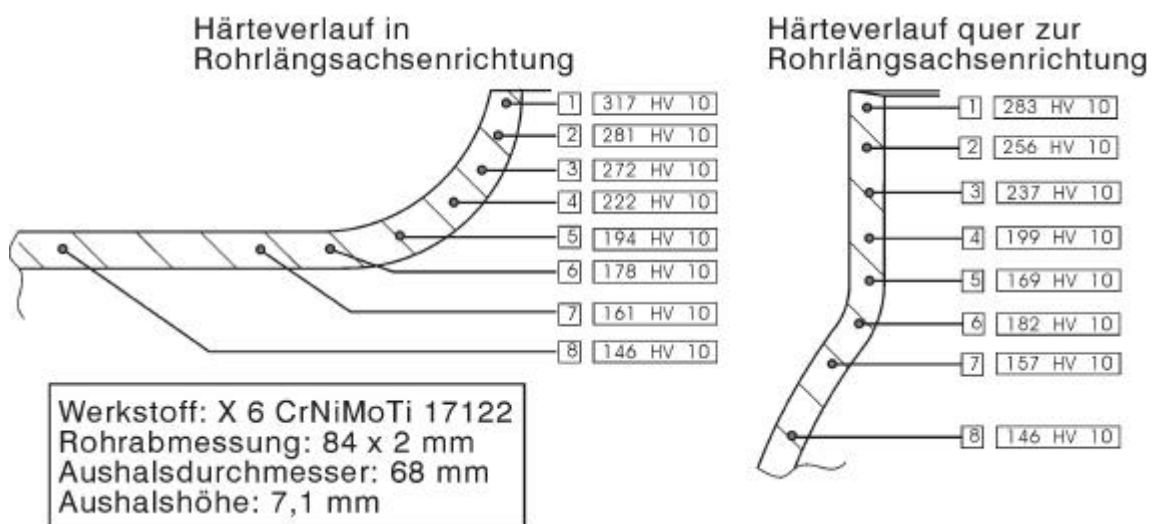


Bild 5.12: Verfestigungen in der Aushalsungswand (Ausgangshärte 146 HV 10)

Die größte Härte in der Blechdickenrichtung der Aushalsungswand wurde in Rohrlängsachsenrichtung festgestellt. Quer dazu in dem Bereich, wo die Aushalswand am höchsten ist, wurden geringere Verfestigungen ermittelt.

Erhöhte Härtewerte in der Aushalsungsumgebung sind auf geringfügige Verformungen der angrenzenden Bereiche zurückzuführen. Durch den Biegevorgang um den Matrizenradius treten Reaktionsmomente auf, die auf die unmittelbare Umgebung der Aushalsung am Rohr wirken und aufgrund des unterschiedlichen Umschlingungswinkels am Matrizenradius auch unterschiedlich groß sind.

5.3.2 Geometrische Abweichungen an Aushalsungen

An der fertigen Rohraushalsung treten nach erfolgter Umformung Form-, Maß- und Lageabweichungen auf (Bild 5.13).

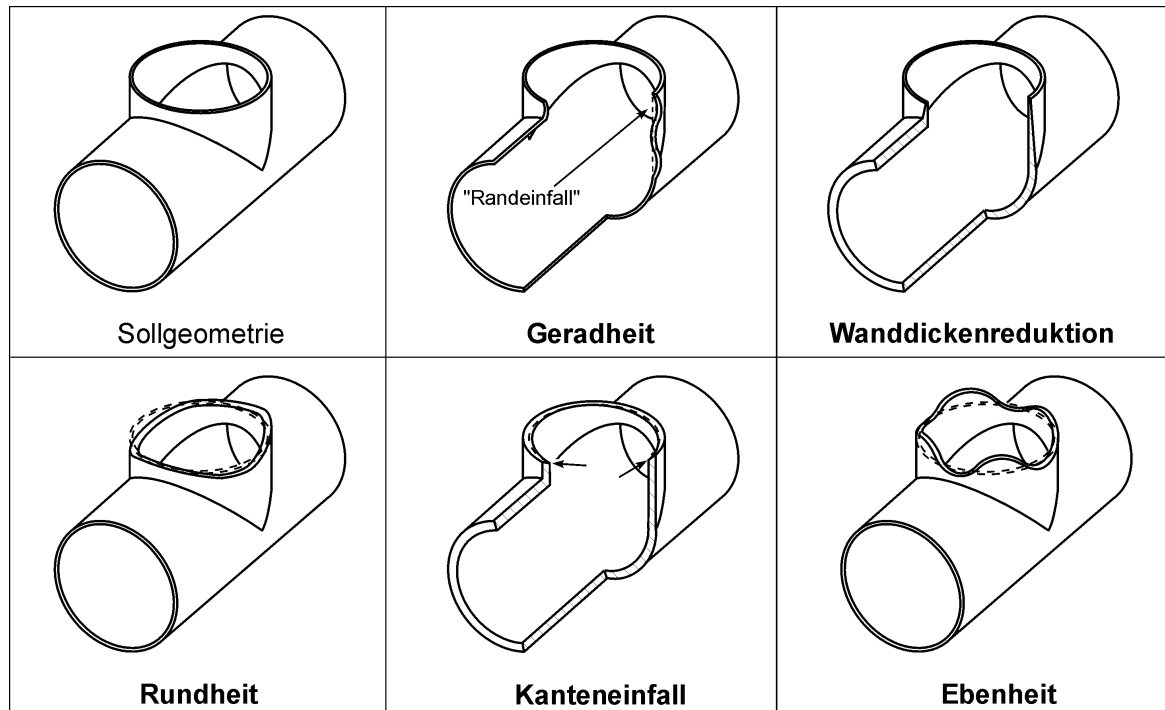


Bild 5.13: Formabweichungskatalog

Art und Größe der Form- und Maßabweichungen sind von der Vorlochgeometrie, der Formänderungsverteilung, den Werkzeugen, den Werkzeugen, den Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück sowie vom Eigenspannungszustand abhängig.

Der Eigenspannungszustand wird mit durch von Mises-Vergleichsspannungen nach der Umformung, die mit der FEM berechnet wurden, in Bild 5.14 dargestellt. Die Vergleichsspannungen sind in der Form des Bauteils gespeichert und charakterisieren den Eigenspannungszustand. Ggf. führen sie in Form der Rückfederung zur Deformation des Bauteils nach der Entlastung. Die Eigenspannungen lösen die Rückfederung nach Passieren des Aushalsstempels aus. Die Aushalsungswand federt zurück, nachdem das Werkzeug sich nicht mehr im Eingriff befindet. Eine Deformation durch die Eigenspannung kann auch in der Umgebung der Aushalsung nach der Umformung auftreten. D. h. die Formabweichungen sind nicht nur auf die Aushalsung beschränkt, sondern betreffen auch die Aushalsungsumgebung am Rohr. Charakteristisch ist die Eigenspannungswirkung in den am Matrizenradius angrenzenden Bereichen am Rohr (Bild 5.14). Die daraus

resultierende partielle Deformation des Rohres ist bei kleinen Rohrwanddicken wesentlich stärker ausgeprägt als bei dickwandigeren Rohren.

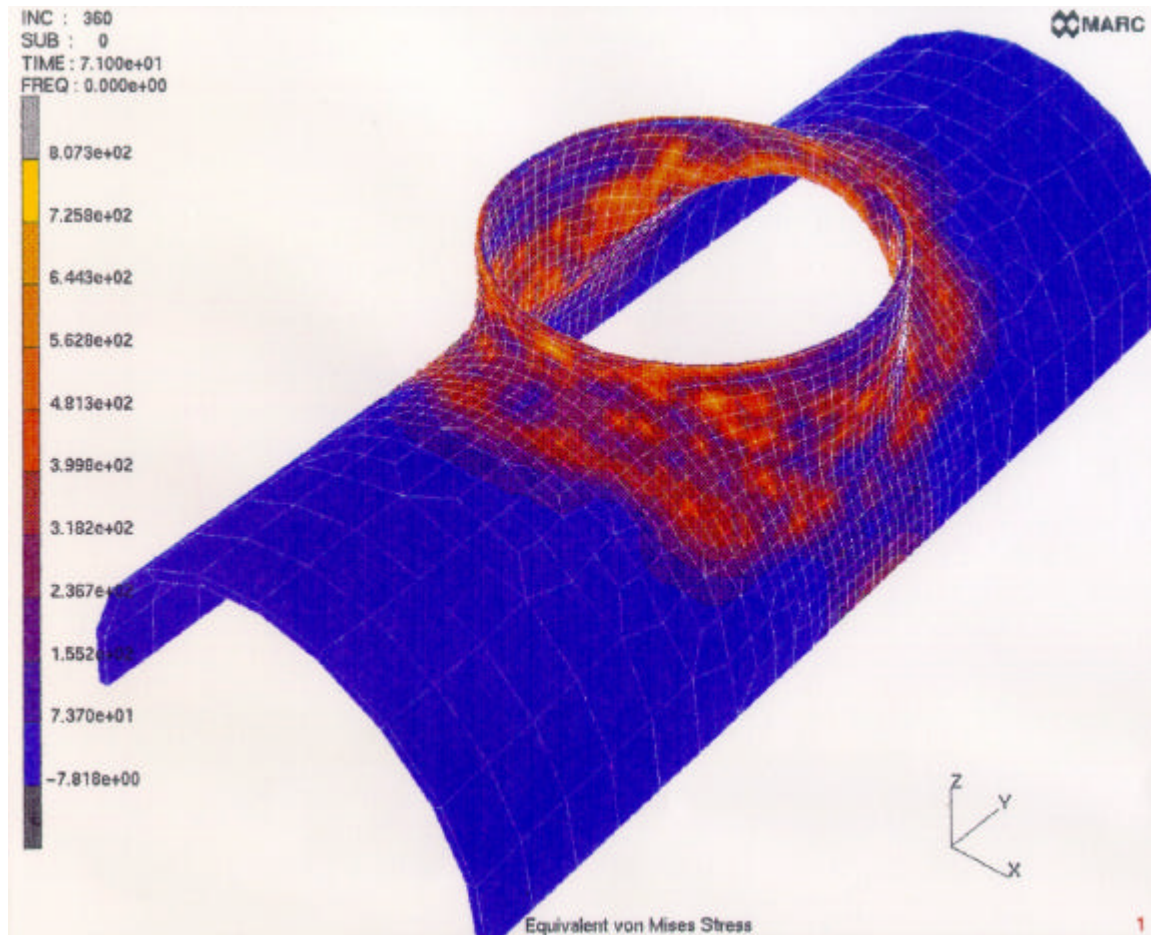


Bild 5.14: Eigenspannungszustand an der Aushalsung nach der Umformung

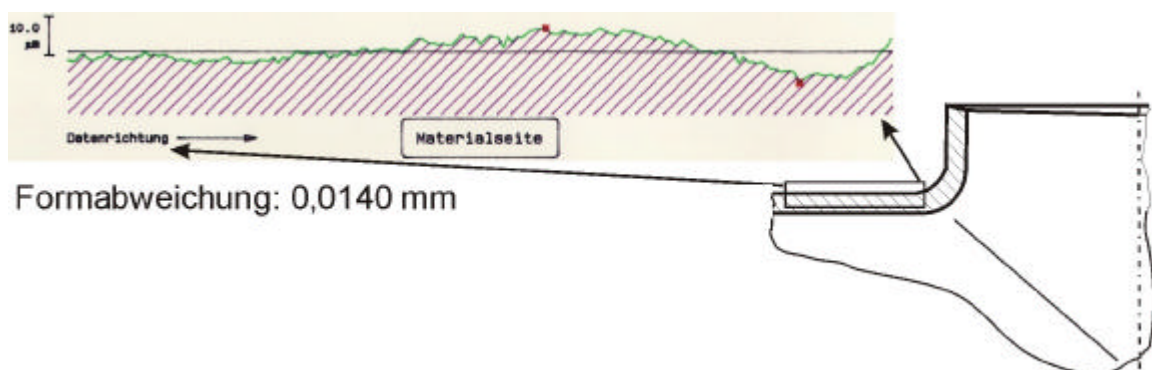


Bild 5.15: Formabweichung am oberen Rohrscheitel

Bild 5.15 veranschaulicht an Hand der Messung der Geradheitsabweichung des oberen Rohrscheitels im Übergang zur Aushalsung die Wirkung des Spannungs- und Formände-

rungszustandes auf die Aushalsumgebung. Durch den Biegevorgang am Matrizenradius kommt es zum Abheben des Materials von der darüberliegenden Matrize.

5.3.2.1 Zylindrizität der Aushalsungswand

Die Sollgeometrie einer Aushalsung stellt einen senkrecht auf dem Rohr stehenden Zylinder dar, der an der Durchdringungslinie mit dem Rohr verbunden ist. Die Istgeometrie der Aushalsung weist eine Zylindrizität, also eine Abweichung von der Zylinderform auf, deren Größe in Umfangsrichtung von der Rundheit und vom Rand zum Fuß der Aushalswand von der Geradheit abhängt.

Geradheit und Randeinfall

Die Wand der Aushalsung weist in senkrechter Richtung eine Geradheitsabweichung auf, die im Bereich des Aushalsungsrandes als Randeinfall bezeichnet wird. Über der Aushalsungshöhe betrachtet bewirkt dies ungleichmäßige Aushalsungsdurchmesser. Die Größe der Geradheitsabweichung hängt von der Rückfederung der Aushalsungswand, den werkzeugabhängigen Größen Kegelwinkel bzw. Rundungsradius sowie von unterschiedlichen Spannungszuständen und Kontaktbedingungen während der Umformung ab. Die Rückfederung ist über den Umfang der Aushalsung unterschiedlich stark ausgeprägt.

Der Einfluss der Stempelform resultiert aus dem Hin- und Rückbiegen des Wandungswerkstoffes durch den Aushalsstempel. Somit wirken sich der Stempelradius bzw. der Kegelwinkel und der Rundungsradius im Übergang zwischen Kegelfläche und zylindrischem Werkzeugteil, über die das umzuformende Material während des Aushalsvorganges gleitet, entscheidend auf die Geradheitsabweichung aus. Je kleiner der Rundungsradius zwischen Kegelfläche und zylindrischem Kalibrierabschnitt ausgeführt wird, desto größere Geradheitsabweichungen treten an der Aushalsungswand auf.

Am Fuß der Aushalsung bei Aushalsverhältnissen $d_A/d_R = 1$ wird, wie in Pkt. 5.2 beschrieben, die Geradheitsabweichung zusätzlich von der geänderten Kontaktzonenausbreitung zu Beginn der Umformung durch die Spreizkegelwerkzeuge beeinflusst.

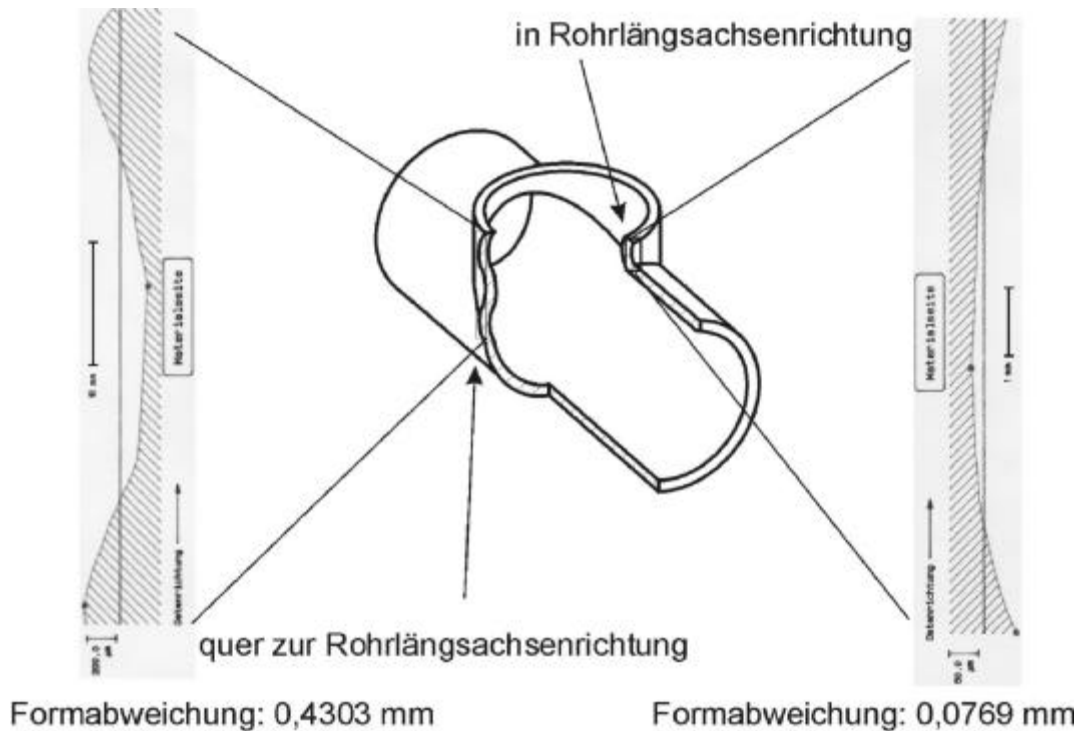


Bild 5.16: Geradheitsabweichungen der Aushalsungswand

Über dem Umfang der Aushalsung stellt sich die Geradheitsabweichung unterschiedlich stark ausgeprägt dar. Die Aushalsungswand am oberen Rohrscheitel weist eine geringere Formabweichung auf. Betrachtet man die um 90° versetzt gemessene Geradheitsabweichung der Aushalsungswand (Bild 5.16), so ist auch der Randeinfall in den Bereichen quer zur Rohrlängsachsenrichtung größer.

Wanddickenreduktion

Neben der bekannten Blechdickenreduktion in der Kragenwand beim Kragenziehen im ebenen Blech, die vom Kragenrand zum -fuß abnimmt, tritt beim Rohraushalsen zusätzlich eine unterschiedliche Wanddickenreduktion in Umfangsrichtung auf, da ein inhomogener Spannungs- und Formänderungszustand über dem Aushalsungsumfang vorliegt. Beim praktischen Einsatz müssen die unterschiedlichen Wanddicken des Aushalsungsrandes berücksichtigt werden.

Der Verlauf der Wanddickenreduktion in Umfangsrichtung weist, wie bereits bei der Formänderungsanalyse für φ_n ermittelt, die geringste Wanddicke des Aushalsungsrandes am oberen Rohrscheitel auf (Bild 5.17).

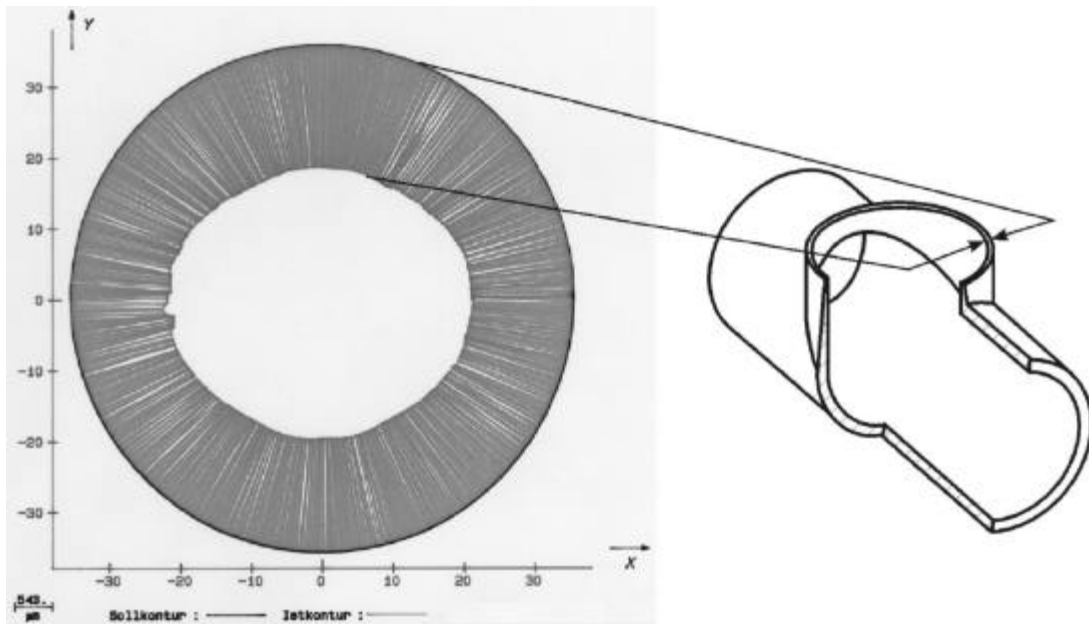


Bild 5.17: Wanddickenverlauf am Aushalsungsrand

Die Größe der Wanddickenreduktion ist vom örtlich vorherrschenden Spannungszustand und damit vom Aushalsverhältnis d_A/d_R , vom Werkstoff, von der Werkzeugform und von der Rohrwanddicke abhängig.

Rundheit der Aushalsungswand

Die Rundheit der Aushalsungswand charakterisiert die Abweichung des Aushalsungsinnen bzw. -außendurchmessers von der Kreisform. Die Rundheitsabweichung stellt eine komplexe Größe dar, die maßgeblich von der Geradheitsabweichung und der Wanddickenreduktion bestimmt wird. Generell muss zwischen der Rundheitsabweichung im Inneren der Aushalsung und der äußeren Wand unterschieden werden. Die Rundheitsabweichung der äußeren Aushalsungswand ist sehr viel größer als die Rundheitsabweichung der inneren Aushalsungswand (Bild 5.18, rechts), da zusätzlich auch die über dem Umfang inhomogene Wanddickenreduktion eingeht. Die in Pkt. 5.3.2.1 beschriebene unterschiedliche Größe der Geradheitsabweichung über dem Aushalsungsumfang wirkt sich auf die innere und die äußere Rundheitsabweichung aus, während die Wanddickenreduktion nur die äußere Rundheitsabweichung beeinflusst. Die Aushalsung besitzt eine Wandungshöhe, die vom Fuß der Aushalsung im Bereich quer zur Rohrlängsachsenrichtung zum Rand der Aushalsung am oberen Rohrscheitel stetig abnimmt. Über dem Umfang der Aushalsung besteht ein inhomogener Spannungs- und Formänderungszustand.

Deshalb ist die Rundheitsabweichung auch ein Kennzeichen des über dem Umfang wirkenden inhomogenen Eigenspannungszustandes nach erfolgter Umformung.

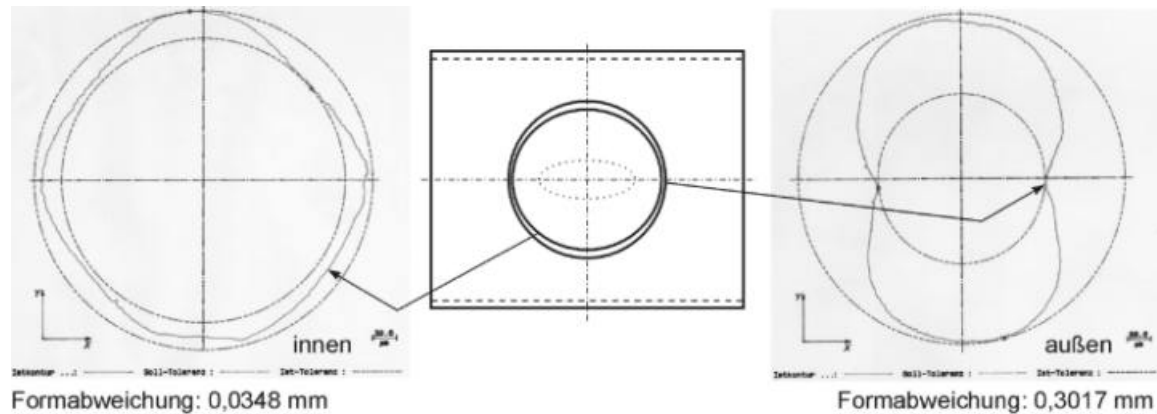


Bild 5.18: Innere und äußere Rundheitsabweichung der Aushalsung

Bild 5.18 links zeigt die typischen Rundheitsabweichungen des inneren Kragenrandes. Die Analyse der Rundheitsabweichung ergibt eine symmetrische Verteilung der Maximalwerte über dem Aushalsungsumfang. Diese stimmen mit den Positionen der maximalen Ebenheitsabweichung überein. Unterschiedlich große Aushalsungsdurchmesser besitzen auch unterschiedlich große Rundheitsabweichungen.

Insgesamt wird die Zylindrizität neben der Werkzeugform auch vom Rückfederungsverhalten des Werkstoffes, also von dessen Elastizitätsmodul, Streckgrenze und Verfestigungsexponenten beeinflusst. Die Zylindrizität ist verfahrensbedingt und kann durch Optimierung der genannten Einflussgrößen beim Aushalsen mit starrem Aushalsstempel in gewissen Grenzen verbessert, jedoch nicht vermieden werden. Lediglich ein Aushalsen mit flexiblem Aushalsstempel (Elastomerstempel) ermöglicht eine signifikante Verbesserung der Zylindrizität, vor allem der äußeren Aushalsungswand durch Anlegen bzw. Kalibrieren der Aushalsungswand in der Matrize. Diese Verfahrensvariante wird im Rahmen dieser Arbeit aber nicht betrachtet.

5.3.2.2 Kanteneinfall

Wie in Pkt. 2.2.1.5 beschrieben, ist beim Kragenziehen in ebenen Blechen bekannt, dass für unterschiedliche Stempelformen unterschiedliche Winkelstellungen des Kragenrandes auftreten. Wird für die Vorlochherstellung im Rohr das in der Praxis übliche Schneiden eingesetzt, macht sich diese Formabweichung aufgrund der Wölbung des Ausgangsteiles noch stärker bemerkbar. Es ergibt sich eine ungleichmäßige Winkelstellung der Vorloch-

schnittkante zur Blechoberfläche (Bild 5.19) und dadurch auch eine über dem Lochumfang unterschiedliche Dicke der zu schneidenden Rohrwand.

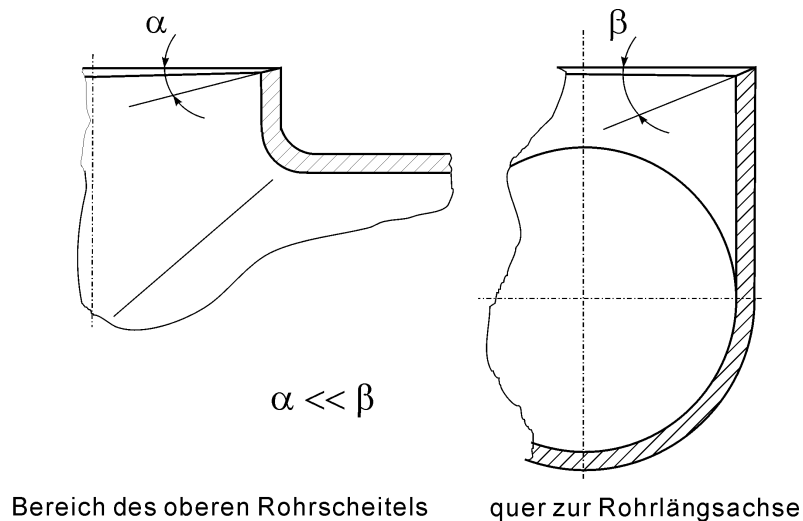


Bild 5.19: Winkelstellung des Aushalungsrandes bei Einsatz geschnittener Vorlöcher

Nach der Umformung besitzt der Rand der Aushalung einen größeren Kanteneinfall im Bereich quer zur Rohrlängsachsenrichtung gegenüber dem Bereich am oberen Rohrscheitel. Die Größe des Kanteneinfalls hängt neben der Stempelform auch von der Vorlochgröße, den Werkstoffeigenschaften, dem Matrizenradius, vom Aushalsverhältnis d_A/d_R und der Wanddicke ab.

Der Einfluss, den die gewölbte Form des Ausgangsteiles auf die Größe der Winkelstellung des Aushalungsrandes besitzt, lässt sich durch Wahl eines alternativen Fertigungsverfahrens für die Vorlochherstellung kompensieren. Verfahren, wie Laserschneiden, Wasserstrahlschneiden oder Fräsen, die eine Schrägstellung der Spindel bzw. Schneideinrichtungen nutzen, ermöglichen die Fertigung einer Vorlochschnittkante im Rohr, deren Lage an jedem Punkt senkrecht zur Rohroberfläche ist.

Versuche mit lasergeschnittenen Vorlöchern ergaben eine erhebliche Verringerung des Kanteneinfalls des Aushalungsrandes, wobei über dem gesamten Umfang der Aushalung ein nahezu gleichgroßer Fehler (3°) festgestellt wurde (Halbkugelstempel). Mit den o. g. alternativen Vorlochherstellungsverfahren kann dieser Kanteneinfall weiter verringert werden, indem der ermittelte Fehler bei der Stellung der Spindel bzw. Schneideinrichtung zur Rohroberfläche zusätzlich vorgehalten wird.

5.3.2.3 Ebenheit des Aushalsungsrandes

Beim Aushalsen besteht das Ziel, nach der Umformung einen Aushalsungsrand ohne spanende Nachbearbeitung zu erhalten, um für das Fügen der Aushalsung mit einem Abzweigungsrohr einen gleichmäßigen Schweißspalt zu gewährleisten.

Ebenheitsabweichungen des Aushalsungsrandes entstehen bei einer nicht geometrie- und verfahrensgerechten Vorlochgestaltung. Es können Ebenheitsabweichungen bis zu mehreren Millimetern auftreten. Durch Berücksichtigung der verfahrensspezifischen Einflussgrößen auf das Umformergebnis bei der Auslegung der Vorlochgeometrie, kann die Ebenheitsabweichung des Aushalsungsrandes minimiert werden. Die Auslegung der Vorlochgeometrie muss dabei die Vorlochabmessung und die Vorlochform umfassen.

Die Ebenheit des Aushalsrandes hängt maßgeblich von folgenden Größen ab:

- Vorlochgeometrie
- Aushalsverhältnis d_A/d_R
- Spannungs- und Formänderungszustand
- Werkzeugform
- Werkstoffeigenschaften des Rohres.

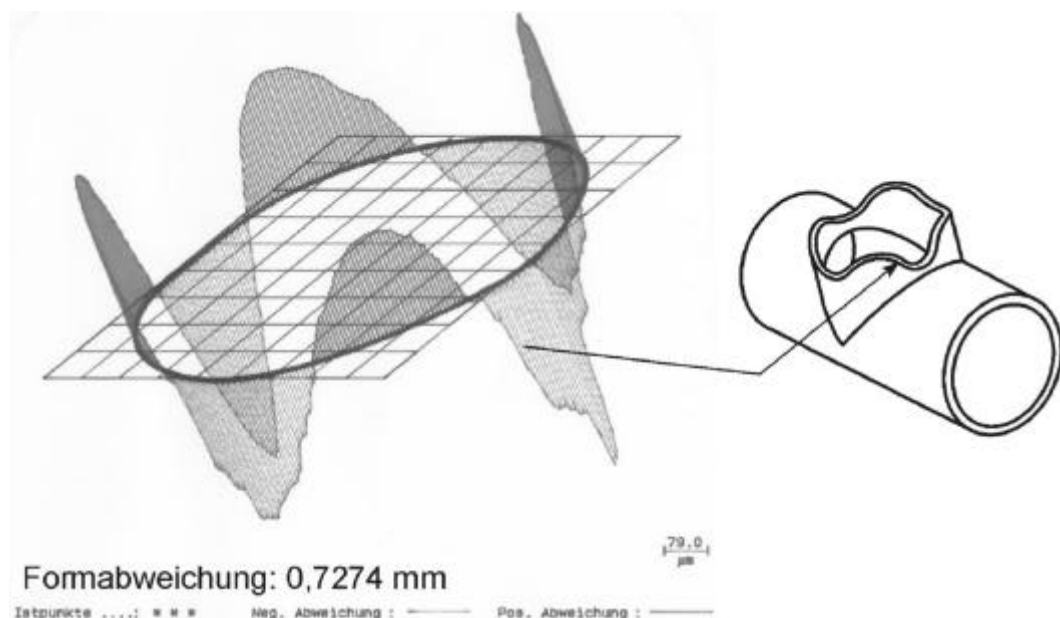


Bild 5.20: Ebenheit des Aushalsungsrandes

Bild 5.20 zeigt den typischen Verlauf der Ebenheit am Aushalsungsrand. Charakteristisch sind die vier Zipfel, deren Größe und Lage sowohl von den geometrischen Aus-

gangsgrößen als auch von den Festigkeits- bzw. und Anisotropieeigenschaften des Werkstoffes abhängen.

In der Formänderungsanalyse (Pkt. 5.2) wurde bereits die Wirkung des über dem Umfang der Aushalsung diskontinuierlich wirkenden Spannungszustandes beschrieben, der Ursache für unterschiedlich große Formänderungen ist. Die über dem Aushalungsumfang unterschiedlich großen radialen Formänderungen (φ_r) tragen in ihrer Summe ebenfalls zur Ebenheitsabweichung am Aushalungsrand bei.

5.4 Vorlochgeometrie

Die erfolgreiche Verfahrensdurchführung hängt beim Aushalsen von Rohren in entscheidendem Maße von der Vorlochgeometrie ab. Durch eine optimal gestaltete Vorlochgeometrie ist das Erreichen eines ebenen Aushalungsrandes möglich, so dass eine spanende Nachbearbeitung entfallen kann. Die Gestaltung der Vorlochgeometrie muss die Auslegung deren Größe und Form umfassen. Eine exakte Auslegung der Vorlochgeometrie trägt neben der Verbesserung der Ebenheit des Aushalungsrandes auch zum Erreichen einer maximalen Aushalungshöhe bei.

5.4.1 Vorlochabmessungen

Für das Aushalsen runder Durchzüge an Rohren wird eine Vorlochform benötigt, die einer Ellipse nahe kommt (s. Pkt. 2.1.4.1). Zur Berechnung von Ellipsen werden die Vorlochabmessungen in Form der großen Ellipsenachse a und der kleinen Ellipsenachse b benötigt. Die zur Vorlochellipsenberechnung notwendigen Achsenlängen a und b lassen sich zum Teil aus folgenden geometrischen Ausgangsgrößen ermitteln (Bild 5.21):

- Rohrinne Durchmesser d_R ,
- Aushalungsinne Durchmesser d_A ,
- Blechdicke s_0 ,
- Matrizenradius r_M und
- Aushalungshöhe H .

Zur exakten Vorlochauslegung für einen ebenen Aushalungsrand muss neben allen geometrischen Ausgangsgrößen auch der verfahrensspezifische Spannungs- und Formänderungszustand berücksichtigt werden. Da mit den aus der Literatur bekannten Berechnungsvorschriften für die Vorlochabmessungen (s. Pkt. 2.1.4.1) das nicht möglich ist, wird im Folgenden eine neue Berechnungsvorschrift für die Vorlochabmessungen (Ellipsenachsen a und b) entwickelt.

Für die große Vorlochachse a werden die geometrischen Ausgangsgrößen am oberen Rohrscheitel und für die kleine Vorlochachse b die geometrischen Ausgangsgrößen quer dazu an der gewölbten Seite der Rohrwand erfasst.

Die große Vorlochachse a wird in Abhängigkeit von den geometrischen Einflussgrößen nach folgender Gleichung berechnet:

$$a = ((4 - \nu)/2) (2r_M + s_0) + d_A - 2H(a). \tag{5.2}$$

Die Berechnung der kleinen Ellipsenachse b erfolgt aus:

$$b = (d_{Ra} - s_0) + \cos(\beta + \gamma). \tag{5.3}$$

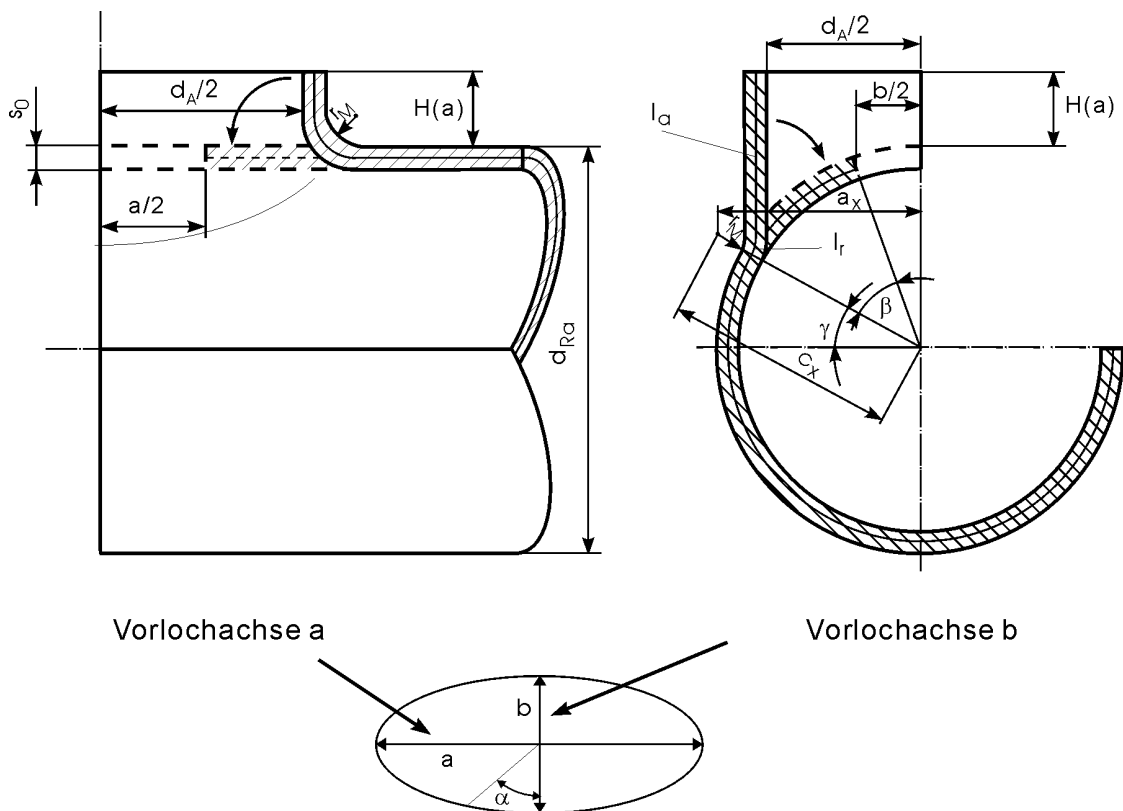


Bild 5.21: Geometrische Größen an der Aushalsung für die Vorlochberechnung

Die einzelnen Berechnungskomponenten, die für die Ellipsenachse b benötigt werden, berechnen sich wie folgt:

$$\mathbf{g} = \arccos(a_x / c_x) \quad (5.4)$$

$$a_x = (d_A / 2) + r_M + s_0 \quad (5.5)$$

$$c_x = (d_{Ra} / 2) + r_M \quad (5.6)$$

$$\mathbf{b} = (360^\circ (l_a + l_r)) / (\mathbf{p}(d_{Ra} - s_0)) \quad (5.7)$$

$$l_a = (d_{Ra} / 2) + H(a) - \sqrt{c_x^2 - a_x^2} \quad (5.8)$$

$$l_r = \mathbf{g}(r_M + s_0/2) (\mathbf{p}180^\circ). \quad (5.9)$$

Die auf diesem Wege berechneten Vorlochellipsenachsen berücksichtigen noch nicht die inhomogene Formänderungsverteilung über dem Aushalungsumfang mit der Ausbildung von Formänderungsmaxima am oberen Rohrscheitel. Ohne Berücksichtigung dieser Formänderungsmaxima besitzt die Aushalungswand am oberen Rohrscheitel eine geringere Höhe (Bild 5.22). Der Grund liegt bei den negativen Formänderungen in radialer Richtung ($\varphi_r < 0$), die in ihrer Summe eine Verringerung der Höhe der Aushalungswand im Bereich des oberen Rohrscheitels ergeben, während im Bereich quer dazu mitunter positive radiale Formänderungen auftreten. Dadurch kommt es bei Auslegung der Vorlochabmessungen nur nach den geometrischen Ausgangsgrößen in den unterschiedlichen Bereichen (Bereiche 3 (0°) und 1, (90°)) zu einer Ebenheitsabweichung des Aushalungsrandes, die durch unterschiedliche Aushalungshöhen über dem Umfang des Aushalungsrandes hervorgerufen werden:

$$\mathbf{DH} = H(b) - H(a). \quad (5.11)$$

Für die Berechnung der Vorlochachsen a und b bedeutet das Eintreten dieser Aushalungshöhendifferenz ΔH , dass neben den Ausgangs- und Endteilabmessungen, wie Rohr-, Vorloch- und Aushalungsabmessungen auch der Einfluss des Werkstoffes berücksichtigt werden muss. Die sich einstellende Aushalungshöhendifferenz ΔH muss bei den Vorlochellipsenachsen vorgehalten werden.

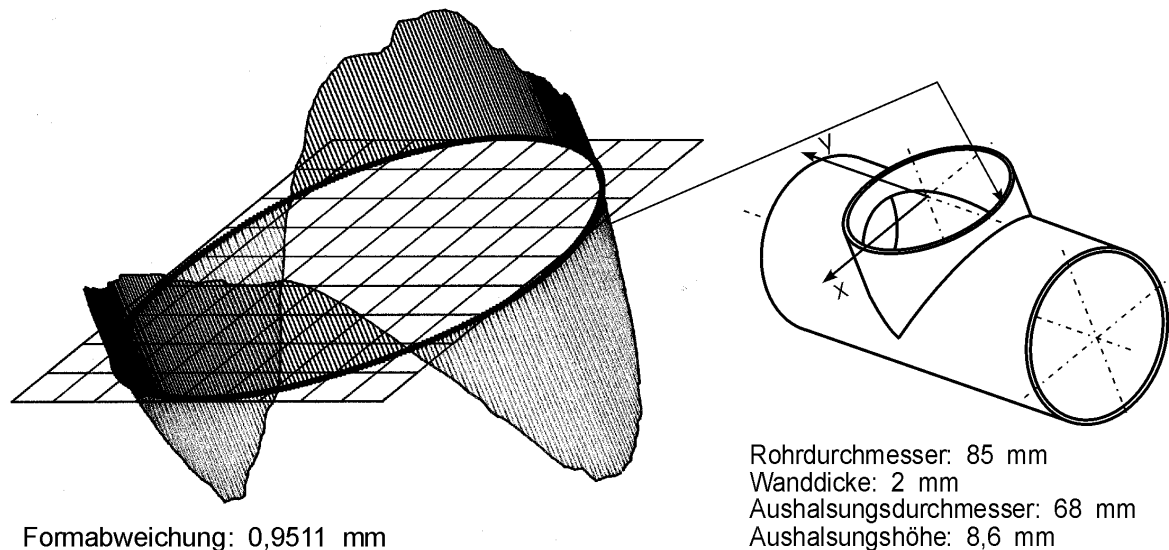


Bild 5.22: Ebenheit des Aushalsungsrandes ohne Vorlochanpassung

Deshalb ist für die Gestaltung einer anforderungsgerechten Vorlochgeometrie neben den geometrischen Größen auch die Einbeziehung des Werkstoffverhaltens erforderlich

$$a, b = f(H, d_R; d_A; s_0; r_M; \text{Werkstoff}). \quad (5.10)$$

Bei der experimentellen Überprüfung der aus Glg. 5.2 bis 5.9 durch Abwicklung berechneten Vorlochellipsenachsen wurde ermittelt, dass diese angepasst werden müssen. Mit steigender Aushalsungshöhe wird die Differenz zwischen den durch Abwicklung berechneten Vorlochellipsenachsen und den im Experiment ermittelten Vorlochellipsenachsen größer. Die Abhängigkeit der Vorlochellipsenachsen von der Aushalsungshöhe ist linear (Bild 5.23). Beide Vorlochachsen steigen mit größer werdendem Rohrdurchmesser logarithmisch an.

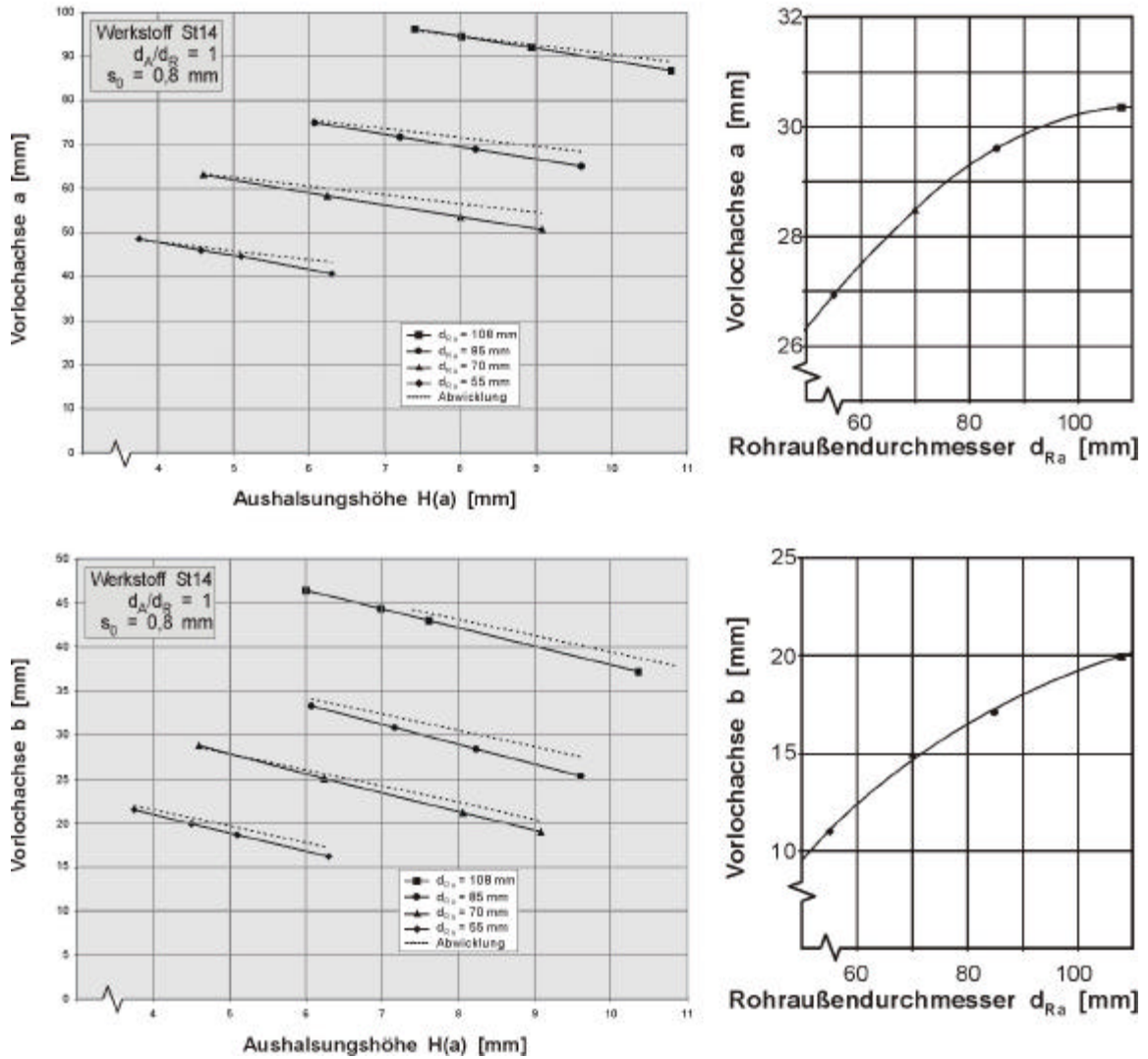


Bild 5.23: Vorlochachsen in Abhängigkeit von der Aushalsungshöhe für unterschiedliche Rohrdurchmesser

Der Anstieg dieser Geraden ändert sich in Abhängigkeit vom eingesetzten Werkstoff (Bild 5.24). Bei gleicher Vorlochabmessung ist die Aushalsungshöhe beim Werkstoff St 14 werkstoffbedingt kleiner als beim ZStE 250i. Das bedeutet, dass für das Erreichen der gleichen Aushalsungshöhe die Vorlochellipsenachsen für den St 14 größer zu dimensionieren sind als für den ZStE 250i.

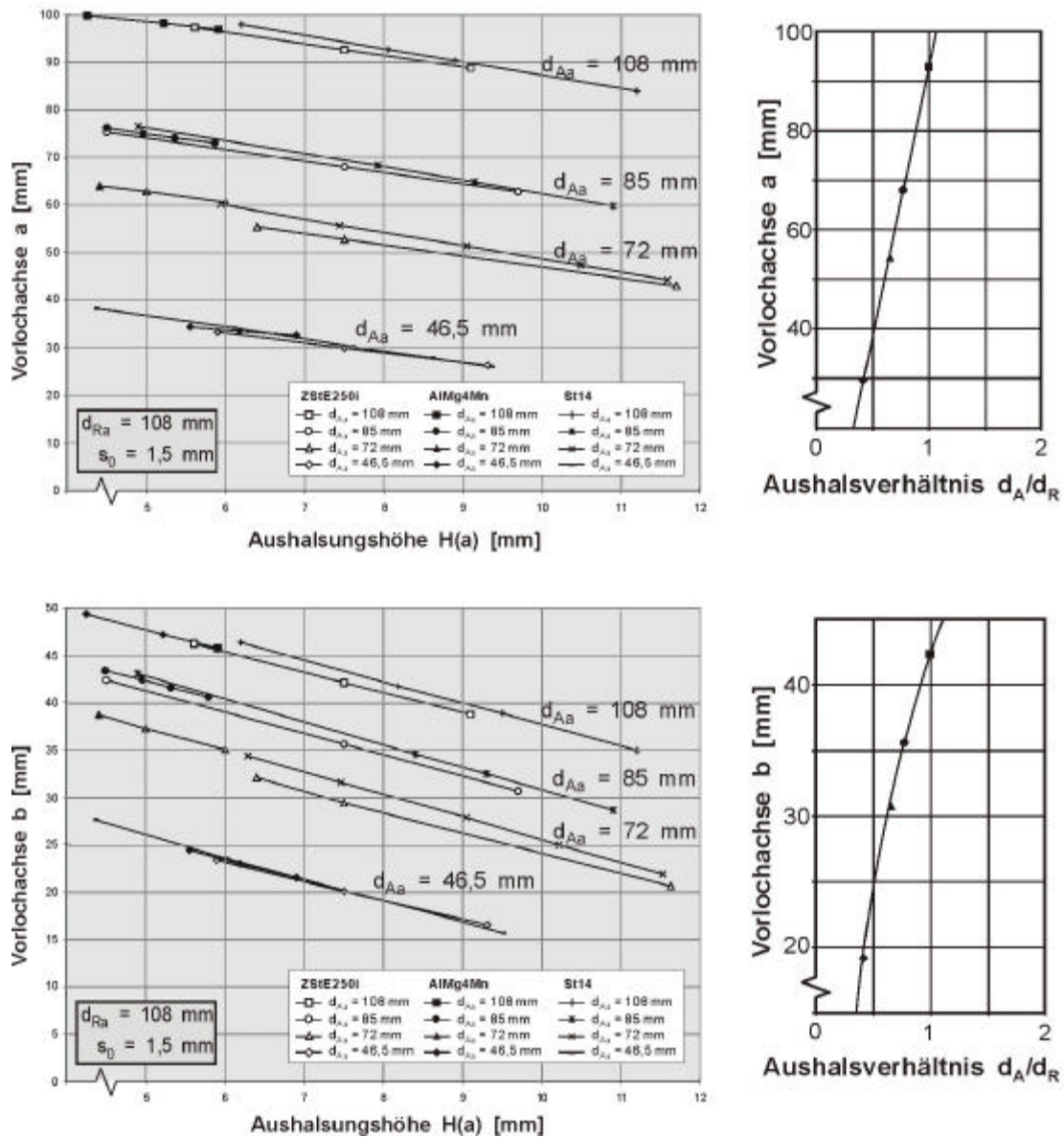


Bild 5.24: Vorlochachsen in Abhängigkeit von der Aushalsungshöhe für unterschiedliche Werkstoffe

Bild 5.25 zeigt für einen ausgewählten Rohrdurchmesser mit mehreren Aushalsungsdurchmessern (Aushalsverhältnissen) eine lineare Abhängigkeit der experimentell ermittelten Vorlochachsen a und b von der Aushalsungshöhe $H(a)$. Mit steigender Aushalsungshöhe nimmt die erforderliche Vorlochabmessung linear ab. Für die unterschiedlichen Aushalsverhältnisse ergeben sich nahezu parallele Verläufe der Geraden.

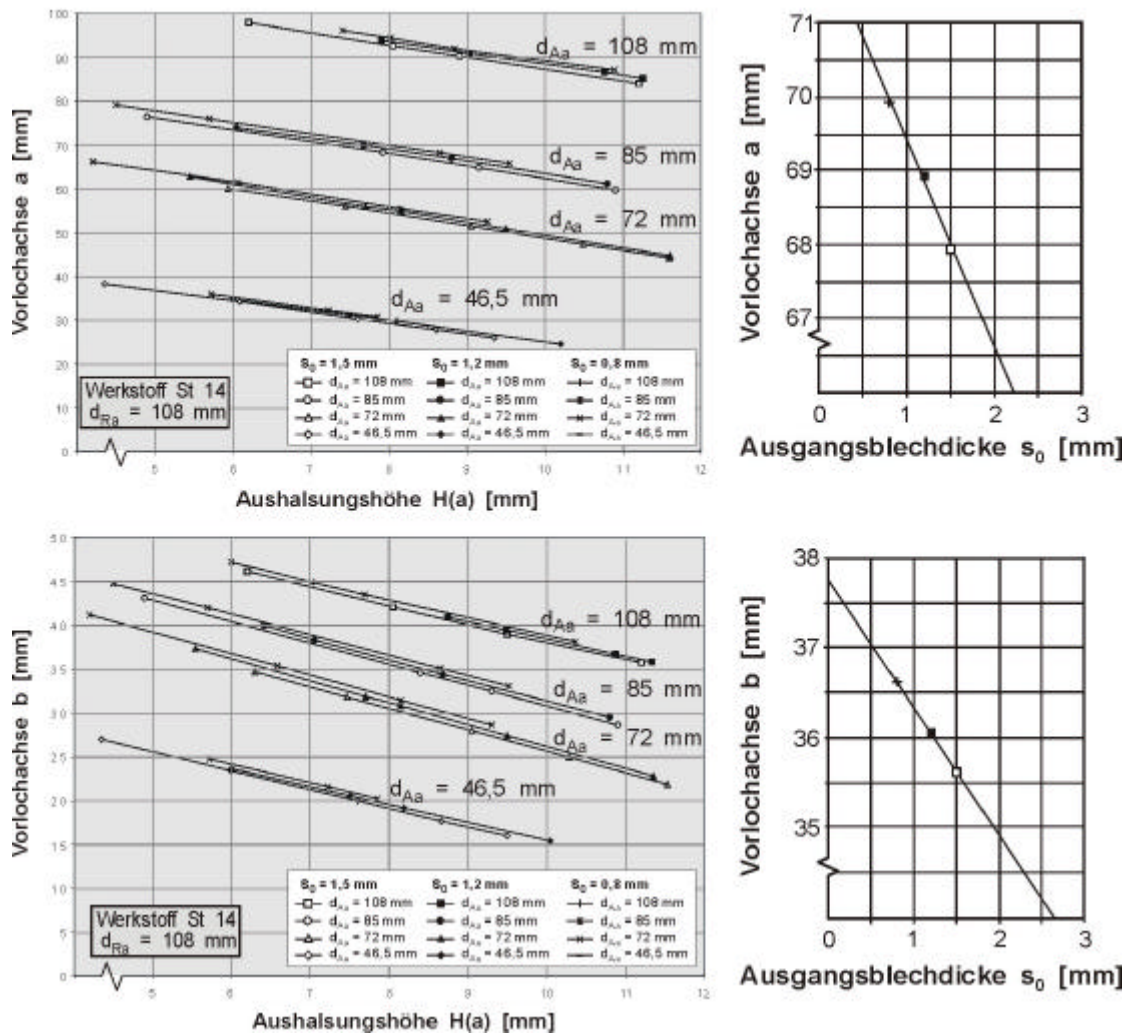


Bild 5.25: Vorlochachsen in Abhängigkeit von der Aushalsungshöhe für unterschiedliche Ausgangsblechdicken

Bei gleichem Aushalsungsaußendurchmesser aber kleinerer Ausgangsblechdicke des Rohres, ist eine Vergrößerung der Vorlochachsen erforderlich. Ein Grund dafür liegt beim minimal abweichenden Aushalsverhältnis d_A/d_R (Aushalsungsinwenddurchmesser zu Rohrinwenddurchmesser) für unterschiedliche Blechdicken, da der Außendurchmesser der Aushalsung bei unterschiedlichen Blechdicken beibehalten, der jeweilige Aushalsungsinwenddurchmesser jedoch abweicht.

Zwischen den geometrisch errechneten Größen und den im Versuch ermittelten Größen für die Vorlochachsen besteht ein linearer Zusammenhang, wobei die experimentell ermittelte Aushalsungshöhe nahezu immer kleiner als der analytisch durch Abwicklung berechnete Wert ist. Durch lineare Regression zwischen der im Experiment gemessenen Aushalsungshöhe H_p und der aus den geometrischen Ausgangsgrößen berechneten Aushalsungshöhe H_{th} für die jeweiligen Vorlochachsen erhält man eine Geradengleichung,

die den Einfluss des Werkstoffes widerspiegelt. Die bestimmenden Werkstoffkennwerte sind in diesem Fall die Zugfestigkeit R_m die Gleichmaßdehnung A_g und der Verfestigungsexponent n .

In die Geradengleichung für die gemessene Aushalsungshöhe mit

$$H_p = C_m * H_{th} + C_n \quad (5.12)$$

geht der Werkstoffeinfluss durch den Geradenanstieg C_m und den Wert für C_n ein. Für die Berechnung der Vorlochachse a wird H_p in Gleichung (5.2) eingesetzt, wobei als C_m die Konstante C_1 und als C_n die Konstante C_2 vorgegeben wird, so dass sich für a ergibt:

$$a = ((4 - \mathbf{p})/2) (2r_M + s_0) + d_A - 2(C_1 * H(a) - C_2). \quad (5.13)$$

In der Berechnung der Vorlochachse b entspricht C_3 der Konstante C_m und C_4 der Konstante C_n , die in Gleichung (5.8) eingesetzt werden, so dass sich für die Länge l_a ergibt:

$$l_a = (d_{Ra} / 2) + (C_3 * H(a) - C_4) - \sqrt{c_x^2 - a_x^2} \quad (5.14)$$

C_1 bis C_4 stellen damit im Experiment ermittelte, werkstoffabhängige Konstanten dar, deren Betrag von den Festigkeits- und Umformeigenschaften des Werkstoffes sowie von den Formänderungsbedingungen in den charakteristischen Bereichen der Vorlochachsen bestimmt wird. Die ermittelten Berechnungsvorschriften beziehen die Gleichmaßdehnung A_g , die Zugfestigkeit R_m und den Verfestigungsexponenten n ein. Die durch C_1 und C_2 mögliche Korrektur der Vorlochellipsenachsen a kompensiert die Ebenheitsabweichung des Aushalsungsrandes am oberen Rohrscheitel (Bereich 3, (0°)). C_3 und C_4 kompensieren bei der Vorlochellipsenachse b die Ebenheitsabweichung im Bereich quer dazu (Bereich 1, (90°)).

In den experimentellen Untersuchungen wurde ein direkter Einfluss des Verfestigungsexponenten n auf die Aushalsungshöhe $H(a)$ festgestellt.

Die Konstante C_1 , die in die Berechnung für a einfließt, berechnet sich nach:

$$C_1 = 1,1 + n. \quad (5.15)$$

Der Wert des Faktors C_2 ist hauptsächlich auf die Werkstoffparameter Gleichmaßdehnung A_g , Zugfestigkeit R_m und den Verfestigungsexponenten n zurückzuführen, so dass sich ergibt:

$$C_2 = A_g / \ln R_m - 13,5n. \quad (5.16)$$

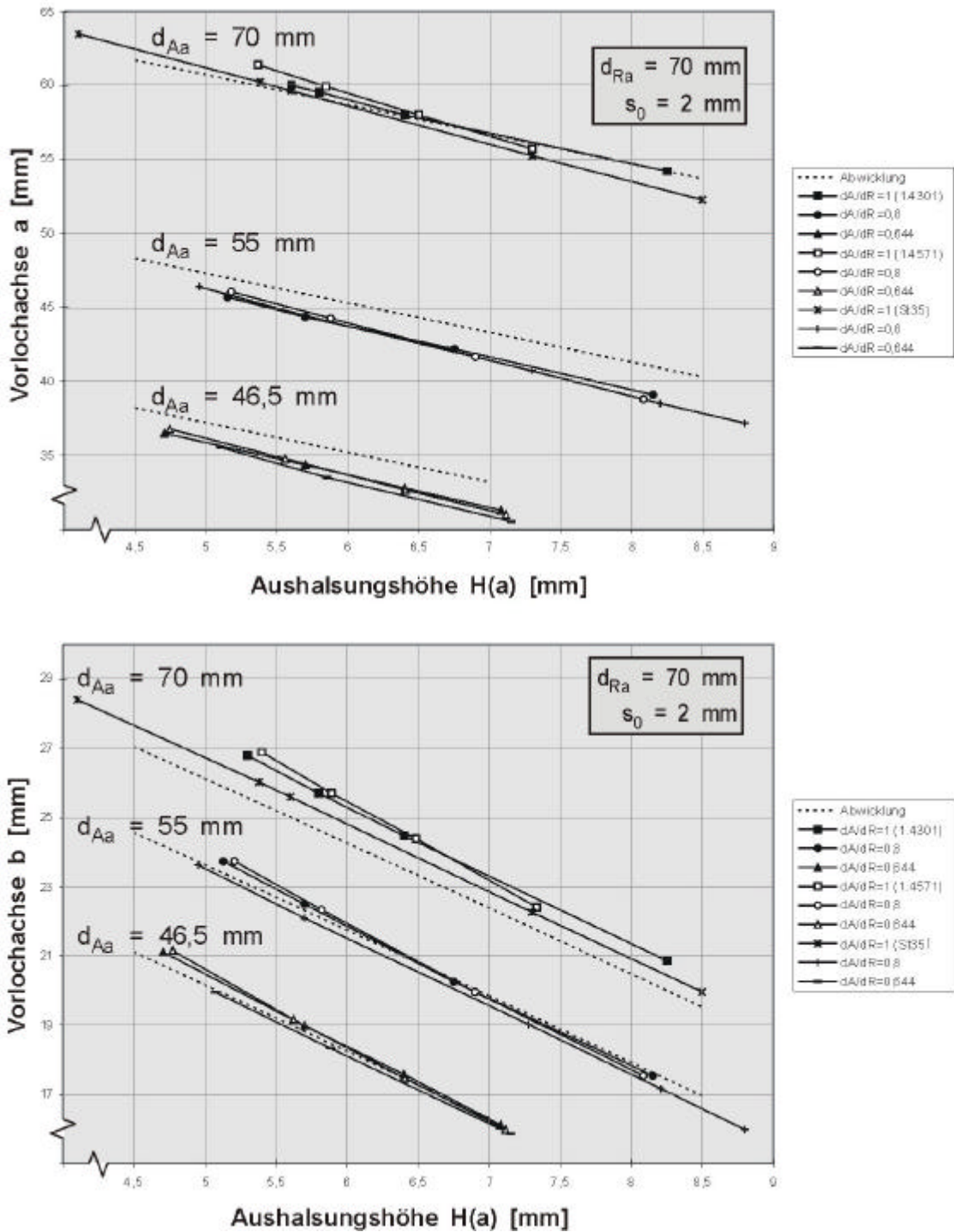


Bild 5.26: Vorlochachsen in Abhängigkeit von der Aushalsungshöhe für unterschiedliche Aushalsungsdurchmesser

Der in Bild 5.26 u.a. dargestellte Vergleich zwischen experimentell und durch Abwicklung ermittelten Vorlochachsen zeigt, dass die im Experiment gemessene Aushalsungshöhe nahezu immer kleiner ist, als der theoretisch berechnete Wert. Die Ursache liegt in den negativen radialen Formänderungen (vgl. 5.6). Eine Ausnahme besteht bei Verwen-

dung kegelförmiger Aushalsstempel bzw. von Spreizkegelwerkzeugen (vgl. Pkt. 5.2), durch deren Einsatz im Bereich quer zur Rohrlängsachse (Bereich b) mitunter positive radiale Formänderungen auftreten, die zu einer größeren praktischen Aushalsungshöhe führen, als durch Abwicklung der Aushalsungswand auf das Rohr ermittelt wurden (Bild 5.7).

Die Faktoren C_1 und C_2 dienen auch zur Berechnung der Aushalsungshöhe im Bereich des oberen Rohrscheitels, so dass sich für $H(a)$ ergibt:

$$H(a) = (2 C_1)^{-1} (d_A + ((4-p)/2) (2r_M+s_0)-a-2C_2, \quad (5.17)$$

Für die genaue Bestimmung der Vorlochachse b ergibt sich prinzipiell die gleiche Vorgehensweise wie bei der Berechnung der Vorlochachse a. Die Regressionskonstanten C_3 und C_4 werden in Gleichung (5.14) eingesetzt, die der Berechnung von b (Glg. 5.3) dient. Die im Experiment ermittelten Konstanten C_3 und C_4 unterscheiden sich von C_1 und C_2 durch einen geringeren Betrag, der auf die kleineren Formänderungen in den Bereichen quer zur Rohrlängsachse (b) zurückzuführen ist. C_3 errechnet sich aus:

$$C_3 = 0,9 + n \quad (5.18)$$

und C_4 aus:

$$C_4 = A_g / \ln R_m - 7,35 \sqrt{n}. \quad (5.19)$$

Die Überprüfung der Genauigkeit der berechneten Vorlochachsen a und b (Differenz der Aushalsungshöhe $\Delta H = \pm 0,2$ mm) für alle untersuchten Werkstoffe mit einer Blechdickenvariation von 0,8 mm bis 3 mm ergab eine Abweichung zwischen der berechneten und der gemessenen Aushalsungshöhe von maximal $\pm 1,2$ %.

Die Berücksichtigung der Anisotropieeigenschaften (planare Anisotropie Δr und senkrechte Anisotropie r) zur Berechnung der Vorlochachsen ist aufgrund zu großer Abweichungen der Werte bei scheinbar gleicher Umformung für das Aushalsen nicht möglich. Die Ergebnisüberprüfung an dem quasiisotropen höherfesten Werkstoff ZStE 250i ermöglichte ebenfalls keine Verifizierung. Der Vergleich der planaren Anisotropie zeigt Beträge von "null" (ZStE 250i) bis 1,04 (St 14) (vgl. Pkt. 4.2.2.2) bei nahezu gleicher Umformung der Werkstoffe für das Aushalsen.

5.4.2 Vorlochform – Aufweitungskoeffizient k

Zur Beschreibung der Vorlochform wird in der Praxis hauptsächlich auf die Methode der Korbbogenkonstruktion (vgl. Pkt. 2.1.4.1) zurückgegriffen. Dadurch ist die genaue Abbildung der erforderlichen elliptischen Vorlochkontur nur bedingt gegeben. Eine Möglichkeit die Vorlochform aus den geometrischen Eingangsgrößen zu berechnen besteht darin, durch numerische Berechnung die Aushalsungswand in der ungelängten Faser auf das Rohr abzuwickeln. Mit dieser Methode lassen sich Vorlöcher für beliebige Aushaltungsformen numerisch berechnen [127]. Diese numerische Berechnung stellt prinzipiell eine Erweiterung der in Pkt. 2.1.4.1 beschriebenen Methode zur Vorlochellipsenachsenberechnung für a und b dar. Durch die numerische Methode werden nicht nur die Vorlochachsen, sondern eine beliebig vorgebbare Punktemenge der Vorlochgeometrie berechnet (Berechnungsmakro s. Anlage A.4).

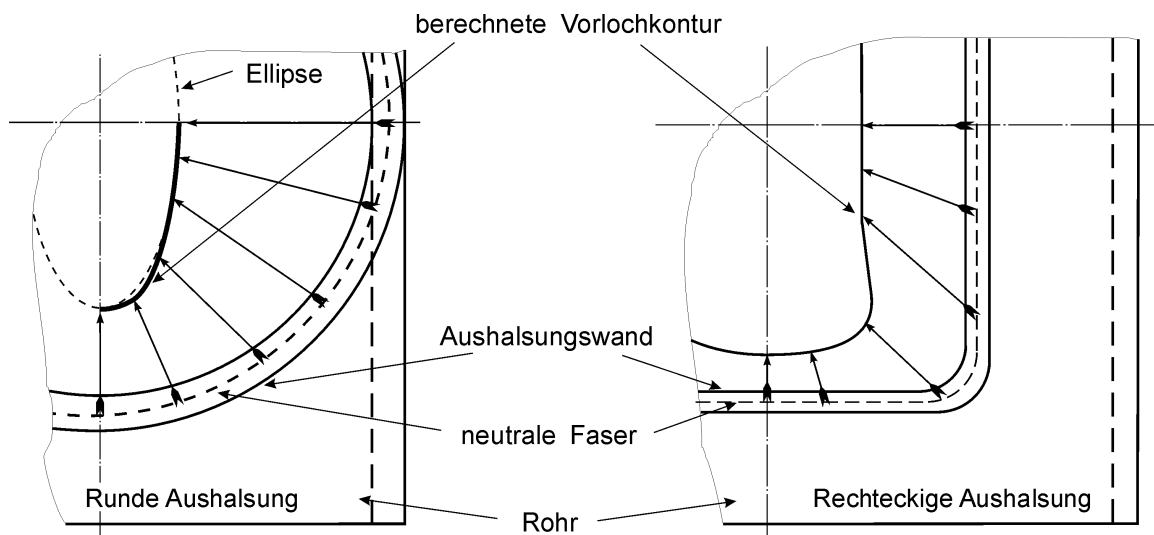


Bild 5.27: Prinzip der Vorlochberechnung durch Abwickeln der Aushalsungswand

In Bild 5.27 ist das Abwicklungsprinzip für eine runde (links) und eine rechteckige (rechts) Aushalsung dargestellt. Eine analytische Beschreibung der Ellipsenform ist mit den allgemeinen Ellipsengleichungen

$$x = a/2 \sin \alpha \quad (5.20)$$

$$y = b/2 \cos \alpha \quad (5.21)$$

möglich. Für die Beschreibung der durch numerische Abwicklung berechneten Vorlochkontur ist diese analytische Beschreibung unzureichend. Deshalb muss die allgemeine Ellipsengleichung modifiziert werden. Durch einen zusätzlichen Aufweitungsteil, der

mit dem Aufweitungskoeffizienten k (Glg.5.28) und einer Winkelfunktion beschrieben wird, kann die anforderungsgerechte Vorlochform mit einer beliebig großen Aufweitung der elliptischen Grundform beschrieben werden:

$$x = a/2 \sin \mathbf{a} \pm k \cos \mathbf{a} \quad (5.22)$$

$$y = b/2 \cos \mathbf{a} \pm k \sin \mathbf{a} \quad (5.23)$$

Für die Berechnung der aufgeweiteten Ellipsenform im Koordinatensystem (Bild 5.28) ist der Vorzeichenwechsel in den vier symmetrischen Quadranten erforderlich:

1. und 3. Quadrant $x = a/2 \sin \mathbf{a} + k \cos \mathbf{a} \quad (5.24)$

$$y = b/2 \cos \mathbf{a} + k \sin \mathbf{a} \quad (5.25)$$

2. und 4. Quadrant $x = a/2 \sin \mathbf{a} - k \cos \mathbf{a} \quad (5.26)$

$$y = b/2 \cos \mathbf{a} - k \sin \mathbf{a} \quad (5.27)$$

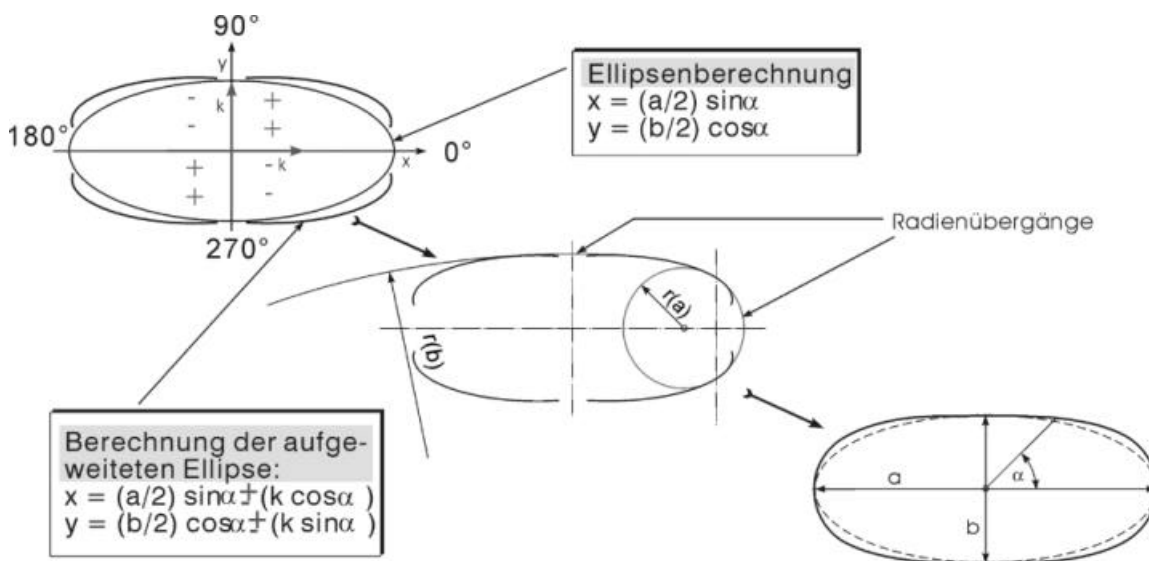


Bild 5.28: Berechnungsprinzip der aufgeweiteten Ellipse

Zur numerischen Berechnung der aufgeweiteten Ellipse kommt ein Software-Programm zum Einsatz, das die einzelnen Graphen mit Verrundungsradien verbindet (Bild 5.29). Durch Tangentenberechnung werden die Start- und Endpunkte der Verrundungsradien ermittelt.

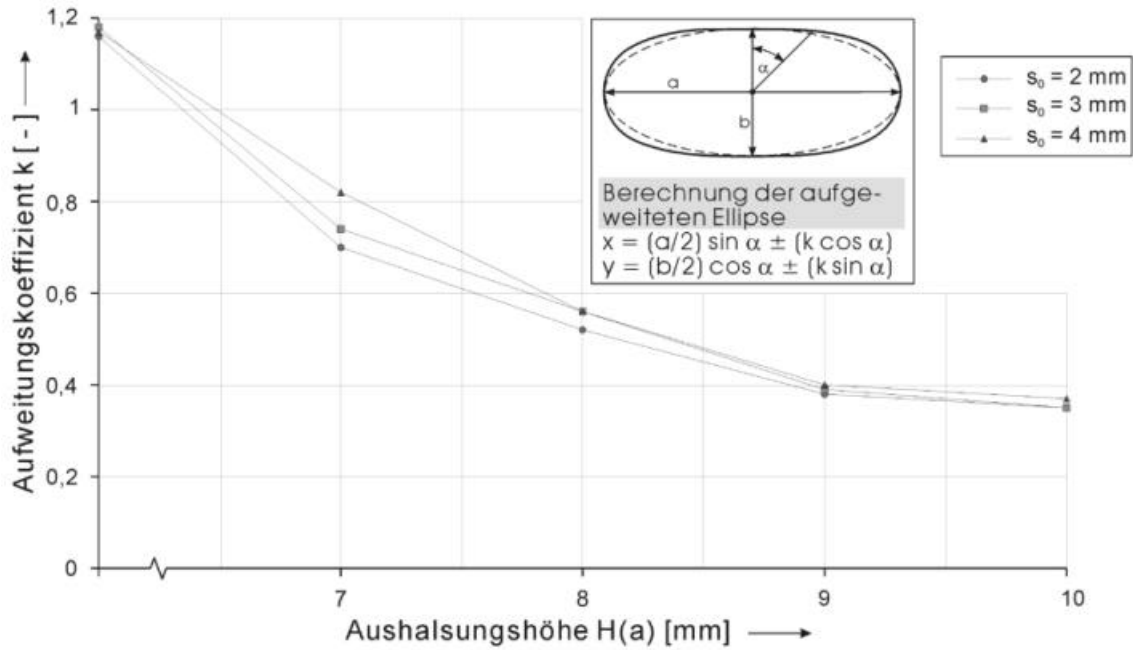


Bild 5.30: Abhängigkeit des Aufweitungskoeffizienten k von der Aushalsungshöhe

Der Einfluss der Blechdicke auf den Aufweitungskoeffizienten k, unter ausschließlicher Betrachtung der geometrischen Eingangsgrößen, ist vergleichsweise gering.

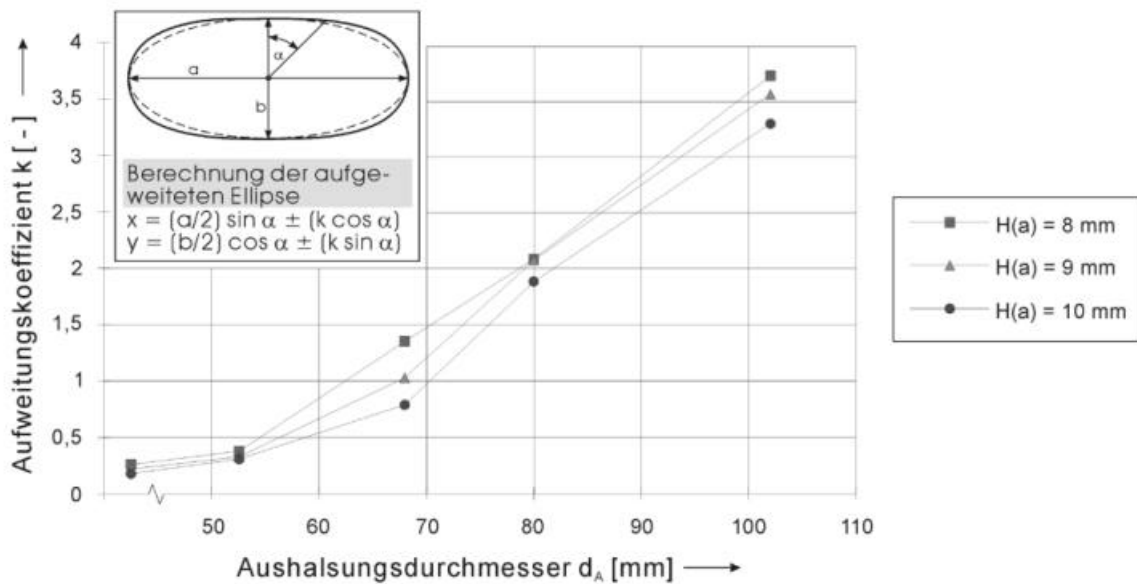


Bild 5.31: Abhängigkeit des Aufweitungskoeffizienten k vom Aushalsungsdurchmesser

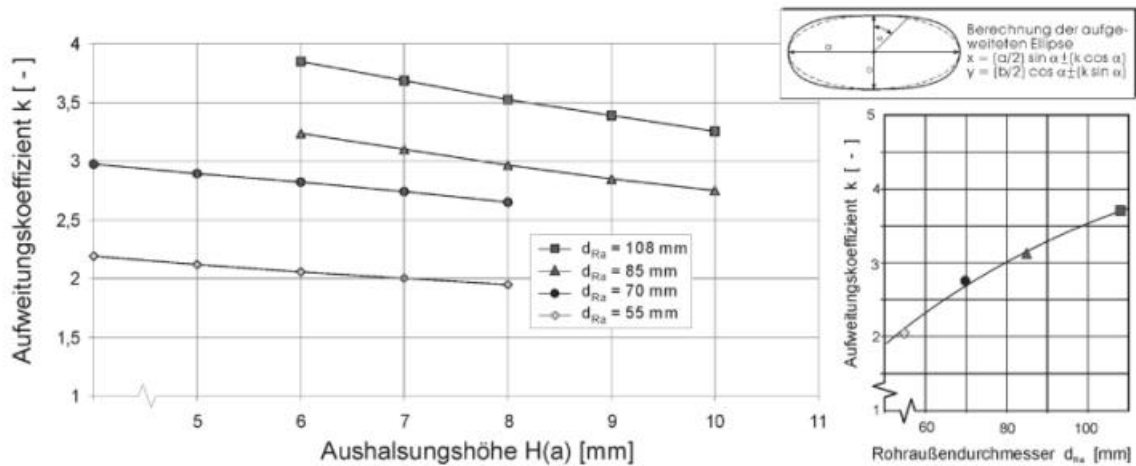


Bild 5.32: Abhängigkeit des Aufweitungskoeffizienten k von der Aushalsungshöhe

Die durch Abwicklung der Aushalsungswand berechneten Ausgangsöffnungen berücksichtigen in ihrer Form nicht die Formänderungen die an der Aushalsung auftreten und müssen korrigiert werden.

Die experimentell ermittelte Ausgangsöffnung für eine Aushalsung weicht neben ihrer Größe auch in ihrer Form von der durch Abwicklung berechneten Ausgangsöffnung ab.

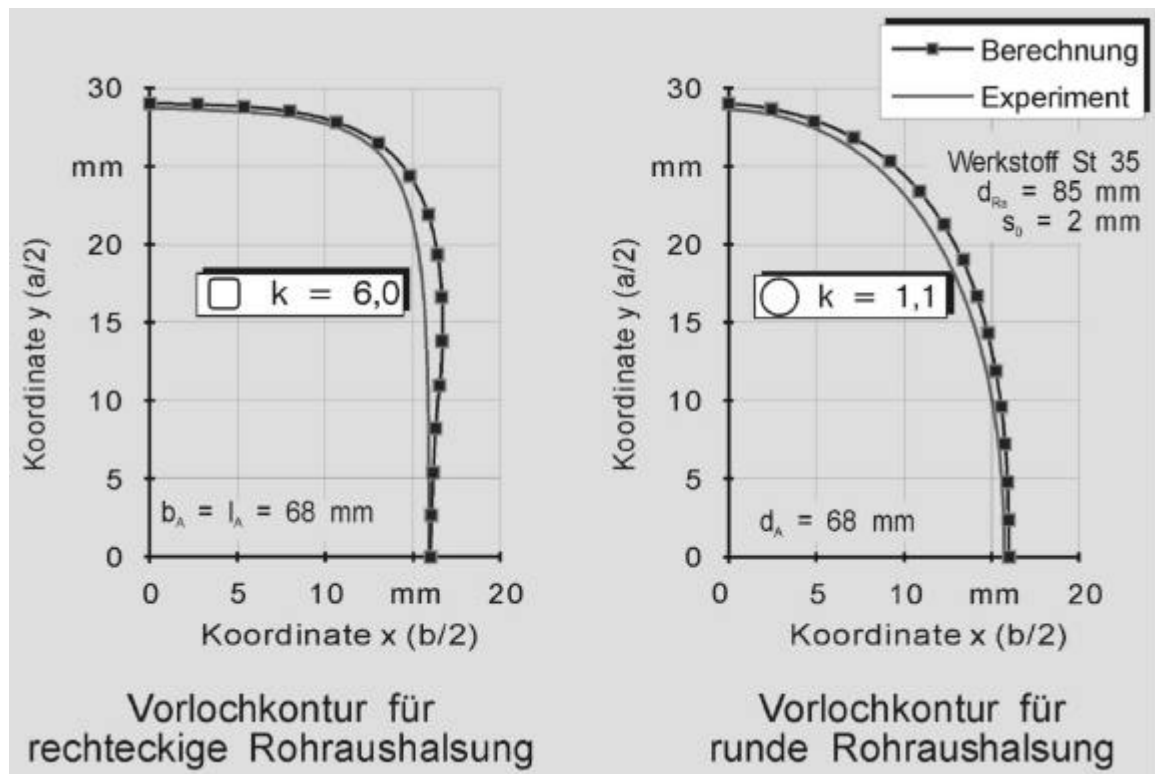


Bild 5.33: Graphischer Vergleich zwischen experimentell ermittelter und durch Abwicklung der Aushalsung berechneter Vorlochkontur

Bild 5.33 zeigt für eine runde und für eine rechteckige Aushalsung graphisch den Vergleich zwischen der experimentell ermittelten und durch Abwicklung berechneten Vorlochkontur. Die für eine Minimierung der Ebenheitsabweichung des Aushalungsrandes korrigierte Vorlochgeometrie ist für beide Aushalsungen kleiner.

Die Vorlochauslegung für quadratische bzw. rechteckige Aushalsungen weist Analogien zur Vorlochauslegung runder Aushalsungen auf. Es ergibt sich eine ähnliche Vorlochform, so dass derselbe Berechnungsalgorithmus für die Vorlochkontur (Glg. (5.24) bis (5.27)) unter Einbeziehung entsprechend größerer Aufweitungskoeffizienten k für rechteckige Aushalsungen verwendet werden kann.

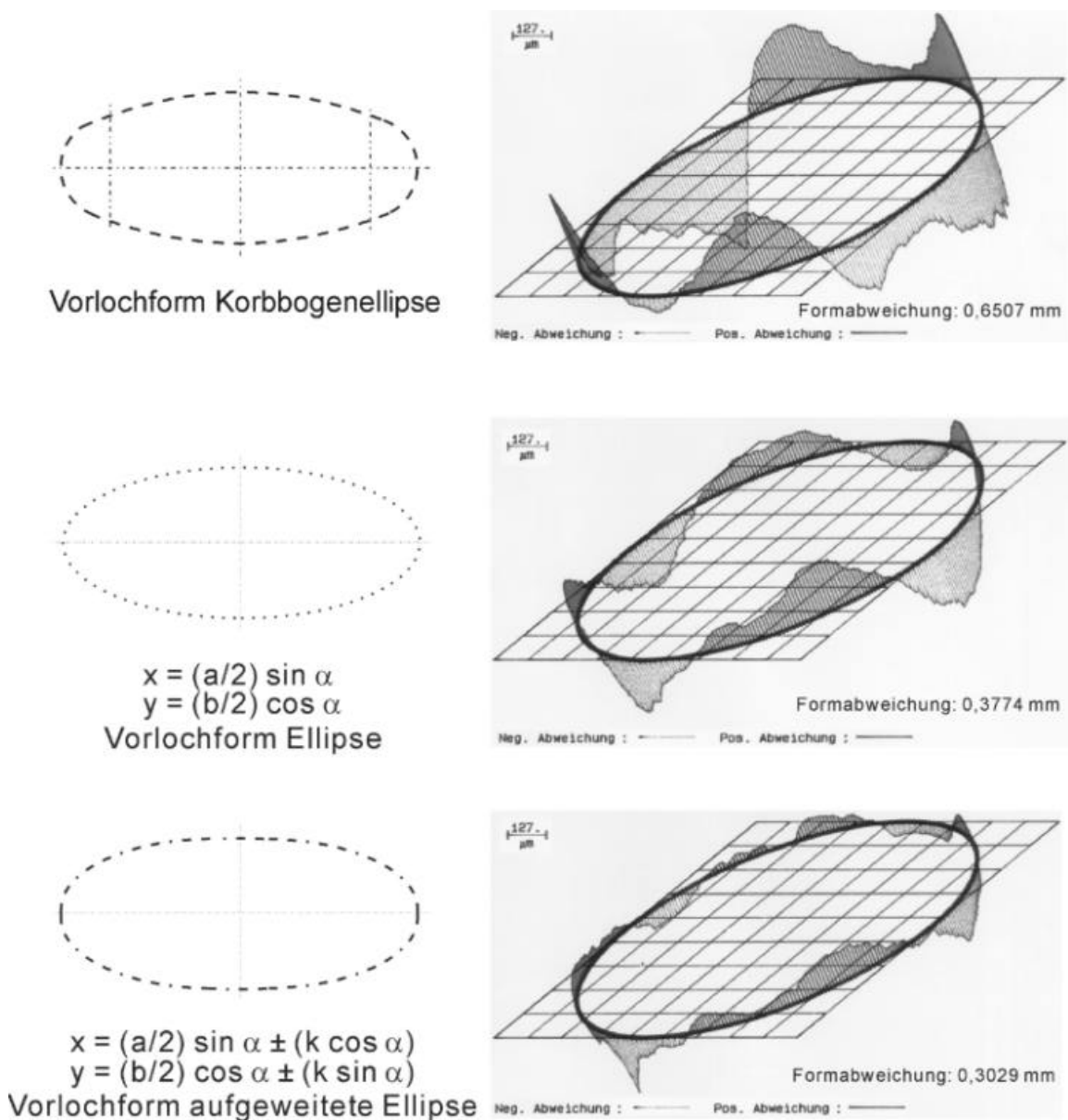


Bild 5.34: Vergleich der Ebenheitsabweichung für unterschiedliche Vorlochformen

Ein Vergleich der Ebenheitsabweichungen von Aushalungen, die mit unterschiedlichen Vorlochformen hergestellt wurden, zeigt eine deutliche Verbesserung der Ebenheit am Aushalungsrand mit der Vorlochform aufgeweitete Ellipse (Bild 5.34). Gegenüber der Korbbogenkonstruktion von Vorlöchern wurde die Ebenheitsabweichung des Aushalungsrandes um ca. 55% reduziert.

Die Dimensionierung des Aufweitungskoeffizienten k hängt wie die Vorlochachsen von den Einflussgrößen Aushalungshöhe, Aushalungsdurchmesser, Rohrwanddicke, Rohrdurchmesser und den mechanischen Werkstoffeigenschaften ab:

$$k = f(H(a), d_R; d_A; s_0; r_M; \text{Werkstoff}). \quad (5.28)$$

Im Experiment wurden lineare Zusammenhänge zwischen dem Aufweitungskoeffizienten k und der Aushalungshöhe $H(a)$ ermittelt, so dass die mit der Abwicklung berechnete hyperbolische Abhängigkeit zwischen dem Aufweitungskoeffizienten k und der Aushalungshöhe $H(a)$ sich nicht widerspiegelt. Bei den untersuchten Rohrdurchmessern besitzt der Aufweitungskoeffizient k eine lineare Abhängigkeit von der Aushalungshöhe $H(a)$.

Das Verhältnis von Aufweitungskoeffizienten k und Aushalsverhältnis d_A/d_R zeigt sich als quadratische Funktion (kongruente Parabel) mit einem größer werdenden Anstieg des k - d_A/d_R -Graphes (Bild 5.35).

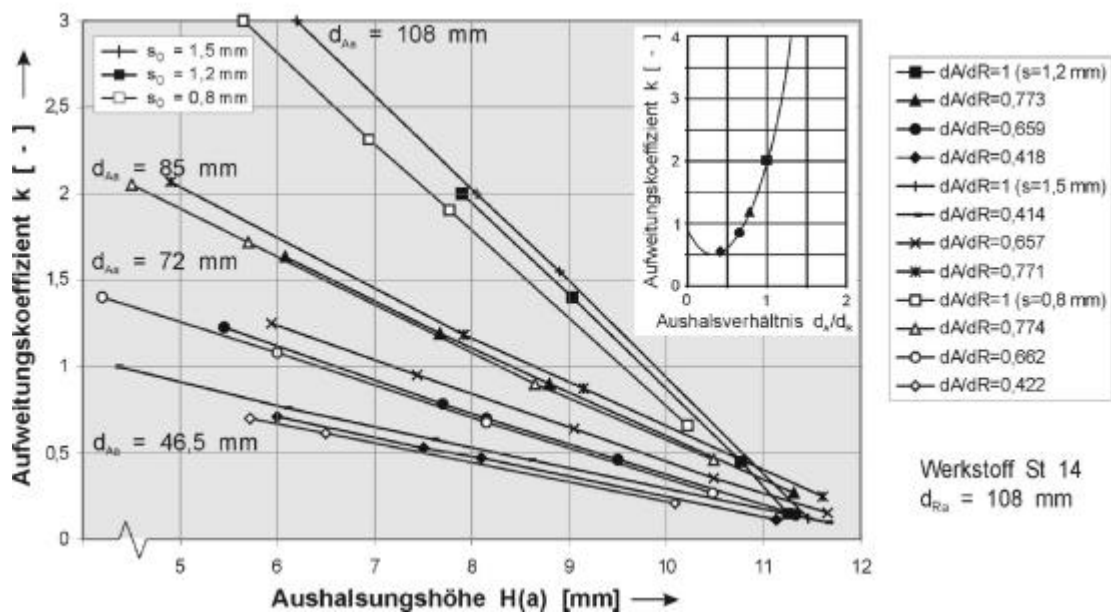


Bild 5.35: Abhängigkeit des Aufweitungskoeffizienten k von der Aushalungshöhe $H(a)$ für unterschiedliche Aushalungsdurchmesser bzw. Aushalsverhältnisse

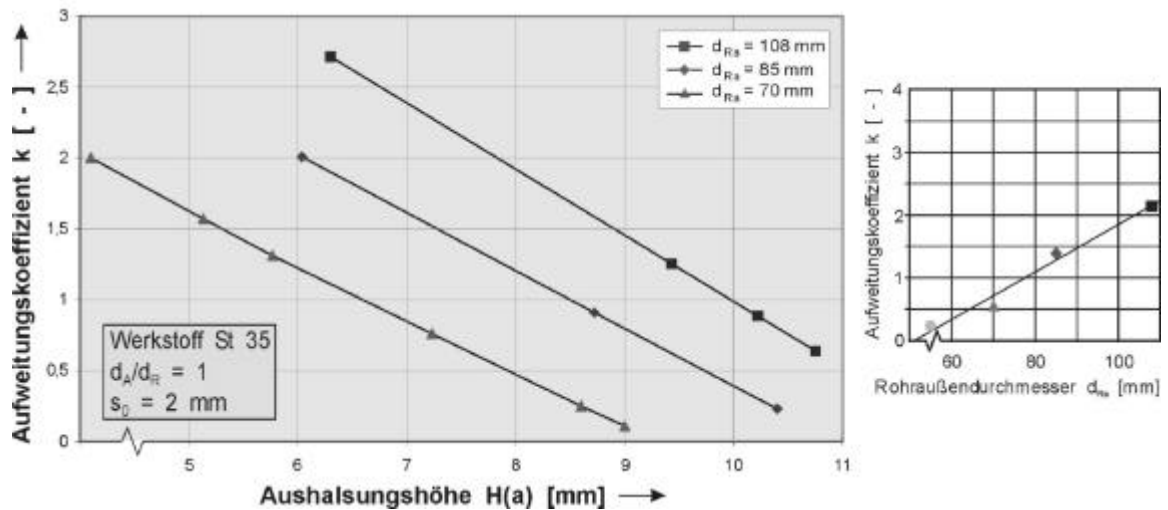


Bild 5.36: Abhängigkeit des Aufweitungskoeffizienten k von der Aushalsungshöhe $H(a)$ für unterschiedliche Rohrdurchmesser

Der Anstieg der Geraden beim Aushalsverhältnis $d_A/d_R=1$ (Aushalsdurchmesser gleich dem Rohrdurchmesser) ist im Vergleich zu den anderen überprüften Aushalsverhältnissen größer. Letzteres ist auf die eingesetzten Spreizkegelwerkzeuge zurückzuführen, die größere Formänderungen in den rissgefährdeten Bereichen bewirken, was sich in der Größe des Aufweitungskoeffizienten k widerspiegelt.

Bild 5.36 zeigt für unterschiedliche Rohrdurchmesser die Abhängigkeit des Aufweitungskoeffizienten k von der Aushalsungshöhe H . Es wurde für die untersuchten Rohrdurchmesser ein nahezu paralleler Verlauf der k - $H(a)$ -Geraden ermittelt. Zwischen dem Aufweitungskoeffizienten k und dem Rohraußendurchmesser d_{Ra} besteht ein linearer Zusammenhang.

Für unterschiedliche Rohrwerkstoffe ergeben sich unterschiedliche Anstiege der k - H -Geraden (Bild 5.37). Ursache sind neben den jeweiligen Anisotropieeigenschaften (r -Wert) auch die Festigkeits- und Verfestigungseigenschaften (n -Wert) der Werkstoffe.

Der Berechnung des Aufweitungskoeffizienten k kann aufgrund der im Experiment ermittelten lineareren Zusammenhänge zwischen der Aushalsungshöhe H und dem Aufweitungskoeffizienten k eine Geradengleichung zugrundegelegt werden:

$$k = -m_k * H(a) + n_k. \quad (5.29)$$

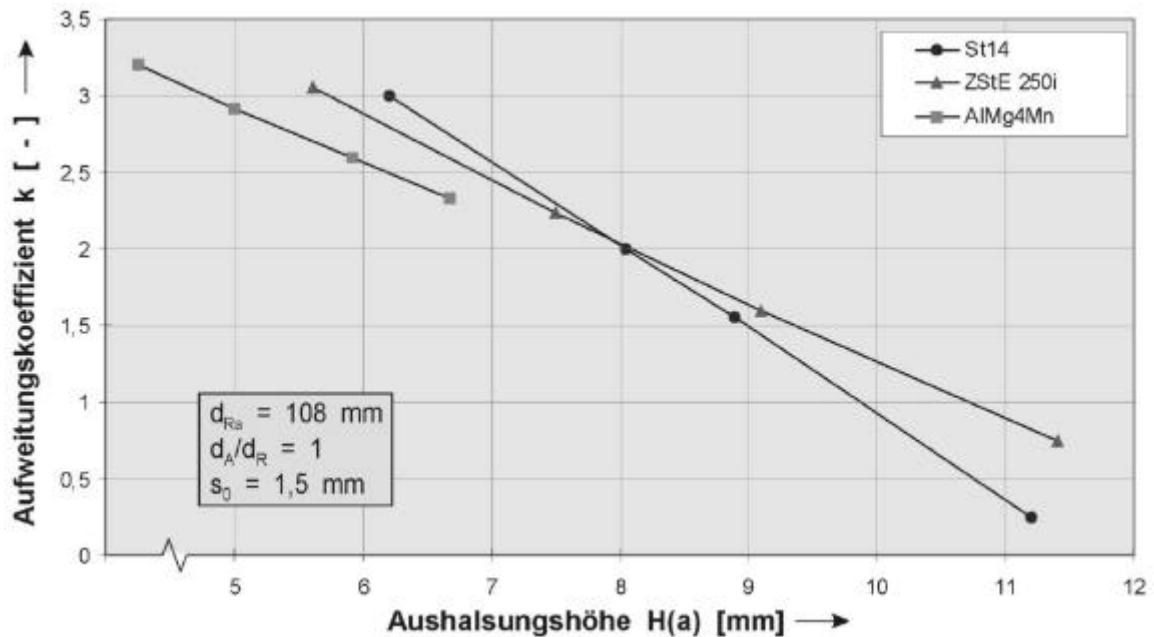


Bild 5.37: Abhängigkeit des Aufweitungskoeffizienten von der Aushalungshöhe für unterschiedliche Werkstoffe

Mit Hilfe der linearen und der Polynomregression wurden aus den Versuchsergebnissen Beziehungen für m_k und n_k ermittelt, die in Glg. (5.29) einfließen. Durch die Einflussgrößen Rohrdurchmesser, Aushalsverhältnis und den Werkstoff wird der Wert für m_k durch folgende Gleichung errechnet:

$$m_k = \frac{m_{kdRa}}{m_{kdA/dR} * m_{kWst}} \quad (5.30)$$

Der Werkstoffeinfluss bei der Berechnung des Geradenanstiegs m_k (Glg. (5.30)) wird durch die Größen Bruchdehnung A_{80} , Zugfestigkeit R_m und Verfestigungsexponent n in der Gleichung

$$m_{k_{Wst}} = -0,0034 (A_{80} / \ln R_m * n) + 1,0456 \quad (5.31)$$

beschrieben. Die durch den Rohrdurchmesser beeinflusste anteilige Größe $m_{k_{dRa}}$ wird mit der Gleichung

$$m_{k_{dRa}} = 0,0058 d_{Ra} - 0,0783 \quad (5.32)$$

berechnet. Der Einfluss des Aushalsverhältnisses geht mit der quadratischen Gleichung

$$m_{k_{dA/dR}} = 3,0877 \left(\frac{d_A}{d_R}\right)^2 - 10,6132 \left(\frac{d_A}{d_R}\right) + 8,5005 \quad (5.33)$$

in die Berechnung des Anstiegs m_k (Glg. (5.30)) ein.

Der Wert für n_k , der Eingang in die Geradengleichung für die Berechnung des Aufweitungskoeffizienten k (Glg. (5.29)) findet, wird von den Einflussgrößen Rohrdurchmesser, Aushalsverhältnis, Blechdicke, Werkstoff und Reibung beeinflusst. Die Berechnung von n_k erfolgt mit der Gleichung

$$n_k = \frac{n_{kdRa}}{n_{kdA/dR} * n_{ks0} * n_{kWst} * n_{kReib}}. \quad (5.34)$$

Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens wird anstelle der Bruchdehnung bei der n_k -Berechnung die Gleichmaßdehnung und zusätzlich zur Zugfestigkeit und dem Verfestigungsexponenten die senkrechte Anisotropie r_{0° herangezogen:

$$n_{k\ Wst} = 0,0558 (A_g / \ln R_m) + 0,7919 - n/r_{0^\circ}. \quad (5.35)$$

Durch Einbeziehung des quasiisotropen Werkstoffes ZStE 250i wurde der Einfluss der planaren Anisotropie Δr auf die Aufweitungskoeffizient-Dimensionierung überprüft. Ein direkter Zusammenhang zwischen Δr - und k -Wert konnte dabei nicht ermittelt werden, so dass eine Berücksichtigung in der Glg. (5.29) für k nicht erfolgt. In den Versuchen wurden mit dem ZStE 250i trotzdem bessere Ergebnisse (größere maximale Aushalshöhen) im Vergleich zu den anderen überprüften Blechwerkstoffen erzielt, so dass von einer sehr guten Eignung dieses Werkstoffes für Streckziehbeanspruchungen ausgegangen werden kann. Eine weitergehende Überprüfung der planaren Anisotropie durch die Einbeziehung der Versuchsergebnisse an Rohren, scheitert am Fehlen des Δr -Wertes. Derzeit existiert keine Methode zur Bestimmung der planaren Anisotropie an Rohren [128], so dass auch das Bestehen eines isotropen Werkstoffzustandes nach dem Rohrbiegen der ZStE 250i-Bleche in Frage steht. Bekannt ist, dass die Größe der Anisotropiekennwerte von der Verfestigung des Werkstoffes beeinflusst werden [129].

Zusätzlich zum Rückschluss auf die der Glg. (5.31) zugrundeliegenden Größen, wurde auch ein Einfluss der Reibung auf die Größe des Aufweitungskoeffizienten k ermittelt. Obwohl bei allen Versuchen die Beibehaltung eines vergleichbaren Reibungsverhältnisses zwischen Werkzeug und Bauteilwand angestrebt wurde, ist ein Einfluss der Reibung, insbesondere zwischen unterschiedlichen Werkstoffen, nachweisbar. Ohne zusätzliche Schmierung konnte ein Zusammenhang zwischen der Oberflächengestalt der Versuchswerkstoffe und dem erforderlichen Aufweitungskoeffizienten k ermittelt werden (Werkzeugoberflächenqualität wurde konstant gehalten, s. Tabelle 4.1). Der erhaltene Zusammenhang ist auf die Kontaktbedingungen zwischen den Reibpartnern und auf die Eineb-

nung der Werkstoffoberfläche der inneren Aushalsungswand durch die Reibungswirkung zurückzuführen. Da während des Umformvorganges (ohne Schmierung) vorwiegend Festkörperreibung vorherrscht, wird der Mittenrauwert R_a der Werkstückoberfläche herangezogen, um den Reibungseinfluss zu charakterisieren. Die Erfassung des Reibungseinflusses erfolgt durch die Gleichung für $n_{k\text{Reib}}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 15\%$:

$$n_{k\text{Reib}} = -0,0511 R_a + 1,1154. \quad (5.36)$$

Zusammen mit den Gleichungen (6.16) und (6.17), der linearen Gleichung für den Rohrdurchmesser

$$n_{k\text{dRa}} = 0,0878 d_{Ra} - 3,062 \quad (5.37)$$

und der quadratischen Gleichung für das Aushalsverhältnis d_A/d_R

$$n_{k\text{dA/dR}} = 3,2342 \left(\frac{d_A}{d_R}\right)^2 - 9,9558 \frac{d_A}{d_R} + 7,6993 \quad (5.38)$$

sowie der Gleichung zur Berücksichtigung der Blechdicke

$$n_{ks_0} = -0,3571 s_0^2 + 0,6643 s_0 + 0,8071, \quad (5.39)$$

berechnet sich n_k aus der Gleichung (5.34).

5.5 Technologische Bedingungen beim Aushalsen

5.5.1 Charakterisierung der Verfahrensgrenze beim Aushalsen

Für den industriellen Einsatz werden Aushalsungen mit möglichst großen Aushalsungshöhen angestrebt, da für die Zugänglichkeit bei Schweißoperationen am Aushalsungsrand zum Fügen mit Rohren o.ä. ein möglichst großer Abstand vom Rohr vorteilhaft ist.

Die Aushalsungshöhe H wird bei gegebenem Aushalsungsdurchmesser von der Größe des Vorloches bestimmt. Je kleiner das Vorloch vorliegt, desto höher ist die Aushalsungshöhe H . Mit kleiner werdendem Vorloch werden die Vergleichsformänderungen an der Aushalsung größer. Die größte erreichbare Formänderung wird durch den Einfluss des Spannungszustandes, der von einer Vielzahl von Einflussfaktoren anhängt, begrenzt. Überschreiten die Vergleichsformänderungen φ_V die vorgangabhängige Bruchformänderung φ_B , reißt die Aushalsungswand ein. Daraus ergibt sich die kleinste aufweitbare Vorlochgröße und damit die maximal herstellbare Aushalsungshöhe H .

Die erreichbare Aushalsungshöhe hängt neben den geometrischen Ausgangsgrößen von einer Vielzahl weiterer Einflussfaktoren ab (Bild 5.38).

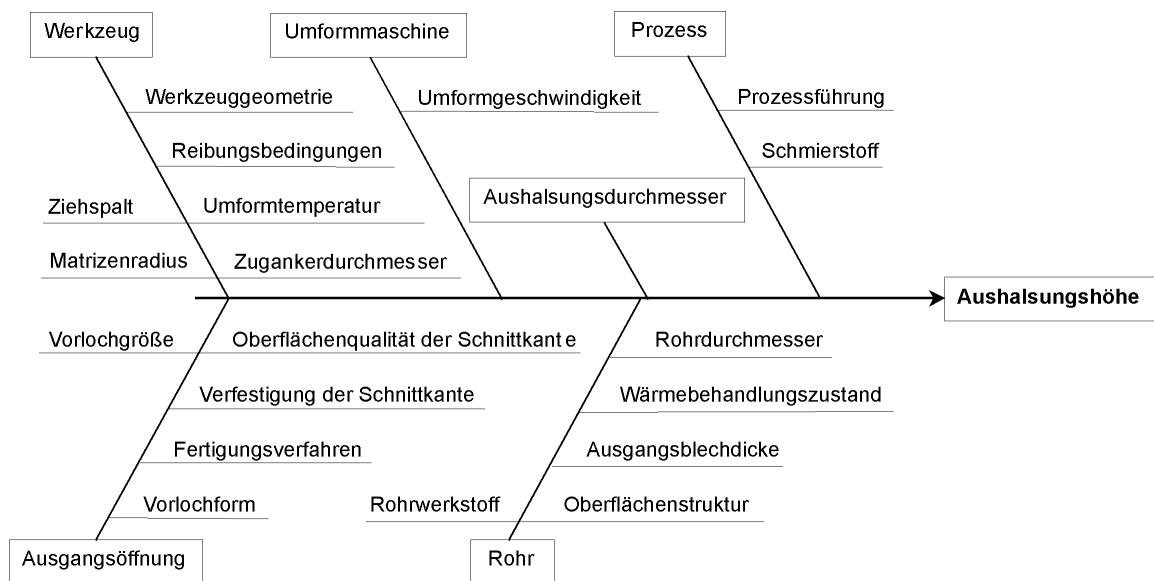


Bild 5.38: Einflussgrößen auf die erreichbare Aushalsungshöhe

Mitunter ist die erreichbare Aushalsungshöhe und damit die Verfahrensgrenze durch den minimalen Durchmesser des Zugankers begrenzt, der kleiner als die Vorlocheilipsenachse b sein muss (Bild 5.39). Der Zuganker Durchmesser hängt von den zu übertragenden Umformkräften auf den Aushalsstempel ab.

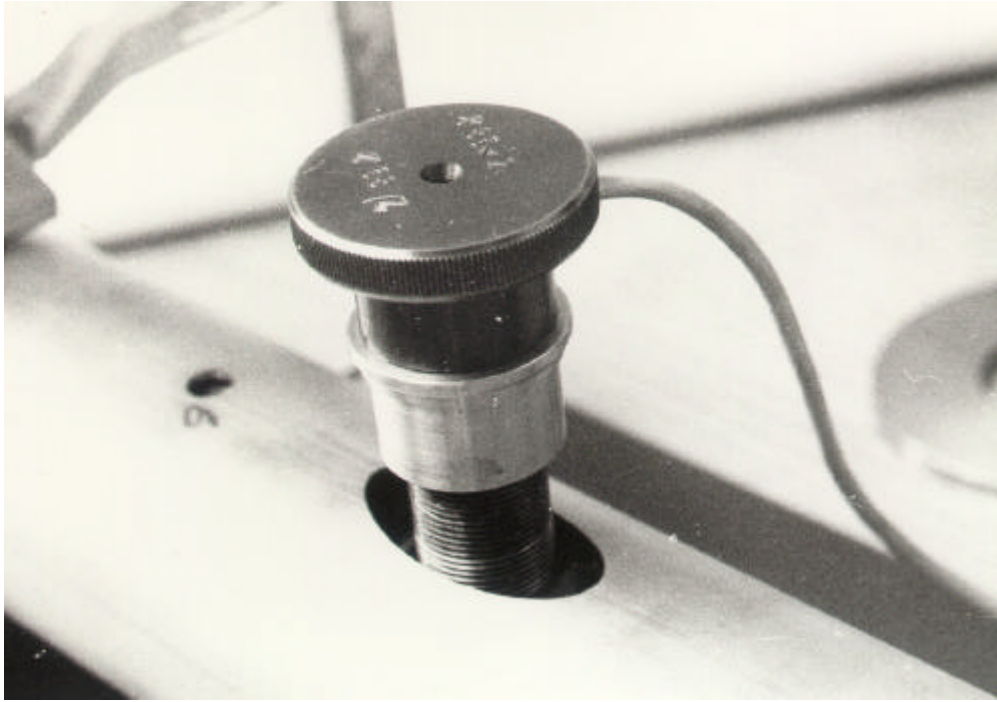


Bild 5.39: Verfahrensgrenze Abmessung des Zugankers

Der Versagensfall beim Aushalsen zeigt sich durch Einreißen der Aushalsungswand vom Rand zum Fuß der Aushalsung. Der Versagensort ist in der Regel auf den Bereich des oberen Rohrscheitels begrenzt (Bild 5.40). Zu große partielle Kerbwirkungen in anderen Bereichen des Vorlochrandes, die durch Bearbeitungsfehler oder dergleichen hervorgerufen werden, führen dazu, dass der Riss ggf. auch anderenorts auftreten kann (Bild 5.41).

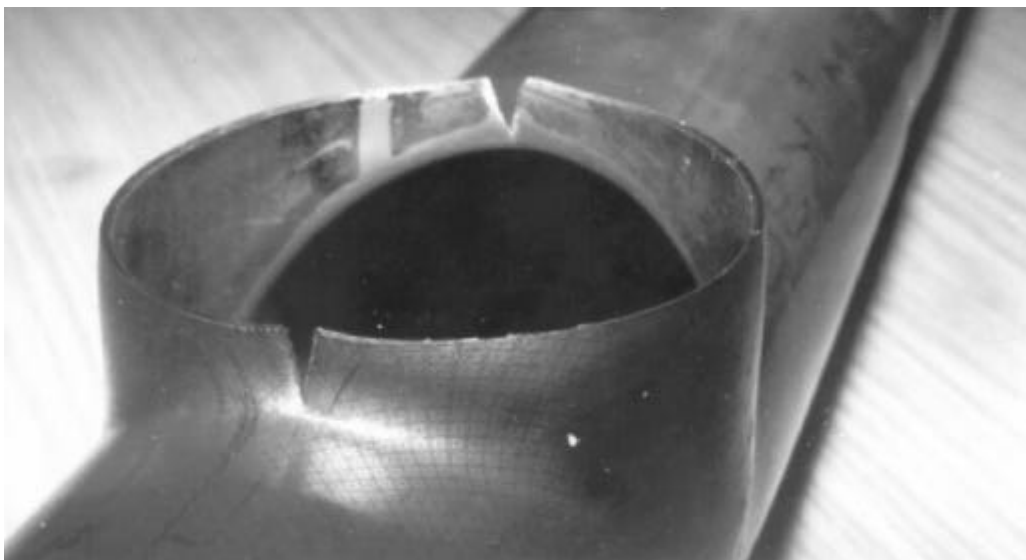


Bild 5.40: Typischer Versagensfall an der Aushalsung

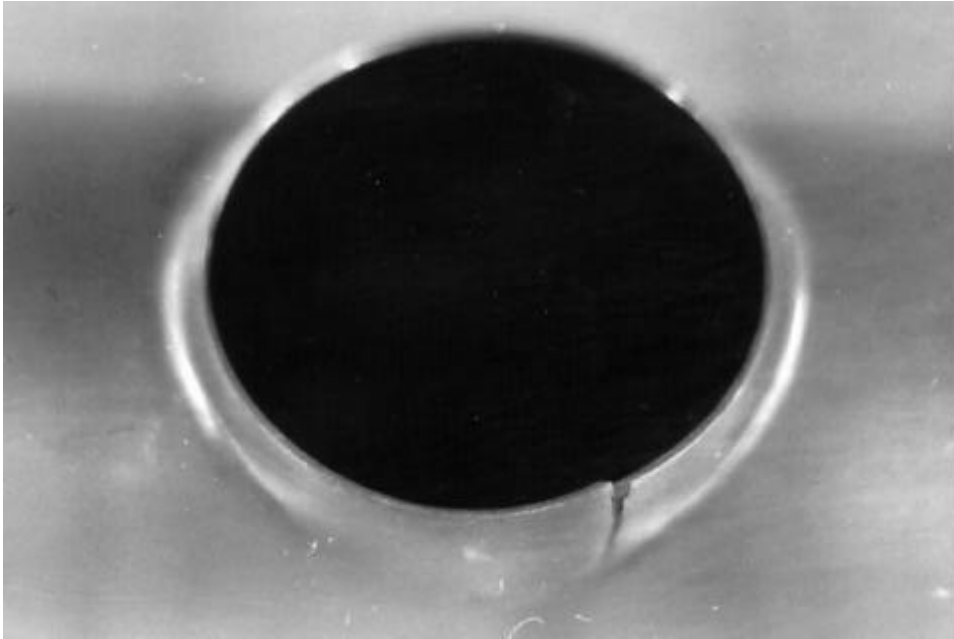


Bild 5.41: Versagensfall bei überhöhter partieller Kerbwirkung am Vorlochrand

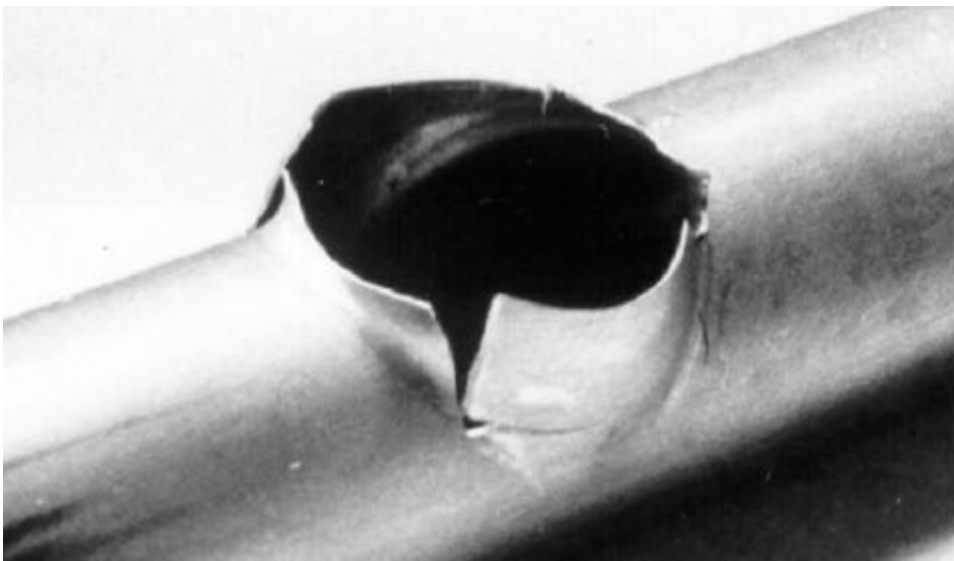


Bild 5.42: Versagensfall bei Einsatz von Aluminiumrohren

Beim Einsatz von Aluminiumrohren ist aufgrund der besonderen tribologischen Bedingungen (Affinität zwischen Eisenwerkstoffen (Werkzeug) und Aluminium) auch ein Versagensfall zu beobachten, bei dem die Aushalsungswand mehrfach über dem Umfang aufreißt (Bild 5.42). Dies tritt bereits in einem frühen Umformstadium durch Werkstoffaufschweißungen am Aushalsstempel ein, so dass der Werkstofffluss behindert wird. Abhilfe schaffen z.B. beschichtete Aushalsstempel (ALOX-Beschichtung u.a.).

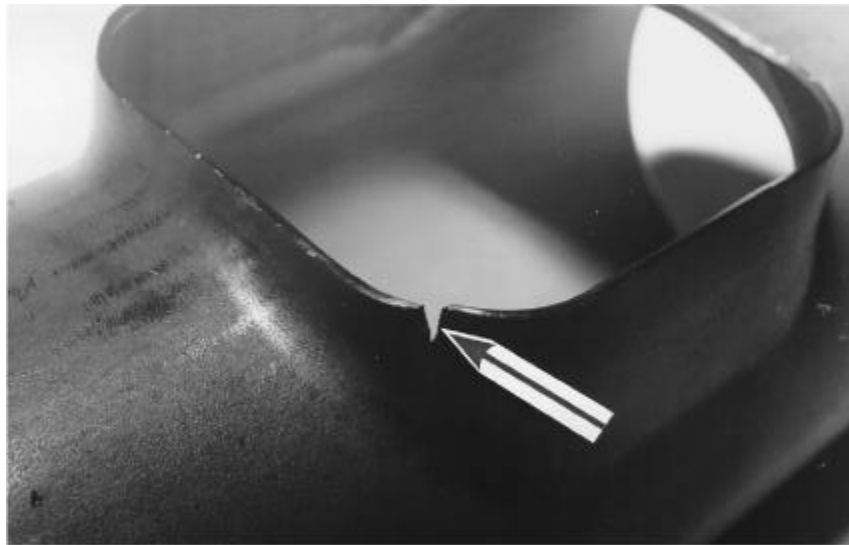


Bild 5.43: Versagensfall bei quadratischen Aushalsungen

Bei quadratischen Aushalsungen ist der Versagensfall auf die Eckenbereiche in Richtung zum oberen Rohrscheitel begrenzt (Bild 5.43).

5.5.2 Einflussfaktoren auf die Verfahrensgrenzen

5.5.2.1 Vorlochbearbeitung

Ein entscheidender Einfluss auf die Verfahrensgrenze beim Aushalsen geht vom jeweiligen Verfahren aus, mit dem die Vorlochfertigung erfolgt. In der Praxis ist das Lochen die häufigste Art der Vorlochherstellung. Durch die weitere Entwicklung der CNC-Technik in den letzten Jahren gibt es aber mittlerweile auch Anwendungen, bei denen das Vorloch für das Aushalsen durch Fräsen oder Laserstrahlschneiden eingebracht wird. Das Laserstrahlschmelzschnitten wird dabei für besonders dünne Wandstärken eingesetzt. Gegenüber dem Lochen besitzt das Laserstrahlschmelzschnitten für die Qualität der Vorlochschnittkante folgende Vorteile:

- abgerundete (geschmolzene) Ober- und Unterkante
- sehr geringe aufgehärtete Schicht an der Kante
- gute Oberflächenqualität
- sehr geringer Grat (Bart) an der Unterseite.

Mit dem Fräsen sind die besten Oberflächengüten der Schnittkante erreichbar. Es erfolgt kein Wärmeeintrag in die Schnittkantenumgebung. Weitere Vorteile sind die Ausrich-

tung der Bearbeitungsriefen in Umfangsrichtung und das Fehlen einer Schnittkantenaufhärtung.

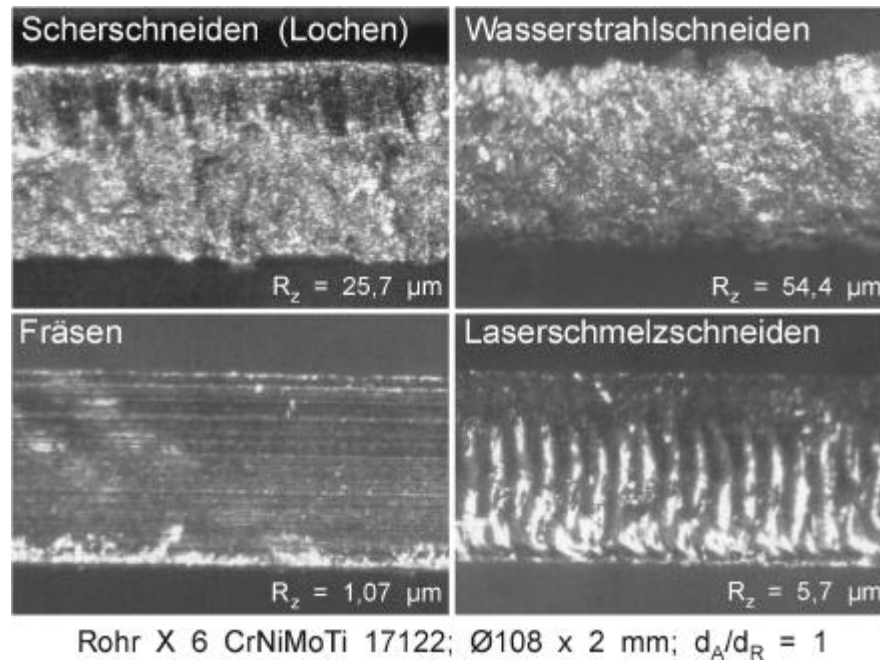


Bild 5.44: Schnittkantenausbildung bei unterschiedlichen Vorlochbearbeitungsverfahren

Das Wasserstrahlschneiden ermöglicht ebenfalls eine Vorlochherstellung ohne Schnittkantenverfestigung. Jedoch ist die herstellbare Rautiefe R_z der Vorlochkantenoberfläche schlechter als bei den anderen Verfahren (Bild 5.44).

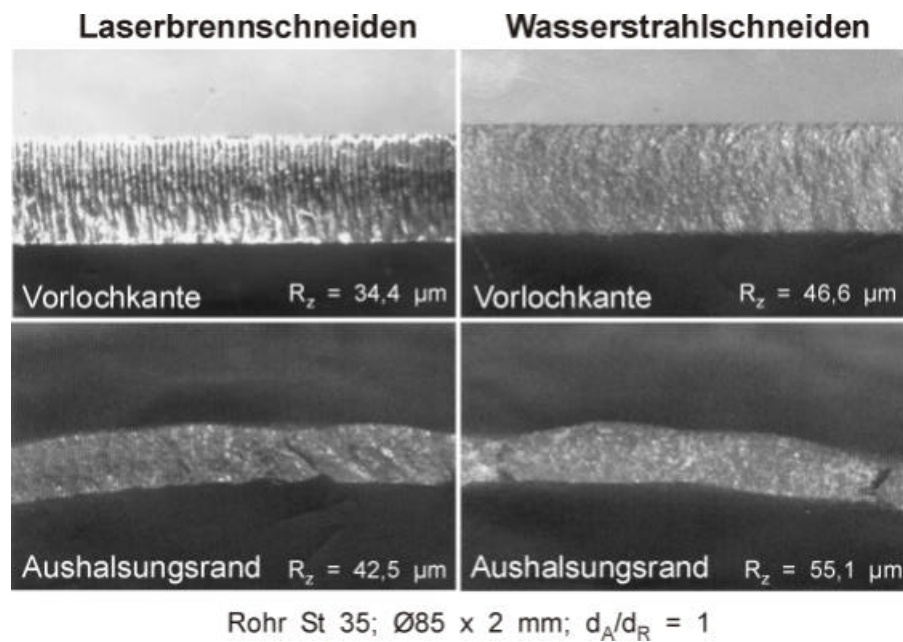


Bild 5.45: Vergleich der Oberflächen des Vorloches und des Aushalungsrandes

Versuche zum Wasserstrahlschneiden ohne Abrasivmittelzusätze brachten zwar eine Verbesserung der Rautiefe an der Schnittkante um ca. 15% und eine geringere Aufrauung der Blechoberfläche. Durch die senkrecht verlaufenden Bearbeitungsriefen kommt es trotzdem zu einer frühen Ausbildung von Einschnürungen und Risskeimen am Aushalsungsrand (Bild 5.45).

Nach erfolgter Umformung treten besonders am Rand der Aushalsung in den rissgefährdeten Bereichen Einschnürungen in regelmäßigen Abständen auf. Die Ausbildung derartiger regelmäßiger Einschnürungen ist ebenfalls beim Einsatz laserstrahlbrenngeschnittener Vorlochkanten nachweisbar und hat u.a. eine Ursache in der facettenförmigen Schnittkantenoberfläche der Versuchsteile. Bei gefrästen und geschnittenen Vorlochkanten tritt dieser Effekt nicht auf.

Ausgehend von den durchgeführten Stichversuchen zu den VorloCHFertigungsverfahren [132] kann festgestellt werden, dass die maximal erreichbare Aushalsungshöhe im Vergleich zum gefrästen Vorloch (100%) bei den anderen untersuchten Verfahren geringer ist. Für das Laserstrahlschmelzschneiden ergibt sich eine um ca. 5% verringerte maximale Aushalsungshöhe, beim Wasserstrahlschneiden um ca. 8% und beim Lochen mit anschließendem Beschleifen der Schnittkante um ca. 20%.

5.5.2.2 Werkzeuggestaltung

Die Werkzeugform des Aushalsstempels hat Einfluss auf den Umformkraftbedarf und die Kontaktzonenausbreitung zwischen Werkzeug und Rohrwand und damit auf das Umformergebnis beim Aushalsen. Stempel mit Traktrix- oder Schleppkurvenform, die wie in [85] und [99] herausgearbeitet, die günstigsten Eigenschaften zum Kragenziehen in ebenen Blechen besitzen, sind aufgrund der durch den Rohrdurchmesser begrenzten Bauhöhe für die Aushalsstempel nur für sehr kleine Aushalsverhältnisse einsetzbar. Ebenso können aus Bauraumgründen keine Flachbodenstempel eingesetzt werden.

Der Einfluss der Aushalsstempelform auf das Umformergebnis wurde deshalb mit kegelförmigen und halbkugelförmigen Aushalsstempeln untersucht. In der Praxis ist es üblich, die rückfederungsbedingte Rundheitsabweichung der Aushalsung (vgl. Pkt. 5.3.2.1) durch Anpassen der Aushalsstempel in gewissen Grenzen zu kompensieren. Im Hinblick auf eine bessere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wird eine derartige Werkzeugkorrektur hier nicht vorgenommen.

Im Ergebnis von Formänderungsanalysen und FEM-Berechnungen kann festgestellt werden, dass die besten Umformergebnisse beim Einsatz halbkugelförmiger Stempel für das Rohraushalsen eintreten.

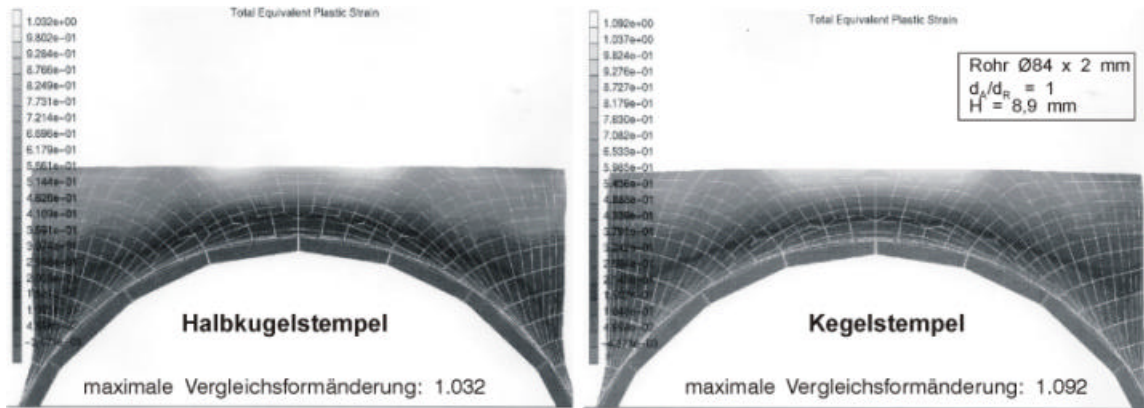


Bild 5.46: Vergleich der Formänderungsmaxima für unterschiedliche Stempelformen

Bild 5.46 zeigt das Aushalsergebnis im FEM-Vergleich bei Verwendung eines halbkugelförmigen und eines kegelförmigen Aushalswerkzeuges unter gleichen Bedingungen. Die maximale Vergleichsformänderung ist für die Halbkugelform niedriger. Begründet ist das durch die halbrunde Form des Rohres und des Aushalsstempels. Beim Rohraushalsen mit halbkugelförmigem Werkzeug entfällt im Gegensatz zum Einsatz kegelförmiger Aushalsstempel das Biegen des gewölbten Rohrwerkstoffes auf die gerade Kegelloinie der Werkzeugoberfläche (Bild 5.47).

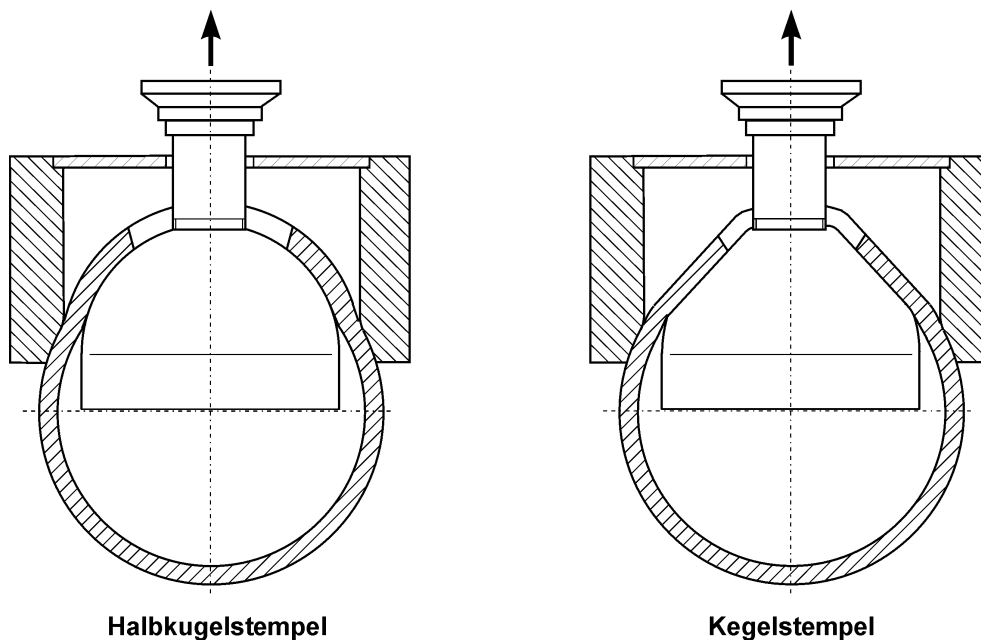


Bild 5.47: Vergleich der Kontaktzonenausbreitung für unterschiedliche Stempelformen

Die eigentliche Ausformung des Formelementes erfolgt bei kegelförmigen Aushalsstempeln an der Stempelkantenrundung im Übergang zum zylindrischen Kalibrierbereich.

Wie in Pkt. 2.2.1.5 bereits dargestellt, besteht bei Verwendung von halbkugelförmigen Kragenziehstempeln eine günstigere Lage der Kragenstirnfläche gegenüber der Orthogonalebene des Kragens. Es ergibt sich eine V-Stoß-ähnliche Öffnung der Aushalsungskante nach außen, die Vorteile für sich anschließende Schweißoperationen besitzt. Für das Aushalsen wurde ebenfalls ein prinzipieller, werkzeugformabhängiger Unterschied in der Ausbildung des Aushalsungsrandes festgestellt. Ein nach außen abfallender Aushalsungsrand beim Einsatz halbkugelförmiger Aushalsstempel, wie in /96/ für das Kragenziehen beschrieben, wurde nicht nachgewiesen. Ein Grund dafür liegt darin, dass lediglich dünnwandige Rohre betrachtet wurden. Weiterhin ist die Ausrichtung der Vorlochschnittkante prinzipbedingt nicht rechtwinklig zur Rohroberfläche, so dass die geometrischen Bedingungen am Ausgangsteil bereits von denen beim Kragenziehen in ebenen Blechen abweichen (vgl. Pkt. 5.3.2.4).

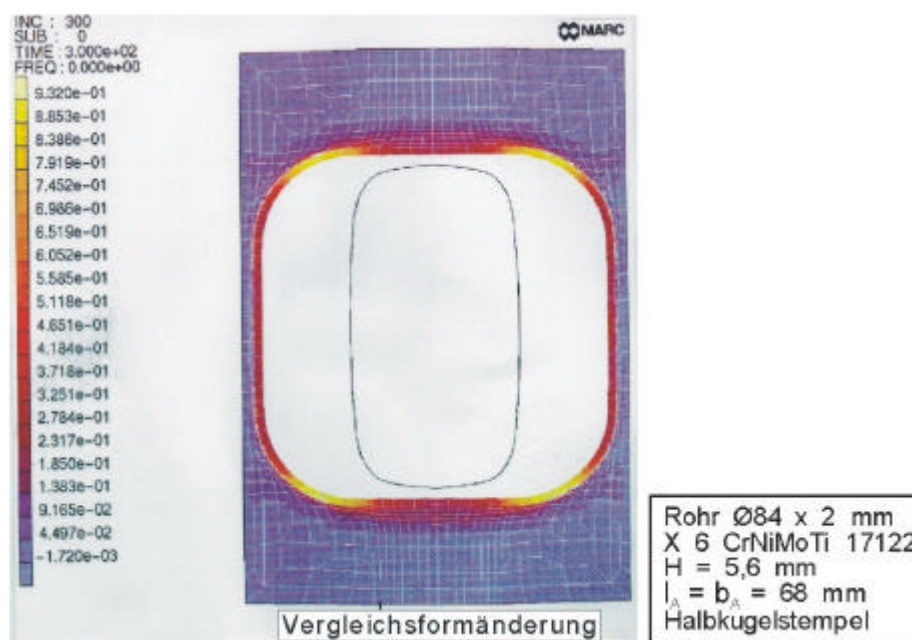


Bild 5.48: Verteilung der Vergleichsformänderungen über dem Aushalsungsumfang

Die Werkzeugform besitzt Einfluss auf die Höhe der Formänderungen und somit auf die Verfahrensgrenze (Einreißen der Aushalsungswand). Bei rechteckigen Rohraushalsungen ist der Einfluss der Werkzeuggestaltung auf die maximale Aushalsungshöhe besonders groß, da das Werkstoffversagen auf die Eckenbereiche eingegrenzt ist. In diesen Bereichen treten die größten Formänderungen auf (Bild 5.48).

In Berechnungen mit der FEM und im Experiment wurde die größte erreichbare Aushalsungshöhe mit Aushalsstempeln erzielt, die eine halbkugelige Grundform besitzen, die zu den Aushalsungsecken hin ausläuft (Bild 5.49).

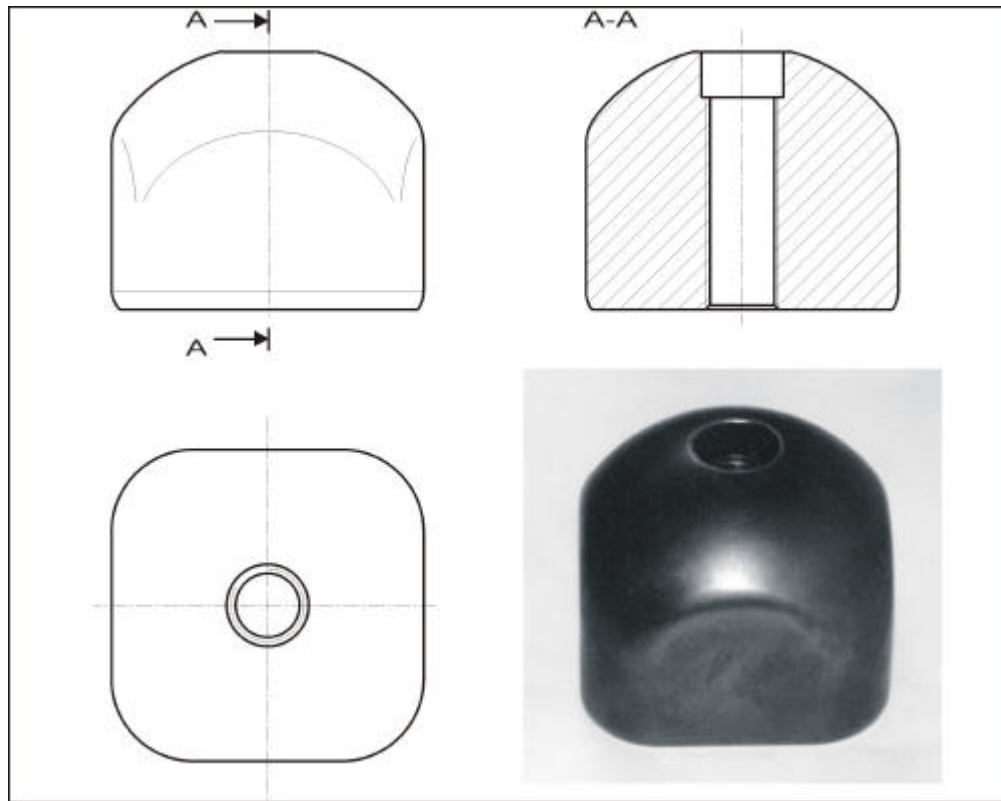


Bild 5.49: Halbkugelförmiger Aushalsstempel für quadratische Aushalsungen

Mit derartigen Aushalsstempeln werden zuerst die geraden Seiten der Aushalsung, von der Kantenmitte her aufgestellt. Anschließend findet die Ausformung der Eckenbereiche statt.

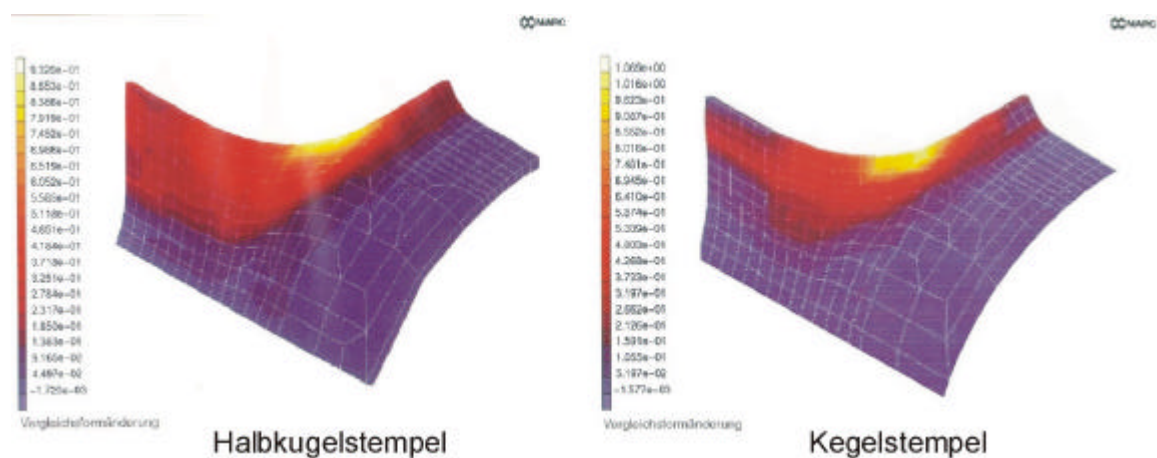


Bild 5.50: Vergleich der Formänderungsmaxima bei Einsatz unterschiedlicher Stempelformen für quadratische Aushalsungen

Der Einsatz halbkugelförmiger Aushalsstempel ermöglicht im Vergleich zum Einsatz kegelförmiger Aushalsstempel verbesserte Bauteileigenschaften und geringere Vergleichsformänderungen in den rissgefährdeten Bereichen der Aushalsung (Bild 5.50).

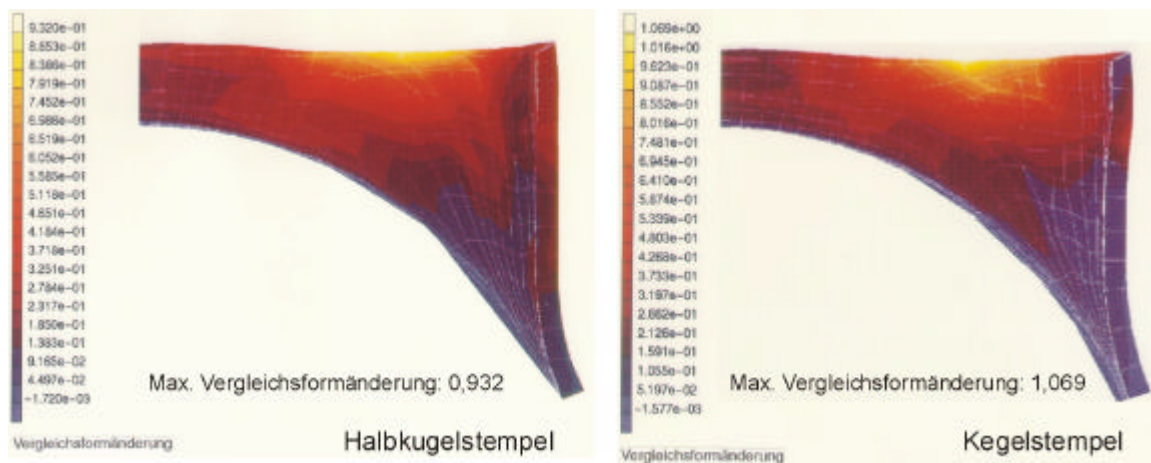


Bild 5.51: Vergleichsformänderungen in der Aushalsungswand quadratischer Aushalsungen

Am Bauteil ergibt sich eine geringere Ebenheitsabweichung des Aushalsungsrandes und eine geringere Geradheitsabweichung der Aushalsungswand, die sich in einem kleineren Randeinfall zeigt. Bild 5.51 zeigt den Vergleich der Geradheiten einer mit kegeligem und einer mit halbkugelförmigen Stempel gefertigten Rohraushalsung.

Der Vergleich der gemessenen Umformkraft beim Rohraushalsen mit den beiden Werkzeugformen zeigt einen um ca. 40 % verringerten Kraftbedarf für die Halbkugelform. Dies ist auf die veränderte Kontaktzonenausbreitung zwischen Werkzeug und Werkstück und auf einen geringeren Biege- und Reibungskraftanteil zurückzuführen.

5.5.2.3 Reibungsbedingungen

Durch den Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück während der Umformung zur Aushalsung kommt es aufgrund der Relativbewegung zu Reibschubspannungen. Diese beeinflussen den Spannungs- und Formänderungszustand in den jeweiligen Bereichen der Aushalsungswand. Desweiteren hängen die Aushalskraft und das erreichbare Aufweitverhältnis von den Reibungsbedingungen ab. Beim Aushalsen von Rohren ist es schwierig, durch Schmierstoffaufträge Mischreibungszustände bzw. einen hydrodynamischen Schmiervorgang zu schaffen und aufrechtzuerhalten. Durch den Aufweitvorgang kommt es zu einer Aufrauung der Oberfläche an der Aushalsungswand, so dass

vorhandene Schmierstofftaschen in ihren Abmessungen vergrößert werden. Da der Umformvorgang beim Aushalsen von Rohren durch den gekrümmten Übergangsbereich zwischen Rohr und Aushalsung gekennzeichnet ist und das rotationssymmetrische Werkzeug in ein elliptisches Vorloch eingreift, kommt es zu veränderlichen Kontaktbedingungen während der Umformung, die einen angestrebten stabilen Reibungszustand behindern. Vom Fuß zum Rand der Aushalsung wurden neben Effekten der Oberflächeneinebnung auch Bearbeitungsspuren registriert, die auf metallischen Kontakt von Werkzeug und Werkstück schließen lassen. Durch Zwischenlegen einer Folie als Trennschicht, was einem hydrostatischem Reibungszustand nahe kommt, wurde ein metallischer Kontakt beider Reibpartner verhindert, so dass an der inneren Aushalsungswand keine Bearbeitungsspuren mehr auftreten und die Aufrauung der Oberfläche noch deutlicher sichtbar wurde. Der Umformkraftbedarf beim Einsatz einer Trennfolie ist um ca. 20% geringer. Beim Einsatz von Schmierstoffen wurde nur eine geringfügige Verringerung des Maximalwertes verzeichnet.

In der Praxis wird zumeist auf zusätzliche Schmierung verzichtet. Speziell das Rohraushalsen betreffend bestehen Probleme der Entfettung nach erfolgter Umformung beispielsweise beim Rohrleitungsbau in der Nahrungsgüterwirtschaft. Im Allgemeinen ist aber bekannt, dass das zusätzliche Aufbringen von Schmierstoff, neben der Verringerung der Umformkraft, eine Verbesserung des Umformergebnisses in gewissen Grenzen bewirkt. Die Schmierung ermöglicht ein besseres Gleiten des umzuformenden Werkstoffs auf der Oberfläche des Aushalsstempels in tangentialer und radialer Richtung. Die tribologischen Verhältnisse können auch durch eine Werkzeugbeschichtung verbessert werden. Jedoch steht dabei die Erhöhung der Standzeit der Aushalsstempel im Vordergrund [130].

Für eine Vergrößerung der maximalen Aushalsungshöhe ist es erforderlich, dass die Bereiche quer zur Rohrlängsachsenrichtung verstärkt in die Umformung einbezogen werden, um dadurch das Werkstoffversagen in den rissgefährdeten Bereichen zu begrenzen. Der Spannungs- und Formänderungszustand wird deshalb über die Reibungsbedingungen beeinflusst, indem in den jeweiligen Bereichen unterschiedliche tribologische Verhältnisse geschaffen werden. Dies kann durch einen partiellen Schmierstoffauftrag realisiert werden, bei dem nur bestimmte Sektoren am Werkzeug zu benetzen sind. Werkzeugsektoren, die die Umformung der rissgefährdeten Bereiche (Bereiche am oberen Rohrscheitel) realisieren, bleiben ohne Befettung.

5.5.2.4 Maximales Aufweitverhältnis

Mit dem maximalen Aufweitverhältnis werden die Aufweitbedingungen beim Erreichen der Verfahrensgrenze, der maximalen Aushalsungshöhe H , betrachtet.

Für das Aufweitverhältnis beim Aushalsen von Rohren AV_{RAH} wird der Quotient aus dem Durchmesser der Aushalsung und der großen Vorlochachse a gebildet, so dass sich durch Einbeziehung von End- (d_A) und Ausgangszustand (a) ergibt:

$$AV_{RAH} = d_A / a. \quad (5.40)$$

Mit dem maximalen Aufweitverhältnis, beim Kragenziehen auch als Grenzaufweitverhältnis bezeichnet, wird die für die maximal herstellbare Aushalsungshöhe H benötigte kleinste aufweitbare Vorlochgröße in Beziehung zum Aushalsungsdurchmesser betrachtet. Da das Werkstoffversagen am oberen Rohrscheitel im Bereich der großen Vorlochachse a auftritt, wird auch nur dieser Bereich beim Aufweitverhältnis berücksichtigt.

Das maximale Aufweitverhältnis AV_{RAHmax} liegt vor, wenn der Aushalsungsrand noch keine Risse aufweist. Damit hat die Vorlochachse a ihr Minimum erreicht, so dass gilt:

$$AV_{RAHmax} = d_A / a_{min}. \quad (5.41)$$

Die Größe des maximalen Aufweitverhältnisses AV_{RAHmax} beim Aushalsen von Rohren ist hauptsächlich abhängig von

- der Oberflächenqualität und Härte der Vorlochkante,
- Rohrwerkstoff,
- der Rohrwanddicke s_0 und
- vom sich einstellenden Spannungszustand.

Der sich einstellende Spannungszustand wird beim Rohraushalsen neben dem Werkstückwerkstoff maßgeblich vom Aushalsverhältnis d_A/d_R mitbestimmt und besitzt damit Einfluss auf das erreichbare Aufweitverhältnis. Im Vergleich zum Grenzaufweitverhältnis AV_{Omax} beim Kragenziehen in ebenen Blechen (Glg. 2.8) sind deshalb die erreichbaren Aufweitverhältnisse AV_{RAHmax} für die untersuchten Werkstückwerkstoffe bei gleichem Vorlochbearbeitungsverfahren kleiner. Zusätzlich verringert sich das maximale Aufweitverhältnis AV_{RAHmax} mit steigendem Aushalsverhältnis d_A/d_R (Bild 5.52).

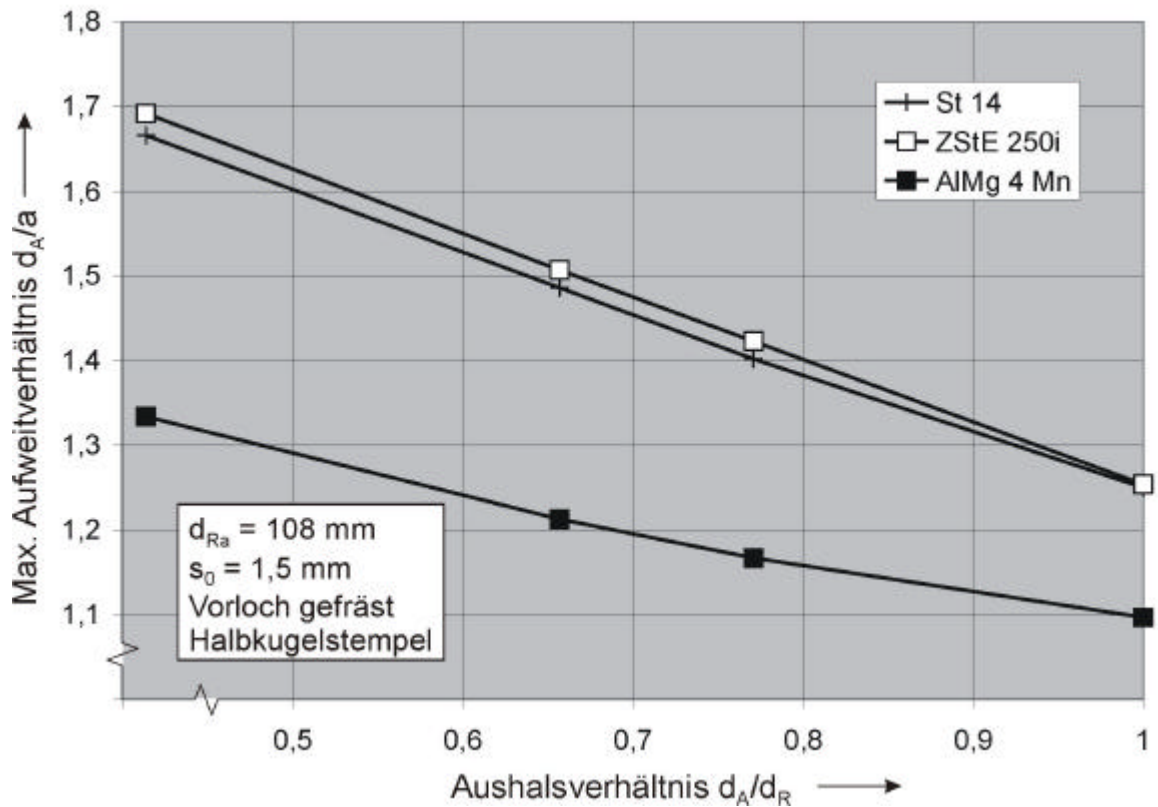


Bild 5.52: Maximales Aufweitverhältnis für unterschiedliche Werkstückwerkstoffe

Die Gegenüberstellung der erreichbaren maximalen Aufweitverhältnisse zu den Werkstoffkenngrößen n - und r -Wert ergab keine eindeutigen Abhängigkeiten, wie beim Krageziehen, wo eine größere senkrechte Anisotropie (r) oder ein größerer Verfestigungsexponent (n) auch ein größeres erreichbares Grenzaufweitverhältnis bedeuten [69].

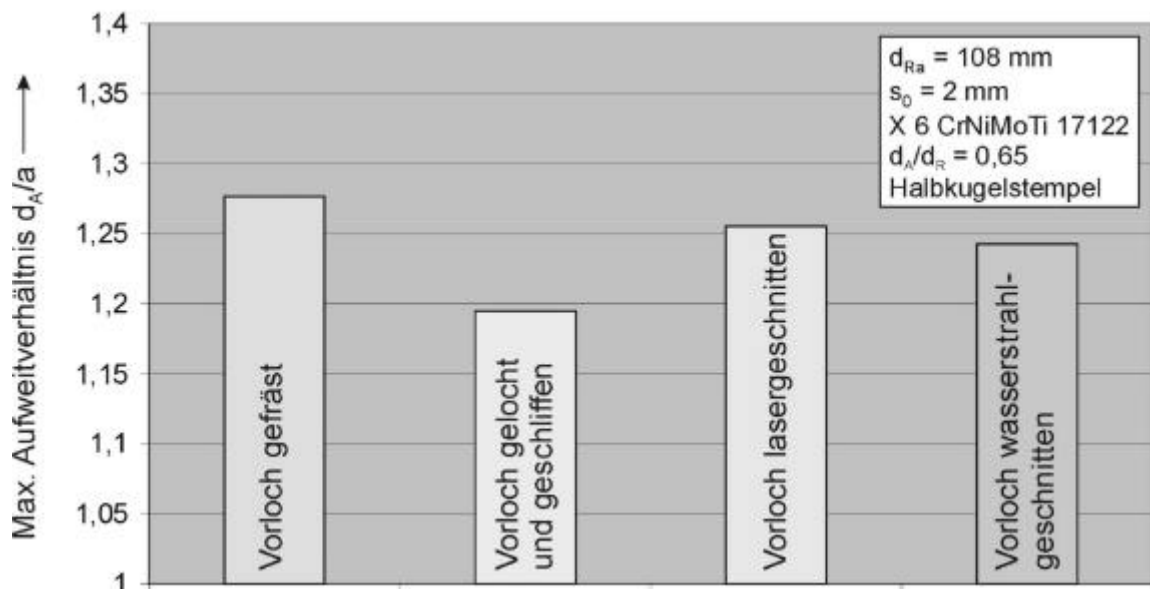


Bild 5.53: Maximales Aufweitverhältnis unterschiedlicher Vorlochbearbeitungsverfahren

Den größten Einfluss auf das erreichbare maximale Aufweitverhältnis besitzen die Oberflächenqualität und die Vorverfestigung der Vorlochkante und damit das Vorlochbearbeitungsverfahren (Bild 5.53). Der Vergleich der maximal erreichbaren Aufweitverhältnisse für die untersuchten Vorlochbearbeitungsverfahren zeigt qualitativ das gleiche Ergebnis wie bei der maximalen Aushalshöhe. Die größten maximalen Aufweitverhältnisse werden aufgrund der guten Oberflächenqualität und fehlender Randaufhärtung mit gefrästen Vorlochkanten erreicht (100 %). Wasserstrahlgeschnittene Vorlochkanten weisen ebenfalls keine Randaufhärtung auf, jedoch führt die schlechtere Oberflächenqualität zu einem geringeren erreichbaren Aufweitverhältnis (ca. 15 % geringer), das auch kleiner als bei laserstrahlschmelzgeschnittenen Vorlochkanten liegt (ca. 10 % geringer). Mit gelochten und anschließend manuell geschliffenen Vorlochkanten werden die geringsten Aufweitverhältnisse erreicht (ca. –30 %), da zum einen die Schnittkantenverfestigung nicht prozesssicher abgetragen wird, zum anderen durch die manuell durchgeführte Schleifbearbeitung das abgetragene Volumen stark variiert.

5.5.2.5 Maximale Aushalshöhe

Die maximal erreichbare Aushalshöhe ist, wie das maximale Aufweitverhältnis nicht nur vom Vorlochherstellungsverfahren, sondern von nahezu allen Einflussgrößen beim Aushalsen abhängig (vgl. Pkt. 5.5.1). Durch Eingrenzung der untersuchten Parameter auf die wichtigsten Einflussgrößen wurde in Auswertung der Experimente eine empirische Berechnungsvorschrift für $H(a)_{\max}$ ermittelt. Die Größen Reibung, Werkzeugform, Prozessführung und Vorlochfertigungsverfahren sind in die Berechnungsvorschrift für $H(a)_{\max}$ nicht eingeflossen.

Im Allgemeinen dient u.a. die Bruchdehnung zur Beschreibung des Umformvermögens eines Werkstoffes. Da die Aufnahme der Bruchdehnung im einachsigen Zugversuch erfolgt, ist eine Übertragbarkeit auf Verfahren mit mehrachsiger Werkstoffbeanspruchung, wie das Aushalsen, problematisch. Die quantitative Beschreibung des Werkstoffeinflusses auf die maximal erreichbare Aushalshöhe wurde mit der Bruchdehnung A_{80} und dem Verfestigungsexponenten n vorgenommen, so dass für die maximale Aushalshöhe gilt:

$$H(a)_{\max} = \left(\frac{A_{80} / n}{(\ln(d_{Ra} * \sqrt{s_0} + 2r_M / d_A))} - r^3 \right) / \left(\frac{8p}{\ln(10d_R)} \right). \quad (5.42)$$

Die weiteren Einflussgrößen mit geringerer Wichtung gehen im Quotienten logarithmisch ein. Der Einfluss des Verfestigungsexponenten n , der als Indikator für die Streckziehbarkeit eines Materials angesehen wird, konnte nachgewiesen werden. Ein zusätzlicher Einfluss auf die Grenzformänderung und damit auf die maximale Aushalsungshöhe geht von der senkrechten Anisotropie (r -Wert) aus.

5.6 Umformkraft

Auf die Größe der Umformkraft haben zahlreiche Faktoren Einfluss [131]. Eine Berechnung des Umformkraft-Umformweg-Verlaufs ist aufgrund der Vielzahl der wirkenden Einflussgrößen (Bild 5.54) sehr schwierig. Für die praktische Anwendung ist vor allem der Maximalwert der Umformkraft für die Maschinen- und Werkzeugauslegung von Bedeutung.

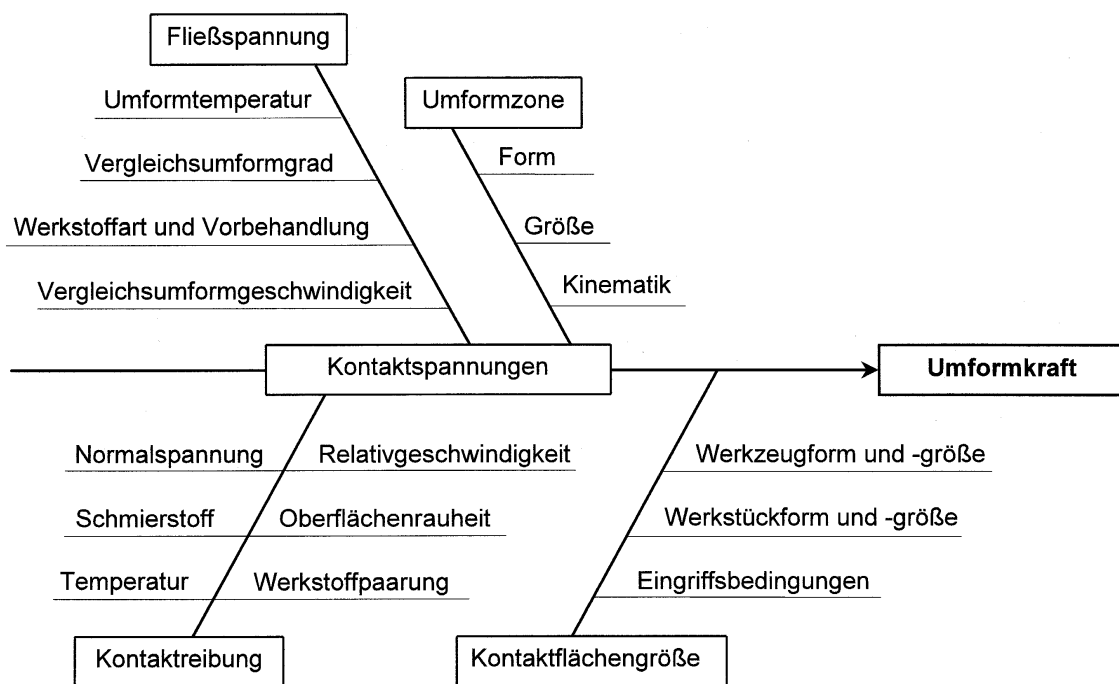


Bild 5.54: Einflussgrößen auf die Umformkraft

Prinzipiell besitzen die Umformvorgänge beim Kragenziehen in ebenen Blechen und beim Aushalsen von Rohren ähnliche Kraft-Weg- bzw. Kraft-Zeit-Verläufe. Bild 5.55 zeigt exemplarisch ein Kraft-Zeit-Diagramm. Da die Geschwindigkeit des Aushalswerkzeuges über den gesamten Zeitraum des Umformvorgangs nahezu konstant bleibt, decken sich die Darstellungen des Kraft-Zeit- und des Kraft-Weg-Schaubildes.

Im Bereich bis zum vollständigen Anlegen der Rohrwand an das Aushalswerkzeug ist ein ständiges Ansteigen der Umformkraft zu verzeichnen, da ein immer größerer Anteil des Materials in die Umformung einbezogen und die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstoff ausgedehnt wird. Dies bewirkt zusätzlich auch größere Reibungskräfte. Das Kraftmaximum ist erreicht, wenn sich das Werkzeug über den kompletten Vorlochungsumfang im Eingriff befindet. Danach fällt die Kraft bis auf einen niedrigeren konstant bleibenden Wert ab, der das Passieren der Kalibrierstufe des Aushalsstempels an der Aushalsung kennzeichnet.

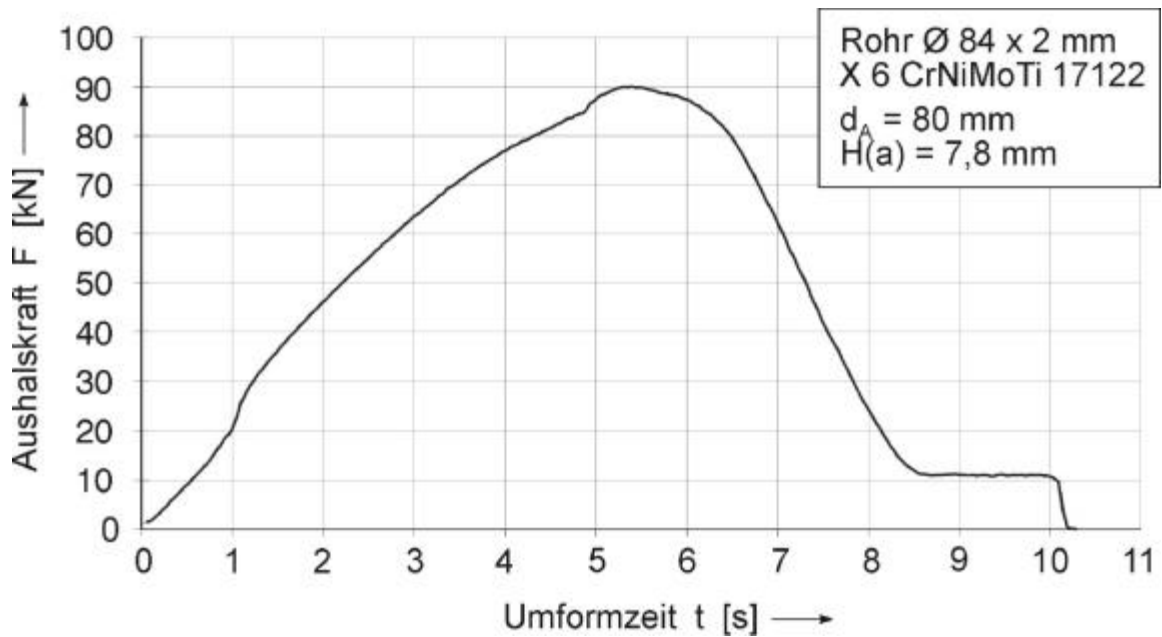


Bild 5.55: Kraft-Zeit-Verlauf beim Aushalsen

Es wird deutlich, dass für Aushalsverhältnisse $d_A/d_R = 1$ zu Beginn der Umformung ein stärkeres Ansteigen der Kraft im Gegensatz zu kleineren Aushalsverhältnissen verzeichnet wird, was auf die Einbeziehung des gesamten umzuformenden Materials im Bereich quer zur Rohrlängsachse (Bereich 1, 90°) zurückzuführen ist.

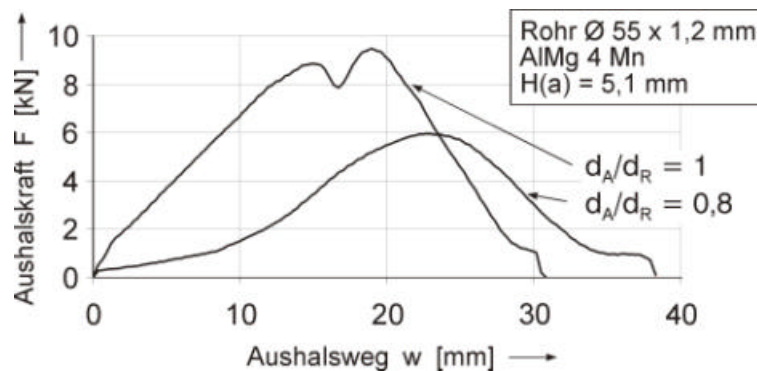


Bild 5.56: Kraft-Weg-Verlauf für unterschiedliche Aushalsungsdurchmesser

Der beim Kraft-Weg-Verlauf für das Umformen von Aushalsungen mit dem Aushalsverhältnis $d_A/d_R = 1$ auftretende Rückgang der Umformkraft vor Erreichen des Maximalwertes (Bild 5.56) tritt auf, wenn die Federnut des Spreizkegelwerkzeuges in diesem Bereich die Vorlockkante passiert.

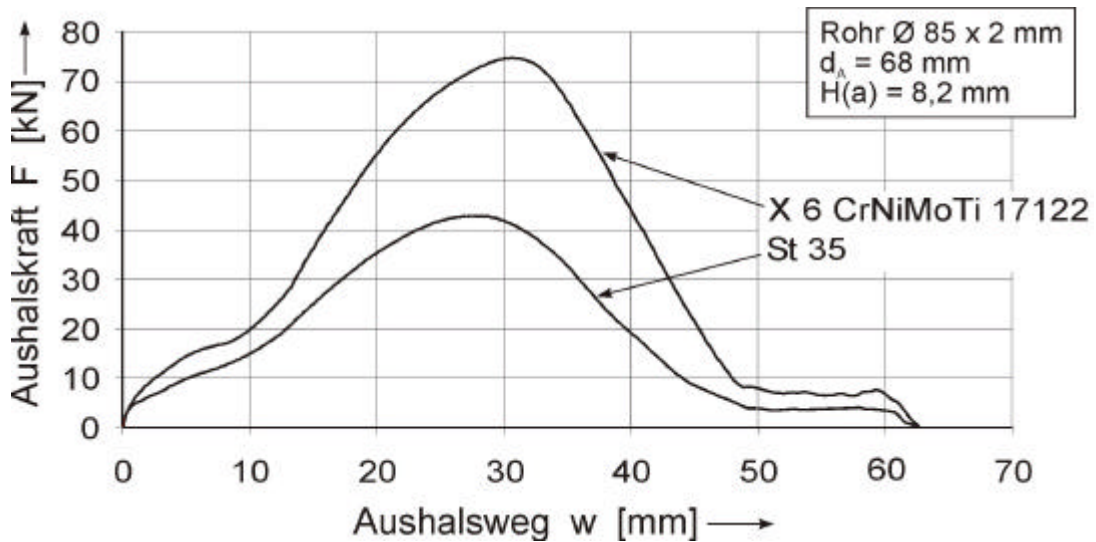


Bild 5.57: Kraft-Weg-Verlauf beim Aushalsen für unterschiedliche Rohrwerkstoffe

Beim Einsatz von Rohrwerkstoffen mit größerer Festigkeit ist eine größere Aushalskraft für die Umformung erforderlich (Bild 5.57). Bei allen untersuchten Aushalsverhältnissen ergibt sich eine lineare Abhängigkeit des Kraftbedarfs von der dazugehörigen Aushalsungshöhe (Bild 5.58).

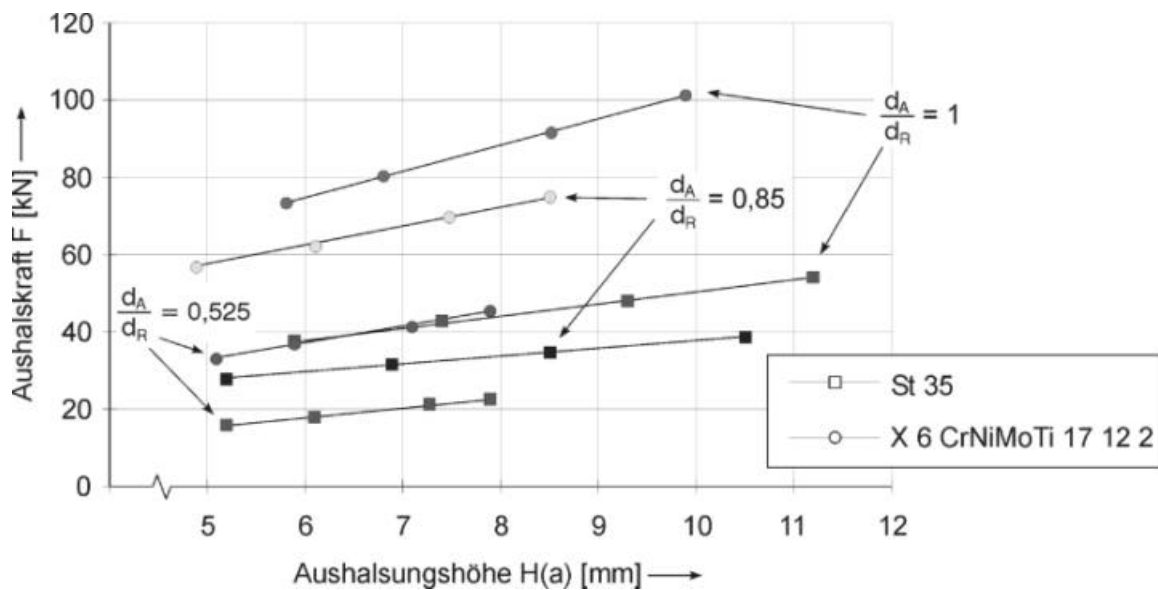


Bild 5.58: Abhängigkeit des Aushalskraftbedarfs von der Aushalsungshöhe

zuführen. Das vollständige Ausformen der Eckenbereiche setzt bei halbkugelförmigen Rohraushalswerkzeugen nach dem Aufstellen des Randes an den geraden Aushalsungskanten ein.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird das Aushalsen von Rohren und Rohrhalschalen untersucht. Dieses Fertigungsverfahren, mit dem einteilige Rohrverzweigungen hergestellt werden, steht in der industriellen Anwendung gesteigerten Anforderungen hinsichtlich der Bauteilqualität und Funktionalität gegenüber. Defizite bestehen besonders bei der Ebenheit des Aushalungsrandes und bei der erreichbaren Aushalsungshöhe, bedingt durch das frühzeitige Erreichen der Verfahrensgrenze. Ziel dieser Arbeit ist die Schaffung einer Verfahrensgrundlage durch die systematische Verfahrensanalyse und -optimierung für das Kaltaushalsen von Rohren mit Aushalsstempel und der Machbarkeitsnachweis für unrunde Rohraushalsungen. Es soll eine Fertigungsstrategie entwickelt werden, die den Anwender in die Lage versetzt, eine neue Aushalsung schneller und kostengünstiger im Vorfeld der Produktion zu entwickeln und zum Serieneinsatz zu bringen. Dazu ist eine Berechnungsmethode für die Vorlochgröße und -form zu entwickeln und zu verifizieren, die gleichzeitig eine Steigerung der Qualität des Aushalungsrandes im Hinblick auf dessen Ebenheit ermöglicht.

Der Arbeit liegen mit dem Aushalsen runder und rechteckiger Durchzugsformen zwei Schwerpunkte zugrunde. Für runde Aushalsungen steht die Schaffung einer Berechnungsvorschrift für die Vorlochgeometrie im Vordergrund. Begleitend dazu werden Untersuchungen zur weitergehenden Optimierung der elliptischen Vorlochgeometrie und zur Vergrößerung der Aushalsungshöhe durchgeführt.

Zur Berechnung der Vorlochgeometrie wird eine Berechnungsmethode und eine dazugehörige Software geschaffen, die sowohl für runde und rechteckige Rohraushalsungen eingesetzt werden kann. Aus der Vorgabe der Ellipsenachsen und eines Aufweitungskoeffizienten erfolgt die automatische Berechnung der elliptischen Vorlochgeometrie. Mit dieser Berechnungsmethode für die elliptische Vorlochgeometrie besteht erstmals die Möglichkeit die Vorlochform für das Aushalsen von Rohren mathematisch zu definieren. Weiterhin wird mit der Berechnungsmethode die erforderliche Vorlochform genau beschrieben, so dass eine Verbesserung der Ebenheitsabweichung des Aushalungsrandes um mehr als 100% erreicht werden kann.

Aus den experimentellen Untersuchungen werden Ergebnisse hinsichtlich der Formänderungsverteilung, dem Kraft-Weg-Verlauf, der Form- und Maßabweichungen und zur Werkzeuggestaltung abgeleitet. Es wird herausgearbeitet, dass die Halbkugelform des

Aushalsstempels beim Aushalsen von Rohren die besten Umformergebnisse ermöglicht. Neben einer verbesserten Formhaltigkeit der Aushalsungswand und einem geringeren Kraftbedarf wird vor allem die Formänderungsverteilung durch den Halbkugelstempel begünstigt. Am Aushalsungsrand treten bei gleichen Vorlochabmessungen geringere maximale Formänderungen auf. Die an den rissgefährdeten Bereichen angrenzenden Zonen stärker in die Umformung einbezogen, so dass größere Aushalsungshöhen erreichbar sind. Besonders beim Rohraushalsen unrunder Durchzüge werden die Vorteile halbkugelförmiger Aushalsstempel genutzt, da durch die positive Beeinflussung der Richtung der Kontaktzonenausbreitung der vorzeitige Versagensfall verhindert wird. Durch eine partielle Werkzeugschmierung kann diese Wirkung noch zusätzlich unterstützt werden.

Für das Aushalsen von Rohren werden im Rahmen der untersuchten Randbedingungen praxisrelevante Berechnungsgrundlagen geschaffen, die dem Anwender eine Vorausbestimmung der Verfahrensparameter Aushalsungshöhe, Vorlochabmessungen und Kraftbedarf erlauben. Das Grenzaufweitverhältnis beim Aushalsen von Rohren wird definiert und der Einfluss unterschiedlicher Vorlochbearbeitungsverfahren auf dessen Größe beschrieben.

Es werden erste grundlegende Untersuchungen zum Spannungs- und Formänderungszustand beim Kaltaushalsen von Rohren durchgeführt, deren Ergebnisse auch auf das Warmaushalsen und das Kragenziehen übertragbar sind.

In der Auswertung der durchgeführten experimentellen Untersuchungen ergeben sich für zukünftige Forschungsaktivitäten folgende Aufgaben:

- Untersuchen der Abhängigkeit des Aufweitungskoeffizienten k vom tribologischen System zwischen Werkzeug und Werkstück.
- Verifizieren der Ergebnisse für
 - das Warmaushalsen von Rohren
 - große Rohrwanddicken
 - das T-Drill-Verfahren.
- Schaffen einer Berechnungsgrundlage für den Aufweitungskoeffizienten k für die Vorlochform von rechteckigen Rohraushalsungen.

Weiterhin besteht Forschungsbedarf für eine neue Verfahrensvariante zum Rohraushalsen mit Aushalsstempel. Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen hat sich eine

neue Möglichkeit zur weiteren Steigerung der Qualität von Rohraushalsungen herauskristallisiert, die bisher noch nicht wissenschaftlich untersucht wurde. Sie besteht in der Verknüpfung der verfahrensbedingten Vorteile des Aushalsens mit Elastomerkern und denen des Aushalsens mit Aushalsstempel. Dazu wird ein Aushalsstempel aus Elastomer eingesetzt. Der Elastomerstempel besitzt ein gewisses Übermaß und lagert auf einer Grundplatte, die mit dem Zuganker verbunden wird. Beim Aushalsen formt der Elastomerstempel die Aushalsungswand in der Matrize. Gleichzeitig ist ein Kalibrieren der äußeren Aushalsungswand möglich, indem diese durch die Überdeckung zwischen Elastomerstempel und Aushalsmatrize an die Matrizengravur angelegt wird. Durch eine spezielle Formgebung des Elastomeraushalsstempels kann der Druck auf das umzuförmende Werkstück auch partiell variiert werden, so dass noch weitergehende Verfahrensoptimierungen möglich sind.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Schmoeckel, D.; Rupp, M.; Müller, F.:
Auf dem Weg zur Net-Shape-Umformung.
Werkstattstechnik (1997) 87, S. 310-314
- [2] Paefgen, F.-J.; Timm, H.:
Aluminium Space Frame - Ein neuer Weg im PKW-Bau.
VDI Berichte Nr. 1099, Düsseldorf 1993, S. 359-373
- [3] Althaus, R.:
Die Räder greifen wieder.
Ingenieur Digest 10/ 94, S. 27-30
- [5] Förster, H.:
Technologie von ausgedornten Sammlern und Rohren.
Fertigungstechnik und Betrieb, Berlin 10 (1960) 8, S. 468-474
- [4] Ogura, T.; Ueda, T.; Takagi, R.:
Über die Anwendung eines hydraulischen Ausbauchverfahrens.
Industrie-Anzeiger, Essen; Teil 1: 88 (1966) 37, S. 769-772;
Teil 2: 88 (1966) 48, S. 1001-1004
- [6] N.N.:
Sonderschweißmaschine für feuchtigkeitsunempfindliche Rohrabgänge aus Edelstahl.
Blech Rohre Profile, Coburg 42 (1995) 7/8, S. 481-482
- [7] DIN 8584, Blatt 5:
Fertigungsverfahren Zugdruckumformen, Kragenziehen, Begriff.
Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin 30 und Köln, April 1971
- [8] Knaupp, M.; Schulte-Beckhausen, J.; Downing, C.:
Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von Hochdruck-Abrasivstrahlen zum Bearbeiten von ein- und doppelwandigen Schalenbauteilen. Vortrag zur Int. Konferenz „Hydroumformung von Rohren, Strangpressprofilen und Blechen“
Fellbach 05.-07.11.2001, Tagungsband S. 447 – 464
- [9] Ehrenberg, H.:
Aushalsen im Rohrleitungs- und Behälterbau.
Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf 1965
- [10] Romaschko N.I.; Odnoduschni, W.A.; Moschnin, E:N.; Welisek, I.:
Entwicklung und Untersuchung der technologischen Prozesse des Pressens von nichtradialen Stützen für den Dampfgenerator PGW-1000.
Kuznecno-stampovocnoe proizvodstvo, Moskau 34 (1992) 7, S. 7-10
- [11] Foster, G.B.:
Draw-forming sheet metal T's.
American machinist, New York 106 (1962) 6, S. 116-117
- [12] Johnson, W.; Ghosh, S.K.; Mamalis, A.G.; Reddy, T.Y.; Reid, S.R.:
The quasi-static piercing of cylindrical tubes or shells.
International Journal of Mechanical Sciences, Oxford 22 (1980), S. 9-20

- [13] N.N.:
Das T-Drill-Rohraushalsverfahren.
Blech Rohre Profile, Coburg; Teil 1: 28 (1981) 2, S. 60-63;
Teil 2: 28 (1981) 4, S. 158-159;
Teil 3: 28 (1981) 6, S. 246-249
- [14] Christoph, H.:
Rationalisierungsmöglichkeiten im Rohrleitungsbau.
Bänder Bleche Rohre, Würzburg 26 (1985) 9, S. 225-227
- [15] N.N.:
Besonderes Aushalsverfahren zum Herstellen preisgünstiger Rohrverbindungen.
Maschinenmarkt, Würzburg 88 (1982) 27, S. 500
- [16] N.N.:
Pull out collars simplify „T“ joints.
Machinery and production engineering, 2. November 1983, S: 22-23
- [17] N.N.:
Die automatische Aushalsmaschine SEC-100.
Firmenprospekt T-Drill, 1995
- [18] Mozarov, O.R.; Lebedev, V.M.; Chovanov, N.N.:
Technologie und Vorrichtungen zur mechanischen Bearbeitung von Ovalöffnungen
für das Aushalsen von Hohlkörpern. Tjazeloe Masinstroenie, (1994) 9/10, S. 18-20
- [19] Zubcenko, A.S. u.a.:
Technologie zur Herstellung von T-Stücken durch kombiniertes Einwalzen und
Abstrecken von Rohren. Tjazeloe Masinstroenie, (1994) 7, S. 25-28
- [20] Thiruvarudchelvan, S.:
A theory for the bulging of aluminium tubes using a urethane rod.
Journal of Materials Processing Technology, 41 (1994), S. 311-330
- [21] Neubauer, A.; Sinke, J.; Bolt, P.J.:
Gummipressen - eine Alternative für die Kleinserienfertigung von kleinformigen
Blechformteilen. VDI - Berichte Nr. 1277, Düsseldorf 1996, S. 231-254
- [22] Johannson, T.G.:
Flexforming von Prototyp- und Kleinserien-Bauteilen.
Vortrag zur Int. Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“
Fellbach 23./24.05.2000, Tagungsband S. 569-592
- [23] Spur, G.; Stöferle, Th.:
Handbuch der Fertigungstechnik, Band 2/3: Umformen/Zerteilen.
Carl Hanser Verlag München, Wien 1985
- [24] Oehler, G.:
Kurzberichte, Kragenziehen mit Hilfe von Kugeln.
Werkstattstechnik, 59 (1969) 2, S. 85
- [25] Butler, R.A.:
A necking operation on a heavy curved-plate component.
Machinery, London 95 (1959), S. 210-212
- [26] Lowack, H.:
Aushalsen von Rohren.
TH Aachen, Diplomarbeit 1963

- [27] Ludewig, F.:
Erhöhte Genauigkeit und Sicherheit in der autogenen Wärmtechnik durch
Einsatz moderner Steuer- und Regelsysteme und Modifizierung der Brenner.
Der Praktiker, Schweißen und Schneiden, Düsseldorf (1977) 9, S. 164-166
- [28] Moschnin, E.N. Romaschko, N.I.; Tschërba, O.W.; Odnoduschni, V.A.;
Lukjanenko, J.L.: Verfahren zum Formen von Rohrstutzen und zum Durchziehen
von Kragen an großen, dickwandigen Behältern und Rohren.
Kuznecno-Stampovocnoe Proizvodstvo, 32 (1990) 2, S. 10-13
- [29] Ehrenberg, H.:
Vorrichtungen zum Aushalsen von Behälterböden.
Schweißtechnik, Wien 29 (1975) 6, S. 98-100
- [30] Ehrenberg, H.; Schumacher, K.:
Wärmbrenner - ein wichtiges Werkzeug für Industrie und Handwerk.
Der Praktiker, Düsseldorf; Teil 1: 33 (1981) 8, S. 184-185;
Teil 2: 33 (1981) 9, S. 243-245;
Teil 3: 33 (1981) 10, S. 252-255
- [31] Guntermann, A.; Hoppe, H.-J.; Schoen, E.:
Aushals- und Erwärmungsversuche mit Erdgas und Propan an hochdruckfesten
Apparateteilen. Gaswärme International, 42 (1993) 7/8, S. 332-336
- [32] Okada, K.; Asao, H.; Watanabe, S.:
Analyses of Deformation Behaviour in Burring of Tube Using Temperature
Gradient. Journal of JSTP, 32 (1991) 364, S. 583-588
- [33] EP 0 322 722 A2; B 21 C 37/29
Verfahren und Vorrichtung zum Aushalsen von Blechrohren.
- [34] Plosteiner, K.- H.:
Mit dem Werkzeug zum Werkstück.
Industrieanzeiger, Essen 107 (1985) 33, S. 18-19
- [35] Plosteiner, K.- H.:
Aushalsungen an Rohren und Blechen.
Industrieanzeiger, Essen 104 (1982) 34, S. 18-20
- [36] Nass, R.:
Das Aushalsen von Blechen und Rohren in kaltem Zustand bei Wanddicken
zwischen 3 und 9 mm. TH Stuttgart, Dissertation 1964
- [37] Nass, R.:
Kaltaushalsen von 3 bis 9 mm dicken Blechen und Rohren (I).
Bänder Bleche Rohre, Düsseldorf 7 (1966) 2, S. 55-60
- [38] Nass, R.:
Kaltaushalsen von 3 bis 9 mm dicken Blechen und Rohren (II).
Bänder Bleche Rohre, Düsseldorf 7 (1966) 4, S. 179-185
- [39] EP 0 328 790 A1; B 21 D 19/04
Method and conversation apparatus for the conversion into a collar of an edge
portion around a hole in a blank using a converter tool and converter mandrel
suitable for the conversion apparatus.

- [40] EP 0 446 089 A1; B 21 C 37/29, G 21 C 13/02
Procédé et installation de formage d'une levre circulaire autour d'une ouverture.
- [41] EP 0 004 240 B1; B 21 C 37/29
Installation de fabrication de tubulures d'attente sur une paroi de très forte épaisseur.
- [42] EP 0 044 858 B1; B 21 C 37/29, B 21 D 39/04 // B 23 B 47/18
A flange forming drill means.
- [43] EP 0 002 163 B1; B 21 C 37/29, B 21 D 19/02
Outil combiné et réversible avec porte-outil, pour l'obtention de collerettes sur tuyauteries ou surfaces planes.
- [44] DE-OS 37 44 046 A1; B 21 C 37/29
Verfahren und Vorrichtung zum Aushalsen von Blechrohren.
- [45] DE-OS 30 09 749 A1; B 21 C 37/29
Vorrichtung zum Aushalsen von Rohren.
- [46] DE-OS 32 06 023 A1; B 21 D 22/16
Vorrichtung zur Herstellung rotationssymmetrischer Aushalsungen.
- [47] DE-OS 32 08 212 A1; B 21 C 37/29
Gerät bzw. Vorrichtung zum Herstellen eines Loches und eines das Loch umschließenden bzw. umrandenden Kragens in der Seite eines Rohres.
- [48] DE-OS 32 08 211 A1; B 21 C 37/29
Vorrichtung zur Herstellung einer elliptischen Lochung in der Wandung eines Rohres.
- [49] DD 150 439; B 21 D 31/02
Verfahren zum Aushalsen vorher gelochter Blechteile.
- [50] DD 271 656 A1; B 21 C 37/29, B 21 C 3/16
Aushalsvorrichtung.
- [51] Averkiev, A.Ju.:
Ermittlung der Umformbarkeit von Blechen und Rohren.
Kuznecno-stampovocnoe proizvodstvo, Moskau 32 (1990) 2, S. 19-24
- [52] Brambacher, F.:
Ermittlung der maximalen Aufweitverhältnisse beim Kragenziehen.
Umformtechnik, Zwickau 5 (1971) 3, S. 46-48
- [53] Dange, P.R.; Subramanian, N.S.:
Hole flanging of sheet metals - an analysis of the process.
Sheet Metal Industries, 49 (1972) 3, S. 209-210
- [54] Ghosh, S.K.; Mamalis, A.G.:
Das Lochen und Lochbördeln von Blechwerkstoffen.
Bänder Bleche Rohre, 21 (1980) 11, S. 489-495
- [55] Küppers, W.:
Das Verhalten nichtrostender Feinbleche beim Kragenziehen.
Blech Rohre Profile, Coburg 18 (1971) 10, S. 403-409

- [56] Parachin, V.K.:
Untersuchung der Formänderungen beim Durchziehen.
Kusnecno-stampovocnoe proizvodstvo, Moskau 15 (1973) 4, S. 13-17
- [57] Reissner, J.:
Bedeutung der Fließortkurve in der Blechumformung.
Blech Rohre Profile, Coburg 28 (1981) 3, S. 106-110
- [58] Reissner, J.; Rauter, A.; Ulli, A.:
Das Grenzaufweitverhältnis beim Kragenziehen in Feinblechen.
Maschinenmarkt, Würzburg 82 (1976) 99, S. 1919-1920
- [59] Strasser, F.:
Blechdurchzüge.
Werkstatt und Betrieb, 113 (1980) 1, S. 50-52
- [60] Strasser, F.:
Long holes for thin parts.
Machine Design, January 26, 1978, S. 100-101
- [61] Judowitsch, Z.S.; Piskov, V.F.:
Die Verfahrensparameter bei der Kombination Lochen und Kragenziehen.
Kuznecno-stampovocnoe proizvodstvo, Moskau 20 (1978) 2, S. 10-11
- [62] Kasper, A.S.; Weeks, M.L.; Borden, M.P.:
Sheet metal stretch flange analysis - a manufacturing viewpoint.
SAE Paper 750197, 1975
- [63] Richards, W.:
The Production of Components with Extruded Necks.
Machinery London; Teil 1: 86 (1955) 2, S. 298-300;
Teil 2: 86 (1955) 3, S. 586-589;
Teil 3: 86 (1955) 6, S. 1303-1305;
Teil 4: 86 (1955) 9, S. 679-682;
Teil 5: 86 (1955) 12, S. 1433-1437
- [64] Wilken, R.:
Das Biegen von Innenborden mit Stempeln.
Forschungsbericht Nr. 794, Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen 1959
- [65] VDI-Richtlinie 3359:
Blechdurchzüge, Fertigungsverfahren und Werkzeuggestaltung.
VDI Verlag, Düsseldorf, Dezember 1986
- [66] Schlagau, S.:
Einfluß überlagerter Druckspannungen auf die Verfahrensgrenzen beim
Kragenziehen von Aluminium. Mitteilung aus dem Institut für Umformtechnik der
TH Darmstadt, 62 (1986) 11, S. 826-829
- [67] Rauter, A.; Reissner, J.:
Ein Beitrag zur Theorie des Kragenziehprozesses.
Bänder Bleche Rohre, Düsseldorf 16 (1975) 11, S. 461-463
- [68] Schlagau, S.:
Eine neue Variante des Kragenziehens.
2.Umformtechnisches Kolloquium in Darmstadt, 6.-7. März 1985

- [69] Schlagau, S.:
Verfahrensverbesserung beim Kragenziehen durch Überlagerung von Druckspannungen. TH Darmstadt, Dissertation 1988
- [70] Deh, R.; Weisel, B.:
Untersuchungsergebnisse zum Kaltaufweiten dicker Bleche.
Fertigungstechnik und Betrieb, Berlin 21 (1971) 6, S. 367-371
- [71] Petzold, W.:
Untersuchungen zur umformtechnischen Fertigung von Ergänzungsformen an Blechteilen. TH Magdeburg, Dissertation B 1985
- [72] Popov, E.A.:
Grundlagen der Blechumformung.
Verlag Maschinenbau, Moskau 1977 (-)
- [73] Romanowski, W.P.:
Handbuch der Kaltumformung.
Verlag Maschinenbau, Moskau 1971, S. 278-288 (-)
- [74] Averkiev, A.Ju.; Baskov, B.V.:
Durchziehen von Kragen mit konischem Stempel.
Umformtechnik, Zwickau 2 (1968) 4, S. 9-13
- [75] Muzykiewicz, W.; Foryt, M.:
Kragenziehen in Tiefziehblech.
Obrobka Plastyczna, Krakau, 4 (1993) 2/3, S. 13-22
- [76] Oehler, G.:
Die höchst erreichbare Bördelhöhe beim Kragenziehen vorgelochter Bleche.
Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, Nr. 39, Köln/Opladen: Westdeutscher Verlag 1953, S. 27-40
- [77] Schmoeckel, D.; Schlagau, S.:
Verfahrensgrenzen beim Kragenziehen durch Drucküberlagerung.
VDI-Berichte, S. 81-103
- [78] Kluge, S.; Bräunlich, H.:
Fertigungsprobleme bei der Herstellung hoher Kragen an Werkstücken aus Grobblech. Umformtechnik, Zwickau 16 (1982) 5, S. 32-39
- [79] Ersov, V.I.; Fedosowa, S.A.; Sobol, A.I.:
Ein Weg zur Intensivierung des Prozesses der Aushalsung.
Kuznecno-stampovocnoe proizvodstvo, Moskau 25 (1983) 4, S. 20-22
- [80] Richards, W.:
What to consider when tooling for extruded holes.
Machinery New York, 64 (1957) 9, S. 193-200
- [81] Schmid, W.:
Kragenziehen mit anschließendem Gewinderollen.
VDI-Berichte Nr. 330, 1978, S. 39-42
- [82] Schlagau, S.:
Kragenziehen mit Gegenhalter verringert die Reißgefahr.
Bänder Bleche Rohre, 27 (1986) 1/2, S. 9-12

- [83] Petzold, W.; Reps, D.:
Herstellung von Durchzügen an Blechteilen.
Blech Rohre Profile, 46 (1999) 5, S.54 - 60
- [84] Lange, K.:
Lehrbuch der Umformtechnik, Band 3: Blechumformung.
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1975, S. 267-275
- [85] Boes, P.J.M.:
Das Kragenziehen. Mitteilung der Deutschen Forschungsgesellschaft für
Blechverarbeitung und Oberflächenbehandlung, Düsseldorf 22 (1971) 4, S.68-75
- [86] Chitkara, N.R.; Gibson, S.:
Hole flanging of clamped thin plates of anisotropic materials.
Advances in machine tool design and research, Proceedings of the
International MTDR Conference, Oxford, 18 (1977), S. 347-359
- [87] Chitkara, N.R.; Johnson, W.:
Hole flanging and piercing of circular plates.
Sheet Metal Industries, 51 (1974) 10, S. 635-640
- [88] Hayashi, H.; Urabe, T.; Hisamatsu, S.; Nagai, Y.:
Hole expanding test for evaluating stretch flangability.
IDDRG Working Groups 95, Colmar, 22.-24. May 1995, S. 151-157
- [89] Jilek, L.; Sommer, B.:
Formänderungsverlauf beim Kragenziehen großer Werkstücke für die
Kernergietechnik (tschechisch). Hutnicke listy, 34 (1979) 2, S.122-126
- [90] Johnson, W.; Chitkara, N.R.; Bex, P.A.:
Characteristic features in the hole flanging and piercing of thin and thick circular
plates using conical and ogival punches. Proc. 15th Int. MTDR Conf. Birmingham
1974, London: Mac Millan, 1975, S. 695-701
- [91] Johnson, W. Chitkara, N.R.; Ibrahim, A.H.; Dasgupta, A.K.:
Hole flanging and punching of circular plates with conically headed cylindrical
punches. Journal Of Strain Analysis, 8 (1973) 3, S. 228-241
- [92] Kienzle, O.; Timmerbeil, H.:
Gestaltung der Werkzeuge zum Durchziehen enger Kragen, Konstruktions-
richtlinien. Mitteilung der Deutschen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung
und Oberflächenbehandlung, Düsseldorf
Nr. 19; (1953), S. 250-252 (Teil 1)
Nr. 1, (1954), S. 2-9 (Teil 2)
Nr. 4, (1954), S. 41 (Teil 3)
Nr. 6, (1954), S. 66-70 (Teil 4)
- [93] Kobayashi, M.; Kamada, A.; Terabayashi, T.; Asao, H.:
Press formability of face-centered cubic metals at cryogenic temperatures.
Advances in machine tool design and research, Proceedings of the International
MTDR Conference, Oxford, 20 (1979), S. 239-246
- [94] Kluge, S.:
Simulation des Kraft-Weg-Verlaufs beim Umformen von Kragen.
Bänder Bleche Rohre, Düsseldorf 36 (1995) 5, S. 30-34, 39-40

- [95] Kluge, S.; Frobin, R.:
Umformverhalten von rostfreiem Stahlblech.
Vortrag 1. Sächsische Fachtagung Umformtechnik Chemnitz 1994,
Tagungsband S. 13/1 - 13/12
- [96] Hofmann, H.; Leib, U.:
Verfahrenskomponente "Kragenziehen" im System WITES-Umformtechnik.
Umformtechnik, Zwickau 24 (1990) 3, S. 113-118
- [97] Johnson, W.; Chitkara, N.R.; Minh, H.V.:
Deformation modes and lip fracture during hole flanging of circular plates of
anisotropic materials. Journal of Engineering for Industry, August 1977, S. 738-748
- [98] Oehler, G.:
Blechdurchzüge. Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung
(1963) 18/19, S. 259-275
- [99] Wilken, R.:
Das Biegen von Innenborden mit Stempeln.
TH Hannover, Dissertation 1957
- [100] Clemas, G.G.; Al-Hassani, S.T.S.; Johnson, W.:
An investigation into the hole-flanging of Zn-Al superplastic sheet.
Proc. 16th Int.MTDR Conf. Manchester 1975,
London: Mac-Millan, 1976 S. 517-525
- [101] Johnson, W.; Mamalis, A.G.:
The perforation of circular plates with four-sided pyramidally-headed square-
section punches. Int. Journal of Mech.Science, Oxford, 20 (1978), S. 849-866
- [102] Remenik, W.S.; Rudman, L.I.:
Aushalsen rechteckiger Öffnungen an Blechteilen.
Kuznecno-stampovocnoe proizvodstvo, Moskau 2 (1960) 9, S. 5-8
- [103] Graf, W.-D.; Hofmann, H.:
Ziehen unrunder Kragen an Blechformteilen.
EFB-Forschungsbericht Nr. 52, 1993
- [104] Hofmann, H.:
Ziehen unrunder Kragen an Blechformteilen.
Vortragsmanuskript zur Sitzung des Arbeitskreises "Feinbleche" der Europäischen
Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Chemnitz, 16.06.1993
- [105] Fischer, H.; Hentschel, B.:
Ergebnisse der Untersuchungen über Langloch- und Rechteckdurchzüge.
Umformtechnik, Zwickau 6 (1972) 3, S.41-47
- [106] Graf, W.-D.; Hofmann, H.:
Ziehen unrunder Kragen an Blechteilen.
Blech Rohre Profile, Coburg 41 (1994) 9, S. 527-531
- [107] Hilbert, H.L.:
Das Durchziehen (Kragenziehen).
Blech, Coburg 14 (1967) 9, VI-1 - VI-5
- [108] Demeri, M.Y.; Tang, S.C.:
Computer simulation and experimental validation of stretch flanging.
Journal of Materials Shaping Technology, 9 (1991) 4, S. 241-251

- [109] Oehler, G.:
Die Zipfelung (Anisotropie) als Kriterium beim Lochaufweitverfahren.
Mitteilung der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung (1964) 16, S. 223-225
- [110] Schlosser, D.:
Geometrische Eigenschaften tiefgezogener kreiszylindrischer Näpfe.
Verlag W. Girardet, Essen 1977
- [111] Meier, M.:
Aufbau und Erprobung eines Versuchsstandes zur Untersuchung der Werkzeug- und
Verfahrensparameter beim Aushalsen von Rohren.
Diplomarbeit, TU Magdeburg 1992
- [112] Masuch, H.:
Verfahrenskenngrößen beim Aushalsen von Rohren.
Diplomarbeit, TU Magdeburg 1992
- [113] DIN EN 10002, T1:
Zugversuch, Teil 1, Prüfverfahren bei Raumtemperatur.
Beuth-Verlag, Berlin/Köln 1991
- [114] DIN 17457:
Geschweißte kreisförmige Rohre aus austenitischen nichtrostenden Stählen für be-
sondere Anforderungen.
Beuth-Verlag, Berlin/Köln 1985, S. 11
- [115] Flaxa, V.; Freier, K.; Kruska, J.-U.; Schroeder, M.:
Effects of r-and n-value on the geometry of a rotation-symmetrical cup.
IDDRG Working Groups 95, Colmar, 22.-24. May 1995, S. 73-86
- [116] Müschenborn, W.; Sonne, H.-M.; Hartmann, G.:
Neuzeitliche Methoden einer anwendungsbezogenen Feinblechprüfung.
Thyssen Technische Berichte 25 (1993) Nr. 1, S. 121-135
- [117] Pausch, E.; Hentrich, C.; Petzold, W.; Leihkauf, J.; Bräunlich, H.:
Numerische Simulation des Kragenziehens an Tiefziehteilen.
Blech Rohre Profile, Bamberg, 1/2 (1999) 46, S. 38-41
- [118] Bathe, K.J.:
Finite Elemente Methoden.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1986
- [119] Owen, D.R.J.; Hinton, E.:
Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice.
Pineridge, Swansea 1980
- [120] Schwarz, H.R.:
Methode der Finiten Elemente.
Teubner-Verlag, Stuttgart 1980
- [121] Zienkiewicz, O.C.:
Methode der Finiten Elemente.
Fachbuchverlag, Leipzig 1977
- [122] Tekkaya, E.:
Stand der Simulation in der Blechumformung.
Blech Rohre Profile, Bamberg 11 (1998) 45, S. 62-69

- [123] Scheler, U.:
Untersuchungen zur Erzeugung von partiellen Materialanhäufungen an scheibenförmigen Dickblechteilen durch translatorisches Kaltumformen.
Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1996
- [124] N.N.:
MARC/MENTAT-Nutzerhandbücher.
MARC Analysis Research Corporation, Palo Alto 1994
- [125] Ludwik, P.:
Elemente der technologischen Mechanik.
Springer-Verlag, Berlin 1909
- [126] Schlagau, S.:
Kragenziehen mit Druckspannungsüberlagerung.
Industrieanzeiger, 106 (1984) 102, S. 28-29
- [127] Reinhardt, O.:
Erstellung eines Berechnungsmodells zur Bestimmung der Vorlochachsen und der Aufweitungsfaktoren beim Aushalsen von Rohren.
Studienarbeit, TU Magdeburg 1994
- [128] Tautenhahn, H.:
Anisotropie und Textur von Rohren.
Blech Rohre Profile, Coburg 43 (1996) 5, S. 234-239
- [129] Küppers, W.; Schmidt, W.:
Über den Anisotropiewert r und seine Bedeutung für das Umformverhalten von nichtrostendem Feinblech.
Bänder Bleche Rohre, Düsseldorf 18 (1977) 8, S. 341-345
- [130] Michler, T.; Brand, J.:
Verschleißschutzschichten für Umformwerkzeuge.
Blech Rohre Profile, Bamberg 10 (1998) 45, S. 144-148
- [131] Herold, K.:
Methodik zur Berechnung der Umformkraft.
TU Dresden, Dr.-Ing. Dissertation 1989
- [132] Petzold, W.; Hentrich, C.:
Untersuchungen zu den Verfahrens- und Werkzeugkenngrößen beim Aushalsen von Rohren. EFB-Forschungsbericht Nr. 59, 1994
- [133] Petzold, W.; Hentrich, C.:
Untersuchungen zur Vorausbestimmung der Verfahrensparameter beim Aushalsen von Durchzügen unterschiedlicher Querschnittsformen in Hohlprofilen.
EFB-Forschungsbericht Nr. 88, 1996

CNC-Programm zum Vorlochfräsen von Korbbogenellipsen

```
%PMN9999 (ELL.AUS 2 RADIEN)
N1 G18
N2 G52
N3 G98 X-60 Y-5 Z-25 I120 J10 K50
N4 G99 X-60 Y-5 Z-25 I120 J10 K50
N5 T4 M67
N6 X15 Y50 Z-5
N7 F500 S800 M3
N8 Y5
N9 G1 Y-12 F100 M8
N10 G42
N11 G1 X24.5 Z-5
N12 X24.5 Z0
N13 G2 X0 Z24.5 R24.5
N14 G2 X-40.605 Z19.834 R179
N15 G2 X-40.605 Z-19.834 R20.365
N16 G2 X40.605 Z-19.834 R179
N17 G2 X40.605 Z19.834 R20.365
N18 G2 X-40.605 Z19.834 R179
N19 G2 X-56.35 Z0 R20.365
N20 G1
N21 G40 Y50 F500
N22 Y100
N23 M30
```

CNC-Programm für das Vorlochfräsen einer Ellipse

```
                                %PM
N100005 (ELLIPSENFRAESEN )
N1 G18 T11 M67 (ELLIPSE FRAESEN- PARAMETER BEACHTEN)
N2 G52
N3 E20=0.2 (WINKELSCHRITT)
N4 G18 E32=23.04 (Z-GANZACHSE B )
N5 G18 E33=51.18 (X-GANZACHSE A )
N6 G18 E27=5 (WZ-RADIUS)
N7 E21=90 (FESTER ANFANGSWINKEL)
N8 G18 E31=80 (ABSTAND ZENTRIERBOHRUNG)
N9 E22=E32:2
N10 E23=E33:2
N11 E28=E22-E27-1
N12 E29=2*E22+10
N13 E30=2*E23+10
N14 G98 X=-E23 Y-11 Z--(E22) I=E30 J30 K=E29
N15 G99 X=-E23 Y-12 Z--(E22) I=E30 J20 K=E29
N16 G0 Y50
N17 X0 Z0
N18 G1 Y10 F500
N19 G1 Y5 F500 S700 M3
N20 X0 Z=E28
N21 G1 Y7 F20 M8
N22 G43
N23 G1 X=E27 Z=E28 F30
N24
N25 G42
N26 G1 Z=E22
N27
N28 E24=E22*sin(E21)
N29 E25=E23*cos(E21)
N30 G1 X=E25 Z=E24
N31 E21=E21+E20
N32 E26=450.001-E21+10
N33 G29 E26 N=28
N34
N46 G0 Y50 M0
N47 G40
N48 E37=5-E27
N49 X=E31 Z0
N50 G1 Y5 F500
N51 G1 Y-10 F20
N510 Z=E37
N511 G2 X=E31 Z=E37 I=E31 K0 F30
N512 G1 Z0
N52 G0 Y10
N53 Y100 Z100
N54 M30
```

CNC-Programm für das Vorlochfräsen einer aufgeweiteten Ellipse

```

                                %PMN90001
(Vorlochfraesen mit k-Faktor
N1 G52 (PARAMETER BEACHTEN
N2 G18 T1 M6
N3 E91=30 (VORSCHUBGESCHW.ELL.FR.
N4 G18 E20=0.2 (WINKELSCHRITT
N5 E27=3 (WZ-RADIUS
N6 G18 E32=46.98303 (Y-ACHSE
N7 G18 E33=110.77237 (X-ACHSE
N8 G18 E42=234.79851 (RADIUS 2
N9 G18 E43=19.16722 (RADIUS 1
N10 G18 E52=2.79 (FAKTOR Y-ACHSE
N11 G18 E53=2.79 (FAKTOR X-ACHSE
N12 G18 E72=165.81151 (OEFFNUNGSWI.A1
N13 G18 E73=252.98774 (OEFFNUNGSWI.A2
N15 (ENDE DER EINZUSTELLENDEN PARAMETER
N16 E24=0
N17 E25=0
N18 E22=E32:2
N19 E23=E33:2
N20 E28=E22-E27-1
N21 E29=2*E22+10
N22 E30=2*E23+10
N23 G98 X-90 Y-15 Z--(E22) I180 J30 K=E29
N24 G99 X-90 Y-12 Z--E22-10 I180 J20
K=E29+20
N25 G0 Y50
N26 X0 Z0
N27 G1 Y10 F500
N28 S800 M3
N29 X0 Y5 Z=E28
N30 G1 Y-6 F=E91*0.5 M8 (Eintauchtiefe)
N31 G43
N32 G1 X=E27 F=E91
N33
N34 G42
N35
N36 G1 Z=E22
N37
N38 E21=90
N39
N40 (90 BIS 180)
N41
N42 E62=-1
N43 E63=-1
N44
N45 E24=E22*sin(E21)
N46 E24=E24+E52*E62*cos(E21)
N47 E25=E23*cos(E21)
N48 E25=E25+E53*E63*sin(E21)
N49
N50 G1 X=E25 Z=E24
N51 E21=E21+E20
N52 E26=E72-E21+0.001
N53 G29 E26 N=44
N54 G2 X=E25 Z=-E24 R=E43
N55
N56 (180 BIS 270)

                                N57
N58 E21=270-E72+E20
N59 E21=E21+90
N60
N61 E62=1
N62 E63=1
N63 E24=E22*sin(E21)
N64 E24=E24+E52*E62*cos(E21)
N65 E25=E23*cos(E21)
N66 E25=E25+E53*E63*sin(E21)
N67 G1 X=E25 Z=E24
N68 E47=E21
N69 E21=E21+E20
N70 E26=E73+0.001-E21
N71 G29 E26 N=63
N72 G2 X=-E25 Z=E24 R=E42
N73
N74 (270 BIS 360)
N75
N76 E21=540-E47
N77 E21=E21+E20
N78
N79 E62=-1
N80 E63=-1
N81
N82 E24=E22*sin(E21)
N83 E24=E24+E52*E62*cos(E21)
N84 E25=E23*cos(E21)
N85 E25=E25+E53*E63*sin(E21)
N86 G1 X=E25 Z=E24
N87 E47=E21
N88 E21=E21+E20
N89 E26=180.001+E72-E21
N90 G29 E26 N=81
N91 G2 X=E25 Z=-E24 R=E43
N92
N93 (360 BIS 450)
N94
N95 E21=450-E72+90
N96 E62=1
N97 E63=1
N98 E24=E22*sin(E21)
N99 E24=E24+E52*E62*cos(E21)
N100 E25=E23*cos(E21)
N101
E25=E25+E53*E63*sin(E21)
N102
N103 G1 X=E25 Z=E24
N104 E47=E21
N105 E21=E21+E20
N106 E26=E73+0.001-E21
N107 E26=E26+180
N108 G29 E26 N=98
N109
N110 G2 X=-E25 Z=E24 R=E42
N111 M5
N112 G0 Y100
N113 G40
N114 M30

```

Makro zur Vorlochberechnung für unrunde Aushalsungen durch Abwicklung

Vorlochberechnung unter Annahme gleicher Dehnung

Rohrabmessungen

Rohraußen-ø: 85
Rohrstärke: 2

Vorkonturabmessungen

y-Maß: 29
x-Maß: 16
Radius: 6

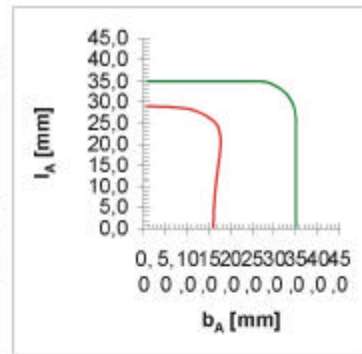
Vorlochkoordinaten

Aushalsabmessungen

Kante x (außen): 72
Kante y (außen): 72
Radius (außen): 10
Höhe (außen): 5

Abschnitte: 100

Makroausführung
Berechn: Ctr+C
Tabelle: Ctr+D



	x	y		x	y		x	y
0	16,019	0,0	34	17,094	14,889	67	13,266	27,316
1	16,02	0,424	35	17,152	15,352	68	12,868	27,514
2	16,023	0,849	36	17,211	15,817	69	12,468	27,7
3	16,028	1,274	37	17,271	16,284	70	12,068	27,871
4	16,035	1,699	38	17,331	16,753	71	11,667	28,025
5	16,044	2,124	39	17,393	17,224	72	11,269	28,162
6	16,055	2,55	40	17,454	17,696	73	10,874	28,279
7	16,069	2,976	41	17,508	18,168	74	10,485	28,379
8	16,084	3,402	42	17,554	18,64	75	10,103	28,459
9	16,101	3,83	43	17,592	19,109	76	9,729	28,52
10	16,12	4,257	44	17,621	19,577	77	9,362	28,565
11	16,141	4,686	45	17,639	20,041	78	8,991	28,606
12	16,165	5,116	46	17,647	20,501	79	8,615	28,646
13	16,19	5,546	47	17,642	20,954	80	8,235	28,684
14	16,216	5,977	48	17,624	21,401	81	7,849	28,718
15	16,245	6,41	49	17,592	21,838	82	7,459	28,751
16	16,276	6,843	50	17,544	22,265	83	7,066	28,782
17	16,308	7,278	51	17,479	22,678	84	6,668	28,81
18	16,342	7,713	52	17,396	23,076	85	6,266	28,835
19	16,378	8,15	53	17,295	23,457	86	5,862	28,86
20	16,415	8,589	54	17,174	23,818	87	5,454	28,881
21	16,454	9,028	55	17,03	24,162	88	5,044	28,901
22	16,495	9,469	56	16,856	24,496	89	4,631	28,918
23	16,537	9,912	57	16,652	24,818	90	4,216	28,933
24	16,581	10,356	58	16,415	25,125	91	3,8	28,949
25	16,626	10,802	59	16,146	25,414	92	3,381	28,959
26	16,673	11,249	60	15,844	25,684	93	2,961	28,968
27	16,721	11,698	61	15,51	25,935	94	2,54	28,977
28	16,77	12,148	62	15,159	26,179	95	2,118	28,984
29	16,821	12,6	63	14,798	26,421	96	1,695	28,987
30	16,873	13,054	64	14,426	26,656	97	1,272	28,994
31	16,927	13,51	65	14,046	26,885	98	0,848	28,994
32	16,981	13,968	66	13,659	27,106	99	0,424	28,994
33	17,037	14,427						

Lebenslauf

1. Angaben zur Person

Name: Cornelius Hentrich
Geburtstag: 08.11.1965
Geburtsort: Gernrode / Eichsfeld
Familienstand: verheiratet, zwei Kinder
Staatsangehörigkeit: Deutsch

2. Ausbildungsdaten

Schule 09/1972 bis 08/1980 Polytechnische Oberschule (POS), Gernrode
09/1980 bis 08/1984 Erweiterte Oberschule (EOS), Leinefelde
Abitur
Studium 09/1986 bis 02/1991 Technische Universität "Otto von Guericke"
Magdeburg
Fachr. Fertigungsprozeßgestaltung - Diplom

3. Wehrdienst

Grundwehrdienst 11/1984 bis 04/1986 Jagdgeschwader 3, Preschen

4. Praktika

Vorpraktikum zum 09/1984 bis 10/1984 Produktionsarbeiter im Milchhof, Leinefelde
Hochschulstudium 05/1986 bis 08/1986
Ingenieurpraktikum 09/1989 bis 02/1990 Magdeburger Armaturenwerke - MAW
Diplomarbeit 09/1990 bis 02/1991 Magdeburger Werkzeugmaschinenfabrik -
MAWEMA

5. Berufstätigkeit

03/1991 bis 09/1996 Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung
Umform- und Zerteiltechnik im
Institut für Fertigungstechnik der
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
seit dem 01.10.1996 Fertigungsverfahrensingenieur in der
DaimlerChrysler AG, Stuttgart