

Erweiterung der Umformgrenzen beim Tiefziehen und Kragenziehen durch Nachschieben von Werkstoff

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

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

von Dipl.-Ing. Manuel Otto M.Sc.
geb. am 6. November 1971 in Leinefelde

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

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. F. Lierath

Prof. Dr.-Ing. B. Viehweger

Doz. Dr.-Ing. habil. W. Petzold

Promotionskolloquium am 12. Dezember 2003

Vorwort des Verfassers

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

Diese Dissertation widme ich meiner Familie, Astrid, William und Dave Samuel sowie meinen Eltern, Willibald und Veronika, die mein Leben außerordentlich geprägt und mich während dieser Zeit immer unterstützt haben.

Magdeburg, Dezember 2003

Inhaltsverzeichnis

0	Formelzeichen und Abkürzungen	iii
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik.....	5
2.1	Vorbemerkung.....	5
2.2	Tiefziehen mit starrem Werkzeug.....	5
2.2.1	Tiefziehvorgang	6
2.2.2	Verfahrensgrenzen des Tiefziehens mit starrem Werkzeug	7
2.3	Möglichkeiten zur Erweiterung der Umformgrenzen beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug.....	9
2.3.1	Tiefziehen mit hydraulischem Nachschieben von Werkstoff	10
2.3.2	Tiefziehen mit mechanischem Nachschieben von Werkstoff	14
2.3.3	Verfahren zum Tiefziehen mit erweiterten Umformgrenzen ohne Nachschieben von Werkstoff.....	17
2.4	Kragenziehen	21
2.5	Möglichkeiten zur Erweiterung der Umformgrenzen beim Kragenziehen	23
2.6	Verfahren zur Herstellung von nabenförmigen Formelementen	25
2.7	Zusammenfassung – Stand der Technik.....	29
2.7.1	Tiefziehen	29
2.7.2	Kragenziehen	31
2.7.3	Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik	32
3	Zielstellung.....	35
4	Grundprinzip: Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (TNWW)	39
5	Untersuchungsprogramm	43
5.1	Fertigungsmittel.....	43
5.2	Versuchswerkstoffe.....	45
5.2.1	Ermittlung der mechanischen Kennwerte	46
5.2.2	Fließkurven.....	48
5.3	Versuchsparameter.....	50
5.4	Versuchsdurchführung	52
5.5	Versuchsstand und Messeinrichtung.....	53
5.6	Messmethoden und Messgeräte	54

6	Untersuchungsergebnisse: Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (TNWW)	57
6.1	Vorbemerkungen	57
6.2	Formänderungen	59
6.2.1	Theoretische Betrachtungen zum TNWW	59
6.2.2	Formänderungen beim TNWW	61
6.3	Verfahrensgrenzen	64
6.4	Umform- und Pressenkräfte.....	68
6.4.1	Theoretische Betrachtungen zum TNWW	68
6.4.2	Pressenkräfte beim TNWW.....	73
6.5	Endteileigenschaften	77
6.5.1	Verlauf der Blechdicke	77
6.5.2	Höhe der Formelemente (Napfhöhen)	80
6.5.3	Verlauf der Härte.....	82
6.6	Prozesssimulation.....	84
6.6.1	Vorbemerkungen.....	84
6.6.2	Verifizierung des FE-Modells	85
6.6.3	Numerische Ermittlung der Verfahrensgrenzen	90
6.7	Resümee	92
7	Untersuchungsergebnisse: Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (KNWW)	95
7.1	Verfahrensprinzip KNWW	95
7.2	Formänderungen	97
7.3	Verfahrensgrenzen	99
7.4	Umform- und Pressenkräfte.....	103
7.5	Endteileigenschaften	104
7.5.1	Verlauf der Blechdicke	104
7.5.2	Höhe der Formelemente (Kragenhöhen)	106
7.5.3	Verlauf der Härte.....	110
7.5.4	Kragenziehen mit überwiegendem Nachschieben von Werkstoff bei geringen Aufweitverhältnissen	112
8	Anwenderrichtlinien	115
9	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	123
9.1	Zusammenfassung	123
9.2	Schlussfolgerungen und Ausblick	125
10	Literatur	129

0 Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Begriffe
A	[mm ²]	Fläche
A_{80}	[%]	Bruchdehnung
A_{gl}	[%]	Gleichmaßdehnung
A_{tats}	[mm ²]	tatsächlich Fläche
b	[mm]	Breite
d	[mm]	Durchmesser
d_0	[mm]	Ausgangsdurchmesser der Ronde
$d_{0\ max}$	[mm]	maximaler möglicher Ausgangsdurchmesser der Ronde beim Erreichen des Grenzziehverhältnisses
d_1	[mm]	aktueller Durchmesser
$d\alpha$	[°]	Winkeldifferential
d_{Fl}	[mm]	Flanschdurchmesser
d_i	[mm]	Innendurchmesser
$d_{Kr\ 0}$	[mm]	Vorlochdurchmesser
$d_{Kr\ a}$	[mm]	Außendurchmesser des Kragens
$d_{Kr\ i}$	[mm]	Innendurchmesser des Kragens
d_m	[mm]	mittlerer Durchmesser
dr	[mm]	Radiendifferential
d_{R1}	[mm]	Durchmesser des Raster-Kreises nach der Umformung
d_{R0}	[mm]	Durchmesser des Raster-Kreises vor der Umformung
d_{St}	[mm]	Stempeldurchmesser
d_x	[mm]	fiktiver Durchmesser nach der Umformung

d_y	[mm]	ursprünglicher Durchmesser des betrachteten Volumenelementes
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
F	[N]	Kraft
F_A	[kN]	Aufweitkraft
F_B	[kN]	Biegekraft
F_{id}	[kN]	ideelle Umformkraft
F_{NH}	[kN]	Niederhalterkraft
F_{NHmax}	[kN]	maximale, experimentelle Niederhalterkraft (werkzeugbedingt)
F_{NHmin}	[kN]	minimale, experimentelle Niederhalterkraft
F_{Ns}	[kN]	Nachschiebekraft
F_{Pr}	[kN]	Pressenkraft
F_R	[kN]	Reibungskraft
F_{St}	[kN]	Ziehstempelkraft
F_U	[kN]	Umformkraft
h	[mm]	Höhe
h_{Kr}	[mm]	theoretische Kragenhöhe beim Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff
h_{th}	[mm]	theoretische Höhe beim Nachschieben von Werkstoff
h_{thk}	[mm]	theoretische Höhe beim konventionellen Kragenziehen
h_R	[mm]	Randhöhe
k	[-]	Aufweitverhältnis
k_f	[N/mm ²]	Fließspannung
k_{fm}	[N/mm ²]	mittlere Fließspannung
k_{max}	[-]	Grenzaufweitverhältnis

n	[-]	Verfestigungsexponent
ρ_i	[N/mm ²]	Innendruck
ρ_{NH}	[N/mm ²]	Niederhalterdruck
ρ_{St}	[N/mm ²]	Stempeldruck
r	[-]	senkrechte Anisotropie
R_m	[N/mm ²]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[N/mm ²]	0,2% - Dehngrenze (techn. Streckgrenze)
r_{ZR}	[mm]	Ziehringradius
s	[mm]	Blechdicke
s_0	[mm]	Ausgangsblechdicke
s_1	[mm]	aktuelle Blechdicke
s_{mink}	[mm]	minimale Blechdicke am Kragenrand
t	[s]	Zeit
x_{Ns}	[mm]	Nachschiebeweg
x_{Pr}	[mm]	Pressenweg
x_{St}	[mm]	Stempelweg
β_0	[-]	Ziehverhältnis im Erstzug
β_{ges}	[-]	Gesamtziehverhältnis
β_{max}	[-]	Grenzziehverhältnis
β_{Ns}	[-]	Nachschiebe-Ziehverhältnis
σ_{max}	[N/mm ²]	maximale Spannung
σ_{min}	[N/mm ²]	minimale Spannung
σ_n	[N/mm ²]	Normalspannung
σ_r	[N/mm ²]	Radialspannung
σ_t	[N/mm ²]	Tangentialspannung

σ_v	[N/mm ²]	Vergleichsspannung
σ_1	[N/mm ²]	größte Hauptnormalspannung
σ_2	[N/mm ²]	mittlere Hauptnormalspannung
σ_3	[N/mm ²]	kleinste Hauptnormalspannung
<hr/>		
φ_g	[-]	Hauptformänderung
φ_n	[-]	normale Formänderung
φ_r	[-]	radiale Formänderung
φ_{ra}	[-]	radiale Formänderung an der Außenseite des Kragens
φ_{ri}	[-]	radiale Formänderung an der Innenseite des Kragens
φ_t	[-]	tangentiale Formänderung
<hr/>		
μ	[-]	Reibungskoeffizient
<hr/>		
Δr	[-]	ebene Anisotropie
<hr/>		

Abkürzungen

TNWW	Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss
KNWW	Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
DMC	Digital Measurement Converter
FEM	Finite Elemente Methode
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik
PMM	Präzisionsmessmaschine

1 Einleitung

Das Umsetzen von Erkenntnissen aus technischer und naturwissenschaftlicher Forschung in innovative Fertigungsverfahren und Produkte bestimmt maßgeblich die Wettbewerbsfähigkeit eines Landes. Dabei zeichnet sich eine optimale Produktentwicklung durch eine volle Nutzung der Potenziale des Werkstoffes, die funktionsoptimierte Bauteilgestaltung und die Anwendung rationeller Herstellungsverfahren aus /1/. Auf die Fertigung bezogen bedeutet dies, Verfahren zu entwickeln und umzusetzen, die eine hohe Produktivität aufweisen, eine minimale Anzahl an Fertigungsstufen benötigen, eine hohe Materialausnutzung gewährleisten, geringe Nacharbeit erfordern, eine günstige Energiebilanz besitzen sowie verbesserte Endteileigenschaften durch eine höhere Form- und Maßgenauigkeit bzw. durch eine verbesserte Oberflächengüte erreichen /2/.

Diese an die Fertigungsverfahren gestellten Forderungen haben dazu geführt, dass in zahlreichen Zweigen des Maschinen- und Fahrzeugbaus aber auch des Apparate- und Gerätebaus eine Substitution von bisher geschmiedeten und gegossenen Werkstücken durch solche aus Blech angestrebt wird /3 bis 11/. Beispiele für die Realisierung von Leichtbaukonzepten und die Ausführung von Konstruktionsteilen in Blech zeigt **Bild 1-1**.



Bild 1-1: Substitutionslösungen in Blech.

Bei einer Fertigungsweise aus Blech kann durch die erreichbaren hohen Oberflächengüten und engen Toleranzen eine aufwändige spanende Nacharbeit entfallen. Dies reduziert den Werkstoffeinsatz und spart zusätzliche Bearbeitungskosten. Durch diese optimale Ausnutzung des Werkstoffes kann in vielen Fällen eine erhebliche Gewichtseinsparung gegenüber Schmiede- oder Gusswerkstücken erreicht werden. Eine solche Gewichtseinsparung ist gerade beim Einsatz von Blechteilen im Fahrzeug- und Getriebebau durch die Verminderung der bewegten Massen von Vorteil.

Eine verstärkte Anwendung der vorteilhaften Teilefertigung aus Blech wird häufig durch die verfahrensbedingten Grenzen einer umformtechnischen Fertigung eingeschränkt. Fortschritte lassen sich nur durch die Entwicklung und Umsetzung von Verfahren mit erweiterten Potenzialen erreichen (**Bild 1-2**).



Bild 1-2: Anforderungen in der modernen Blechumformung.

Konstruktionsteile aus Dickblech (Blehdicken ab 2 mm) sind häufig charakterisiert durch rotationssymmetrische, scheibenförmige Geometrien und lassen sich vorteilhaft an Stelle einer Guss- oder Schmiedeausführung aus Blech herstellen. In vielen Fällen weisen diese Werkstücke im Zentrum napf- oder nabenförmige Formelemente auf (**Bild 1-3** und **Bild 1-4**).



Pumpengehäuse /18/

Befestigung für Sicherheitsgurte /18/

Deckel einer Kraftregeleinheit /17/

Bild 1-3: Napf- und nabenförmige Formelemente an napfförmigen und scheibenähnlichen Grundkörpern.

Zur Fertigung von napf- oder nabenförmigen Formelementen aus Dickblechteilen werden häufig die Verfahren Tiefziehen oder Kragenziehen eingesetzt. Sind die Durchmesser der napf- oder nabenförmigen Formelemente im Verhältnis zum scheibenförmigen Grundkörper sehr klein, ist eine umformtechnische Fertigung des Dickblechteiles „aus einem Stück“ nur mit einem hohen Aufwand möglich /12 bis 17/. Wird das Verfahren des Tiefziehens in seiner konventionellen Weise angewendet, sind für die Ausformung der Geometrie eine große Anzahl von Ziehstufen (Weiterzügen) erforderlich. Darüber hinaus weisen die auf diese Art gefertigten Teile eine aus-

geprägte Welligkeit des Flansches auf, deren Ursache das mehrmalige Biegen des Flansches in den einzelnen Ziehstufen ist /16/.

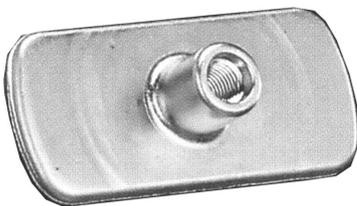
Wird das konventionelle Kragenziehen zur Fertigung von nabenförmigen Formelementen mit kleinen Durchmessern eingesetzt, kann kein zufrieden stellendes Umformergebnis in Form einer funktionell ausreichenden Kragenhöhe ohne Einschnürungen erzielt werden. Bedingt durch das Verfahrensprinzip wird der Werkstoff in Richtung des Kragenrandes hin geschwächt. Ein anschließendes Stauchen, um eine angemessene Blechdicke am Kragenrand zu gewährleisten, würde die ohnehin geringe Kragenhöhe weiter verringern. Häufig ist das „Anformen“ eines Kragens (einer Nabe) nicht zu realisieren, so dass die Nabe als separat gefertigtes Werkstück durch unterschiedliche Methoden mit dem Grundkörper verbunden werden muss /18/.



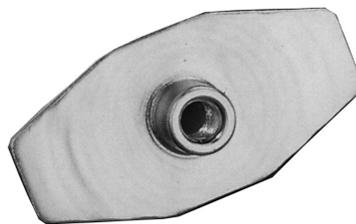
Pumpendeckel /18/



Flügelrad einer Pumpe



Gewindeplatten für Hinterachsbefestigung /18/



Kommutatorlager /18/

Bild 1-4: Nabenförmige Formelemente im Zentrum von scheibenförmigen Grundkörpern.

Eine Verbesserung der oben geschilderten Situation (ungenügende geometrische Endteileigenschaften, hohe Anzahl von Fertigungsstufen) erfordert die Anwendung neuer bzw. die Weiterentwicklung bestehender Verfahrensprinzipien mit dem Ziel, die Verfahrensgrenzen zu erweitern und das Spektrum der herstellbaren Teilegeometrien zu vergrößern.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung von technisch realisierbaren Lösungen zur Fertigung von napf- und nabenförmigen Formelementen an scheibenförmigen Dickblechteilen (**Bild 1-5**), die im Verhältnis zur Grundgeometrie kleine Durchmesser aufweisen, mit dem Ziel, notwendige Umformstufen zu reduzieren und

das Spektrum der herstellbaren Teilegeometrien zu erweitern. Mit den Ergebnissen von wissenschaftlichen Untersuchungen zu den zu entwickelnden Verfahrensvarianten sollen die Grundlagen für eine effektive Verfahrensplanung und Verfahrensrealisierung geschaffen und die Verfahrensvarianten technologisch determiniert werden.



napfförmiges Formelement



nabenförmiges Formelement

Bild 1-5: Scheibenförmiger Grundkörper mit napf- oder nabenförmigem Formelement.

2 Stand der Technik

2.1 Vorbemerkung

Um eine vergleichende Betrachtung und eine einheitliche Beschreibung der dargestellten Verfahrensvarianten bezüglich der Richtung ihrer wirkenden Spannungen und auftretenden Formänderungen zu ermöglichen, werden vorab die folgenden Koordinatenrichtungen definiert.

Die in dieser Arbeit verwendeten Koordinatenrichtungen der Volumenelemente (radiale, tangentielle und normale Richtung) bleiben für alle Positionen, die ein Volumenelement entlang des Querschnitts eines Werkstücks einnehmen kann, unverändert und sind als die Koordinatenrichtungen definiert, die ein Volumenelement bei einer gedachten Rückbiegung in die Ebene des Flansches gemäß **Bild 2-1** besitzt. Die Definition der Koordinatenrichtungen im Flansch ist wie folgt:

Die normale Richtung ist definiert durch die Richtung der Symmetrieachse des Werkstücks (normal zur Blechdicke), radiale Richtung bedeutet in Richtung des Mittelpunktes des Werkstücks und die tangentielle Richtung ist die Richtung, die durch eine Tangente an diesem Werkstückelement (Kreissegment) definiert ist.

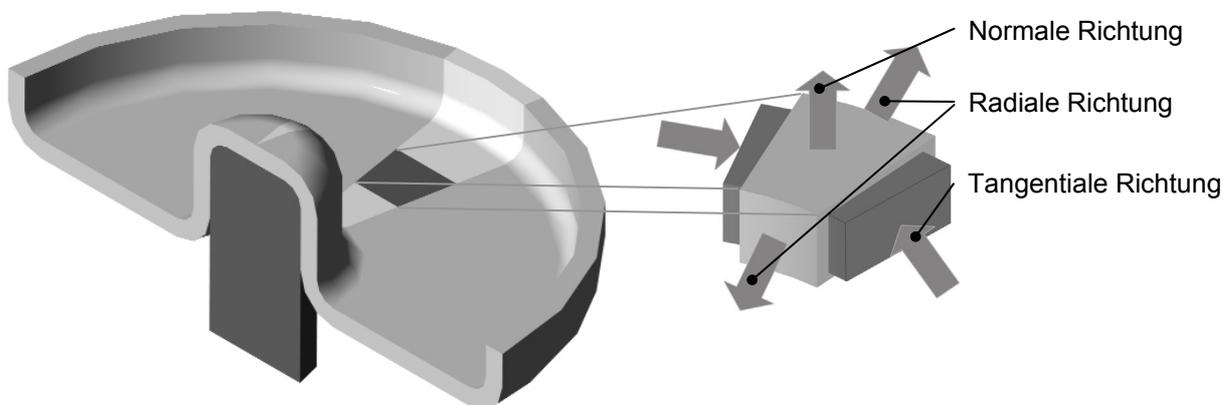


Bild 2-1: Koordinatenrichtungen eines Volumenelements im Flansch.

2.2 Tiefziehen mit starrem Werkzeug

Das Tiefziehen zählt zu den wichtigsten Verfahren der Blechumformung und ist für die Massenfertigung von Hohlkörpern in den Bereichen des Maschinen- und Fahrzeugbaus, der Verpackungsindustrie u. a. von zentraler Bedeutung. Gemäß DIN 8584 /19/ handelt es sich beim Tiefziehen um ein Zug-Druck-Umformen eines ebenen Blechzuschnitts in einen einseitig offenen Hohlkörper (Erstzug) oder eines Hohlkörpers in einen Hohlkörper mit kleinerem Umfang (Weiterzug) ohne beabsichtigte Veränderung der Wanddicke. Das Verfahren des Tiefziehens mit starrem Werkzeug, starr sind sowohl Stempel, Niederhalter und Ziehring, ist am weitesten verbreitet.

tet. Die Werkzeuganordnung für das Tiefziehen mit starrem Werkzeug sowie die vorliegenden Spannungen und die örtlich und zeitlich stark unterschiedlichen Formänderungen (Erfüllen der Plastizitätsbedingung) sind im **Bild 2-2** für einen rotationssymmetrischen Napf qualitativ dargestellt.

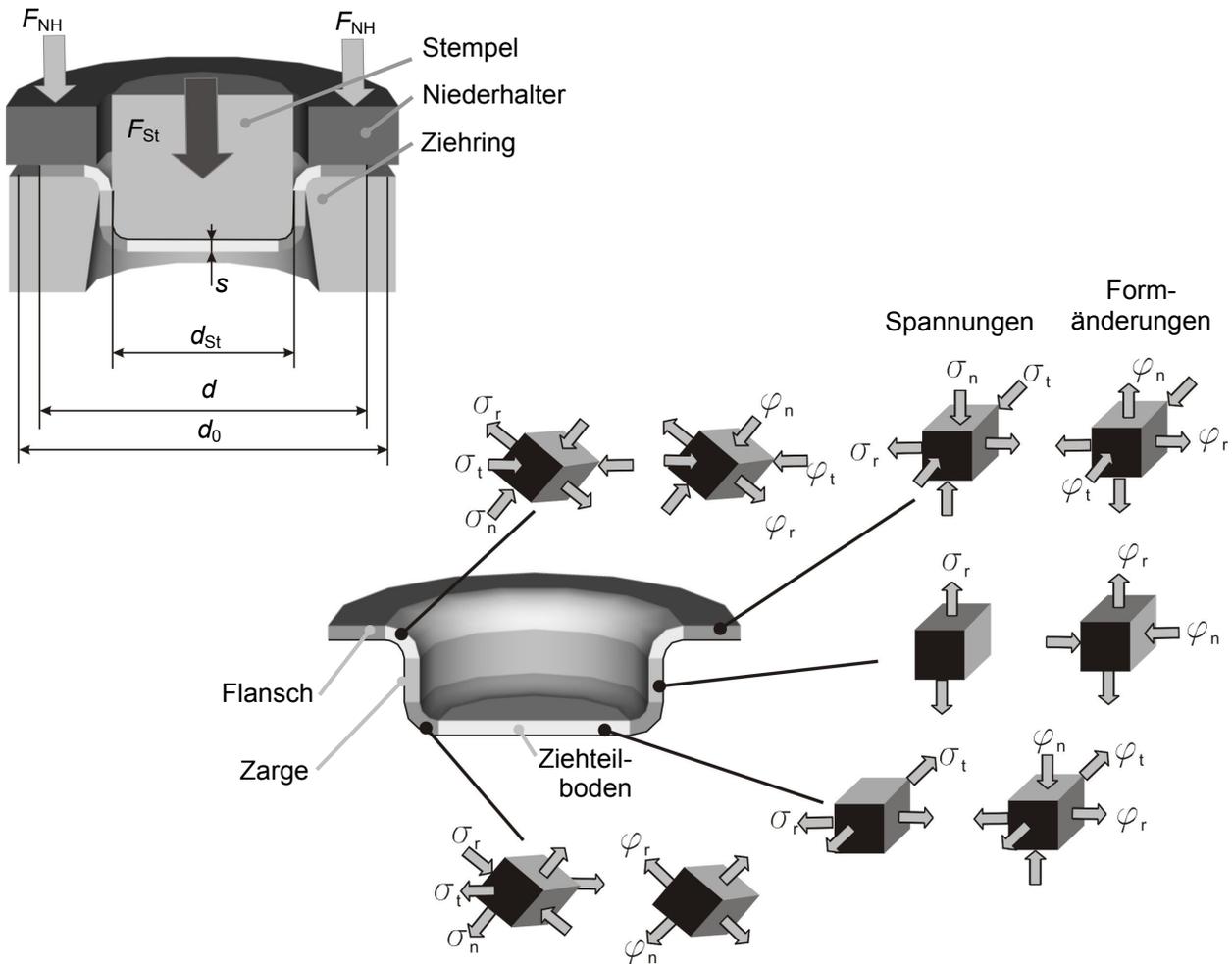


Bild 2-2: Werkzeuganordnung, Spannungen und auftretende Formänderungen beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug.

2.2.1 Tiefziehvorgang

Der Tiefziehvorgang beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug kann in zwei Phasen mit zwei unterschiedlichen Beanspruchungen eingeteilt werden. Aus einer am Anfang des Tiefziehvorgangs vorliegenden Streckziehbeanspruchung (Zug-Zug) wird im Verlauf des Tiefziehvorgangs eine Tiefziehbeanspruchung (Zug-Druck).

In der ersten Phase wird der Ziehteilboden zu Beginn des Tiefziehvorgangs infolge eines Streckziehvorganges durch ein Anlegen des Werkstoffs an den Stempelradius ausgeformt. Zu diesem Zeitpunkt findet im Flansch keine Umformung statt und der Außendurchmesser des Ausgangsteils bleibt konstant. Beim Ausformen des Ziehteilbodens befindet sich die Hauptumformzone ggf. unter der Berührungsfläche des Stempels (Reibung) und in der Zone, die nicht zwischen Niederhalter und Ziehring

eingespannt ist. Die maximalen Formänderungen treten während dieser Phase des Tiefziehvorgangs in der Zone des Ziehringradius auf. Die Verringerung der Blechdicke des Werkstücks an der Stelle der maximalen Formänderungen und eine somit entstehende Schwachstelle sind für das Tiefziehen mit starrem Werkzeug charakteristisch. Durch diese zu Beginn des Tiefziehens mit starrem Werkzeug stattfindende Streckzieh-Beanspruchung verfestigt sich der Werkstoff in der Zone des Stempelradius.

Zu diesem Zeitpunkt sind die Plastizitätsbedingungen im Ziehteilboden nicht mehr erfüllt, wenn für das Tiefziehen mit starrem Werkzeug die im Bild 2-2 dargestellte Werkzeuggeometrie verwendet und übliche Reibwerte ($\mu > 0,1$) angenommen werden. Die Hauptumformzone verlagert sich in der zweiten Phase des Tiefziehvorgangs in den Flansch des Werkstücks. Der Werkstoff, der sich außerhalb der sich ausbildenden Zarge befindet, wird unter den im Flansch wirkenden radialen Zugspannungen und den daraus resultierenden tangentialen Druckspannungen (Bild 2-2) durch die weitere Bewegung des Ziehstempels in den Ziehring hineingezogen. Dabei verringert sich der Außendurchmesser der Ronde und im Flansch treten für das Tiefziehen mit starrem Werkzeug charakteristische Formänderungen auf. Der Werkstoff im Flansch des Werkstücks wird radial gestreckt, tangential gestaucht sowie normal gestreckt. Diese normale Streckung des Materials bewirkt, dass sich in Richtung des Außendurchmessers die Blechdicke vergrößert. Der maximale Wert der Blechdicke befindet sich beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug am Außendurchmesser des Flansches.

Nach der Ausbildung des Ziehteilbodens kommt die indirekte Kraftwirkung als charakteristisches Merkmal des Tiefziehens mit starrem Werkzeug zur Wirkung. Die vom Ziehstempel auf den Ziehteilboden aufgebrachte Ziehstempelkraft wird über die Kraftübertragungszone (Zarge) in die Hauptumformzone im Flansch des Werkstücks übertragen.

2.2.2 Verfahrensgrenzen des Tiefziehens mit starrem Werkzeug

Die Verfahrensgrenzen beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug werden durch die Werkstückeigenschaften (stofflichen und geometrischen Eigenschaften des Ausgangsteils) und die Umformbedingungen (vorherrschender Spannungszustand, vorherrschende Reibung in der Umformzone, Werkzeuggeometrie, Umformtemperatur, Umformgeschwindigkeit usw.) bestimmt. Die hauptsächlichen Versagensarten

- Bodenreißer,
die Ziehstempelkraft, welche auf den Ziehteilboden wirkt, kann nicht mehr über den Querschnitt der Zarge in die Hauptumformzone (Flansch) übertragen werden,
- bzw. Faltenbildung,
die in der Hauptumformzone (Flansch) wirkenden tangentialen Druckspannungen führen zum Ausknicken des Blechs,

begrenzen das für das Tiefziehen charakteristische Verfahrensfenster (**Bild 2-3**). Der Versagensfall Bodenreißer tritt an der beim Ausformen des Ziehteilbodens gebildeten Schwachstelle (siehe oben) in der Zone des Ziehstempelradius auf.

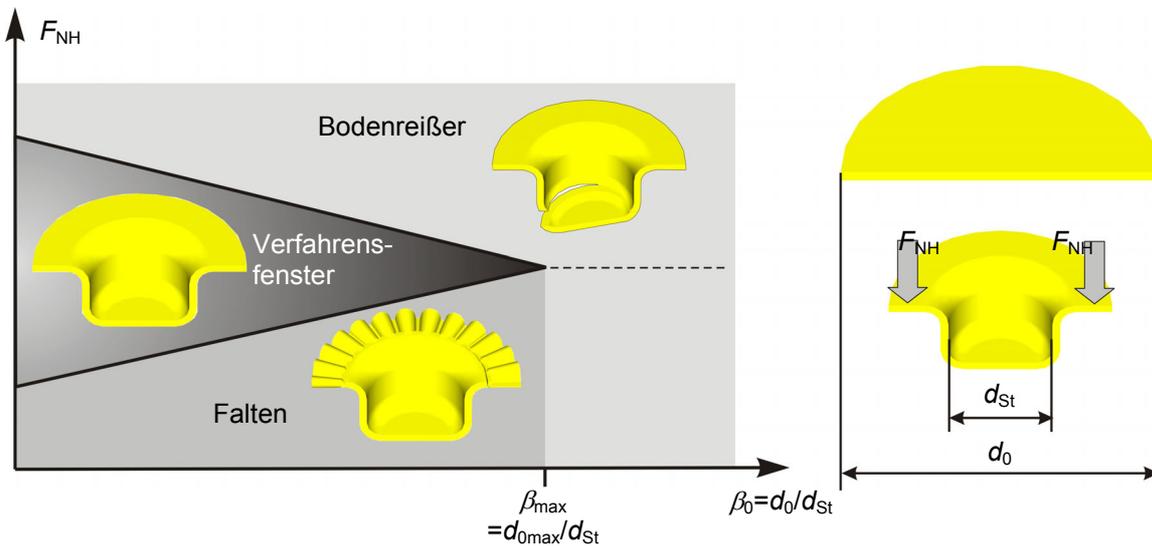


Bild 2-3: Verfahrensfenster beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug /23/.

Das Grenzziehverhältnis β_{max} ist bei rotationssymmetrischen Werkstücken definiert als das Verhältnis des größten Ausgangsdurchmessers der Ronde bezogen auf den Durchmesser des Stempels, bei dem das Tiefziehen noch ohne auftretenden Bodenreißer durchgeführt werden kann:

$$\beta_{max} = \frac{d_{0,max}}{d_{St}} \tag{1}$$

Die Werte für erreichbare Grenzziehverhältnisse liegen beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug je nach den vorherrschenden Bedingungen bei Werkstücken aus Stahl zwischen $\beta_{max} = 1,6 \dots 2,2$. Kann die gewünschte Endform des Napfes wegen einer Überschreitung des Grenzziehverhältnisses nicht erreicht werden, sind ein bzw. mehrere Weiterzüge notwendig. Werkstücke, welche durch mehrere Weiterzüge gefertigt wurden, weisen im Flansch ungünstige geometrische Endteileigenschaften in Form einer charakteristischen Welligkeit auf /16/.

Die Faltenbildung im Flansch beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug ist eine geometrische Instabilität, welche durch die Kombination bestimmter Last- und Geometriebedingungen zum Versagen führt. Werden im Flansch kritische tangentielle Druckspannungen beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug überschritten und wird der dann vorhandenen Knickbeanspruchung des Bleches vom Niederhalter keine ausreichende Stützwirkung entgegengesetzt, führt dies zur Faltenbildung im Flansch des Werkstücks.

Für rotationssymmetrische Ausgangsteile sind durch SIEBEL /21, 22/ mathematische Modelle entwickelt worden, die das Problem der Faltenbildung im Flansch als ein eindimensionales geometrisches Instabilitätsproblem behandeln und auf ein Ausknicken eines Stabes unter Druckbelastung zurückführen.

2.3 Möglichkeiten zur Erweiterung der Umformgrenzen beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug

Jeder Umformprozess nutzt das Umformvermögen von Werkstoffen. Bei metallischen Werkstoffen ist das Umformvermögen charakterisiert durch die Werkstoffeigenschaften und die beim Umformprozess vorherrschenden Umformbedingungen. Sowohl die Geschwindigkeit, die Temperatur als auch insbesondere der bei der Umformung vorherrschende Spannungszustand bestimmen das Umformvermögen. Das Umformvermögen kann verbessert und somit die Umformgrenzen erweitert werden, wenn kritische Zustände hinsichtlich des Spannungszustands, der Temperatur oder der Formänderungsgeschwindigkeit vermieden und lokal bzw. zeitlich beeinflusst werden.

Bei Umformverfahren mit indirekter Kraftwirkung ist das Umformvermögen in der eigentlichen Hauptumformzone in den meisten Fällen nicht ausgenutzt. Bei diesen Umformverfahren, zu denen auch das Tiefziehen zählt, lassen sich die Umformgrenzen erweitern, wenn die Zone der Kraftübertragung entlastet, die Belastbarkeit des Querschnitts der Kraftübertragung erhöht oder der Formänderungswiderstand in der Umformzone verringert werden.

Entsprechend lassen sich die Verfahrensgrenzen beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug wesentlich erweitern, wenn es gelingt, die zum Einziehen des Werkstoffs aus dem Flansch in die Zarge notwendige Zugspannung zu verringern (Kraftübertragungszone entlasten) oder wenn die zulässige Spannung, die der Werkstoff ohne ein Versagen ertragen kann, in der Zone des Übergangs vom Ziehteilboden zur Zarge erhöht werden kann (Kraftübertragungszone verstärken).

Die Kraftübertragungszone kann verstärkt werden, wenn die Ausgangsblechdicke oder die Zugfestigkeit des Werkstoffs erhöht werden. Ein Werkstoff mit einer höheren normalen Anisotropie verstärkt durch seine geringere Neigung zur Blechdickenreduktion ebenfalls die Kraftübertragungszone. Wird beim Tiefziehen mit starrem Werkzeug zusätzlich zu der wirkenden Ziehstempelkraft eine Kraftkomponente in die Hauptumformzone eingebracht, kann die Kraftübertragungszone entlastet werden. Auch eine Verringerung der notwendigen Umformkraft durch eine Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung des Werkstoff, der tribologischen Bedingungen, der Umformtemperatur und der Umformgeschwindigkeit bewirkt eine Entlastung der Kraftübertragungszone.

Konkrete Maßnahmen, welche die oben beschriebenen Effekte bewirken, sind der Wertigkeit nach im Folgenden aufgeführt:

- Nachschieben von Werkstoff,
- Verringerung der Reibung zwischen Niederhalter, Flansch und Ziehring,
- Vergrößerung der Reibung zwischen Stempel und Ziehteilboden,
- Erhöhung der normalen Anisotropie des Bleches,
- Erwärmung des Flansches und Kühlung des Stempels.

Das Nachschieben von Werkstoff kann als eines der wirksamsten Verfahren angesehen werden, um die notwendige Zugspannung zum Einziehen des Werkstoffs, welche über die Zarge zu übertragen ist, zu verringern und somit die Kraftübertragungszone zu entlasten. Durch das Einbringen einer zusätzlichen Kraftkomponente in die Hauptumformzone wird beim Nachschieben von Werkstoff der Werkstofffluss in Richtung der Ziehringöffnung unterstützt und somit die vom Ziehstempel aufzubringende und von der Ziehteilzarge zu übertragende Kraft reduziert. Diese Methode erscheint besonders geeignet, um napf- oder nabenförmige Formelemente an scheibenförmigen rotationssymmetrischen Dickblechteilen herzustellen, die im Verhältnis zur Grundform kleine Durchmesser aufweisen.

In den nachfolgenden Absätzen wird der Stand der Technik vordergründig zu Verfahren dargestellt, welche das Nachschieben von Werkstoff durch eine hydraulische oder mechanische Verfahrensweise anwenden, um die Verfahrensgrenzen im Vergleich zum konventionellen Tiefziehen zu erweitern.

2.3.1 Tiefziehen mit hydraulischem Nachschieben von Werkstoff

Das Nachschieben von Werkstoff beim Tiefziehen mit einer hydraulischen Wirkungsweise stellt eine prinzipielle Möglichkeit dar, die bestehenden Umformgrenzen beim Tiefziehen zu erhöhen, indem die Kraftübertragungszone durch einen zusätzlichen hydraulischen Krafteintrag in die Hauptumformzone entlastet wird. Über die Nutzung eines hydraulischen Druckes zum Nachschieben von Werkstoff beim Tiefziehen im Weiterzug berichten NAKAMURA u. a. /28/. Bei der untersuchten Verfahrensvariante wurden Werkstücke aus Aluminium mit einer Ausgangsblechdicke von 0,8 mm in einem Erstzug ohne hydraulische Unterstützung mechanisch tiefgezogen (**Bild 2-4-b**). Anschließend wurde dieser mechanisch tiefgezogene Napf mit einem starren Stempel im Stülpzug gegen ein in einer Druckkammer befindliches flüssiges Medium weitergezogen.

Der beim Stülpziehen in diesem Medium entstehende Druck wurde durch Verbindungskanäle auf die Stirnfläche der Zarge geleitet (**Bild 2-4-d**) und damit der Vorgang des Weiterziehens durch das Nachschieben von Material im Flansch unterstützt. Nach diesem Verfahrensprinzip konnte ein Ziehverhältnis beim Weiterzug von 2,34 erreicht werden. Bei einem Ziehverhältnis von 2,1 im Erstzug, wurde ein maximales Gesamtziehverhältnis von 4,91 realisiert. Der maximale Nachschiebedruck bei der Fertigung der Ziehteile durch das von NAKAMURA beschriebene Verfahren betrug 25 MPa.

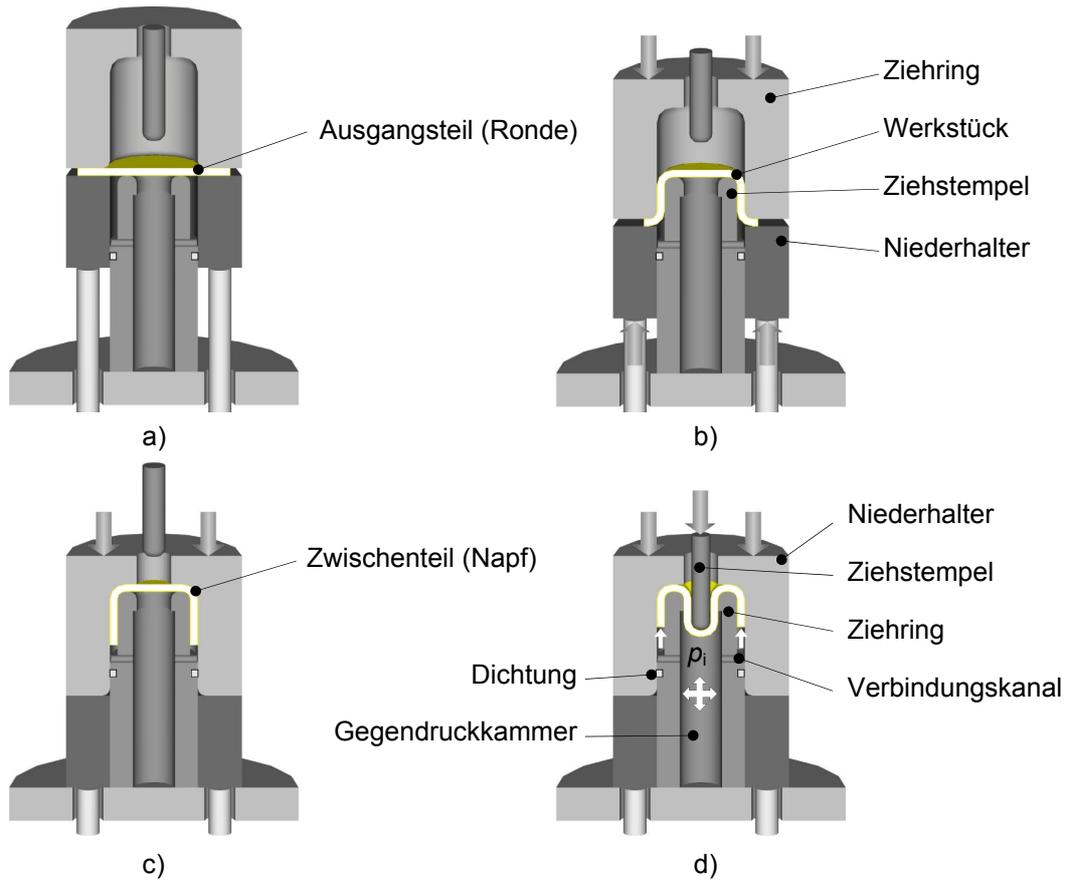


Bild 2-4: Prinzip des Stülpziehens mit hydraulischem Nachschieben von Werkstoff /28/. a) bis c) Erstzug (mechanisch), d) Weiterzug (hydraulisch)

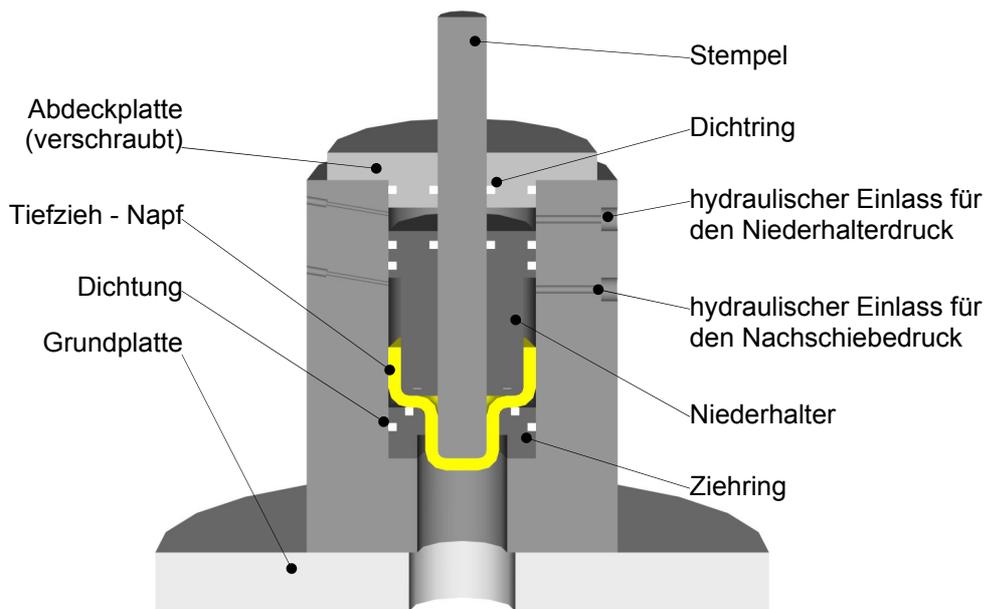


Bild 2-5: Weiterzug mit hydraulisch druckbeaufschlagtem Ziehteilzargenrand /29/. Über das Tiefziehen im Erstzug mit radialem Nachschieben von Werkstoff durch eine druckbeaufschlagte Flüssigkeit berichtet THIRUVARUDCHELVAN in /30 bis 33/. Bei dem

angewandten Verfahren wirkt ein im Werkzeug erzeugter hydraulischer Druck auf den Niederhalter und den Ziehstempel. Über Verbindungskanäle wird die Druckflüssigkeit zum radialen Nachschieben des Werkstoffes zwischen den Ziehring und den Niederhalter geleitet (**Bild 2-6**).

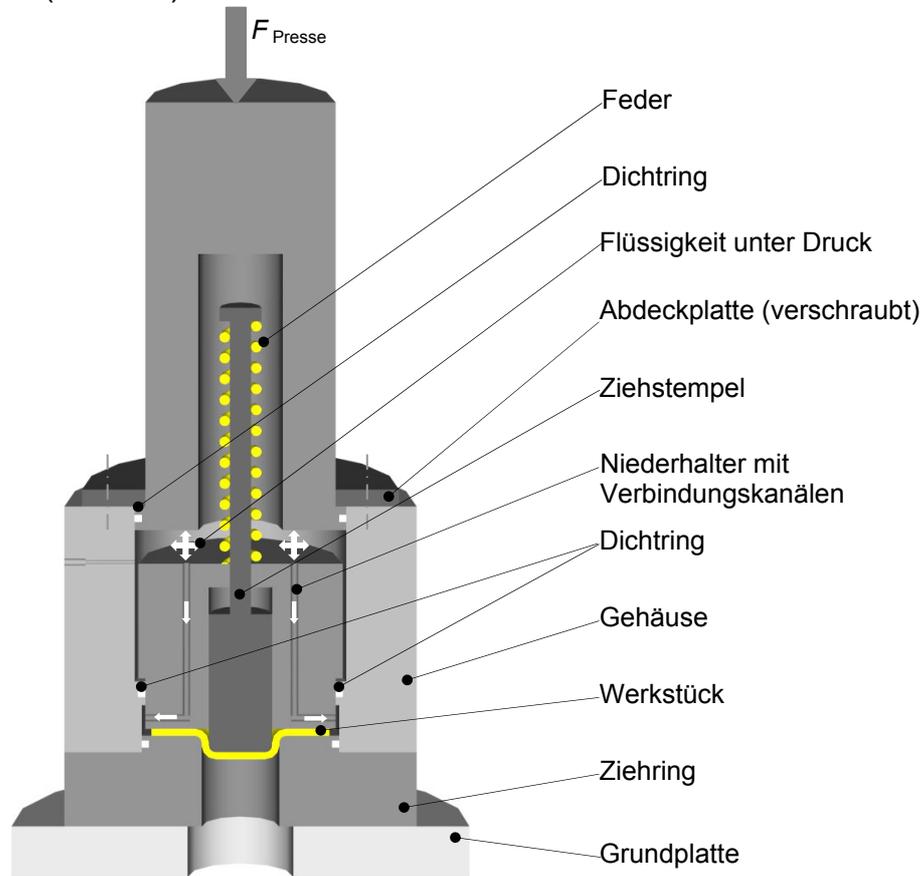


Bild 2-6: Verfahrensprinzip des Tiefziehens mit radialem Nachschieben von Werkstoff nach /30 bis 33/.

Nach diesem Verfahrensprinzip wurden Ziehteile mit 36 mm Durchmesser und einer Wanddicke von 1 mm aus Aluminium bis zu einem Ziehverhältnis von 3,11 gefertigt. Der maximale Nachschiebedruck betrug dabei 83 MPa, die maximale Ziehstempelfkraft 9,1 kN und die maximale Niederhalterkraft 580 kN.

NAKAGAWA und NAKAMURA nutzen den beim Ziehen gegen eine Flüssigkeit in der Druckkammer entstehenden Druck zum radialen Nachschieben des Werkstoffes und zur Reduzierung der Reibung in der Umformzone (**Bild 2-7**). Die Blechdicke der verwendeten rotationssymmetrischen und rechtwinkligen Ausgangsteile aus Aluminium beträgt 0,8 mm. Der in der Gegendruckkammer entstehende Druck wird über einen By-Pass auf die Umfangsfläche des Außendurchmessers der Ronde umgeleitet. Dadurch wird Material aus dem Flansch in Richtung des entstehenden Napfes nachgeschoben und die Kraftübertragungszone am Übergang vom Ziehteilboden zur Zarge entlastet. Durch die Konstruktion des Werkzeuges wird ein Spalt zwischen Niederhalter, Flansch der Ronde und Ziehring realisiert, so dass durch das Medium an dieser Stelle die Reibung verringert werden kann. Auch zwischen Stempel und Niederhalter existiert ein geringer Spalt, so dass das Medium gedrosselt austreten kann.

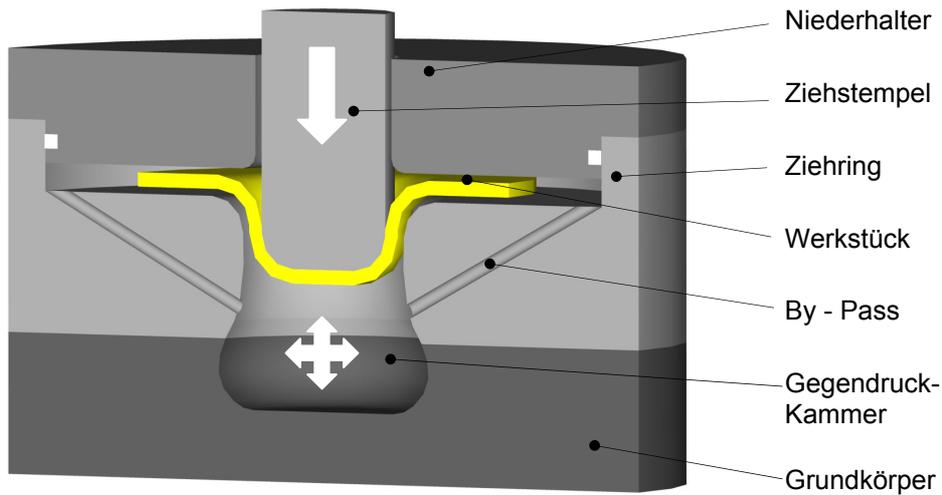


Bild 2-7: Verfahrensprinzip des Tiefziehens mit radialem Nachschieben von Werkstoff nach /34, 35, 36/.

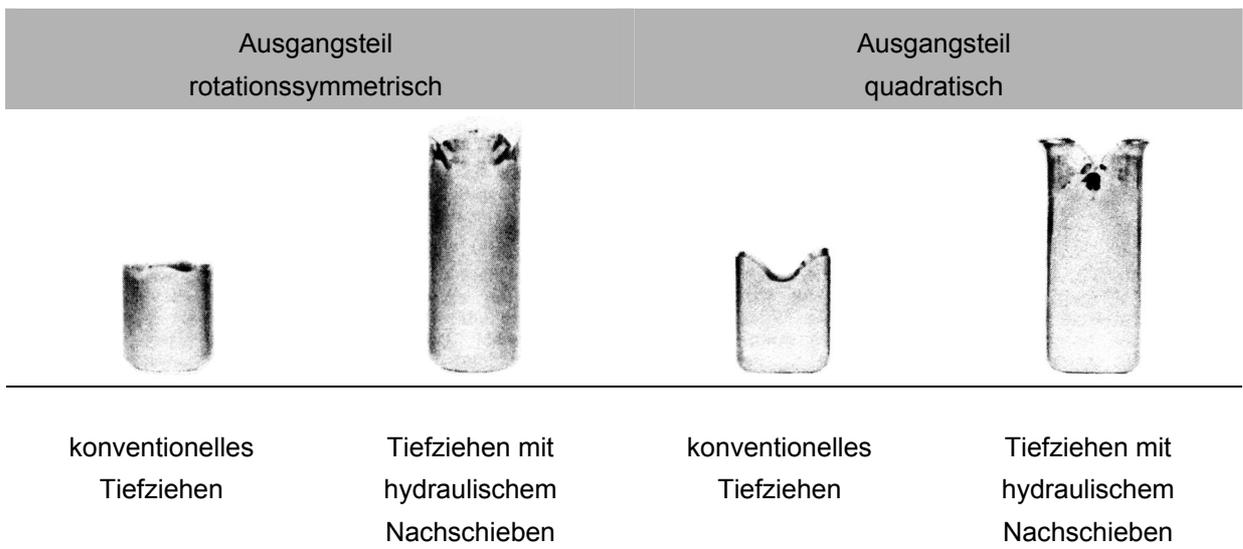


Bild 2-8: Vergleich der herstellbaren Teile beim hydraulischen Nachschieben von Werkstoff /34/.

Durch die Verringerung der Reibung in der Umformzone und durch die Entlastung der Kraftübertragungszone konnten die Verfahrensgrenzen erweitert werden. Das erreichte Ziehverhältnis im Erstzug bei den rotationssymmetrischen Werkstücken beträgt 3,3 und bei den rechteckigen Werkstücken 3,6 (**Bild 2-8**).

Eine weitere Möglichkeit des direkten Nachschiebens von Werkstoff in der Flanschenebene beim Erstzug beschreibt Sizov in /37/. Dabei wird ähnlich wie im oben beschriebenen Prozess durch die Bewegung des Ziehstempels ein radialer Druck auf der Umfangsfläche des Außendurchmessers der Ronde erzeugt. Bei rotationssymmetrischen Ausgangsteilen aus Aluminium mit der Blechdicke 1,0 mm konnte durch die Entlastung der Kraftübertragungszone das Ziehverhältnis auf 3,1 erhöht werden.

Hydraulische Verfahrensvarianten zum Nachschieben von Werkstoff bieten eine einfache Möglichkeit, direkt in den Flansch eine unterstützende Kraftkomponente einzuleiten /30, 31, 32/. Alle erwähnten hydraulischen Verfahren zum Nachschieben von Werkstoff sind dadurch gekennzeichnet, dass Probleme mit der Dichtheit der Systeme sowie Schwierigkeiten bei der Steuerung des Drucks für das Nachschieben und Niederhalten auftreten. Favorisiert werden deshalb mechanische Verfahrensvarianten zum Nachschieben von Werkstoff, auch weil die Kraft zum Nachschieben von Werkstoff nicht durch eine separate hydraulische Einheit erzeugt werden muss.

2.3.2 Tiefziehen mit mechanischem Nachschieben von Werkstoff

Möglichkeiten der Reduzierung von Ziehstufen beim Weiterzug durch mechanisches Nachschieben von Werkstoff wurden durch ENGEL /38, 39/ und durch ENGEL und SCHMOECKEL /40, 41/ untersucht. Dabei wurde ein Verfahrensprinzip angewendet, bei dem sowohl beim Gleichlaufweiterziehen als auch beim Stülpziehen der Umformvorgang durch Druckbeaufschlagung der Restzarge unterstützt wird (**Bild 2-9**).

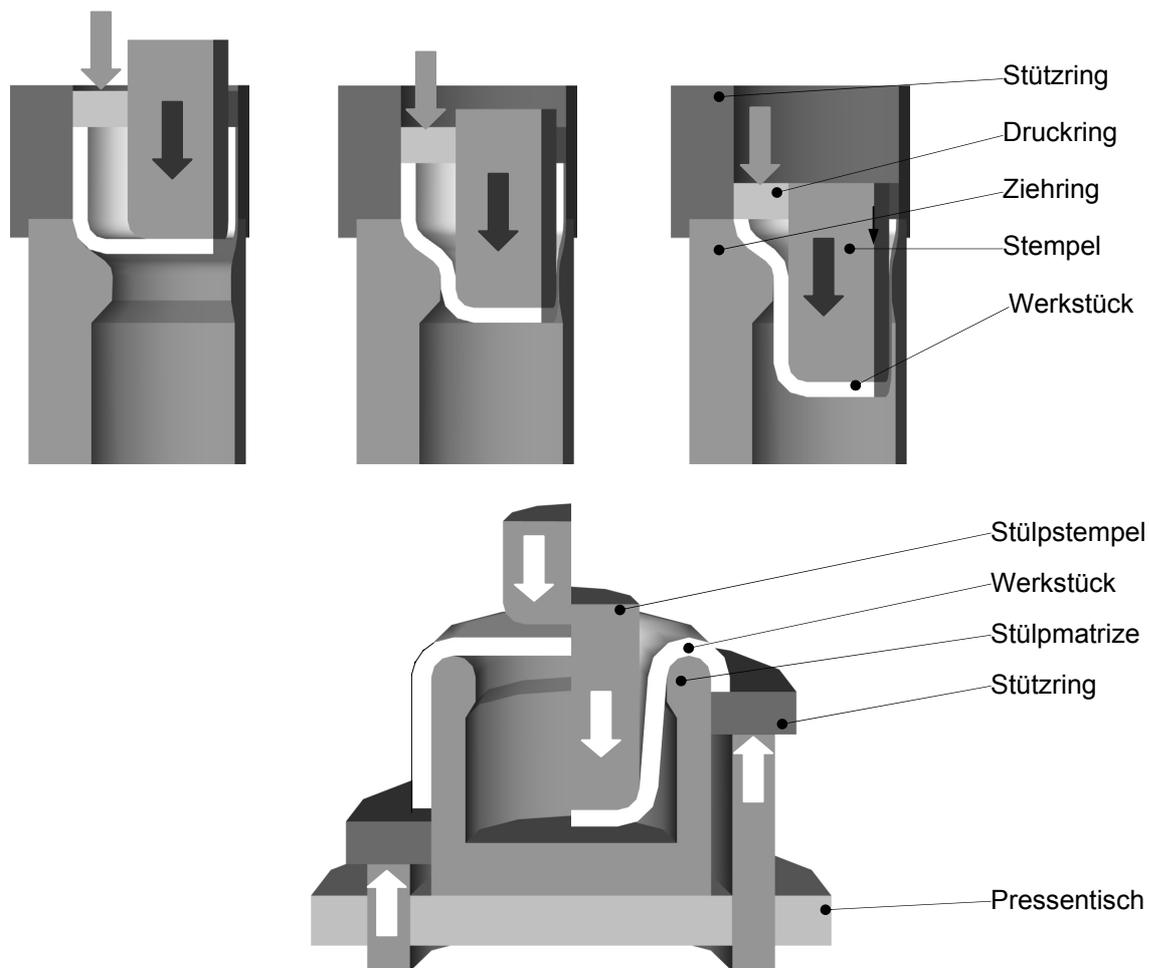


Bild 2-9: Umformverfahren mit druckbeaufschlagter Restzarge /38, 39/.

Beim Gleichlaufweiterziehen konnte eine Erhöhung des Ziehverhältnisses im ersten Weiterzug von 1,4 auf 1,7 erreicht werden. Beim Stülpziehen mit druckbeaufschlagter Restzarge wurden bei einem „optimalen“ Stülpziehverhältnis von 1,23 gegenüber dem konventionellen Stülpziehen größere Napfhöhen erzielt. Das maximale Gesamtziehverhältnis konnte in Abhängigkeit des Verhältnisses Durchmesser/Blechdicke von 2,2 auf 2,6 bzw. von 2,8 auf 3,2 erhöht werden.

Bei Verfahren, die nach dem Maslennikov-Prinzip /42, 43, 44/ arbeiten, wird die Reibung zwischen dem Werkstück und einem Elastomer ausgenutzt, um durch die Deformation des Elastomers das Werkstück schrittweise in Richtung der Symmetrieachse zu drücken. Für einen solchen Prozess müssen mehrere Hübe der Presse nacheinander stattfinden. Dabei gilt, je größer der Ausgangsdurchmesser der Ronde ist, desto größer ist die Anzahl der notwendigen Hübe. Für Ronden gleicher Blechdicke und gleichen Materials verringert sich die Anzahl der Hübe mit der Zunahme der aufgebrauchten Kraft.

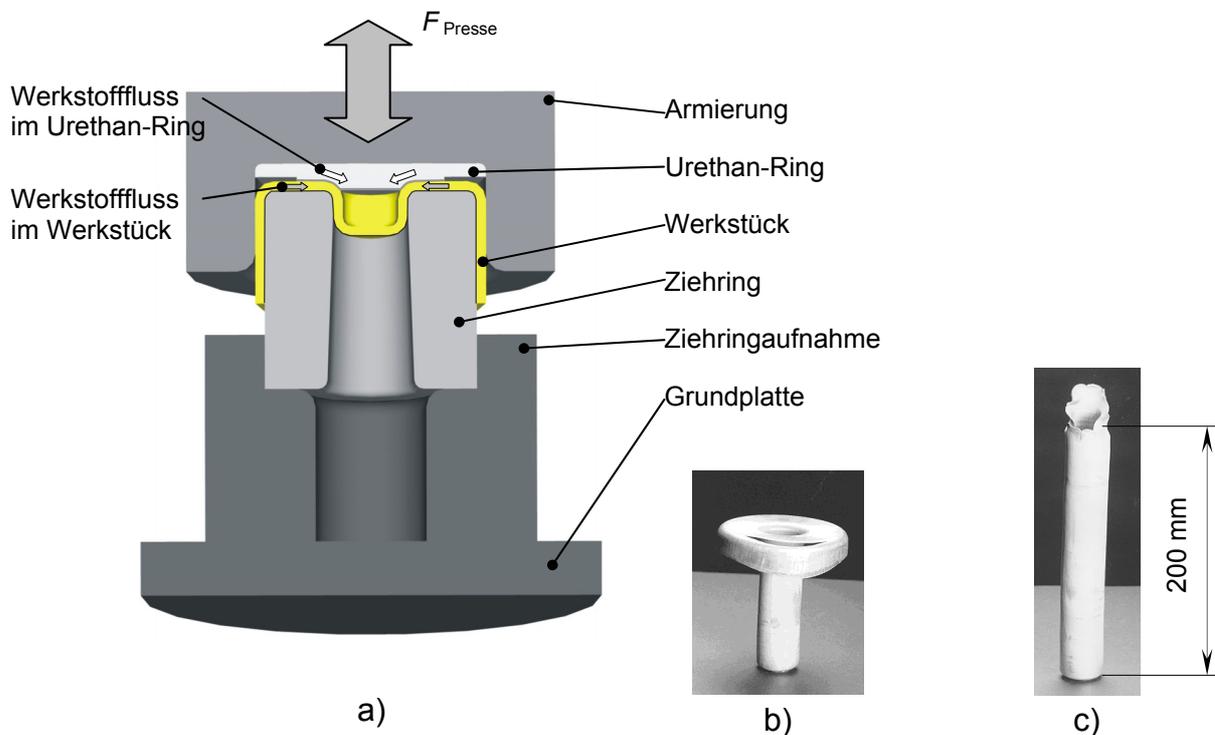


Bild 2-10: Weiterzug mit Urethan-Ring; a) Werkzeug, b) typischer Versagensfall, c) vollständig weitergezogenes Werkstück /44/.

THIRUVARUDCHELVAN beschreibt in /44/ ein Verfahren, welches nach dem Maslennikov-Prinzip funktioniert und bei dem durch einen Urethan-Ring im Weiterzug ein Ziehverhältnis von 3 erzielt werden kann (**Bild 2-10**). Bei dem durch THIRUVARUDCHELVAN beschriebenen Verfahren wird ein Napf durch mehrmaliges und schrittweises Pressen mit Hilfe des Urethan-Rings hergestellt. Die auf die Armierung aufgebrauchte Pressenkraft deformiert den Urethan-Ring, der dadurch zu Beginn des Umformprozesses als Stempel wirkt und den Werkstoff in den Ziehring zieht. Zusätzlich

dazu bewirkt die Reibung zwischen Urethan-Ring und Werkstück einen Materialtransport aus dem Flansch des Werkstücks in Richtung des inneren Radius des Zieh-rings. Mit zunehmender Höhe des sich ausbildenden Napfes wird das Material nur noch durch Reibung zwischen Urethan-Ring und Werkstück in den Zieh-ring transportiert. Der Urethan-Ring verliert den Kontakt zum Napfboden und kann mit dem Fort-schreiten des Umformprozesses keine Ziehstempelkraft mehr auf den Napfboden aufbringen.

Der zurückgelegte Pressenweg ist gering, um eine Schädigung des Urethan-Ringes durch eine übermäßige Deformation zu vermeiden. Einen typischen Versagensfall bei zu großen Ziehverhältnissen sowie ein vollständig weitergezogenes Teil zeigen Bild 2-10 b und Bild 2-10 c. Weitere 3 Verfahrenvarianten, in denen flexible Werk-zeugelemente zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen zur Anwendung kommen, be-schreibt THIRUVARUDCHELVAN in /45, 46, 47/.

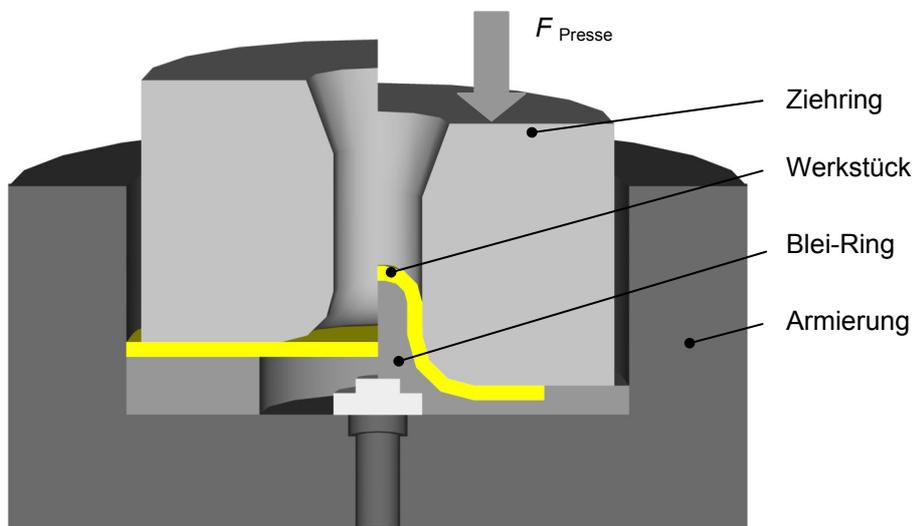


Bild 2-11: Erstzug mit Blei-Ring nach BRAKMAN /48/.

BRAKMAN beschreibt in /48/ ein Verfahren, bei dem nach dem Maslennikov-Prinzip im Erstzug Ziehverhältnisse bis 4 erreicht werden können, wobei Blei anstelle eines Elastomers verwendet wird (**Bild 2-11**). Als Werkstoff sind Stahl mit einer Blechdicke von 0.57 mm, Zinn mit einer Blechdicke von 0.3 mm und Aluminium mit einer Blechdicke von 0,5 mm und 1,0 mm untersucht worden. Bei dem hier beschriebenen Ver-fahren kommt es zu keiner wesentlichen Blechdickenreduktion im Werkstück.

Mit dem Ziel, das Grenzziehverhältnis zu erhöhen, bewirken bei der Fertigung von quadratischen Ziehtteilen vier seitlich angeordnete Flachstempel mit der Hilfe von Ak-tuatoren ein radiales Nachschieben von Werkstoff (**Bild 2-12**). Eine speziell für die-ses Verfahren entwickelte Mechanik verhindert, dass sich die Flachstempel beim Nachschieben des Werkstoffs gegenseitig kontaktieren.

Bei dem durch SATO /49 bis 52/ beschriebenen Verfahren ist Aluminium mit einer Blechdicke von 3 mm verwendet worden. Nach der auf die Herstellung von quadrati-

schen Teilen beschränkten Methode wurde im Erstzug eine Erhöhung des Grenz-ziehverhältnisses um bis zu 20 % erreicht.

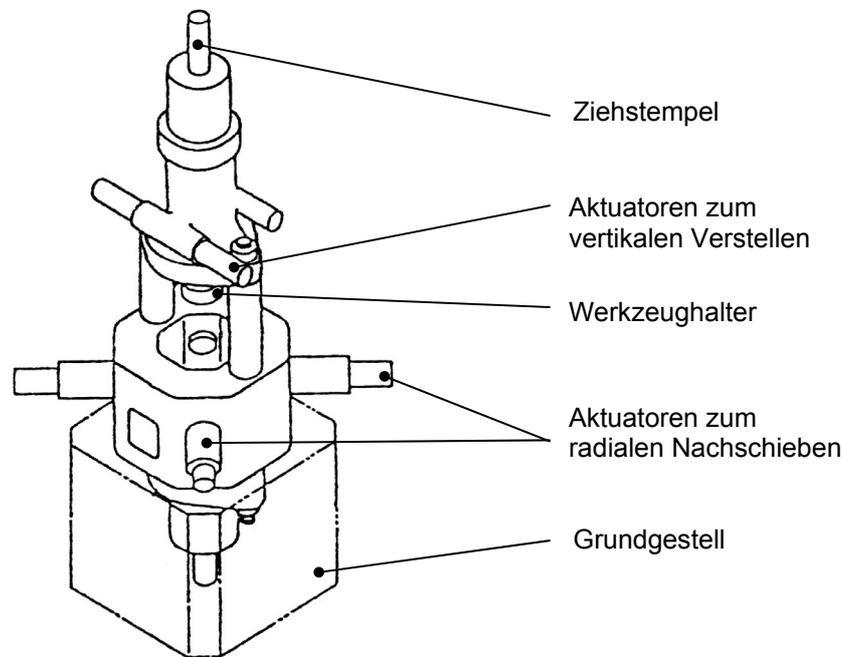


Bild 2-12: Tiefziehen mit radialem Nachschieben (quadratischen Ziehteilen) /49/.

Das mechanische Nachschieben von Werkstoff bietet aussichtsreiche Möglichkeiten, um die Kraftübertragungszone beim Tiefziehen zu entlasten und so die bestehenden Verfahrensgrenzen beim konventionellen Tiefziehen zu erweitern. Ein direktes radiales Nachschieben von Werkstoff und demnach ein direktes Einbringen einer Kraftkomponente in den Flansch des Werkstücks lässt sich bei rotationssymmetrischen Ausgangsteilen konstruktiv nur schwer lösen. Aussichtsreicher ist eine Verfahrensvariante, bei welcher die Kraft auf einen bereits aufgestellten Rand eines im Erstzug hergestellten Napfes aufgebracht wird /38 bis 41/. Für eine solche Verfahrensvariante muss jedoch der Rand hinreichend gegen ein Ausknicken gesichert werden. Ebenfalls ist es erforderlich, auf den Flansch eine Niederhalterkraft aufzubringen, um das Entstehen von Instabilitäten in Form von Falten zu vermeiden.

2.3.3 Verfahren zum Tiefziehen mit erweiterten Umformgrenzen ohne Nachschieben von Werkstoff

Eine weitere Möglichkeit, die zum Einziehen des Werkstoffs aus dem Flansch in die Zarge notwendige Zugspannung zu verringern und somit die Umformgrenzen beim Tiefziehen zu erweitern, bietet die Verringerung der Reibkräfte zwischen Niederhalter und Werkstück sowie zwischen Werkstück und Ziehring.

Mit Hilfe der modernen Rechentechnik und der Elektronik ist es möglich, die Niederhalterkraft in Abhängigkeit von Blechdicke, Ziehweg u.a. zu steuern oder zu regeln und somit die Reibungskräfte im Gegensatz zum konventionellen Tiefziehen zu ver-

ringern. Gerade bei nicht - rotationssymmetrischen Werkstücken werden Vielpunkt-Zieheinrichtungen oder segmentierte Werkzeuge genutzt, um über eine örtlich unterschiedliche Verteilung der Flächenpressungen den Materialfluss zu steuern /53 bis 63/. Dabei wird die Niederhalterkraft über den Umfang des Werkstücks und über der Ziehtiefe variiert. Die Entwicklung und der Einsatz dieser aktiven Niederhaltersysteme führten zu einer deutlichen Verbesserung des Umformergebnisses insbesondere, wenn es gilt komplizierte Bauteile herzustellen.

Ein Werkzeugsystem, bei dem der Niederhalter flexibel ausgeführt ist und somit die Niederhalterkraft in Bezug auf Zeit und Ort variiert werden kann, beschreibt KERGEN in /64/.

Eine weitere Möglichkeit, die Reibkräfte zu verringern und den Werkstofffluss zu erleichtern, besteht im Einsatz von schwingenden Niederhaltern /65 bis 75/. Durch die Anwendung von schwingenden Niederhaltern können das Grenzziehverhältnis erhöht, Schmierstoff minimiert und das Tiefziehen von schwer umformbaren Blechen optimiert werden. SIEGERT modelliert in /76, 77/ an einer Streifenziehmaschine das Tribosystem, wie es in der Zone des geraden Materialeinlaufes beim Tiefziehen zu finden ist. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit zunehmendem schwingendem Anteil der Niederhalterkraft die Reibungskraft reduziert werden kann.

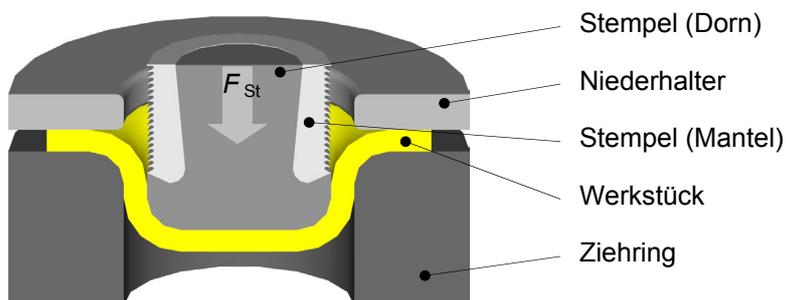


Bild 2-13: Prinzip des Tiefziehens mit differenzierter Kraftübertragung /78, 79/.

Die Entlastung der Ziehteilzarge ist auch der tragende Gedanke eines durch MAYER in /78, 79/ vorgestellten Verfahrens. Dabei wird die Ziehstempelkraft nicht wie beim konventionellen Tiefziehen alleinig in den Boden eingeleitet und über die Zarge in den Flansch des Werkstücks übertragen, sondern die Ziehstempelkraft wird über die gesamte Mantelfläche eingeleitet. Durch die in einen „Expansionsstempel“ eingedrehten Rillen und die so aufgeraute Mantelfläche kann der Stempel in die Innenwandung der Zarge eindringen und so die Ziehstempelkraft über die jeweilige Wandhöhe verteilt wirksam werden (**Bild 2-13**). Durch diese Entlastung der Ziehteilzarge kann das Grenzziehverhältnis je nach Werkstoff zwischen 21 % und 33 % verbessert werden.

Ein Verfahren, bei dem speziell zugeschnittene ebene Ausgangsformen einem Tiefziehen unterzogen werden, um besonders hohe Näpfe herstellen zu können, beschreiben YAMAGUCHI, NIHARA, TAKAKURA und SHIRAKAWA in /80/. Der Grundgedanke bei diesem Verfahren ist, dass das „überschüssige“ Material im Flansch, das beim

Tiefziehen von normalen Ronden durch die tangentialen Druckspannungen im Flansch verdrängt wird, vor dem Tiefziehen herausgeschnitten wird (**Bild 2-14**).

Durch das Ausschneiden des „überschüssigen“ Materials wird die notwendige Ziehstempelkraft im Vergleich zu den Ronden verringert, und das Grenzziehverhältnis konnte bei Ausgangsteilen aus Aluminium der Blechdicke 1 mm auf $\beta_{\max} = 3$ erhöht werden. Für den Fall, dass die gezogenen Näpfe Flüssigkeiten aufnehmen sollen, macht es sich jedoch erforderlich, die Endteile im Anschluss an das Tiefziehen zu fügen.

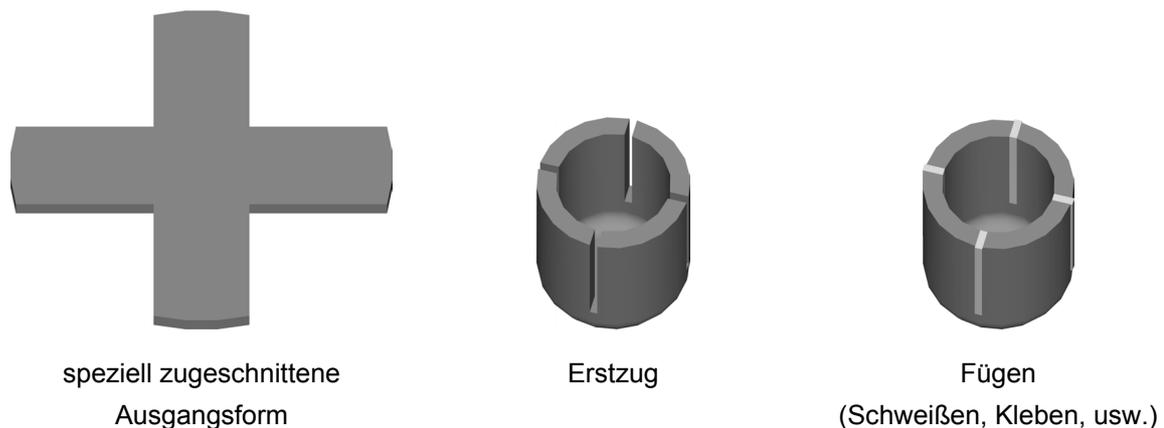


Bild 2-14: Tiefziehen speziell zugeschnittener Ausgangsform /80/.

Mit einem örtlich vergrößerten Querschnitt der Kraftübertragungszone erhöhen PARSA, YAMAGUCHI und TAKAKURA das Grenzziehverhältnis bei der Fertigung von rotationssymmetrischen Ausgangsteilen /81/. Als Material ist Stahl mit den Blechdicken 0,2 mm, 0,6 mm und 1 mm verwendet worden. Die Breite b der verstärkten Zonen in dem hier untersuchten Verfahren beträgt 8 mm, 11 mm und 27 mm. Die Höhe h der verstärkten Zonen beträgt

- für die 0,2 mm dicken Ausgangsteile 0,15 mm und 0,2 mm,
- für die 0,6 mm dicken Ausgangsteile 0,2 mm, 0,4 mm und 0,6 mm und
- für die 1 mm dicken Ausgangsteile 0,2 mm, 0,4 mm und 1 mm.

Die verstärkten Zonen der Ausgangsteile für dieses Verfahren sind einmal durch Punktschweißen in Form einer Patchwork-Technik und einmal durch Schmieden hergestellt worden. Die geometrischen Eigenschaften der punktgeschweißten Ausgangsteile zeigt **Bild 2-15**. Das Grenzziehverhältnis für die punktgeschweißten Ausgangsteile konnte auf 2,55 erhöht werden (**Bild 2-16**). Für die geschmiedeten Ausgangsteile konnte das Grenzziehverhältnis nur unwesentlich erhöht werden.

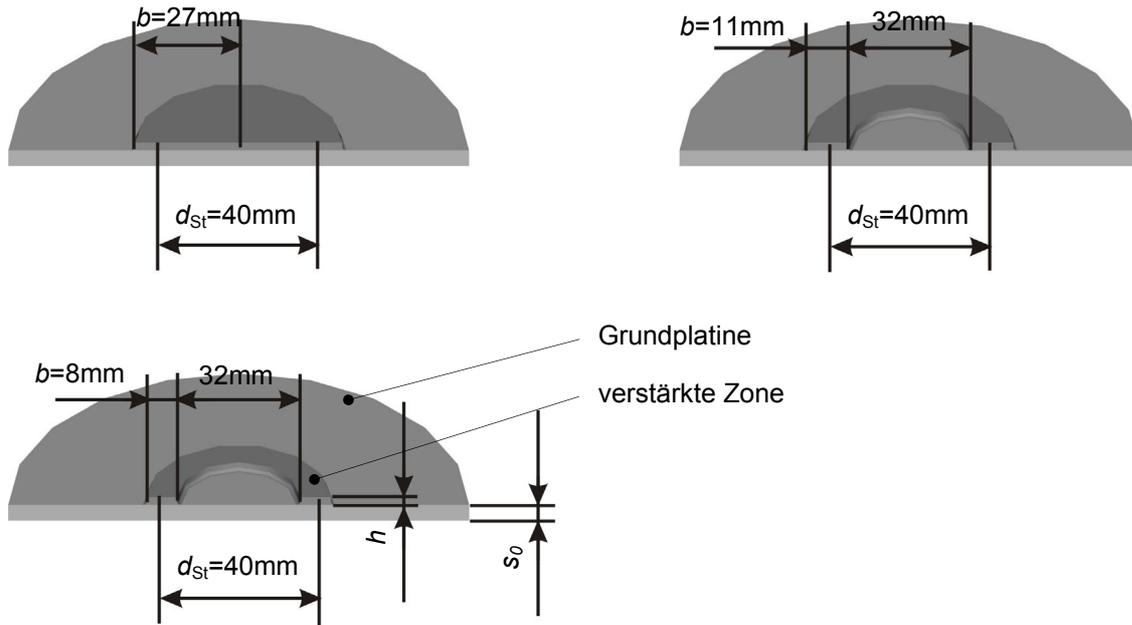


Bild 2-15: Geometrische Größen bei der punktgeschweißten Patchwork-Technik /81/.

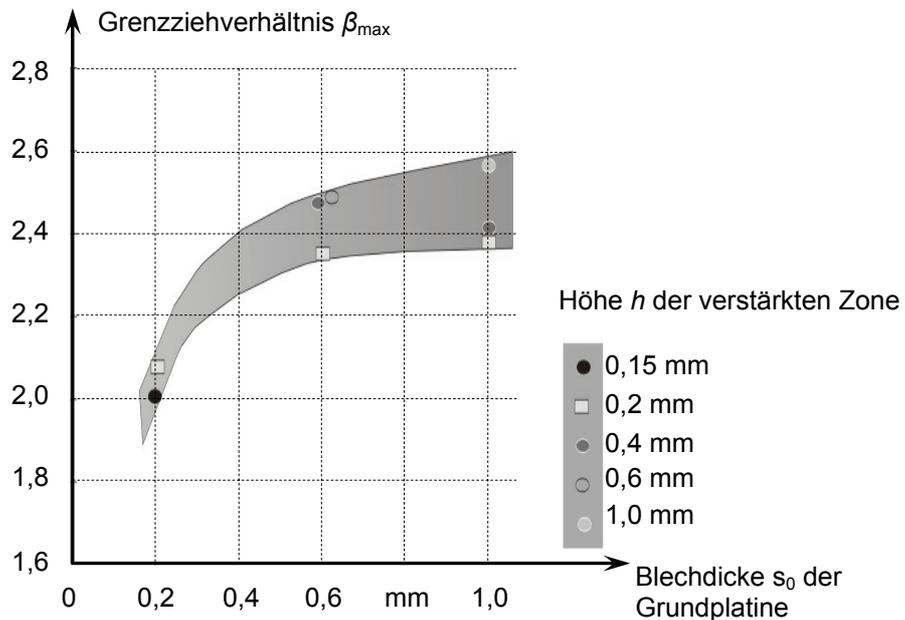


Bild 2-16: Grenzziehverhältnis der punktgeschweißten Ronden /81/.

Durch die Anwendung der dargestellten innovativen Verfahren zum Tiefziehen mit erweiterten Potenzialen können die bestehenden Grenzen des konventionellen Tiefziehens erweitert werden. Für die Fertigung von napf- oder nabenförmigen Formelementen an scheibenförmigen Dickblechteilen, die im Verhältnis zur Grundform kleine Durchmesser aufweisen, sind die durch die oben genannten Verfahren erreichten Verbesserungen unbefriedigend. Hinzu kommt, dass zusätzliche Fertigungsschritte zur Herstellung der Ausgangsteile notwendig sind /80, 81/ oder die erreichbaren End-

teileigenschaften (vorhandene Einschnittstellen in der Zarge) die an sie gestellten funktionalen Anforderungen nicht erfüllen /78/.

2.4 Kragenziehen

Zur Fertigung von nabenförmigen Formelementen an scheibenförmigen Dickblechteilen, die im Verhältnis zur Grundgeometrie kleine Durchmesser aufweisen, wird neben dem mehrstufigem Tiefziehen und anschließendem Lochen des Ziehteilbodens auch das Kragenziehen eingesetzt.

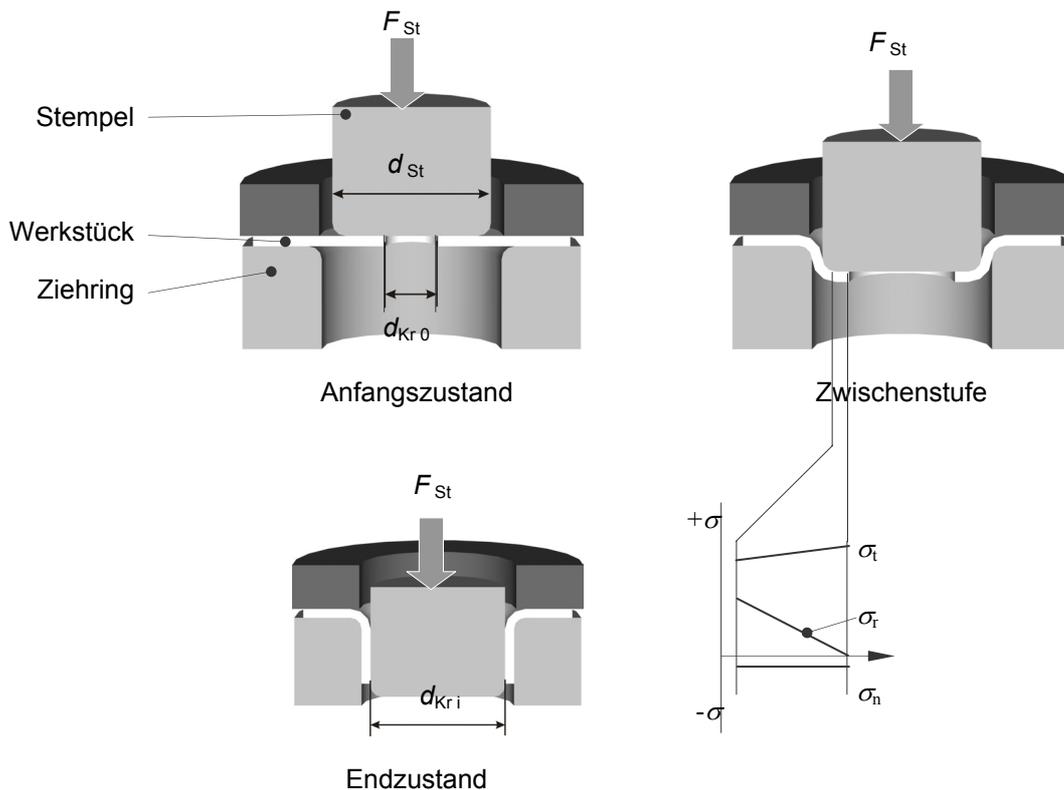


Bild 2-17: Verfahrensprinzip und qualitativer Spannungsverlauf beim Kragenziehen /82/.

Das Kragenziehen wird, wie auch das Tiefziehen, gemäß DIN 8584 den Zug-Druck-Umformverfahren zugeordnet /19/. Durch eine translatorische Bewegung des Stempels werden beim Kragenziehen an ausgeschnittenen Öffnungen geschlossene Ränder bzw. Kragen aufgestellt. Als Ausgangsteile können ebene Bleche, gewölbte Teile (z.B. Rohre) o. ä. verwendet werden. Gebräuchliche Verfahrensvarianten des Kragenziehens sind in der VDI-Richtlinie 3359 aufgeführt. Anders als beim Tiefziehen liegt die Hauptumformzone nicht in der Zone des Niederhalters, sondern über der Ziehringöffnung. Der Umformvorgang beschränkt sich überwiegend auf die Zone des entstehenden Formelementes. Nur der Werkstoff, der sich über der Ziehringöffnung befindet, wird umgeformt, indem der Werkstoff um die Rundungen des Stempels und des Ziehringes gebogen und somit der Durchmesser der vorher eingebrachten Öffnung vergrößert wird (**Bild 2-17**). Ein Nachfließen von Werkstoff außerhalb der Ziehringöffnung findet beim konventionellen Kragenziehen nicht statt. Die geo-

metrischen Gesamtabmessungen des Werkstücks bleiben daher beim Kragenziehen unverändert und dürfen, anders als beim Tiefziehen, beliebig groß gewählt werden. Der Vorgang des Kragenziehens ist beendet, wenn das Vorloch vollständig aufgeweitet ist.

Beim Kragenziehen ist die Verfahrensgrenze durch radiale Risse am Kragenrand gekennzeichnet, die zur Unbrauchbarkeit des Werkstücks führen. Zum Riss kommt es, wenn die infolge des Aufweitvorgangs am Kragenrand herrschenden tangentialen Zugspannungen die Zugfestigkeit des Werkstoffs überschreiten. Die Rissbildung wird im Allgemeinen durch vorher entstehende Einschnürungen eingeleitet, die ebenfalls unerwünscht sind.

Von entscheidender Bedeutung für das erreichbare Aufweitverhältnis d_{St}/d_{Kr0} ist der verwendete Werkstoff. Außerdem wird das maximal erreichbare Aufweitverhältnis stark von der Art der Herstellung des Vorloches beeinflusst. Durch Bohren und anschließendes Reiben kann ein glatter und gratfreier Vorlochrand erzeugt werden, der zu guten Ergebnissen beim Kragenziehen führt. Realisierbare Aufweitverhältnisse von 1,5 bis 3 sind in Abhängigkeit von der Qualität des Vorloches und der relativen Blechdicke in [83 bis 88] angegeben. Berechnungsgrundlagen für die beim Kragenziehen erreichbaren Kragenhöhen und die auftretende Reduktion der Blechdicke liefern [23, 89, 90, 91].

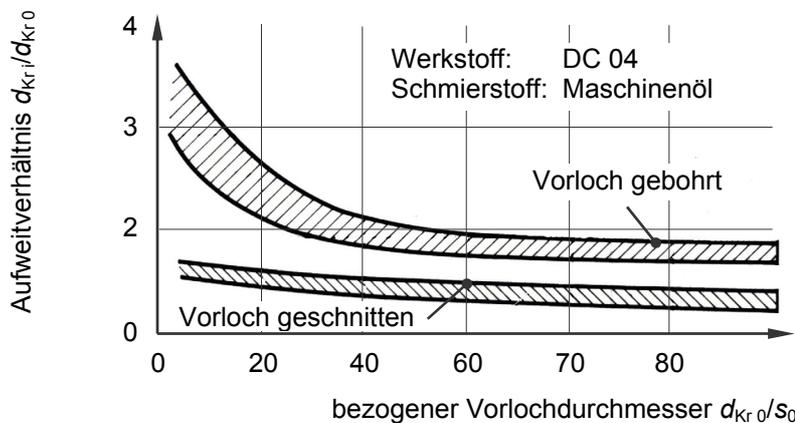


Bild 2-18: Erreichbare Aufweitverhältnisse als Funktion des bezogenen Vorlochdurchmessers [88].

Infolge der am Kragenrand herrschenden tangentialen Zugspannungen verringert sich die Blechdicke in Richtung des Kragenrandes. Ebenfalls nachteilig beim Kragenziehen ist, dass nur geringe Kragenhöhen erreicht werden, wenn die Durchmesser der herzustellenden Kragen gering sind. Für die Fertigung von nabenförmigen Formelementen an scheibenförmigen Dickblechteilen, die im Verhältnis zur Grundgeometrie kleine Durchmesser aufweisen, ist das konventionelle Kragenziehen demnach nur bedingt geeignet. Im Folgenden sind solche Verfahren im Stand der Technik erläutert, welche die bestehenden Nachteile des konventionellen Kragenziehens

beseitigen und die für die Fertigung von nabenförmigen Formelementen an scheibenförmigen Dickblechteilen geeignet sind.

2.5 Möglichkeiten zur Erweiterung der Umformgrenzen beim Kragenziehen

Mit dem Ziel, höhere Kragen zu fertigen, wurde von SCHLAGAU /92 bis 95/ eine Verfahrensvariante untersucht, bei der durch axiale oder radiale Gegenstempel eine Druckspannung in die Umformzone eingeleitet wird. Das Verfahrensprinzip mit axialem Gegenstempel zeigt **Bild 2-19**. Mit diesem Verfahrensprinzip konnten das Grenzaufweitverhältnis erhöht und eine Vergrößerung der Kragenhöhe um das 1,25-fache erreicht werden (**Bild 2-20**).

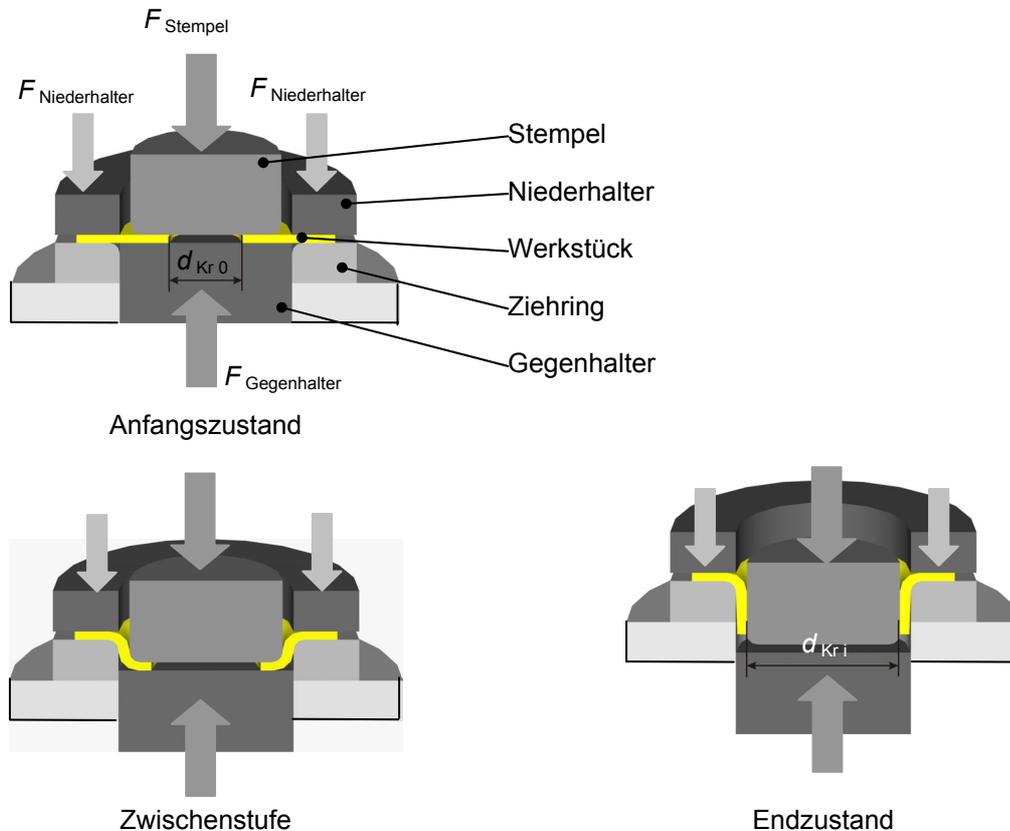


Bild 2-19: Kragenziehen mit axialem Gegenhalter /92/.

Im Gegensatz zum konventionellen Kragenziehen wird bei dem hier beschriebenen Verfahren mit axialem Gegenhalter eine Druckspannung in Richtung der Blechdicke erzeugt. Dies führt dazu, dass die zum Fließen des Werkstoffs notwendig Hauptspannungsdifferenz bereits bei einer kleineren tangentialen Zugspannung auftritt. Der zum Riss am Lochrand führende kritische Wert der tangentialen Zugspannung wird daher erst bei einem größeren Aufweitverhältnis erreicht. Die radiale Spannung beim Kragenziehen mit axialem Gegenhalter ist am Rand des Vorlochs gleich Null. In Richtung der Rundung des Ziehstempels steigt die radiale Spannung jedoch infolge der Reibung zwischen Ziehstempel und Blech bzw. Blech und axialem Gegenhalter stärker an als beim konventionellen Kragenziehen.

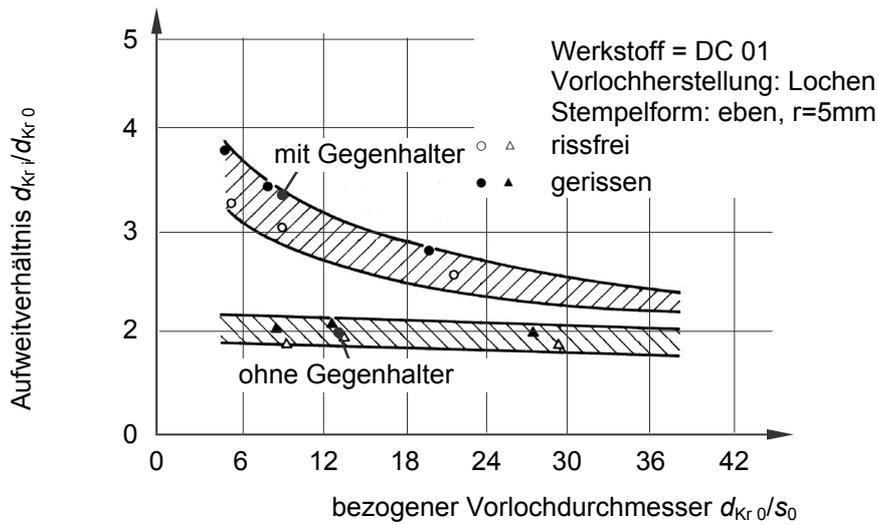


Bild 2-20: Verbesserung des erreichbaren Aufweitverhältnisses mit Hilfe eines axialen Gegenhalters /94/.

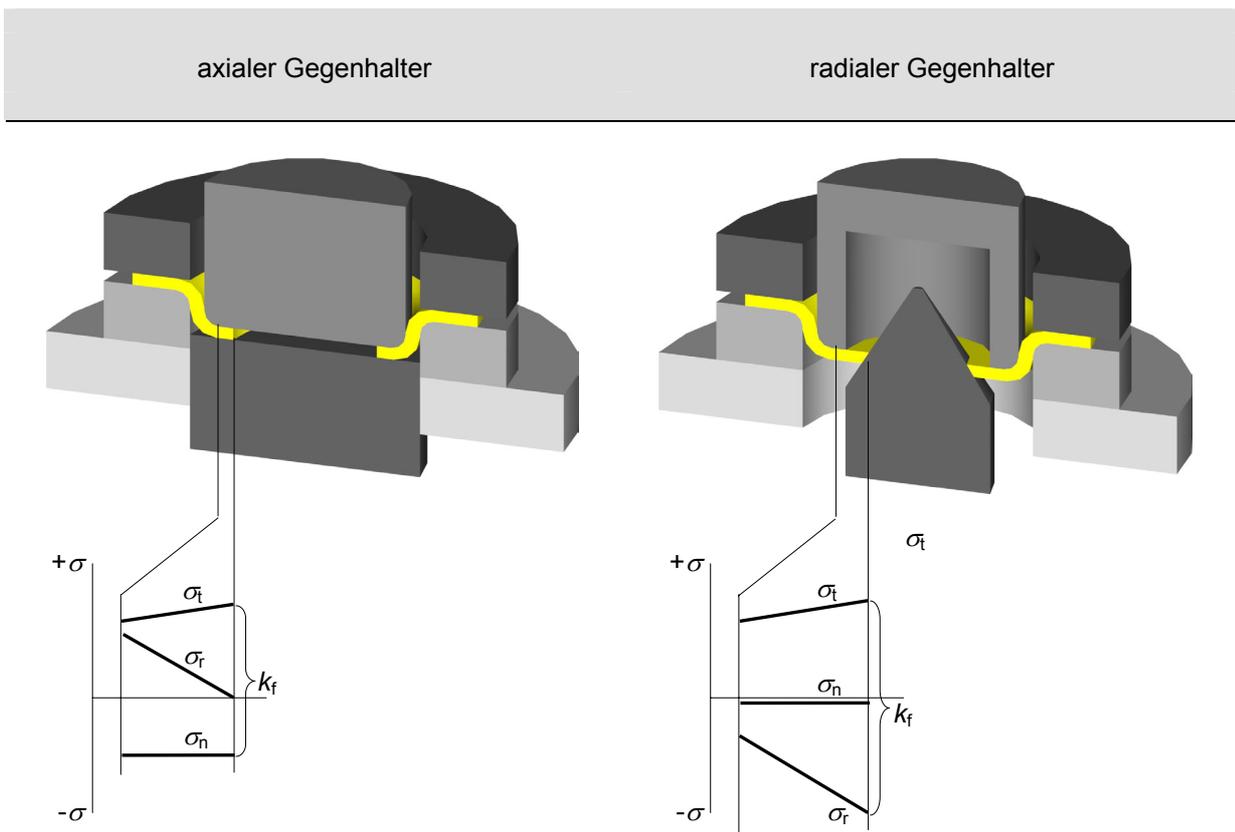


Bild 2-21: Vergleich der Spannungszustände beim Kragenziehen mit axialem und radialem Gegenhalter.

Beim Verfahren des Kragenziehens mit radialem Gegenhalter verringern sich die radialen Spannungen um den durch den Gegenhalter eingebrachten Betrag der radialen Druckspannungen. Einen Vergleich der Spannungszustände beim Kragenziehen

mit axialem und radialem Gegenhalter zeigt **Bild 2-21**. Sowohl der axiale als auch der radiale Gegenhalter bewirken, dass gegenüber dem konventionellen Kragenziehen ein kleinerer Spannungsmittelwert vorliegt.

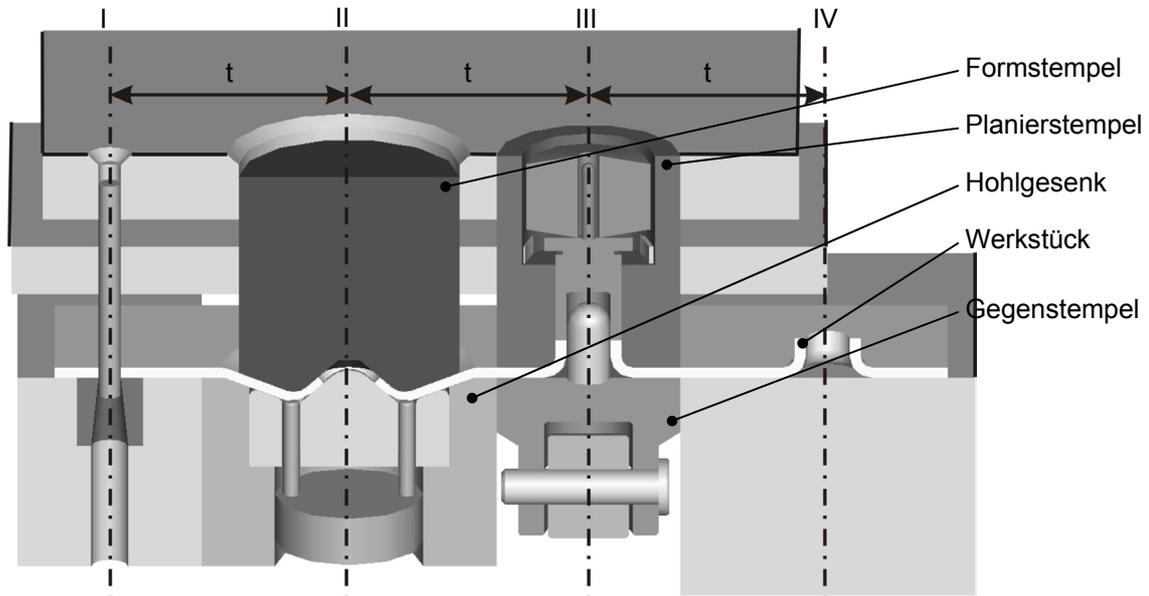


Bild 2-22: Verbundfolgewerkzeug zum Erzeugen hoher Kragen /96/.

Eine Vergrößerung der Kragenhöhe um etwa 50% erreicht OEHLER /96/ in einem Stufenwerkzeug (**Bild 2-22**). In der dem Loch (Stufe I) folgenden Verfahrensstufe wird das Werkstück mit einem Formstempel in ein vertieft liegendes Hohlgesenk gedrückt (Stufe II). In der dritten Verfahrensstufe wird das Vorloch aufgeweitet und das in der Stufe II nach unten gewölbte Blech, welches sich außerhalb des Kragens befindet, durch den von oben wirkenden Planierstempel und durch den von unten wirkenden Gegenstempel wieder eben gerichtet.

2.6 Verfahren zur Herstellung von nabenförmigen Formelementen

Zur umformtechnischen Herstellung von nabenförmigen Formelementen an Dickblechteilen sind Fertigungsverfahren mit rotatorischer und translatorischer Werkzeughauptbewegung bekannt. Nach dem im **Bild 2-23** dargestellten Verfahrensprinzip wird die Nabe durch Spalten des gelochten Bodens eines nach oben offenen zylindrischen Hohlkörpers mit anschließendem schrittweisen Umformen zwischen Rollenpaaren gefertigt. Nähere Angaben über herstellbare Teilegeometrie, Werkzeuggestaltung, notwendige maschinelle Einrichtungen sowie Verfahrensparameter werden in /97/ nicht angegeben.

Bild 2-24 zeigt das Anformen einer Nabe an einer vorgeformten Riemenscheibe durch Drücken. Hierbei wird das Material zur Nabenbildung durch 2 Drückrollen aus der Scheibe in die Naben verlagert. Konkrete verfahrenstechnische Angaben zu diesem rotatorisch arbeitenden Verfahren liegen nicht vor /98/.

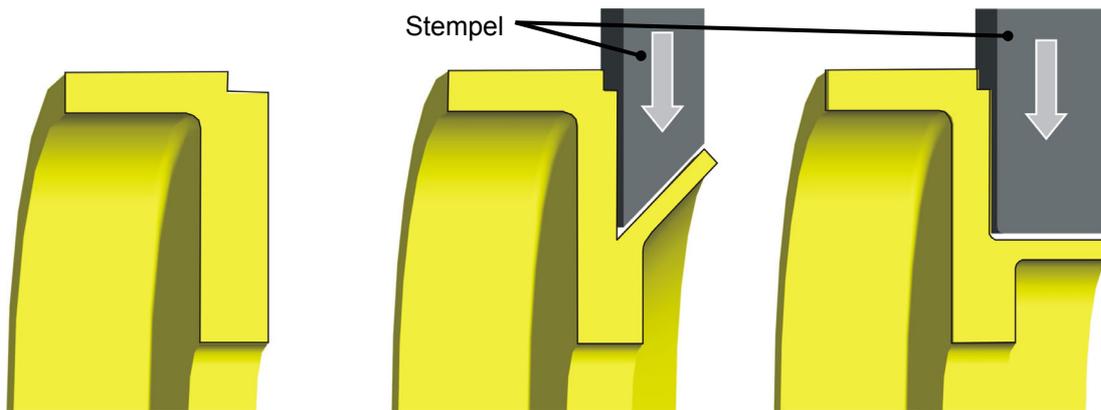


Bild 2-23: Nabenfertigung durch Spalten /97/.

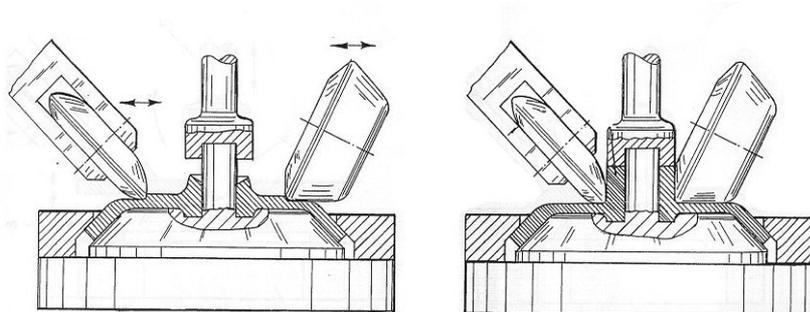


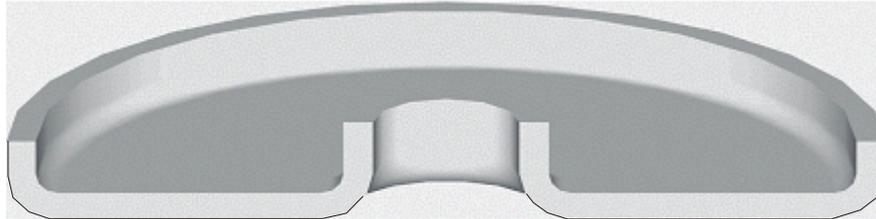
Bild 2-24: Nabenfertigung durch Drücken /98/.

Die Nachteile der Verfahren mit rotatorischer Werkzeughauptbewegung sind die notwendigen kostenintensiven maschinellen Einrichtungen, die eingeschränkte Anwendbarkeit hinsichtlich des Platzbedarfes der Werkzeuge sowie eine im Vergleich zu translatorischen Umformverfahren längere Stückzeit. Eine häufig angewendete Technologie zur Herstellung von nabenförmigen Formelementen an Blechteilen ist das mehrstufige Tiefziehen mit anschließendem Lochen des Ziehteilbodens. Je nach Abmessungen der zu fertigenden Nabe sind hierbei 10 bis 19 Umformstufen erforderlich /17/.

PETZOLD und SCHELER /14, 15, 16/ entwickelten eine Technologie, welche die stufenweise Fertigung der im **Bild 2-25** (3. Stufe) dargestellten Endteilgeometrie durch translatorisches Kaltumformen ermöglicht. Zur Herstellung der Werkstücke wurden verschiedene Fertigungsfolgen der Verfahren Tiefziehen, Lochen, Kragenziehen, Stauchen und Durchsetzen angewendet.

Mit den Werkstoffen DD 11, ZStE 380, QStE 340 und C 35 GKZ in den Blechdicken von 2 mm bis 6 mm wurden Untersuchungen durchgeführt. Die erste Zwischenform zur Nabenfertigung wurde durch mehrstufiges Tiefziehen gefertigt. Entsprechend der vorgegebenen Endform war hierbei ein Gesamtziehverhältnis von $\beta_{ges} = 8,7$ zu realisieren, das durch Optimierung der Stufenfolge in 6 Ziehstufen erreicht wurde. Nach dem radialen Abtrennen des Ziehteilbodens wurde die Nabe gestaucht. Da für die Verfahrensgestaltung bedeutungsvoll, wurden auf experimentellem Wege erreichbare Stauchverhältnisse der ersten Stauchstufe ermittelt, die durch das Entstehen einer

Rille bzw. Falte an der Nabeninnenwand begrenzt sind. In einer zweiten und dritten Stauchstufe wurden Aufdickungen des Materials von 35 % bzw. 65 % gegenüber der Ausgangsblechdicke erreicht.



1. Stufe: Formgebung der Zwischenform durch mehrstufiges Tiefziehen mit anschließendem Lochen



2. Stufe: Erzeugung einseitiger Materialanhäufungen durch Stauchen



3. Stufe Erzeugung beidseitiger Materialanhäufungen mittels Durchsetzen

Bild 2-25: Fertigungsfolgen und Endteilgeometrie der Dickblechteile /14/.

NAKAMURA beschreibt in /36, 99/ ein Verfahren, bei dem aus einem rotationssymmetrischen Blechzuschnitt mit Vorloch (Werkstoff: Stahl, Blechdicke: 0,8 mm) ein Werkstück mit Flansch und hohem Kragen in einem Zug hergestellt werden kann. Das Verfahren unterteilt sich in einen Tiefziehvorgang und einen anschließenden Kragenziehvorgang. Die vier Phasen des Verfahrens verdeutlicht **Bild 2-26**. In der ersten Phase wird ein Medium in die Gegendruckkammer gegeben, sobald der Stempel auf dem Werkstück aufsitzt. Anschließend wird die Gegendruckkammer druckdicht verschlossen. Setzt sich der Stempel in Richtung der Gegendruckkammer in Bewegung (Phase II), so baut sich in der Gegendruckkammer ein Druck auf.

Dieser Druck presst das Werkstück gegen die Stirnfläche des Stempels und die Reibung zwischen Stempel und Werkstück verhindert ein Aufweiten des Vorlochs. In der dritten Phase wird das Medium aus der Gegendruckkammer abgeleitet. Als Ergebnis

liegt nach der dritten Phase ein tiefgezogenes Werkstück mit Flansch und Loch im Ziehteilboden vor (**Bild 2-27**). Abschließend wird in der vierten Phase der Vorgang des Kragenziehens durchgeführt. Durch die Kombination des Tiefziehens mit anschließendem Kragenziehen kann die erreichbare Höhe des Kragens im Vergleich zum konventionellen Kragenziehen deutlich vergrößert werden.

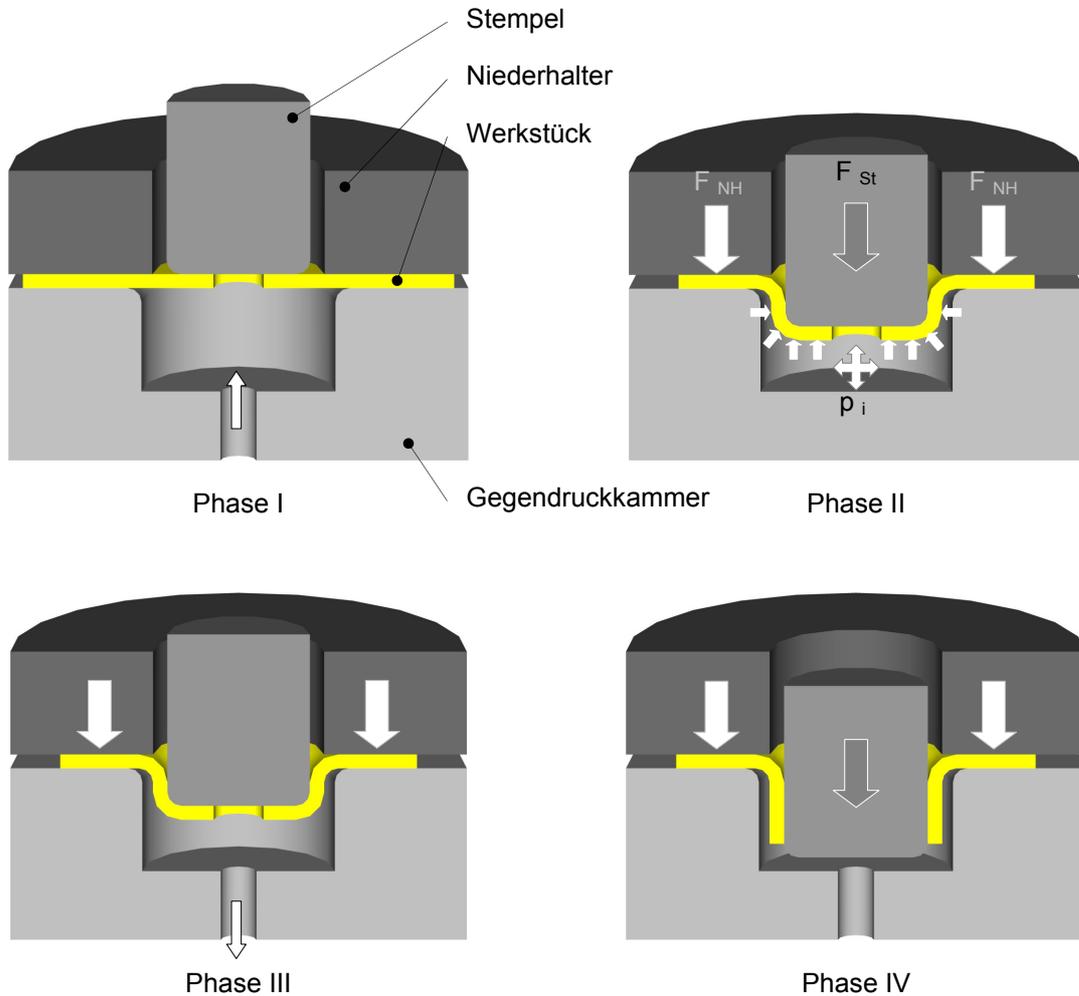
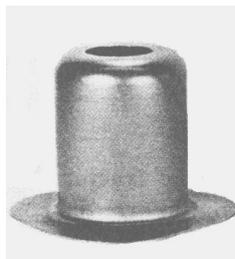
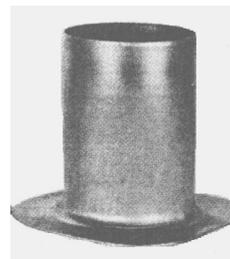


Bild 2-26: Tiefziehen mit hydraulischem Gegendruck und anschließendes Kragenziehen /99/.



nach Phase III



nach Phase IV

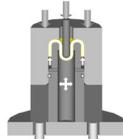
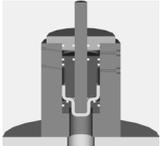
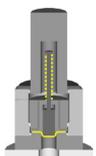
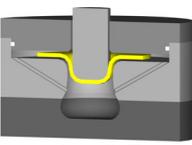
Bild 2-27: Werkstück nach dem Vorgang des Tiefziehens und nach dem Vorgang des Kragenziehens.

2.7 Zusammenfassung – Stand der Technik

2.7.1 Tiefziehen

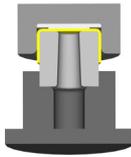
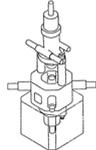
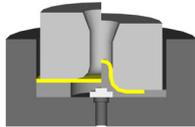
Der dargelegte Stand der Technik zu Verfahren des Tiefziehens zeigt, dass eine Vielzahl von Verfahrensvarianten existieren, welche die bestehenden Verfahrensgrenzen erweitern können. Um die einzelnen Verfahren vergleichen zu können, zeigen **Tabelle 2-1** einen Überblick über die im Stand der Technik dargestellten hydraulischen Verfahren und **Tabelle 2-2** einen Überblick über die dargestellten mechanischen Verfahren. In dieser Kurzdarstellung werden noch einmal Angaben gemacht zu den verwendeten Werkstoffen und den erreichbaren Grenzziehverhältnissen. Außerdem wird jedes Verfahren hinsichtlich der Praxis- und Serientauglichkeit kurz bewertet und bestehende Defizite des Verfahrens bzw. der zu den Verfahren durchgeführten Untersuchungen genannt.

Tabelle 2-1: Hydraulische Verfahren mit erweiterten Umformgrenzen zum Tiefziehen.

Verfasser	Quelle	verwendeter Werkstoff	Verfahren/ Grenzziehverhältnis	Verfahrensbild	Bewertung
NAKAMURA	/28/	Aluminium $s_0 = 0,8 \text{ mm}$	Tiefziehen im Weiterzug (hydraulisch) $\beta_{\max} = 2,34$	 Bild 2-4	keine Regelung des Nachschiebedrucks, bedingt serientauglich, keine Variation des Werkstoffs
THIRUVARUD- CHELVAN	/29/	Aluminium $s_0 = 0,9 \text{ mm}$	Tiefziehen im Weiterzug (hydraulisch) $\beta_{\max} = 2,2$	 Bild 2-5	keine Steuerung der Niederhalterkraft, bedingt serientauglich, keine Variation des Werkstoffs
THIRUVARUD- CHELVAN	/30, 31, 32/	Aluminium $s_0 = 1,0 \text{ mm}$	Tiefziehen im Erstzug (hydraulisch) $\beta_{\max} = 3,11$	 Bild 2-6	Grenzziehverhältnis vergrößert, keine Steuerung der Niederhalterkraft, bedingt serientauglich, keine Variation des Werkstoffs
NAKAGAWA, NAKAMURA	/34, 35, 36/	Aluminium $s_0 = 0,8 \text{ mm}$	Tiefziehen im Erstzug (hydraulisch) $\beta_{\max} = 3,3$	 Bild 2-7	Grenzziehverhältnis vergrößert, keine Regelung des Nachschiebedrucks, bedingt serientauglich, keine Variation des Werkstoffs

SIZOV	/37/	Aluminium $s_0 = 1,0 \text{ mm}$	Tiefziehen im Erstzug (hydraulisch) $\beta_{\max} = 3,1$	ähnlich Bild 2-7	Grenzziehverhältnis vergrößert, keine Regelung des Nachschiebedrucks, keine Variation des Werkstoffs
-------	------	-------------------------------------	---	------------------	--

Tabelle 2-2: Mechanische Verfahren mit erweiterten Umformgrenzen zum Tiefziehen.

Verfasser	Quelle	verwendeter Werkstoff	Verfahren/Grenzziehverhältnis	Verfahrensbild	Bewertung
ENGEL	/38, 39, 40, 41/		Tiefziehen im Weiterzug (mechanisch) $\beta_{\max} = 1,7$	 Bild 2-9	keine Niederhalterkraft, kein gezielter Werkstofffluss
THIRUVA-RUDCHELVAN	/44/	Aluminium $s_0 = 0,8 \text{ mm}$	Tiefziehen im Weiterzug nach Maslennikov $\beta_{\max} = 3$	 Bild 2-10	Grenzziehverhältnis vergrößert, lange Prozesszeiten, starker Werkzeugverschleiß, bedingt serientauglich, keine Variation des Werkstoffs
SATO	/49/	Aluminium $s_0 = 3,0 \text{ mm}$	Tiefziehen im Erstzug (mechanisch) $\beta_{\max} = 3,4$	 Bild 2-12	Grenzziehverhältnis vergrößert, aufwändige Steuerung des Nachschiebens, keine Variation des Werkstoffs
BRAKMAN	/48/	Stahl $s_0 = 0,57 \text{ mm}$ Zinn $s_0 = 0,3 \text{ mm}$ Aluminium $s_0 = 0,5 \text{ mm}$ $s_0 = 1,0 \text{ mm}$	Tiefziehen im Erstzug (mechanisch) $\beta_{\max} = 4$	 Bild 2-11	Grenzziehverhältnis vergrößert, lange Prozesszeiten, starker Werkzeugverschleiß, bedingt serientauglich
MAYER	/78/	Stahl, Kupfer $s_0 = 0,3 \text{ mm}$	Tiefziehen im Erstzug mit „Expansionsstempel“ $\beta_{\max} = 2,65$	 Bild 2-13	lange Prozesszeiten, Rillen an der Stempelkontaktfläche

YAMAGUCHI, /80/
NIHARA,
TAKAKURA,
SHIRAKAWA

Aluminium
 $s_0 = 1,0 \text{ mm}$
Tiefziehen im
Erstzug
 $\beta_{\max} = 3$



Bild 2-14

Grenzziehverhältnis
vergrößert,
zusätzliches Fügen nach
dem Tiefziehen notwen-
dig

PARSA, /81/
YAMAGUCHI,
TAKAKURA

Stahl
 $s_0 = 0,2 \text{ mm}$
 $s_0 = 0,6 \text{ mm}$
 $s_0 = 1,0 \text{ mm}$
Tiefziehen im
Erstzug
 $\beta_{\max} = 2,55$



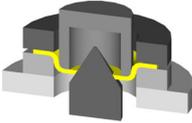
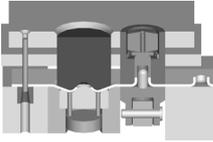
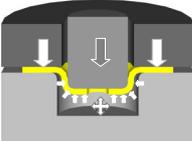
Bild 2-15

aufwändige Herstellung
der Ausgangsteile

2.7.2 Kragenziehen

Verfahren mit erweiterten Potenzialen für das Kragenziehen sind in weit geringerem Umfang vorhanden als Verfahren zum Tiefziehen mit erweiterten Umformgrenzen. Die ohnehin nur geringen erreichbaren Kragenhöhen beim Kragenziehen konnten nur durch ein von NAKAMURA beschriebenes Verfahren wesentlich vergrößert werden. Eine wissenschaftliche Untersuchung mehrerer Werkstoffe in Kombination mit mehreren Blechdicken kann nur SCHLAGAU vorweisen. Zusammengefasst sind die im Stand der Technik dargestellten Verfahren mit erweiterten Umformgrenzen zum Kragenziehen in **Tabelle 2-3**.

Tabelle 2-3: Verfahren mit erweiterten Umformgrenzen zum Kragenziehen.

Verfasser	Quelle	verwendeter Werkstoff	Verfahren/ Grenzziehver- hältnis	Verfahrensbild	Bewertung
SCHLAGAU	/92, 93, 94, 95/	Aluminium Stahl $s_0 = 1,0 \text{ mm}$ $s_0 = 2,0 \text{ mm}$ $s_0 = 3,0 \text{ mm}$	Kragenziehen mit axialen und radialen Gegen- halten Kragenhöhe um 25% vergrößert	 REF _Ref500227349 h * MERGE- FORMAT Bild 2-21	Verbesserung des Grenz- aufweitverhältnisses, ge- ringe Vergrößerung der Kragenhöhe
OEHLER	/96/	Stahl $s_0 = 1,0 \text{ mm}$	Kragenziehen mit Verbund- werkzeug Kragenhöhe um 50% vergrößert	 Bild 2-22	größere erreichbare Kra- genhöhen, keine Variation des Werkstoffs
NAKAMURA	/36, 99/	Stahl $s_0 = 0,8 \text{ mm}$	Verfahrenskom- bination Tiefzie- hen / Kragenziehen	 Bild 2-26	Kragenhöhe nur begrenzt durch die erreichbare Napfhöhe beim voraus- gehenden Tiefziehen, keine Variation des Werk- stoffs

2.7.3 Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik

Für die Fertigung von scheibenförmigen Grundkörpern mit napfförmigen Formelementen, welche eine ausreichende Formelementhöhe aufweisen sollen, bietet sich das Tiefziehen an. Ein anschließendes Abtrennen des Formelementbodens ermöglicht auch die Herstellung von nabenförmigen Formelementen. Sind die Durchmesser der Formelemente im Vergleich zu den Durchmessern der scheibenförmigen Grundkörper klein, ist eine Fertigung mit Hilfe des konventionellen Tiefziehens durch eine große Anzahl von Umformstufen und somit durch eine charakteristische Welligkeit des Flansches gekennzeichnet. In vielen Fällen können sehr kleine Formelementdurchmesser umformtechnisch nicht hergestellt werden.

In der Literatur sind eine Vielzahl von Verfahren bekannt, welche die Verfahrensgrenzen beim konventionellen Tiefziehen erweitern können. Das aussichtsreichste Verfahrensprinzip zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim konventionellen Tiefziehen stellt das Nachschieben von Werkstoff dar, da durch das Nachschieben von Werkstoff die Zugspannung in der Zarge des Werkstücks reduziert werden kann. Somit wird durch das Nachschieben von Werkstoff die Kraftübertragungszone in der Zarge wesentlich entlastet und größere Ziehverhältnisse im Vergleich zum konventionellen Tiefziehen werden ermöglicht. Eine stufenarme umformtechnische Fertigung von napf- oder nabenförmigen Formelementen an scheibenförmigen Grundkörpern kann demnach durch das Nachschieben von Werkstoff realisiert werden.

Die wichtigsten Verfahren zum Nachschieben von Werkstoff sind durch ihre hydraulische bzw. mechanische Verfahrensweise charakterisiert. Die dem Stand der Technik zu entnehmenden hydraulischen Verfahren zum Nachschieben von Werkstoff ermöglichen eine direkte Einleitung der zusätzlichen Kraftkomponente in den Flansch des Werkstücks.

Bei den hydraulischen Verfahren zum Nachschieben von Werkstoff berichten die Autoren vielfach von Schwierigkeiten bei der Abdichtung des Druckraums. Besonders bei den hydraulischen Verfahren, bei denen die Dichtungen in die Zonen gelegt wurden, in denen sich die Blechdicke während des Vorgangs des Tiefziehens ändert, treten Undichtheiten des Druckraums auf. Viel versprechender ist die Variante der Abdichtung in Zonen, in denen die Dichtungen nicht mit dem Werkstück in Berührung kommen. Bei den Verfahren, die mit einem Wirkmedium arbeiten, werden demnach immer sehr hohe Anforderungen an die Dichtungstechnik gestellt. Auch eine aufwändige Prozessregelung der Niederhalter- und Nachschiebekraft erschwert die technologische Machbarkeit der hydraulischen Verfahrensvarianten zum Nachschieben von Werkstoff.

Da der zum Nachschieben erforderliche Druck des Wirkmediums der Niederhalterkraft entgegenwirkt, müssen bei den hydraulischen Verfahren höhere Pressenkräfte aufgebracht werden als bei den mechanischen Verfahren.

Eine technisch einfacher zu realisierende Möglichkeit bieten mechanische Verfahren zum Nachschieben von Werkstoff. Bei den mechanischen Verfahren ist ein Nachschieben in der Flanschebene bei rotationssymmetrischen Ausgangsteilen konstruk-

tiv nur schwer zu lösen. Nachteilig bei den dargestellten Verfahren, welche nach dem Maslennikov-Prinzip arbeiten, sind der hohe erforderliche Zeitbedarf durch die hohe Anzahl von Pressenhüben sowie der Verschleiß der Urethan-Ringe. Aussichtsreich ist eine Verfahrensvariante, bei welcher die Restzarge eines in einem Erstzug hergestellten Napfes beim Umformvorgang mit einer Kraft beaufschlagt wird, wenn das Verfahrensprinzip dahingehend verbessert wird, dass der Flansch durch einen Niederhalter abgestützt wird, um die Bildung von Falten zu verhindern. Außerdem muss der Außenrand durch eine Armierung vor dem Ausknicken geschützt werden, wenn die Verfahrensgrenzen gegenüber dem konventionellen Tiefziehen wesentlich erweitert werden sollen.

Unbefriedigend bei den im Stand der Technik aufgeführten hydraulischen und mechanischen Verfahren zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und zum Tiefziehen mit erweiterten Umformgrenzen ist, dass sich das Spektrum der untersuchten Materialien größtenteils auf Aluminium und der Parameterbereich der untersuchten Blechdicken größtenteils auf Blechdicken kleiner bzw. gleich 1,0 mm beschränkt. Außerdem sind viele dieser beschriebenen Verfahren für eine Serienfertigung nicht geeignet.

Die technologische Machbarkeit des Nachschiebens von Werkstoff beim Tiefziehen ist sowohl für die mechanischen als auch für die hydraulischen Verfahrensweisen nachgewiesen. Systematisch und wissenschaftlich erforscht sind die Verfahrensgrenzen und Endteileigenschaften für unterschiedliche Werkstoffe und Blechdicken bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht.

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher eine mechanische Verfahrensvariante zum Nachschieben von Werkstoff beim Tiefziehen für die Fertigung von scheibenförmigen Dickblechteilen mit napfförmigen Formelementen entworfen und nach wissenschaftlichen Methoden für verschiedene Werkstoffe, Blechdicken und Werkzeuggeometrien untersucht werden. Um eine konstante Krafterleitungsfläche zu gewährleisten, soll die Kraft auf einen in einer ersten Fertigungsstufe hergestellten Rand eingeleitet werden. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Technik soll bei dieser mechanischen Verfahrensvariante zum Nachschieben von Werkstoff durch einen speziell konstruierten Niederhalter der Werkstofffluss aus dem Rand in den Flansch unterstützt und eine Faltenbildung im Flansch gleichzeitig unterdrückt werden. Eine Armierung soll ein seitliches Ausknicken des hochgestellten Randes während des Nachschiebens verhindern.

Der vorliegende Kenntnisstand ist auf die Anwendung des ausgewählten Verfahrensprinzips zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff bei Blechdicken größer 2 mm nicht ausreichend. In der Literatur fehlen gesicherte Aussagen zum Umformvorgang, zu den Verfahrensparametern (Nachschiebewege, Niederhalter-, Nachschiebe- und Ziehkräfte), zur Werkzeuggestaltung sowie zu den erreichbaren stofflichen und geometrischen Endteileigenschaften. Hierzu sind systematische wissenschaftliche Untersuchungen notwendig.

3 Zielstellung

Die stetig steigenden Anforderungen an die Fertigung von Blechformteilen in Bezug auf die Reduzierung der Kosten und des Zeitbedarfs sowie auf die Realisierung von Leichtbaukonzepten führen dazu, dass konventionelle Umformverfahren diese hohen Ansprüche nicht mehr erfüllen oder bestenfalls mit großem Aufwand (mehrstufige Prozesse) zu einem gewünschten Ergebnis führen. Daher besteht die Notwendigkeit, Verfahrensvarianten mit erweiterten Umformgrenzen zu entwickeln und umzusetzen, die es ermöglichen, komplexe Blechteile mit den geforderten optimalen Endteileigenschaften stufenarm und mit geringen Kosten umformtechnisch herzustellen.

In der Industrie setzen sich neue Fertigungsverfahren jedoch nur dann gegen etablierte Fertigungsverfahren durch, wenn die existierenden Verfahrensgrenzen erweitert, die Anzahl notwendiger Umformstufen reduziert, die herstellbaren Teilegeometrien erweitert, die Endteileigenschaften verbessert, das Anwenden von schwer umformbaren Werkstoffen ermöglicht und nicht zuletzt die Kosten reduziert werden. Eine Vielzahl der im „Stand der Technik“ beschriebenen Verfahren mit erweiterten Potenzialen zielt darauf ab, die Verfahrensgrenzen bestehender Verfahren zum Tiefziehen durch hydraulisches oder mechanisches Nachschieben von Werkstoff zu erweitern.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde schlussfolgernd aus den im „Stand der Technik“ dargestellten Potenzialen des Nachschiebens von Werkstoff zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen und unter Vermeidung der dargestellten Defizite der bekannten Verfahrensvarianten zum Nachschieben von Werkstoff ein neuartiges Verfahrensprinzip zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (TNWW) entworfen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Schaffung der Voraussetzungen für die rationelle, wissenschaftlich fundierte Verfahrensplanung und Verfahrensrealisierung sowie der Voraussetzungen für eine breite industrielle Anwendung des TNWW bei einer hohen Verfahrenssicherheit. Abgeleitet aus diesem Hauptziel ergeben sich folgende Einzelziele (**Bild 3-1**): Die technologische Machbarkeit des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss soll nachgewiesen werden. Das TNWW soll im Rahmen dieser Arbeit technologisch determiniert sowie konkrete Verfahrensgrenzen und Verfahrensparameter für die gewählte Verfahrensvarianten ermittelt werden. Die Beurteilung und der Nachweis der erzielten Verbesserungspotenziale sowie die Bewertung der Qualität des Umformvorganges werden über die ermittelten Endteileigenschaften der durch Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss hergestellten Werkstücke erbracht.



Bild 3-1: Forschungsziele.

Zur Anwendung und Erweiterung der Potenziale des Verfahrensprinzips des Nachschiebens von Werkstoff sollen die beim TNWW gewonnenen Erkenntnisse auf eine ähnliche Fertigungsaufgabe zum Krageziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (KNWW) übertragen werden. Auch für das KNWW werden die Voraussetzungen für eine wissenschaftlich fundierte Verfahrensplanung und Verfahrensrealisierung geschaffen. Das aus dem TNWW entwickelte Verfahrensprinzip des KNWW wird technologisch determiniert, die Verbesserungspotenziale gegenüber dem konventionellen Krageziehen werden über die Endteileigenschaften nachgewiesen und die Verfahrensgrenzen und Verfahrensparameter ermittelt.

Mit dem neuartigen Verfahrensprinzip zum Nachschieben von Werkstoff wird es möglich sein, napfförmige und nabenförmige Formelemente an scheibenförmigen, rotationssymmetrischen Grundkörpern mit optimierten Endteileigenschaften stufenarm umformtechnisch zu fertigen. Dabei sollen die Durchmesser der Formelemente im Verhältnis zur Grundgeometrie klein sein. Durch dieses Verfahrensprinzip können Geometrien gefertigt werden, welche mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur unter höherem Aufwand herstellbar sind.

Die vorgegebenen Forschungsziele dieser Arbeit werden erreicht durch:

- Theoretische Betrachtungen zum Verfahrensprinzip,
- experimentelle Untersuchungen mit einer gezielten Variation der für das zu untersuchende Verfahren relevanten werkstück-, werkzeug- sowie verfahrensbedingten Einflussgrößen (z.B. Blechwerkstoff, Blechdicke, Niederhalterkraft, Nachschiebeweg, Abmessung des Ausgangsteils und Geometrie des Formelementes),
- Bestimmung der stofflichen und geometrischen Ausgangsteil- und Endteileigenschaften,
- begleitende numerischen Betrachtungen zu ausgewählten Verfahrensfällen in Erweiterung der experimentellen Untersuchungen.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind ein Beitrag zur Fertigung von napf- oder nabenförmigen Formelementen an scheibenförmigen Dickblechteilen, die im Verhältnis zur Grundgeometrie kleine Formelement-Durchmesser aufweisen, unter Nutzung eines neuartigen Verfahrensprinzips zum Nachschieben von Werkstoff, welches angewendet auf einen Tiefziehvorgang im Vergleich zum Tiefziehen mit starrem Werkzeug und angewendet auf einen Kragenziehvorgang im Vergleich zum konventionellen Kragenziehen erweiterte Verfahrensgrenzen besitzt, die Anwendung von schwer umformbaren Werkstoffen zulässt und die Fertigung von Werkstücken mit verbesserten Endteileigenschaften ermöglicht.

4 Grundprinzip: Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (TNWW)

Gegenstand der wissenschaftlichen Untersuchungen ist ein Verfahrensprinzip zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss. Im Folgenden wird dieses Verfahrensprinzip mit TNWW abgekürzt. Das im „Stand der Technik“ beschriebene Verfahren Tiefziehen mit starrem Werkzeug wird im Folgenden als konventionelles Tiefziehen bezeichnet.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entworfene und wissenschaftlich untersuchte neuartige Verfahrensprinzip ist dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zur Ziehstempelkraft F_{St} eine axiale, über einen zuvor hochgestellten Rand des Werkstückes eingeleitete, mechanische Kraft F_{Ns} den Tiefziehvorgang unterstützt.

Bild 4-1 zeigt das Grundprinzip für das TNWW. Durch ein definiertes Umlenken der axial wirkenden Kräfte in den Flansch entsteht im Flansch eine radial gerichtete Druckspannung, die den Werkstofffluss in Richtung der sich ausbildenden Napfgeometrie begünstigt. Dieser durch die Werkzeuggeometrie unterstützte Werkstofffluss bewirkt eine wesentliche Erweiterung der Verfahrensgrenzen.

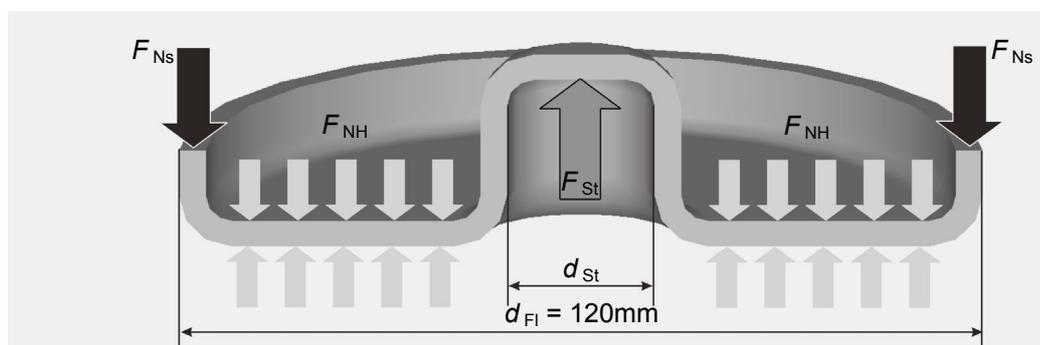


Bild 4-1: Grundprinzip beim TNWW.

Das Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss ist eine Kombination aus einem Tiefziehvorgang und einem Vorgang des Nachschiebens von Werkstoff. Zur Verdeutlichung der beim TNWW vorherrschenden Beanspruchung sind diese beiden Einzelvorgänge, die gleichzeitig die Grenzfälle beim Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss darstellen können, im **Bild 4-2** vergleichend gegenübergestellt.

Ist die Nachschiebekraft F_{Ns} Null (Bild 4-2a), liegt ein konventioneller Tiefziehvorgang vor. Ein Werkstückelement im Flansch wird radial gestreckt, tangential gestaucht sowie normal gestreckt werden. Wird im Gegensatz dazu nur Werkstoff nachgeschoben und keine Ziehstempelkraft F_{St} aufgebracht (Bild 4-2b), so werden aus den beim konventionellen Tiefziehen vorherrschenden radialen Zugspannungen radiale Druck-

spannungen. Ein Werkstückelement im Flansch wird in diesem Grenzfall sowohl tangential als auch radial gestaucht und normal gestreckt.

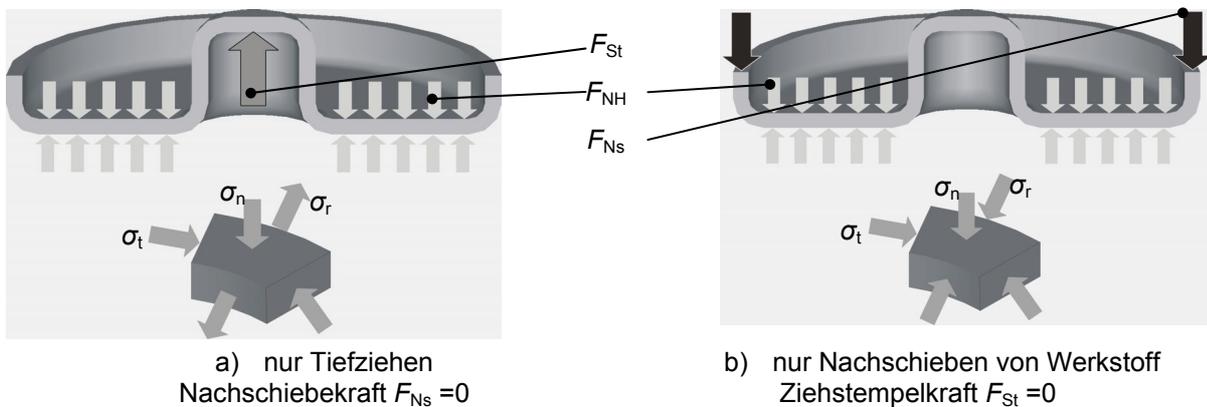


Bild 4-2: TNWW mit typischen Beanspruchungen (Grenzfälle des TNWW).

Zur bestmöglichen Ausnutzung der Potenziale des Verfahrens TNWW muss ein Verfahrensfenster zwischen diesen beiden Grenzfällen gefunden und realisiert werden. In einem solchen Verfahrensfenster ergeben sich für das TNWW charakteristische Beanspruchungszonen. Im Rand des Werkstücks findet eine axiale Stauchung des Werkstoffs statt. Im Flansch wird der Werkstoff durch das Niederhalten und durch das Nachschieben von Werkstoff radialen, tangentialen und normalen Druckspannungen unterworfen. In der Zarge ist die Umformung beendet. Im Zieheteilboden wird beim TNWW kein Werkstoff umgeformt.

Der Umformvorgang beim Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss stellt sich wie folgt dar: Beim TNWW findet wie beim konventionellen Tiefziehen beim Ausformen des Napfbodens in der Zone des Ziehstempelradius ein Streckziehvorgang statt. Durch den infolge des Nachschiebens von Werkstoff verursachten Werkstofffluss wird die Streckziehbeanspruchung des Werkstoffs in der Zone des Ziehstempelradius reduziert. Somit werden eine ausgeprägte Verringerung der Blechdicke und die für das konventionelle Tiefziehen charakteristische Schwachstelle in der Zone des Ziehstempelradius vermieden.

Nachdem der Napfboden ausgeformt ist, wird beim TNWW durch das Nachschieben von Werkstoff und die dadurch im Flansch entstehenden Druckspannungen die zum Einziehen des Flansches notwendige und über die Zarge zu übertragende Ziehstempelkraft wesentlich reduziert. Die zum Umformen im Flansch benötigte Umformkraft wird durch die Nachschiebekraft F_{Ns} und durch die Ziehstempelkraft F_{St} erzeugt. Da die über die Zarge zu übertragende Ziehstempelkraft (Zugspannung) bei gegebenem Zargenquerschnitt und gegebener Zugfestigkeit des Werkstoffs begrenzt ist, muss der Anteil der Ziehstempelkraft an der Umformkraft bei kleiner werdenden Durchmessern der Formelemente immer geringer werden, wenn der Versagensfall des Bodenreißers ausgeschlossen werden soll.

Die Verfahrensgrenzen des TNWW unterscheiden sich von denen des konventionellen Tiefziehens. Ist der Vorgang des Ziehens und Nachschiebens in einem verfahrensentsprechenden Geschwindigkeitsverhältnis abgestimmt, wird das TNWW nicht

wie beim konventionellen Tiefziehen durch einen Bodenreißer begrenzt. Vielmehr besteht verstärkt die Gefahr, dass die beim Erreichen eines bestimmten tangentialen Umformgrades wirkenden Druckspannungen bei deutlich höheren Nachschiebe-Ziehverhältnissen β_{NS} (Definition: geometrisches Verhältnis von Flanschaußendurchmesser zum Stempeldurchmesser, d_{Fl}/d_{St}), zu Falten im Flansch des Werkstücks führen. Die im Stand der Technik erwähnten Modelle, welche die Faltenbildung beim konventionellen Tiefziehen erklären, können auf das TNWW angewendet werden.

Für das TNWW ist der Hauptversagensfall, das Entstehen der Falten im Flansch, von folgenden Faktoren abhängig:

- Nachschiebe-Ziehverhältnis β_{NS} ,
- Niederhalterkraft F_{NH} ,
- Nachschiebeweg x_{NS} ,
- Nachschiebekraft F_{NS} ,
- Werkstoff sowie
- Blechdicke im Flansch des Werkstücks.

Zusätzlich zum Versagensfall der Faltenbildung hebt beim TNWW der Niederhalter bei einer zu geringen Niederhalterkraft vom Flansch des Werkstücks ab. Dies geschieht, da der Werkstoff über den äußeren Ziehringradius zwar einmal in Richtung des Flansches gebogen wird, aufgrund einer zu geringen Niederhalterkraft jedoch nicht mehr in die Ebene des Flansches zurück gebogen werden kann.

5 Untersuchungsprogramm

5.1 Fertigungsmittel

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen ist das im **Bild 5-1** dargestellte Werkzeug entwickelt und verwendet worden. Das Werkzeug ist in eine ein-fachwirkende hydraulische Viersäulenpresse vom Typ KuPY 250 eingebaut. Diese Presse besitzt eine Nennpresskraft von 2500 kN und einen maximalen Hub von 630 mm. Die Senkgeschwindigkeit der Presse beträgt 70 mm/s und die Geschwindigkeit des Pressenstößels während des Umformvorgangs beträgt 2...5 mm/s.

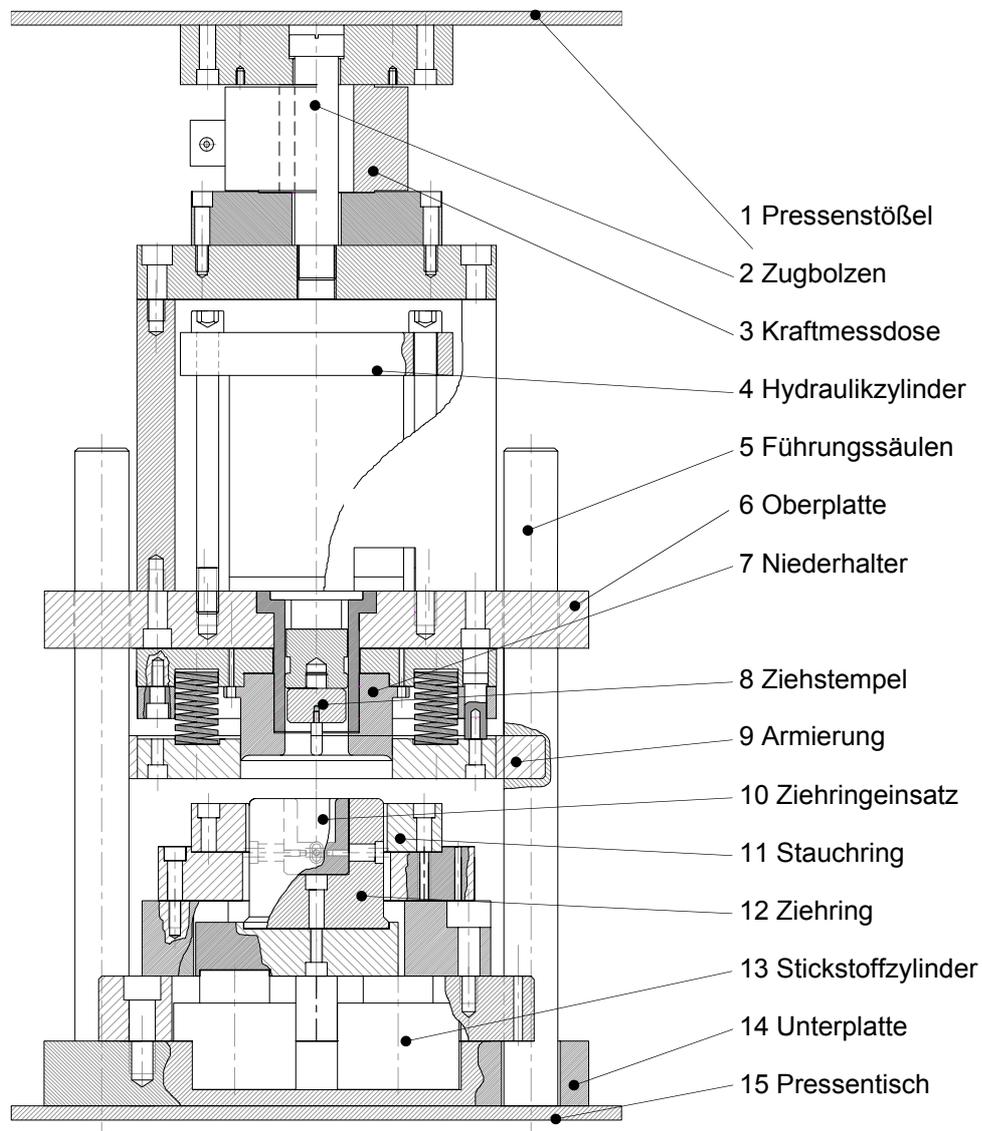


Bild 5-1: Versuchswerkzeug.

Für die Bewegung des Ziehstempels ist ein Hydraulikzylinder im Werkzeug integriert. Die Maximalkraft des Hydraulikzylinders beträgt 300 kN. Der Hub ist auf 30 mm begrenzt. Zur Versorgung des Hydraulikzylinders dient ein Hydraulikaggregat, welches

von der Presse unabhängig ist. Die Niederhalterkraft wird durch Gasdruckfedern erzeugt, die in die Unterplatte des Säulenführungsgestells eingebaut sind. Die integrierten Gasdruckfedern können eine maximale Niederhalterkraft (F_{NHmax}) von 206 kN aufbringen.

Zur Realisierung des Verfahrensprinzips muss das Werkzeug folgende Funktionen erfüllen (**Bild 5-2**):

- Axialkraft aufbringen (F_{Presse}),
- Bewegung des Ziehstempels zum Tiefziehen ($F_{Hydraulik}$) und
- Niederhalterkraft aufbringen ($F_{Stickstoff}$).

Während des Umformvorganges werden diese Funktionen gleichzeitig ausgeführt.

Beim Schließen der Presse setzt der Niederhalter auf die Oberseite der Zwischenform auf. Der Vorgang des Nachschiebens wird durch die Abwärtsbewegung des Pressenstößels realisiert. Die Abnahme der Höhe des Randes wird durch die Bewegung des Ziehrings ausgeglichen, welcher durch Gasdruckfedern gestützt ist. Hierbei findet eine Relativbewegung zwischen Stauchring und Ziehring statt.

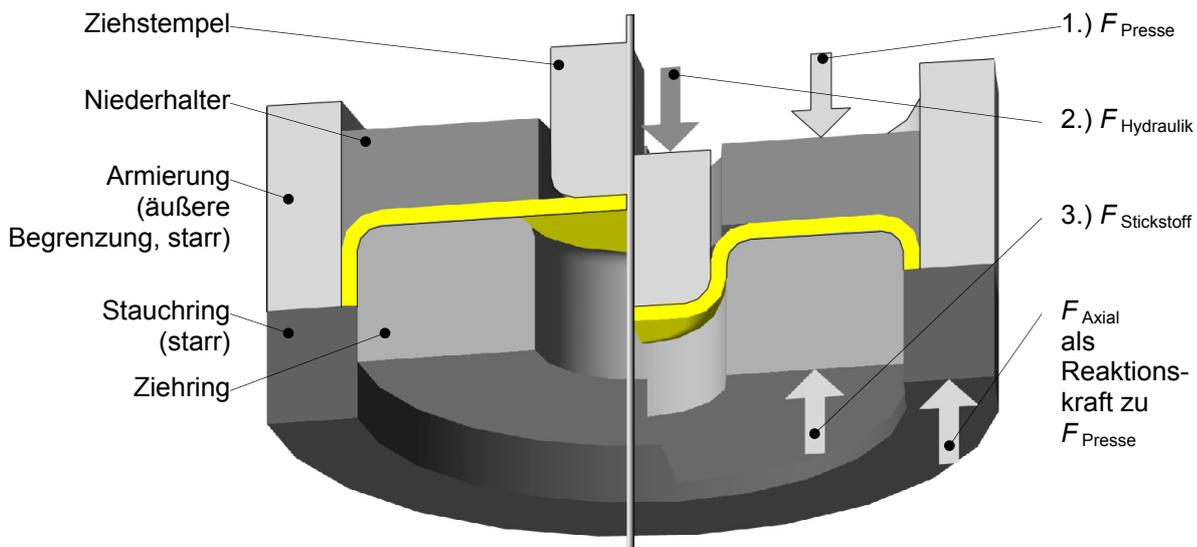


Bild 5-2: Wirkprinzip des Werkzeuges beim TNWW.

Außerdem bewegt sich der Niederhalter relativ zur Armierung (äußerer Begrenzung). Die federnd gelagerte Armierung liegt auf dem Stauchring auf, während der Niederhalter sich abwärts bewegt. Der Spalt zwischen Armierung und Niederhalter ist nur geringfügig größer als die Blechdicke des Rondenrandes, so dass beim Vorgang des Nachschiebens der Rand seitlich geführt wird und das Material des Randes in Richtung des Formelementes gezwungen wird. Einen wesentlichen Einfluss auf den Materialfluss haben die Reibungsbedingungen zwischen Niederhalter und Ronde bzw. zwischen Ziehring und Ronde.

Das eigentliche Tiefziehen wird durch das Ausfahren des Ziehstempels realisiert. Der Ziehstempel wird durch einen in das Werkzeug integrierten Hydraulikzylinder ange-

trieben. Die Geschwindigkeit des Ziehstempels kann durch eine Volumenstromregelung variiert werden. **Bild 5-3** verdeutlicht die komplette Fertigungsfolge beim Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss.

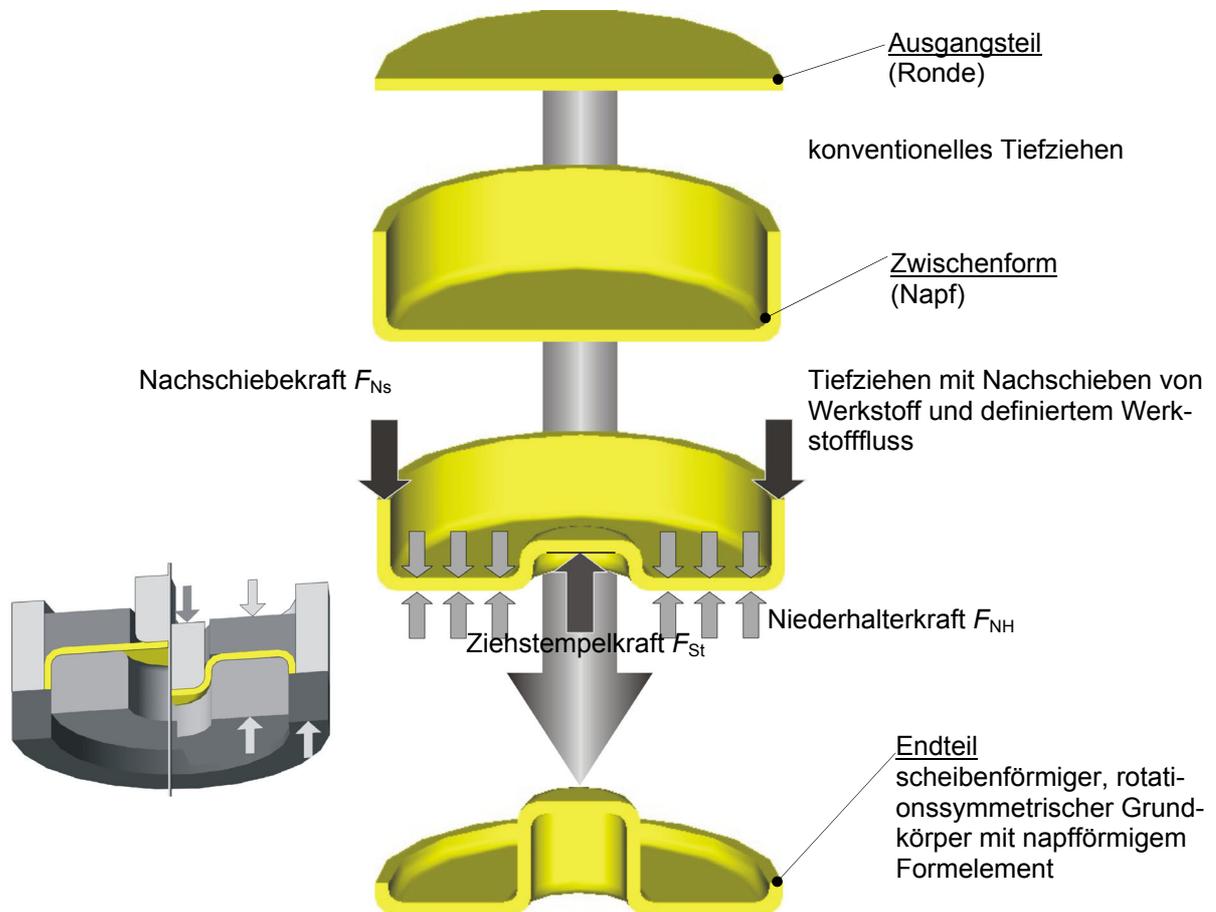


Bild 5-3: Fertigungsfolge beim TNWW.

5.2 Versuchswerkstoffe

Um die Verfahrensgrenzen für das TNWW zu bestimmen, ist es notwendig, die folgenden Parameter zu variieren: Nachschiebe-Ziehverhältnis, Niederhalterkraft, Nachschiebeweg/-kraft, Werkstoff sowie Blechdicke des Werkstücks. Die Versuchswerkstoffe sind nach dem Gesichtspunkt ausgewählt worden, ein möglichst großes Spektrum unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften zu erfassen, ohne die Grenzen (max. Pressenkraft 2500kN) der zur Verfügung stehenden Versuchsanlage zu überschreiten. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen sind folgende vier unterschiedliche Materialien, die auch in der Praxis Anwendung finden, verwendet worden:

- DC 01 (1.0330),
- DD 11 (1.0332)
- QStE 340 (1.0974) sowie,
- AlMg 3 (3.3535).

5.2.1 Ermittlung der mechanischen Kennwerte

Um das Umformverhalten eines Blechwerkstoffes beurteilen und einen hohen Praxisbezug durch eine Beschreibung des in den Untersuchungen verwendeten Werkstoffes bei der FE-Modellbildung erreichen zu können, ist es notwendig, die mechanischen Kennwerte des Werkstoffes zu ermitteln. Für die Untersuchung von Blechwerkstoffen existieren eine Vielzahl von Prüfverfahren. Der Flachzugversuch nach DIN EN 10002 /100/ besitzt unter den Prüfverfahren die größte Bedeutung, besonders deshalb, weil er einen Werkstoffvergleich ermöglicht, zur Berechnung von Bauteilen dienen kann, reibungsfrei und einfach durchführbar ist /101, 102, 103/.

Für eine schnelle Qualitätskontrolle des Bleches sind die durch den Zugversuch ermittelten Werte für die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung ausreichend. Als Streckgrenze ist die Spannung definiert, bei der das Material beginnt, plastisch zu fließen. Die Zugfestigkeit charakterisiert die Höchstkraft der Zugbeanspruchung bezogen auf den Ausgangsquerschnitt der Probe. Die Bruchdehnung ist die auf die Ausgangslänge bezogene bleibende Längenänderung nach dem Bruch der Probe. Für eine Beurteilung des Umformverhaltens ist es notwendig, zusätzlich zu der Streckgrenze, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung weitere mechanische Kennwerte, wie die Fließkurve, die senkrechte und ebene Anisotropie sowie die Gleichmaßdehnung und den Verfestigungsexponenten, aus dem Zugversuch zu ermitteln.

Beim Tiefziehen von Blech ist die Anisotropie für das Ziehergebnis von großer Bedeutung. Anisotropie bedeutet, dass die plastischen Eigenschaften des Blechs richtungsabhängig sind. Der r -Wert als Maß für die senkrechte Anisotropie ist als das Verhältnis des Umformgrades in Breitenrichtung zum Umformgrad in Dickenrichtung beim Dehnen einer Flachzugprobe im Flachzugversuch definiert. Ein Wert von $r = 1,0$ sagt aus, dass sich der Werkstoff isotrop verhält. Die Änderung der Länge setzt sich zu gleichen Teilen aus der Änderung der Dicke und der Breite zusammen. Bei einem r -Wert kleiner 1 überwiegt die Änderung aus der Dicke. Bei einem r -Wert größer 1 ist der Widerstand der Zugprobe gegenüber einer Formänderung in Dickenrichtung größer als bei einem r -Wert kleiner 1. Für das Tiefziehen ist demnach ein Werkstoff mit hohem r -Wert (größer 1) von Vorteil, da die Ausgangsblechdicke sich nicht verringern soll.

Für die experimentellen Untersuchungen zum TNWW sind der Werkstoff DC 01 (1.0330) mit der Blechdicke 2 mm, der Werkstoff QStE 340 (1.0974) sowie der Werkstoff DD 11 (1.0332) mit den Blechdicken 2 mm und 4 mm und AlMg 3 (3.3535) mit den Blechdicken 2 mm und 4 mm verwendet worden. Die im Zugversuch nach DIN EN 10002 ermittelten mechanischen und plastischen Eigenschaften sind in **Tabelle 5-1** aufgeführt. Um eine statistische Absicherung der Kennwerte zu gewährleisten, sind je Lage zur Walzrichtung (0° , 45° und 90°) jeweils 3 Zugproben aus dem Ausgangsmaterial entnommen und geprüft worden.

Tabelle 5-1: Werkstoffeigenschaften.

Werkstoff	Walz- richtung [°]	E [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_{gl} [%]	A_{80} [%]	n	r
DC 01 2 mm	0	169.000	158	291	24,5	47,1	0,225	1,59
	45	206.000	167	306	22,9	40,5	0,217	1,33
	90	183.000	161	291	24,7	46,8	0,224	2,10
Werkstoff	Walz- richtung [°]	E [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_{gl} [%]	A_{80} [%]	n	r
DD 11 2 mm	0	201.000	295	373	16,2	34,5	0,138	0,90
	45	199.000	302	365	15,4	32,2	0,130	0,95
	90	203.000	298	365	16,5	32,5	0,135	0,97
Werkstoff	Walz- richtung [°]	E [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_{gl} [%]	A_{80} [%]	n	r
DD 11 4 mm	0	215.000	276	349	18,9	34,0	0,176	0,79
	45	206.000	273	343	19,0	36,3	0,170	1,09
	90	223.000	280	343	19,1	36,5	0,171	1,06
Werkstoff	Walz- richtung [°]	E [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_{gl} [%]	A_{80} [%]	n	r
QStE 340 2 mm	0	212.000	442	500	15,1	26,0	0,139	0,61
	45	200.000	447	488	15,5	26,8	0,136	0,99
	90	213.000	462	500	14,9	23,4	0,137	0,85
Werkstoff	Walz- richtung [°]	E [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_{gl} [%]	A_{80} [%]	n	r
QStE 340 4 mm	0	197.000	434	475	17,7	31,0	0,164	0,63
	45	189.000	441	476	16,8	27,5	0,153	0,90
	90	205.000	443	483	15,1	26,5	0,149	0,70

Werkstoff	Walz- richtung [°]	E	$R_{p0,2}$	R_m	A_{gl}	A_{80}	n	r
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]		
AlMg 3 2 mm	0	68.000	206	251	7,7	9,9	0,149	0,51
	45	67.000	203	246	8,3	8,9	0,135	1,04
	90	69.000	201	256	8,3	10,9	0,133	1,03

Werkstoff	Walz- richtung [°]	E	$R_{p0,2}$	R_m	A_{gl}	A_{80}	n	r
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]		
AlMg 3 4 mm	0	64.000	176	241	9,0	11,9	0,169	0,58
	45	64.000	170	232	9,9	13,1	0,159	0,76
	90	65.000	174	239	9,4	13,9	0,162	0,92

5.2.2 Fließkurven

In der Umformtechnik ist es wichtig, dass die tatsächlich wirksamen Spannungen bekannt sind. Aus diesem Grund wird zur Ermittlung der Fließkurve die Kraft F auf die tatsächliche Fläche A bezogen. Die Fließkurve beschreibt das Verfestigungsverhalten des Werkstoffs und ist charakterisiert durch die Fließspannung k_f und den Hauptumformgrad (Hauptformänderung) φ_g . Die Fließspannung eines Werkstoffs ist diejenige äußere Spannung, die zur Einleitung und Aufrechterhaltung des plastischen Werkstoffflusses bei einachsigem, homogenem Spannungszustand notwendig ist. Sie ist die grundlegende Kenngröße zur Berechnung umformtechnischer Vorgänge:

$$k_f = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Die Fließspannung eines Werkstoffs ist keine konstante Größe, sondern abhängig von

- der chemischen Zusammensetzung des verwendeten Werkstoffs,
- dessen Vorbehandlung und Zustand,
- der logarithmischen Hauptformänderung (Umformgrad),
- der logarithmischen Hauptformänderungsgeschwindigkeit (Umformgeschwindigkeit) und
- der Umformtemperatur.

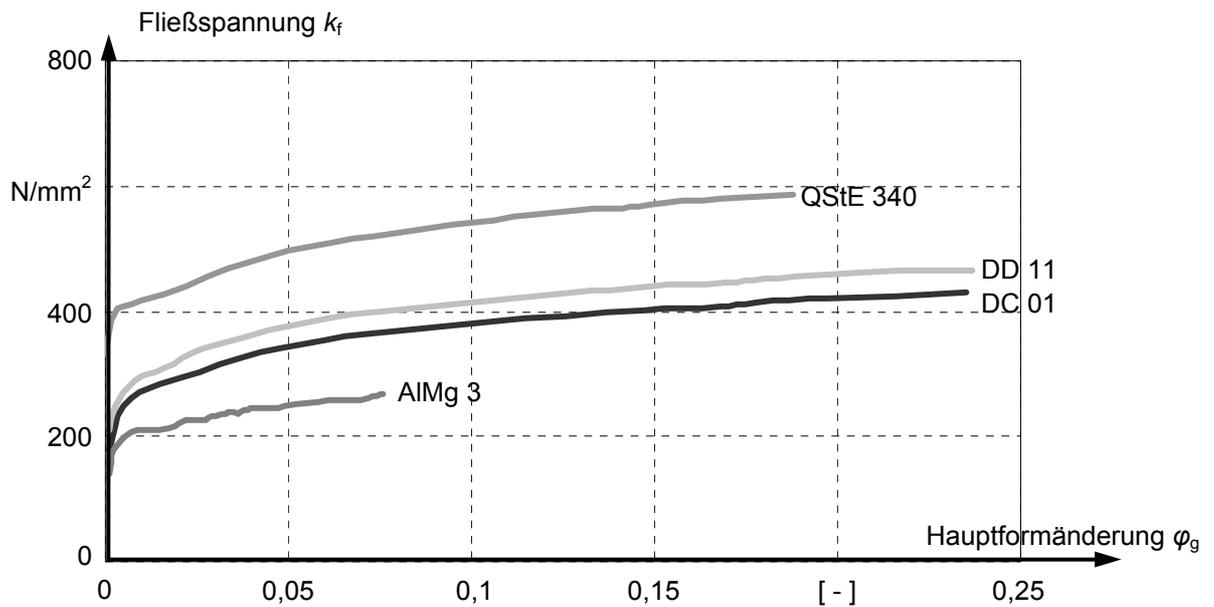


Bild 5-4: Fließkurven (Blechdicke: 2mm).

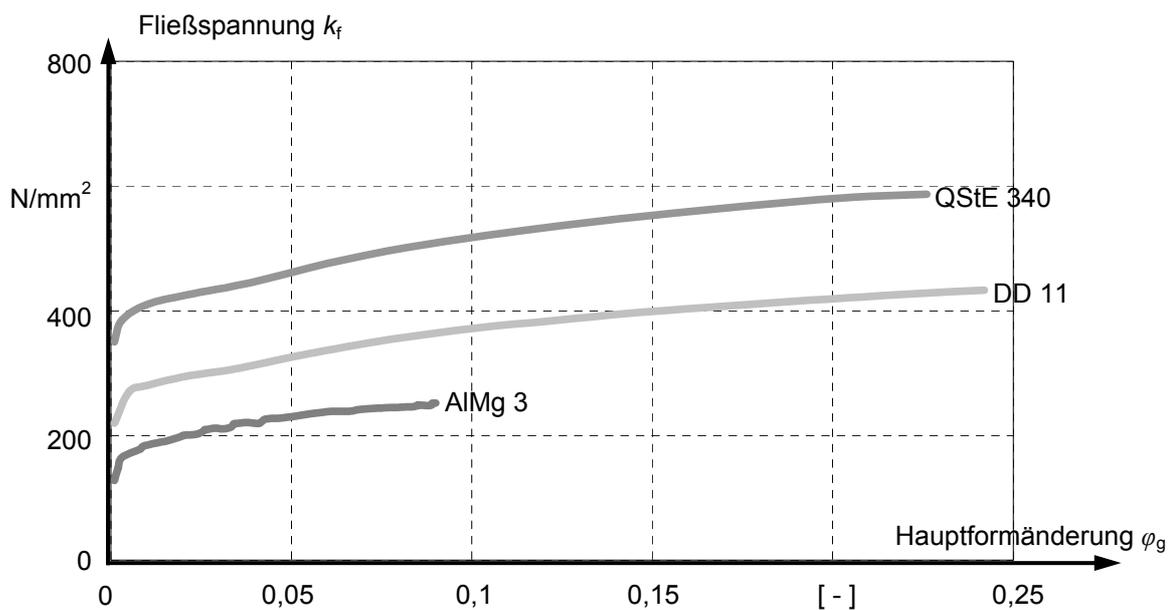


Bild 5-5: Fließkurven (Blechdicke: 4mm).

Die für die Fließkurve erforderlichen Werte für die Fließspannung und den Umformgrad lassen sich aus dem Zugversuch ermitteln. Die für die verwendeten Werkstoffe AlMg 3, DC 01, QStE 340 und DD 11 ermittelten Fließkurven sind für die Blechdicke 2 mm im **Bild 5-4** und für die Blechdicke 4 mm im **Bild 5-5** dargestellt.

5.3 Versuchsparameter

Für das Verfahren Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss sind jeweils die Parameter

- Werkstoff,
- Blechdicke,
- Nachschiebe-Ziehverhältnis,
- Niederhalterkraft und
- Nachschiebeweg

gezielt variiert worden, um den Einfluss dieser Versuchsparameter auf die erreichbaren Verfahrensgrenzen und Endteileigenschaften zu bestimmen.

Da die Niederhalterkraft durch integrierte Stickstoffzylinder aufgebracht wird (Absatz 5.1) und diese Stickstoffzylinder nur in einer begrenzten Baugröße in das Werkzeug integriert werden konnten, ist die Niederhalterkraft auf maximal 206 kN (F_{NHmax}) begrenzt. Wegen des konstant gehaltenen Ausgangsdurchmessers (Flanschdurchmessers) der Ronden ist der Durchmesser des Ziehstempels in Stufen bis zu einem Verhältnis Flanschdurchmesser/Stempeldurchmesser von 7,5 variiert worden. Um Zwischenformen herstellen zu können, bei denen eventuell auftretende Zipfel vernachlässigt werden können und um die bei der Herstellung der Zwischenformen durch konventionelles Tiefziehen auftretende Blechdickenzunahme im Rand des Zwischenteils zu minimieren, beträgt die maximale Höhe der Zwischenform 30 mm. Der maximale Nachschiebeweg ist auf 25 mm begrenzt. Eine komplette Übersicht über die Versuchsparameter zeigt **Tabelle 5-2**.

Zur Minimierung der Reibung im Hinblick auf die bestmögliche Ausnutzung des Umformvermögens des Werkstoffs und zur Minimierung des Verschleißes wurden zwei hochlegierte Spezialöle mit einer Walze bzw. mit einem Pinsel gleichmäßig auf die Werkstücke aufgetragen, so dass die Schmiermittelmenge $15 \text{ g/m}^2 \dots 20 \text{ g/m}^2$ betrug. Für das TNWW beim Werkstoff AIMg 3 kam das Spezialöl Rhenus Rotanor CPS zum Einsatz. Bei den Werkstoffen DC 01, DD 11 und QStE 340 wurde das Spezialöl Rhenus Rotanor CYW verwendet. Die technischen Daten der beiden Spezialöle, welche von der Firma Rhenus Lub GmbH & Co. KG hergestellt werden, sind in **Tabelle 5-3** dargestellt. Bei beiden Spezialölen handelt es sich um hochlegierte, chlorfreie Ziehöle, deren chemische EP-Zusätze (extreme pressure) Materialverschweißungen unter extremen Druckbelastungen vermeiden. Außerdem zeichnen sich die beiden Spezialöle durch eine gute Netz- und Haftfähigkeit aus. Eine Variation der tribologischen Bedingungen (Variation Schmierstoff und Schmierstoffmenge, Variation der Werkzeug- und Werkstückoberfläche, u.a.) ist im Untersuchungsprogramm nicht vorgesehen.

Tabelle 5-2: Versuchsplan.

Werkstück		
Ausgangsform	Ronden	Durchmesser 164 mm; 160 mm; 156 mm; 152 mm
Zwischenform	Napf	Durchmesser 120 mm
Werkstoff	DC 01	Werkstoffnummer: 1.0330
	DD 11	Werkstoffnummer: 1.0332
	QStE 340	Werkstoffnummer: 1.0974
	AlMg 3	Werkstoffnummer: 3.3535
Blechdicke	2 mm, 4 mm	
Werkzeug		
Nachschiebe-Ziehverhältnis	2,2; 3,3; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 7,5	
Stempeldurchmesser	55,5 mm; 35,4 mm; 30 mm; 26,6 mm; 24 mm; 21,8 mm; 20 mm; 16 mm	
Oberflächenqualität	$R_z=6,3 \mu\text{m}$	
Umformmaschine		
max. Pressenkraft	einfachwirkende hydraulische Viersäulenpresse KuPY 250 2500 kN	
Umformbedingungen		
Niederhalterkraft	82 kN (F_{NHmin}); 123 kN; 164 kN; 206 kN (F_{NHmax})	
Nachschiebeweg	17,5 mm; 20,0 mm; 22,5 mm; 25,0 mm	
Werkzeuggeschwindigkeit	2...5 mm/s	
Umformtemperatur	Raumtemperatur	
Schmierstoff	Rhenus Rotanor CPS	
	Rhenus Rotanor CYW	

Tabelle 5-3: Technische Daten der Schmierstoffe.

	Viskosität 40°C [mm ² /s]	Dichte 20°C [g/ml]	Flammpunkt [°C]	Pourpoint [°C]
Rhenus Rotanor CPS	120	0,897	236	-9
Rhenus Rotanor CYW	185	0,963	200	-15

5.4 Versuchsdurchführung

Als Ausgangsteile für das Tiefziehen dienen ebene scheibenförmige Blechzuschnitte (Ronden) mit unterschiedlichen Außendurchmessern. Die Ronden werden durch konventionelles Tiefziehen im Erstzug in eine Zwischenform mit dem Außendurchmesser von 120 mm gebracht (**Bild 5-6**). Diese Zwischenformen dienen als Ausgangsteile für den eigentlichen Vorgang des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss. Um eine vollständige Analyse der Formänderungen durchführen zu können, wird auf den Ronden ein Messraster mit Hilfe eines elektrochemischen Verfahrens aufgebracht /104 bis 107/.

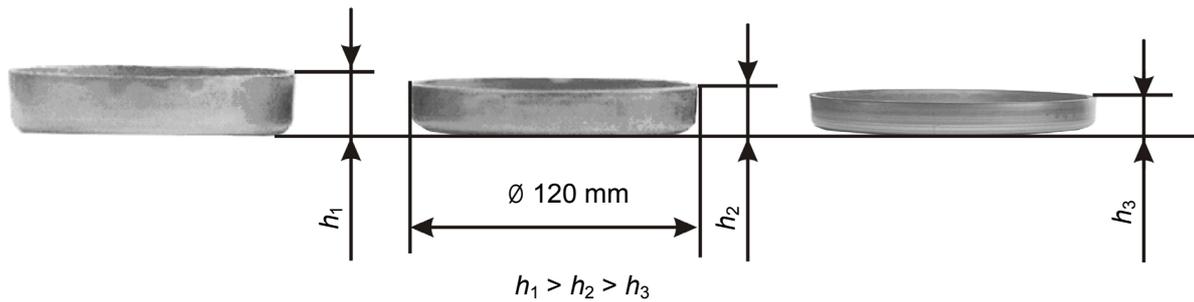


Bild 5-6: Zwischenformen mit unterschiedlichen Randhöhen.

Prinzipiell wird bei der Durchführung der Versuche nach dem folgenden Schema vorgefahren: Die Zwischenform wird mit der Öffnung nach unten auf dem Ziehring positioniert (**Bild 5-7-a**). Danach fährt die Presse soweit zusammen, bis der hochgestellte Rand der Zwischenform auf dem Stauchring aufliegt (Bild 5-7-b). Anschließend fährt der Ziehstempel bis auf die Zwischenform (Bild 5-7-c).

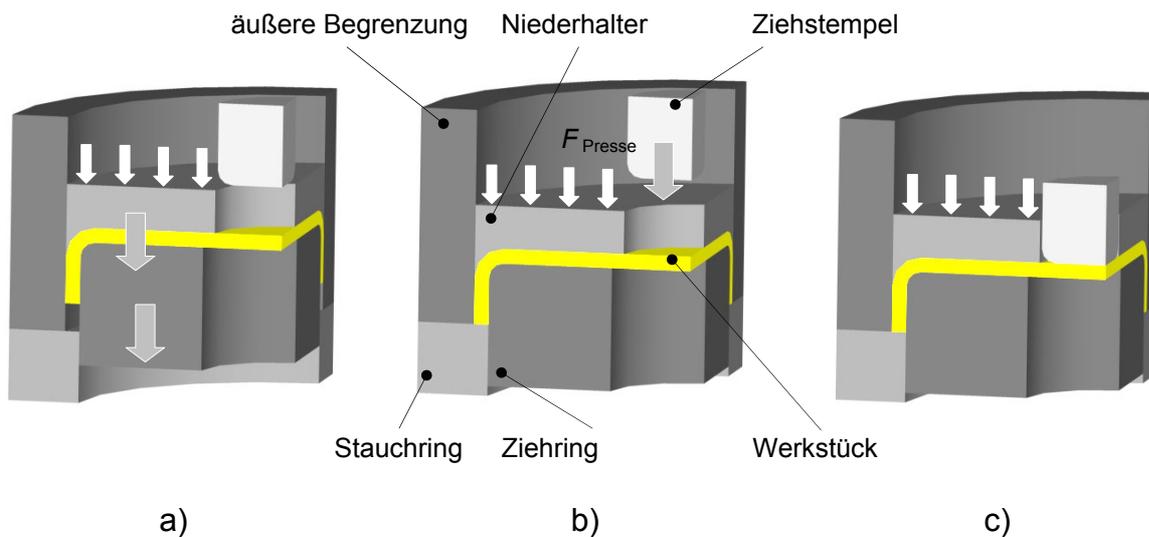


Bild 5-7: Versuchsablauf, - a) Ausgangszustand; b) Rand des Werkstücks liegt auf dem Stauchring; c) Ziehstempel sitzt auf dem Werkstück.

Nachdem der Ziehstempel auf der Zwischenform aufliegt, setzt das Nachschieben von Werkstoff mit der weiteren Bewegung des Ziehstempels ein. Sobald der Rand der Zwischenform bis auf 5 mm Resthöhe nachgeschoben ist, enden die Bewegung des Nachschiebens und des Ziehstempels zeitgleich. Anschließend fährt die Presse in ihre Ausgangsposition zurück.

5.5 Versuchsstand und Messeinrichtung

Für eine wissenschaftliche Auswertung des Umformvorganges ist die Aufnahme von folgenden Prozessparametern und Systemgrößen notwendig:

- Pressenkraft,
- Pressenweg,
- Ziehstempelkraft (Druck im Hydraulikzylinder),
- Ziehstempelweg,
- Niederhalterkraft (Druck in den Gasdruckfedern) und
- Zeit.

Der Nachschiebeweg kann aus Gründen der Werkzeuggestaltung nicht direkt gemessen werden. Er lässt sich aber aus dem Arbeitshub der Presse berechnen. Der Arbeitshub ist definiert als absolvierter Pressenweg zwischen dem Aufsetzen der Presse auf die Zwischenform und dem Ende des Nachschiebens. Die oben angeführten Prozessparameter werden mit Druck-, Kraft- und Wegaufnehmern erfasst. Ein Messverstärker DMC 9012 A des Herstellers Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) verstärkt die Messwerte und führt sie dem Steuerrechner zu.

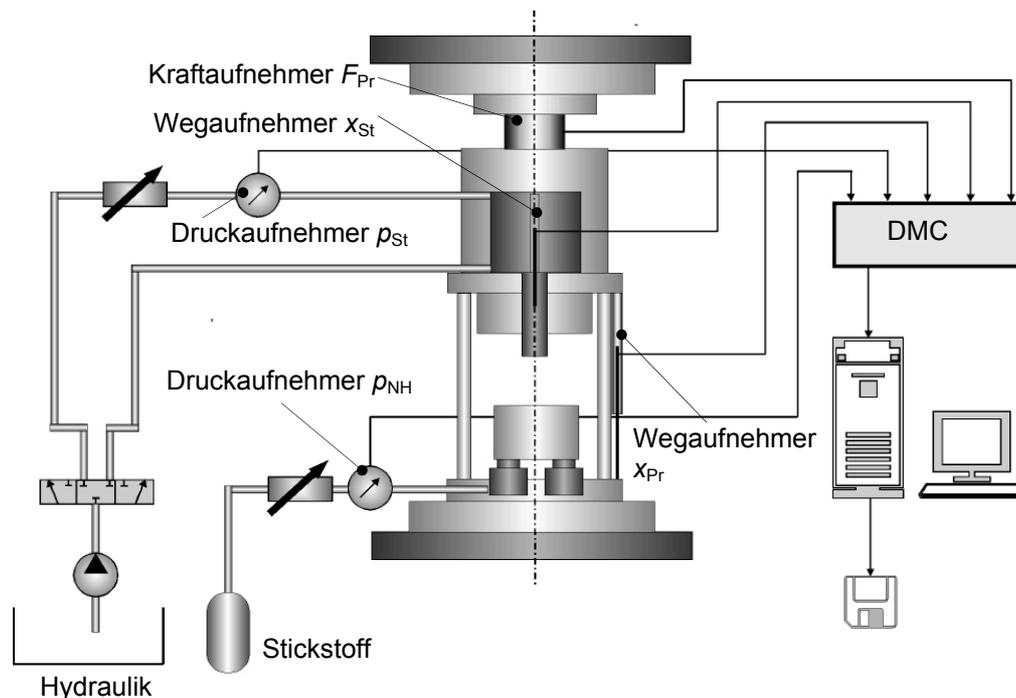


Bild 5-8: Erfassung der Messgrößen.

Dies ermöglicht eine anschließende Bearbeitung der Messwerte, da die Messwerte jetzt als ASCII-Daten vorliegen. Im Folgenden sind die Hard- und Software aufgeführt, die für die Erfassung und Verarbeitung der Messwerte verwendet werden:

- induktiver Wegaufnehmer (IWT 100, Messgenauigkeit = $\pm 0,01$ mm; Hersteller HBM) zum Bestimmen des Pressenweges,
- Kraftmessring (Genauigkeitsklasse 0,5; Hersteller HBM) zum Bestimmen der Pressenkraft,
- induktiver Wegaufnehmer mit Tauchanker in Hydraulikausführung (WSF-L-050W-31L-L2-F1-4, Messgenauigkeit = $\pm 0,06$ mm; Hersteller HBM) zum Bestimmen des Ziehstempelweges,
- Druckmessumformer P 19 (Genauigkeitsklasse 0,5; Hersteller HBM) zum Bestimmen der Ziehstempelkraft (Druckverlauf im Hydraulikzylinder),
- Druckmessumformer P 19 (Genauigkeitsklasse 0,5; Hersteller HBM) zum Bestimmen der Niederhalterkraft (Druckverlauf in den Gasdruckfedern),
- digitales Messverstärkersystem DMC 9012 A (Hersteller HBM),
- PC Pentium 1600 MHz und
- Messwernerfassungs- und Messverarbeitungssoftware Catman[®] 4.0 sowie Microsoft[®] Excel.

5.6 Messmethoden und Messgeräte

Die mechanischen Kennwerte der untersuchten Werkstoffe wurden rechnergestützt im Flachzugversuch nach DIN EN 10002 auf einer 100 kN Wolpert-Universalprüfmaschine ermittelt. Eine Härteprüfmaschine der Fa. Zwick diente der Härtmessung, um zerstörungsfrei Aussagen zu den Festigkeitseigenschaften der Ausgangs-, Zwischen- und Endteile treffen zu können. Eine Verfestigung des Materials führte zu einer Härtesteigerung, wobei daraus keine Aussage bezüglich der Art der Beanspruchung abzuleiten ist. Für die Bestimmung der Härte nach Vickers wurde eine Diamant-Pyramide mit 2 kg belastet, d.h. die Messwerte entsprechen HV 2. Für das Vermessen der Werkstückgeometrie kam eine CNC-Koordinatenmessmaschine PMM 866 der Fa. Tesa - Leitz zum Einsatz.

Zum Bestimmen der auftretenden Formänderung der durch TNWW hergestellten Werkstücke wurde eine Formänderungsanalyse durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde das auf der Oberfläche des Werkstücks elektrochemisch aufgebrachte zentrisch angeordnete Kreis-Messraster ausgemessen (**Bild 5-10**).

Aus den ermittelten Abmessungsänderungen der Kreise wurde der örtlich vorliegende tangentielle Umformgrad berechnet.

$$\varphi_t = \ln \frac{d_{R1}}{d_{R0}} \quad (3)$$



a)

Messaufbau Zugversuch
100 kN Universalprüfmaschine
Fa. Wolpert



b)

Härteprüfmaschine
Fa. Zwick



c)

CNC Koordinaten-
messmaschine PMM 866
Fa. Tesa-Leitz

Bild 5-9: Messgeräte.

Der normale Umformgrad wird aus der gemessenen Änderung der Blechdicke bestimmt.

$$\varphi_n = \ln \frac{s_1}{s_0} \quad (4)$$

Der radiale Umformgrad wird nach dem Gesetz der Volumenkonstanz berechnet.

$$\varphi_r = -(\varphi_t + \varphi_n) \quad (5)$$

Die Vergleichsformänderung φ_v kann dann nach der Gestaltänderungs-Energie-Hypothese nach v. Mises gemäß Gleichung (6) ermittelt werden.

$$\varphi_v = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_t^2 + \varphi_r^2 + \varphi_n^2)} \quad (6)$$

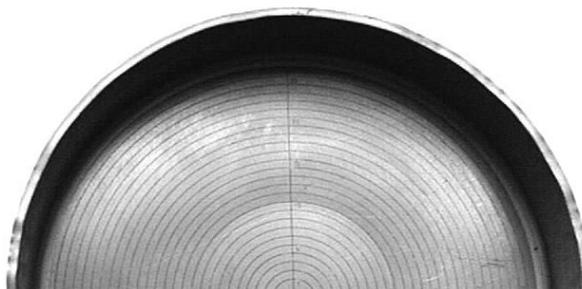


Bild 5-10: Zwischenform mit zentrisch angeordnetem Kreis-Messraster.

In **Tabelle 5-4** sind die zur Beschreibung der Ausgangsteileigenschaften, der Umformbedingungen und Endteileigenschaften notwendigen Messgrößen und Messverfahren dargestellt.

Tabelle 5-4: Übersicht zu den Messgrößen.

	Messgröße	Messverfahren
Ausgangsteileigenschaften	Streckgrenze, Zugfestigkeit Gleichmaßdehnung, Bruchdehnung Anisotropiewert Verfestigungsexponent	Zugversuch nach DIN EN 10002
	Verlauf der Härte HV2	Härtemessung nach Vickers
	Blechdicke Ausgangsteildurchmesser	Manuelle Längen- und Dickenmessung mittels Messschieber und Bügelmessschraube
Umformbedingungen	Pressenkraft Ziehstempelkraft	Kraftmessring
	Niederhalterkraft	Druckmessdose
	Nachschiebeweg Ziehstempelweg	Induktive Wegmessung
Endteileigenschaften	Endteilgeometrie (Höhe des Formelementes, Höhe des Randes)	Manuelle Längen- und Dickenmessung mittels Messschieber und Bügelmessschraube
	Verlauf der Blechdicke	Koordinatenmessmaschine
	Verlauf der Härte HV 2	Härtemessung nach Vickers
	Verlauf der Formänderung	Messrasterverfahren

6 Untersuchungsergebnisse: Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (TNWW)

6.1 Vorbemerkungen

Beim konventionellen Tiefziehen begrenzen, wie im „Stand der Technik“ beschrieben, hauptsächlich der Versagensfall Bodenreißer und die Faltenbildung das Verfahrensfenster.

Beim TNWW wird durch das Nachschieben von Werkstoff und die dadurch im Flansch entstehenden radialen Druckspannungen die zum Einziehen des Flansches notwendige und über die Zarge zu übertragende Ziehstempelkraft wesentlich reduziert. Sind der Vorgang des Ziehens und Nachschiebens in einem verfahrensspezifischen Verhältnis abgestimmt, wird das neuartige Verfahren nicht wie beim konventionellen Tiefziehen durch einen Bodenreißer begrenzt. Vielmehr besteht verstärkt die Gefahr, dass die beim Erreichen eines bestimmten tangentialen Umformgrades wirkenden tangentialen Druckspannungen bei deutlich höheren Nachschiebe-Ziehverhältnissen (d_{Fl}/d_{st}) zu Falten im Flansch des Werkstücks führen.

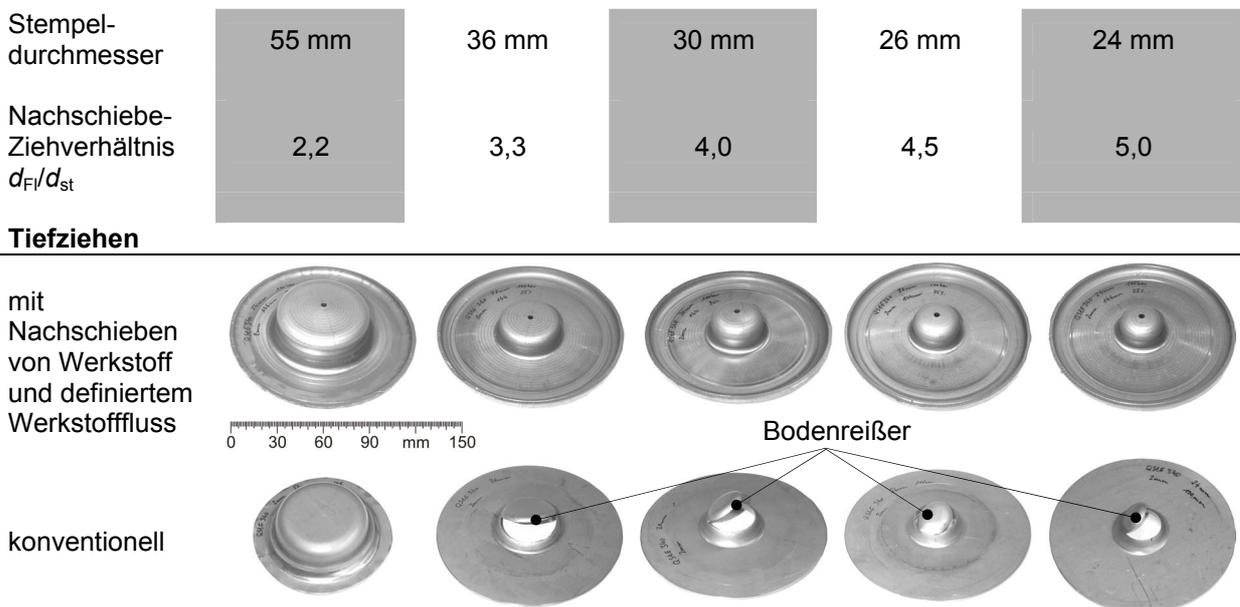


Bild 6-1: Vergleich konventionelles Tiefziehen – TNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm)

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass mit dem neuen Verfahrensprinzip die Verfahrensgrenzen beim Tiefziehen wesentlich erweitert werden können (**Bild 6-1**). Unter Versuchsbedingungen konnten bei Werkstücken mit der Blechdicke 2 mm Nachschiebe-Ziehverhältnisse von 5,5 erzielt werden. Deutlich zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass durch das Nachschieben von Werkstoff die Endteileigenschaften im Vergleich zu den Arbeitsergebnissen beim konventionellen Tiefziehen wesentlich verbessert werden.

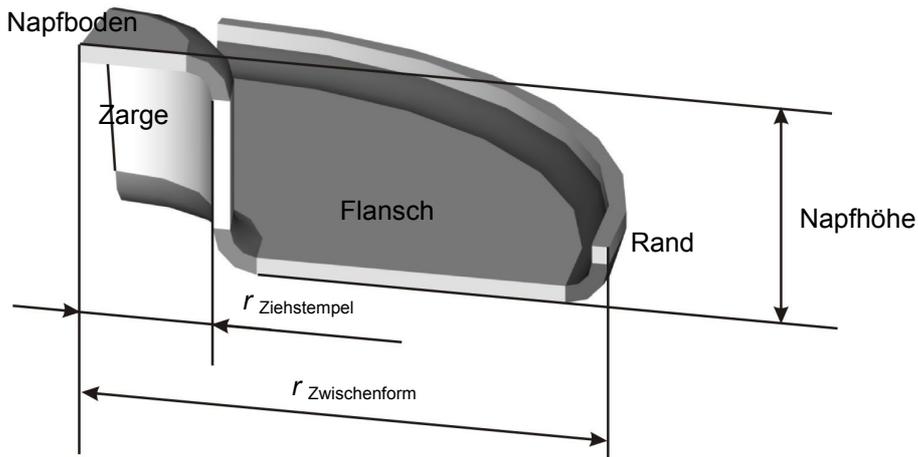


Bild 6-2: Begriffserklärung.

Zur Begriffserklärung sind Flansch, Rand, Zarge und Napf im **Bild 6-2** erläutert. Die Untersuchungen zum TNWW verdeutlichen, dass die zeitliche Wechselwirkung von Nachschiebebewegung zu Stempelbewegung einen wesentlichen Einfluss auf das Umformergebnis hat. Nur ein gleichzeitiger Ablauf der Nachschiebe- und Stempelbewegung sowie ein verfahrensentsprechendes Verhältnis von Stempel- und Nachschiebebeschwindigkeit führen zu einem fehlerfreien Werkstück. In dem untersuchten Parameterbereich konnten durch ein gleiches Verhältnis von Stempel- und Nachschiebebeschwindigkeit die im Folgenden beschriebenen Fehler vermieden werden:

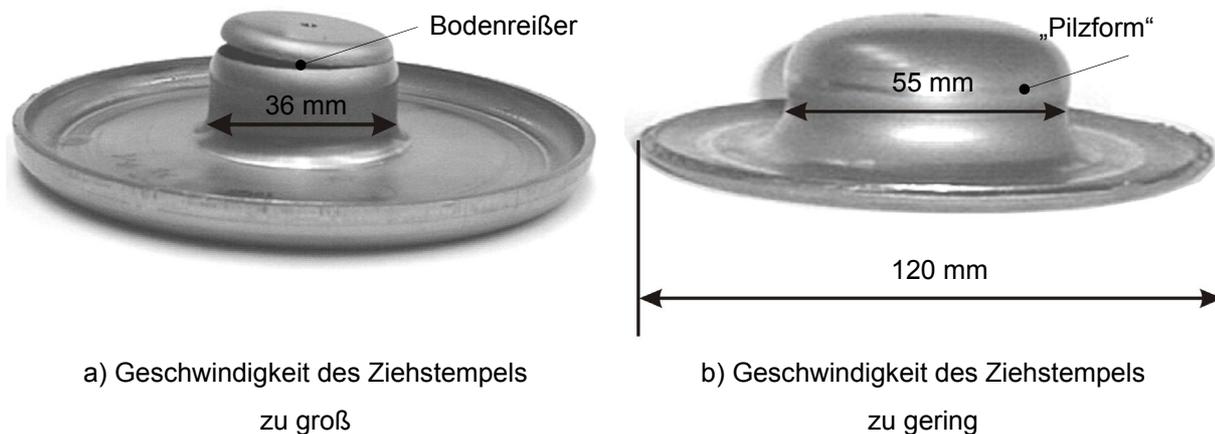


Bild 6-3: Endteilgeometrie bei unterschiedlichem Verfahrensablauf.

Wird beim TNWW die Stempelbewegung vor der Nachschiebebewegung durchgeführt, kommt es zu Bodenreißern (**Bild 6-3-a**). Dieser Fehler tritt auch auf, wenn die Geschwindigkeit des Ziehstempels gegenüber der Geschwindigkeit des Nachschiebens zu groß gewählt wurde. Ein zu frühes Nachschieben von Werkstoff beim TNWW und/oder eine zu geringe Geschwindigkeit des Ziehstempels führen zu einer „pilzförmigen“ Ausbildung der Zarge (Bild 6-3-b) und zu einer vorzeitigen Faltenbildung im Flansch.

6.2 Formänderungen

6.2.1 Theoretische Betrachtungen zum TNWW

Beim Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss sind die Plastizitätsbedingungen im Napfboden nicht erfüllt. Aus diesem Grund können im Boden auch keine signifikanten Formänderungen verzeichnet werden. Erst am Übergang Boden – Zarge treten feststellbare Formänderungen auf. Infolge der tangentialen Stauchung im Flansch und der bei größeren Nachschiebe-Ziehverhältnissen zu erwartenden radialen Stauchung muss beim TNWW mit einer verstärkten normalen Streckung im Flansch im Vergleich zum konventionellen Tiefziehen gerechnet werden.

Der tangentielle Umformgrad φ_2 an der Stelle des Ziehringradius, welcher durch die tangentielle Druckspannung hervorgerufen wird, lässt sich unter der Annahme einer konstanten Blechdicke folgendermaßen bestimmen:

Beim TNWW verschiebt sich ein Volumenelement am Rand des Werkstücks vom ursprünglichen Flanschdurchmesser d_{FI} während des Umformvorgangs auf den Durchmesser d_x (**Bild 6-4**).

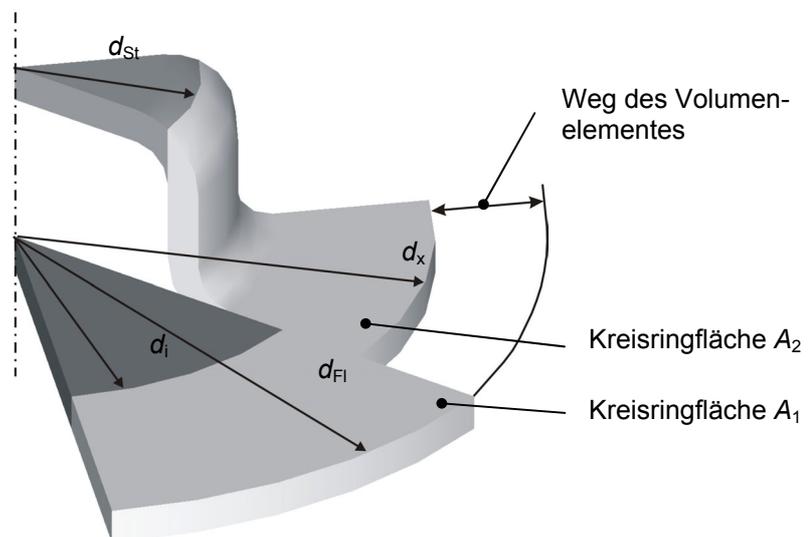


Bild 6-4: Formänderungen beim TNWW.

Die Größe des tangentialen Umformgrades φ_{t1} an der Stelle d_x ergibt sich zu

$$\varphi_{t1} = \ln \frac{d_x}{d_{FI}} \quad (7)$$

Der Werkstoff, welcher sich vor der Umformung in einem Kreisring mit dem äußeren Durchmesser d_{FI} und dem inneren noch unbekanntem Durchmesser d_i befand, befindet sich nach dem Vorgang des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss in einem Kreisring zwischen den Durchmessern d_x und d_{St} .

Unter der Annahme einer konstant bleibenden Blechdicke und mit Hilfe der Kontinuitätsbedingungen ergibt sich der Durchmesser d_i wie folgt:

$$A_1 = A_2 \tag{8}$$

$$\frac{\pi}{4} (d_{Fl}^2 - d_i^2) = \frac{\pi}{4} (d_x^2 - d_{St}^2) \tag{9}$$

$$d_i = \sqrt{d_{Fl}^2 - d_x^2 + d_{St}^2} \tag{10}$$

Der sich an der Stelle des Ziehringradius maximal einstellende tangentielle Umformgrad φ_{t2} berechnet sich aus

$$\varphi_{t2} = \ln \frac{d_{St}}{d_i} \tag{11}$$

Die Größe des sich maximal einstellenden tangentialen Umformgrades am Ziehringradius ist abhängig vom

- Flanschdurchmesser d_{Fl} ,
- Nachschiebeweg $x_{Ns} = (d_{Fl} - d_x) / 2$ bzw. vom Durchmesser d_x und
- Stempeldurchmesser d_{St} .

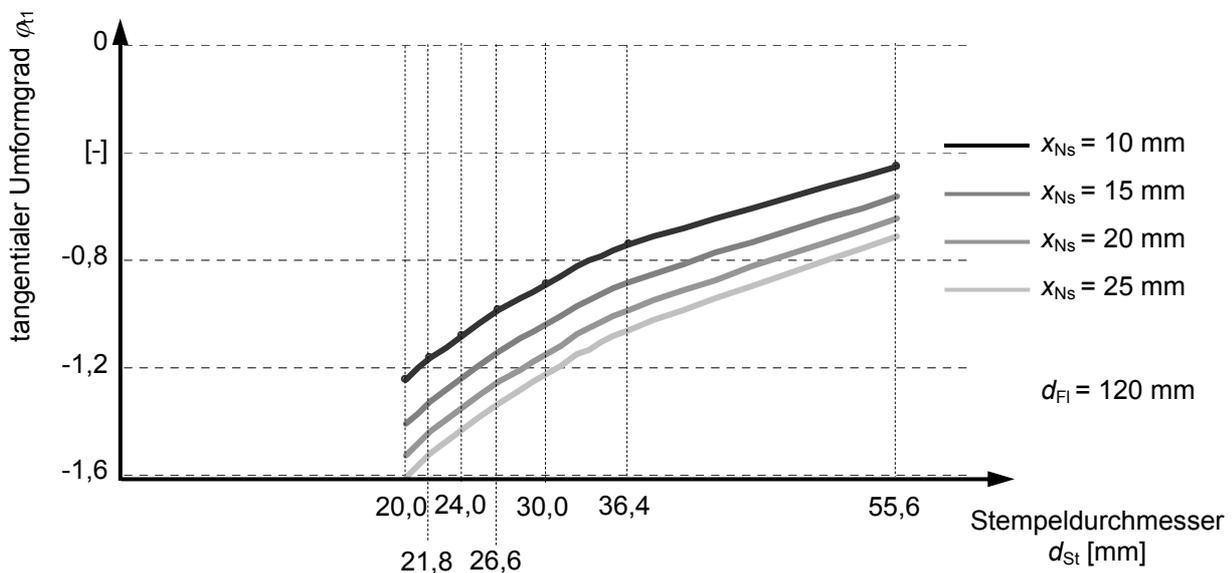


Bild 6-5: Tangentialer Umformgrad (theoretisch) am Ziehringradius beim TNWW.

Der Grenzwert für die tangentielle Formänderung, welcher einen faltenfreien Umformvorgang ermöglicht, ist von den Werkstoffeigenschaften, der Blechdicke und der Niederhalterkraft abhängig. Die tangentielle Formänderung am Ziehringradius beim TNWW für verschiedene Nachschiebe-Ziehverhältnisse und Nachschiebewege für den Fall, dass die Blechdicke als konstant angenommen wird, zeigt **Bild 6-5**. Demnach vergrößert sich der tangentielle Umformgrad mit zunehmendem Nachschiebe-

Ziehverhältnis (d_{FI}/d_{St}) bzw. abnehmendem Stempeldurchmesser und mit zunehmendem Nachschiebeweg.

6.2.2 Formänderungen beim TNWW

Beim Verfahren Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss treten im Werkstück Formänderungen in tangentialer, radialer und normaler Richtung auf. Nur im Ziehteilboden sind keine Formänderungen nachweisbar. Im Flansch des Ziehteils kommt es zu einer tangentialen Stauchung, die am Übergang vom Flansch zur Zarge ihr Maximum erreicht und in der Zarge in Richtung des Ziehteilbodens nahezu Null wird. Der radiale Umformgrad erreicht am Übergang zur Zarge seinen Maximalwert und verringert sich innerhalb der Zarge auf den Wert Null. Die radiale Streckung wird in Richtung zum Flanschrand durch eine stattfindende Materialstauchung verringert, die durch das Nachschieben von Werkstoff hervorgerufen wird. Mit Zunahme des Nachschiebe-Ziehverhältnisses ($\beta_{Ns} > 3,3$) gehen die radialen Dehnungen am Flanschrand in radiale Stauchungen über. Aus den genannten Beanspruchungen kommt es zu einer relativ gleichmäßigen Aufdickung des Werkstoffes im Flansch. Innerhalb der Zarge nimmt diese Blechdickenzunahme in Richtung des Ziehteilbodens ab.

Einen typischen Verlauf der ermittelten Umformgrade beim TNWW ist im **Bild 6-6** für den Endzustand dargestellt. Die Formänderungen sind an einzelnen Messpunkten, welche einen Abstand von 2 mm haben, über den Querschnitt des Werkstücks ermittelt worden. Bei den Werkstücken, die durch TNWW gefertigt wurden, liegt der erste Messpunkt auf der Symmetrieachse im Mittelpunkt des Ziehteilbodens und der letzte Messpunkt am äußeren Ende des Flanschs.

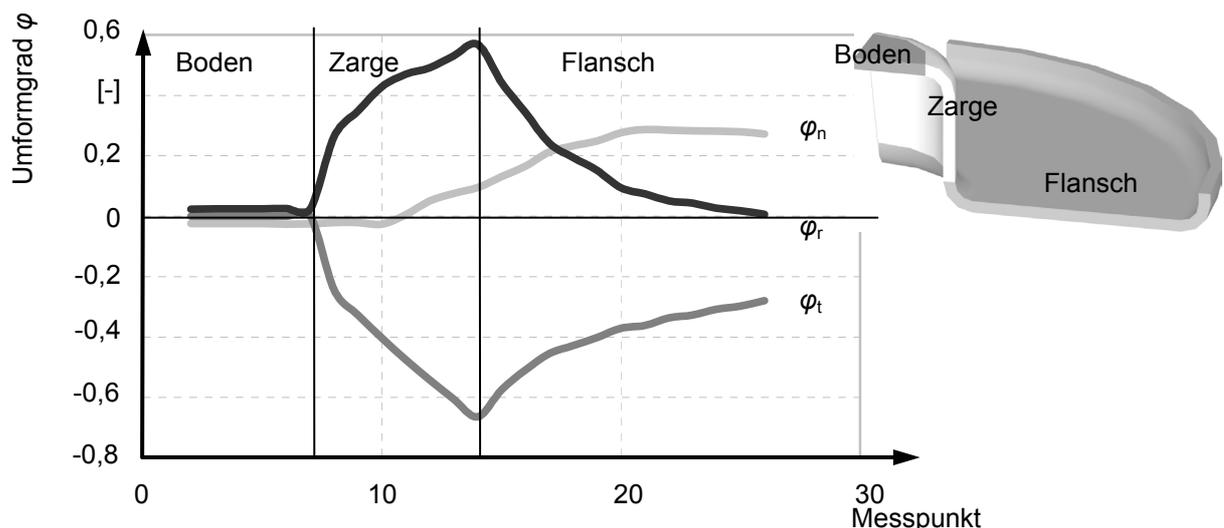


Bild 6-6: Formänderungsverlauf (Abwicklung) beim TNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN; Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

Der Verlauf der experimentell ermittelten tangentialen Formänderungen im Flansch stimmt qualitativ mit den theoretisch vorhergesagten und nach Gleichung (11) be-

rechneten tangentialen Formänderungen überein (**Bild 6-7**), wobei in Richtung des Übergangs vom Flansch in die Zarge die experimentell (exp.) ermittelten tangentialen Formänderungen aufgrund der nicht berücksichtigten normalen Formänderung (Zunahme der Blechdicke im Flansch) kleiner sind als die theoretisch vorhergesagten Formänderungen.

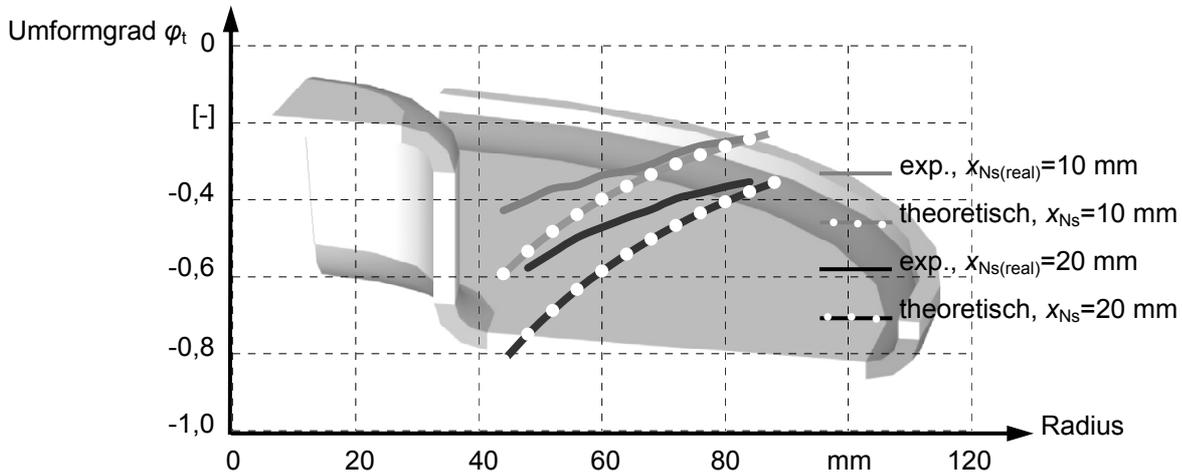


Bild 6-7: Vergleich der experimentell und theoretisch ermittelten Formänderungsverläufe im Flansch. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN; Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3)

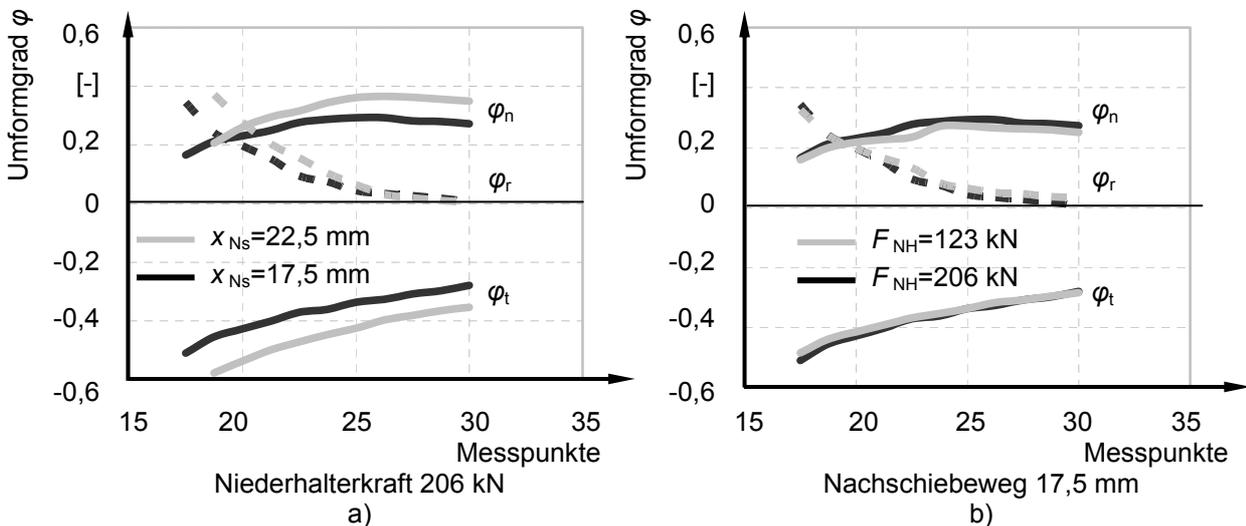


Bild 6-8: Formänderungsverlauf im Flansch beim TNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

Den Einfluss des Nachschiebeweges auf die Verteilung der Formänderungen im Flansch des Werkstücks beim TNWW zeigt **Bild 6-8a**. Mit zunehmendem Nachschiebeweg vergrößert sich die tangentiale Stauchung im Flansch des Werkstücks. Dies bedeutet, dass mit zunehmendem Nachschiebeweg die Neigung zur Bildung von Falten zunimmt. Der Hauptversagensfall (Falten) beim TNWW wird demnach bei größeren Nachschiebewegen verstärkt auftreten. Der Einfluss der Niederhalterkraft

auf den Verlauf der Formänderungen im Flansch des Werkstücks ist nicht signifikant (**Bild 6-8b**).

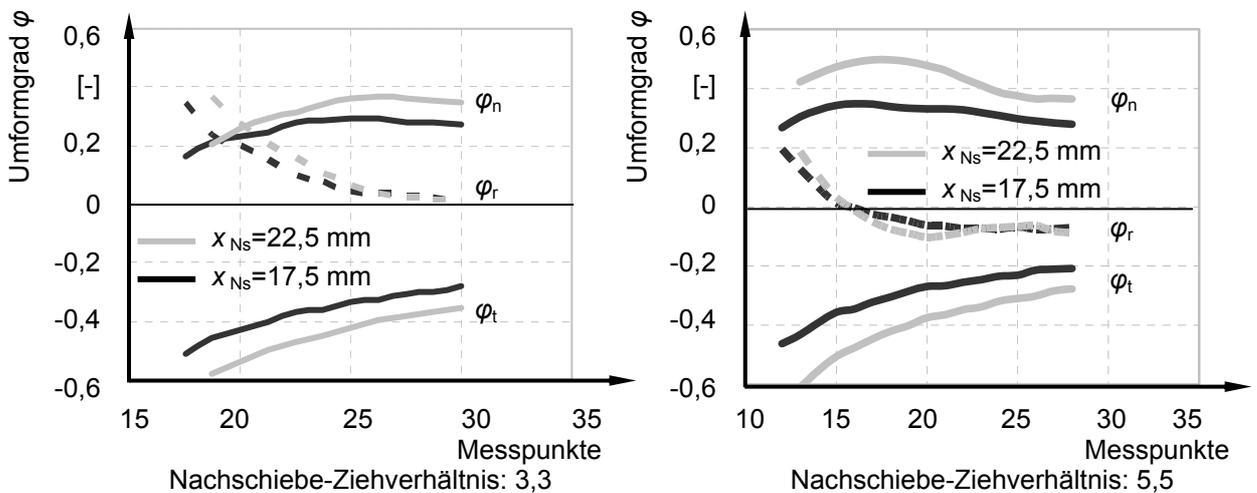


Bild 6-9: Formänderungsverlauf im Flansch beim TNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft 206 kN).

Bild 6-9 zeigt den Verlauf der radialen, normalen und tangentialen Formänderungen für verschiedene Nachschiebe-Ziehverhältnisse. Mit zunehmenden Nachschiebe-Ziehverhältnissen gehen die für das konventionelle Tiefziehen typischen radialen Dehnungen am Flanschrand in radiale Stauchungen über. Auch die Zone, in denen bei zunehmenden Nachschiebe-Ziehverhältnissen radiale Stauchungen vorliegen, vergrößert sich ausgehend vom Rand des Flansches in Richtung des sich ausbildenden Formelementes.

Die höheren Nachschiebe-Ziehverhältnisse können nur deshalb erreicht werden, weil durch das Nachschieben von Werkstoff in den Flansch des Werkstücks eine radiale Druckspannungskomponente eingebracht werden kann. Diese Druckspannungskomponente unterstützt den Werkstofffluss in Richtung des Napfes wesentlich und reduziert die vom Ziehstempel aufzubringende und von der Ziehteilzarge zu übertragende Kraft. Bei den Werkstücken mit der Blechdicke 4 mm liegen vergleichbare Verläufe der Formänderungen vor wie bei Werkstücken mit der Blechdicke 2 mm. Radiale Stauchungen treten bei Werkstücken mit der Blechdicke 4 mm schon bei Nachschiebe-Ziehverhältnissen von 3,9 in den äußeren Zonen des Flansches auf (**Bild 6-10**).

Aufgrund der vorherrschenden Spannungen und der daraus resultierenden Formänderungen beim TNWW ergeben sich im Gegensatz zum konventionellen Tiefziehen neue charakteristische Verfahrensgrenzen, die im folgenden Abschnitt dargestellt werden.

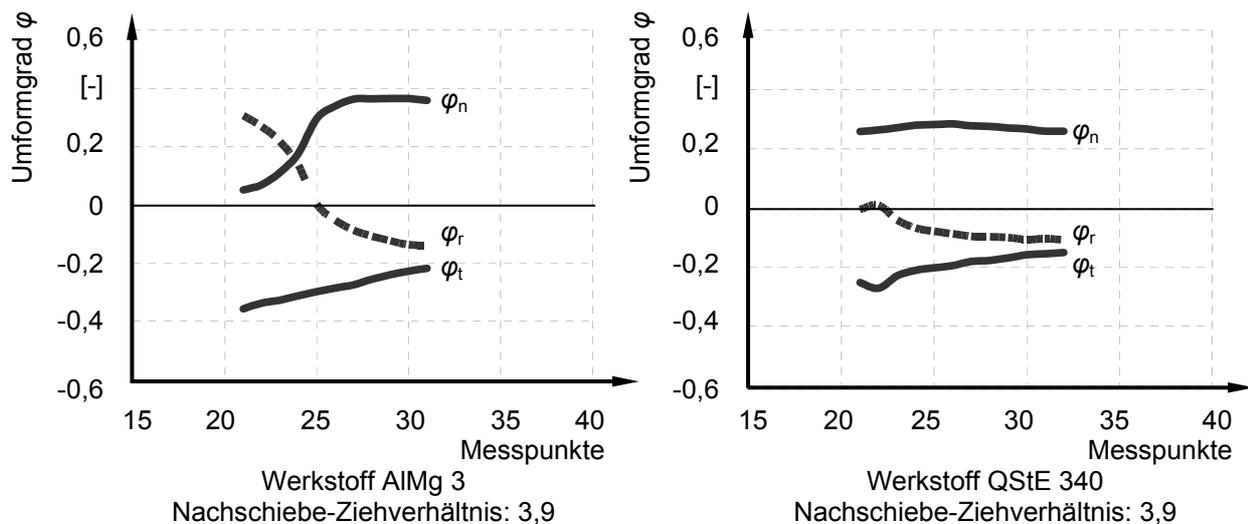


Bild 6-10: Formänderungsverlauf im Flansch beim TNWW, (Blechdicke: 4 mm, Niederhalterkraft: 206 kN, Nachschiebeweg: 22,5 mm).

6.3 Verfahrensgrenzen

Für die praktische Anwendung des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss ist die Kenntnis der Verfahrensgrenzen von vorrangiger Bedeutung. Wenn die Geschwindigkeit des Ziehstempels der Geschwindigkeit entspricht, mit der das Material in den Ziehring nachgeschoben wird, kann der Versagensfall Bodenreißer für das Verfahren Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss ausgeschlossen werden. Hauptversagensfall beim TNWW ist das Eintreten einer Instabilität in Form von Falten im Flansch. Falten entstehen dann, wenn die tangentialen Spannungen einen Grenzwert für das Knicken /21, 22/ überschreiten und die Stabilität des Flansches nicht mehr gegeben ist. Das Eintreten von Falten wird beim TNWW von den folgenden Faktoren bestimmt:

- stoffliche Eigenschaften des Ausgangsteils,
- Blechdicke,
- Niederhalterkraft,
- Nachschiebe-Ziehverhältnis,
- Ziehweg und
- Nachschiebeweg.

Für das Bestimmen der Verfahrensgrenzen sind die Parameter Niederhalterkraft, Verhältnis Flanschdurchmesser zu Ziehringdurchmesser in den folgenden Grenzen variiert worden:

- Niederhalterkraft bedingt durch den Werkzeugaufbau zwischen 82 kN (F_{NHmin}) und 206 kN (F_{NHmax}) sowie
- Nachschiebe-Ziehverhältnis zwischen 2,2 und 7,5.

Um den Einfluss der Bildung von Zipfeln auszuschließen, ist die Randhöhe der Zwischenform auf 30 mm begrenzt worden. Für das Bestimmen der Verfahrensgrenzen ist der Parameter Nachschiebeweg in den folgenden Grenzen variiert worden:

- Nachschiebeweg zwischen 17,5 mm und 25 mm.

Die Haupteinflussfaktoren für das Auftreten einer Instabilität in Form von Falten sind das vorliegende Verhältnis Flanschdurchmesser zu Ziehringdurchmesser und die Niederhalterkraft. Die Größe des Nachschiebeweges zeigt im experimentell untersuchten Parameterbereich nur einen geringen Einfluss auf die Faltenbildung im Flansch. Bei konstanter Niederhalterkraft und konstantem Nachschiebe-Ziehverhältnis sind die Verfahrensgrenzen in den untersuchten Parameterbereichen für unterschiedliche Nachschiebewege bis 22,5 mm ähnlich.

Bei der aufgrund des Werkzeugaufbaus maximal erreichbaren Niederhalterkraft von 206 kN ist die Grenze des Nachschiebens von Werkstoff noch nicht erreicht. Bei einem weiteren Erhöhen der Niederhalterkraft können die Verfahrensgrenzen noch erweitert werden, da das Eintreten von Falten im Flansch durch eine höhere Niederhalterkraft verzögert werden kann.

In **Bild 6-11** sind die Verfahrensfenster des konventionellen Tiefziehens und des TNWW dargestellt. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, wird durch das Nachschieben von Werkstoff das Verfahrensfenster zu wesentlich höheren Ziehverhältnissen erweitert. **Bild 6-12** bis **Bild 6-16** zeigen die Verfahrensfenster für das TNWW für unterschiedliche Werkstoffe und Blechdicken.

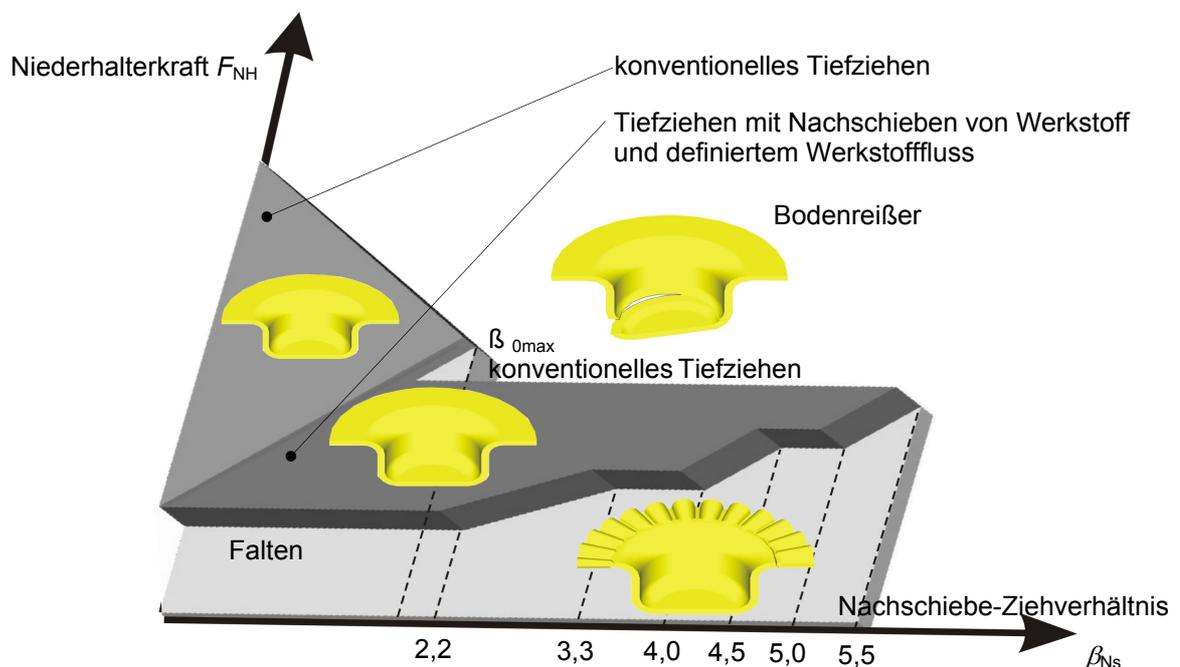


Bild 6-11: Prinzipielles Verfahrensfenster des konventionellen Tiefziehens im Vergleich zum TNWW.

Bei dem Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 2 mm kommt es unterhalb einer Niederhalterkraft von 123 kN zu einem unerwünschten Anheben des Niederhalters, so dass kein Material mehr in die Zarge transportiert werden kann (**Bild 6-13**). Der

Niederhalter hebt ab, da der Werkstoff über den äußeren Ziehringradius zwar einmal gebogen wird, aber aufgrund der geringen Niederhalterkraft nicht mehr in den Flansch zurück gebogen werden kann. Der gleiche Versagensfall tritt beim Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 4 mm unterhalb einer Niederhalterkraft von 164 kN auf (**Bild 6-14**). Instabilitäten in Form von Falten konnten beim Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 4 mm im untersuchten Parameterbereich nicht beobachtet werden.

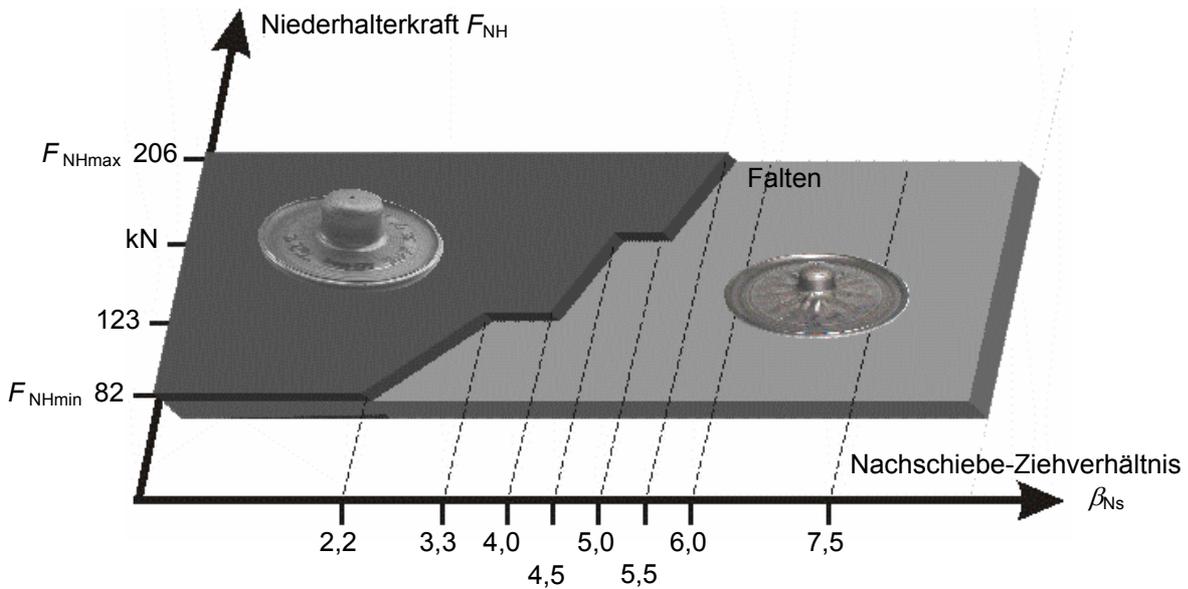


Bild 6-12: Verfahrensfenster beim TNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm).

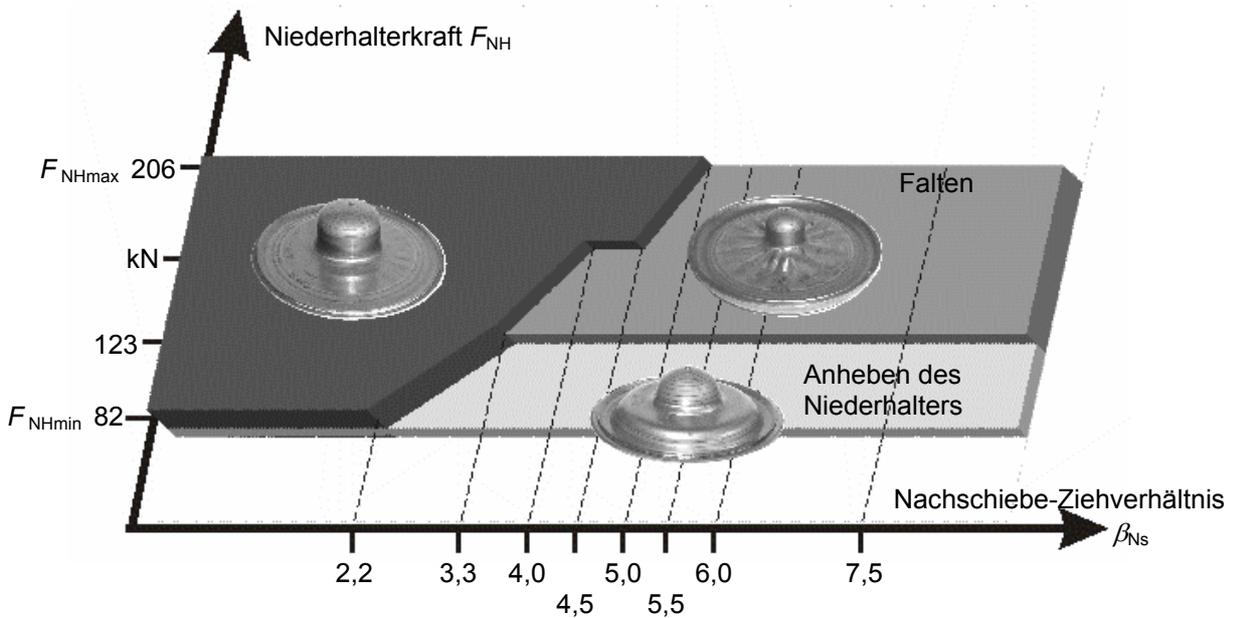


Bild 6-13: Verfahrensfenster beim TNWW, (Werkstoff: QStE 340, Blechdicke: 2 mm).

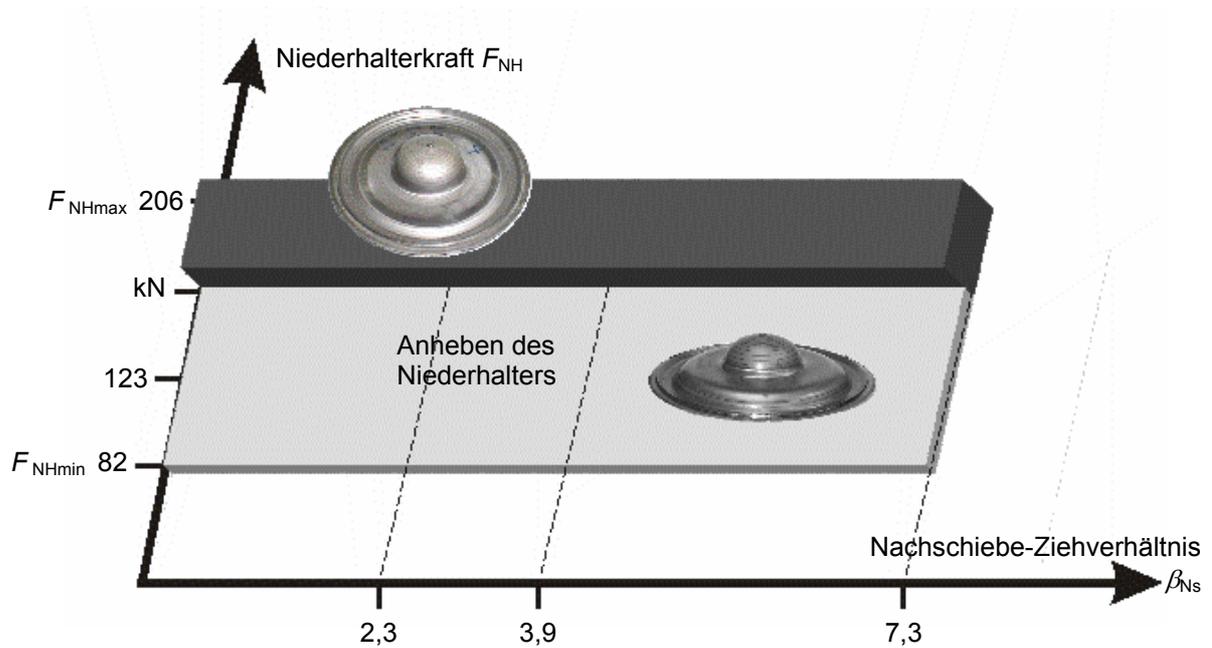


Bild 6-14: Verfahrensfenster beim TNWW, (Werkstoff: QStE 340, Blechdicke: 4 mm).

Bei dem untersuchten Aluminiumwerkstoff können die Potentiale des Verfahrens TNWW erst bei einer größeren Blechdicke ab 4 mm genutzt werden (Bild 6-16). Bei den Werkstücken aus AlMg3 mit einer Blechdicke von 2mm treten bereits bei einem Nachschiebe-Ziehverhältnis von 2,2 Falten im Flansch auf, da aufgrund des geringen E-Moduls der Werkstoff Aluminium im Vergleich zum Werkstoff Stahl dem Ausknicken des Werkstoffes bei gleichen Beanspruchungs- und Abmessungsverhältnissen nur einen geringeren Widerstand entgegensetzen kann.

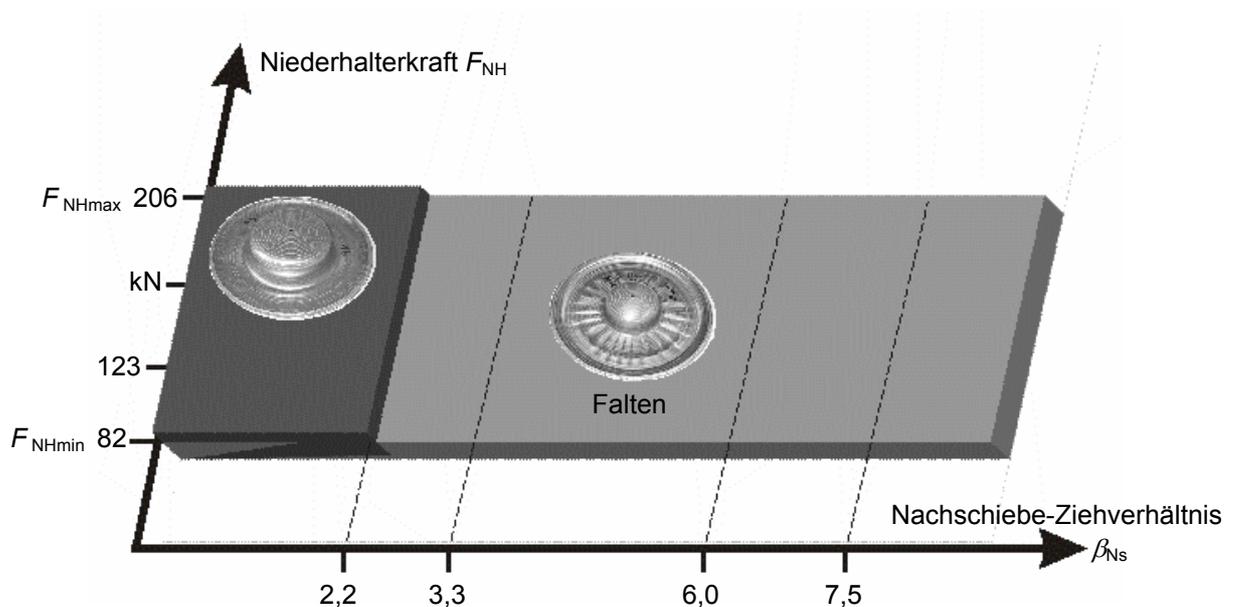


Bild 6-15: Verfahrensfenster beim TNWW, (Werkstoff: AlMg 3, Blechdicke: 2 mm).

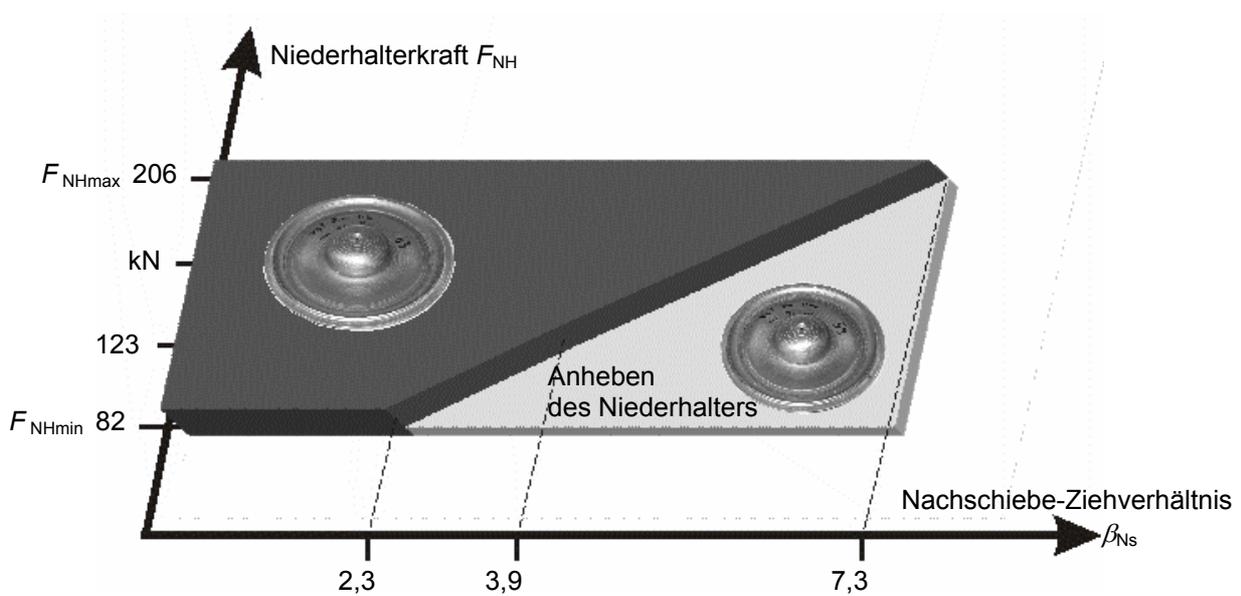


Bild 6-16: Verfahrensfenster beim TNWW, (Werkstoff: AlMg 3, Blechdicke: 4 mm).

6.4 Umform- und Pressenkräfte

6.4.1 Theoretische Betrachtungen zum TNWW

Die benötigte verfahrensspezifische Pressenkraft (F_P) setzt sich entsprechend dem Werkzeugaufbau beim TNWW als Reaktionskraft aus den Teilkräften Umform- (F_U), Feder- (F_F) und Reibkraft (F_R) zusammen (**Bild 6-17**):

$$F_P = F_U + F_F + F_R \tag{12}$$

Als Umformkraft wird die Kraft bezeichnet, welche für das Nachschieben des Randes und das Formen des Formelementes Napf benötigt wird und setzt sich zusammen aus der Nachschiebekraft (F_{Ns}) und der Ziehstempelkraft (F_{St}) zum eigentlichen Ziehen:

$$F_U = F_{Ns} + F_{St} \tag{13}$$

Die Federkraft setzt sich aus der Kraft der Schraubenfedern und der Kraft der Gasdruckfedern zusammen. Sowohl die Kraft der Schraubenfedern als auch die Kraft der Gasdruckfedern sind notwendig, um die Relativbewegungen (Abschnitt 5.1) für das Nachschieben von Werkstoff und das Aufbringen der Niederhalterkraft zu realisieren.

Die für das Nachschieben von Werkstoff notwendige Kraft (F_{Ns}) setzt sich aus einer Vielzahl von Teilkräften zusammen. Die Größe der Teilkräfte kann nicht explizit bestimmt werden. Als Teilkräfte treten sowohl Reib- als auch Biegekräfte auf. Die eigentliche, zur Umformung benötigte Kraft ist mit F_{id} zusammengefasst worden. Wird beim TNWW gleichzeitig durch den Stempel eine Ziehstempelkraft aufgebracht und Werkstoff nachgeschoben (**Bild 6-18**), so verringert sich der Anteil der Nachschiebe-

kraft F_{Ns} an der Umformkraft F_U um den Betrag der ohne Bodenreißer maximal erreichbaren Ziehstempelkraft F_{St} .

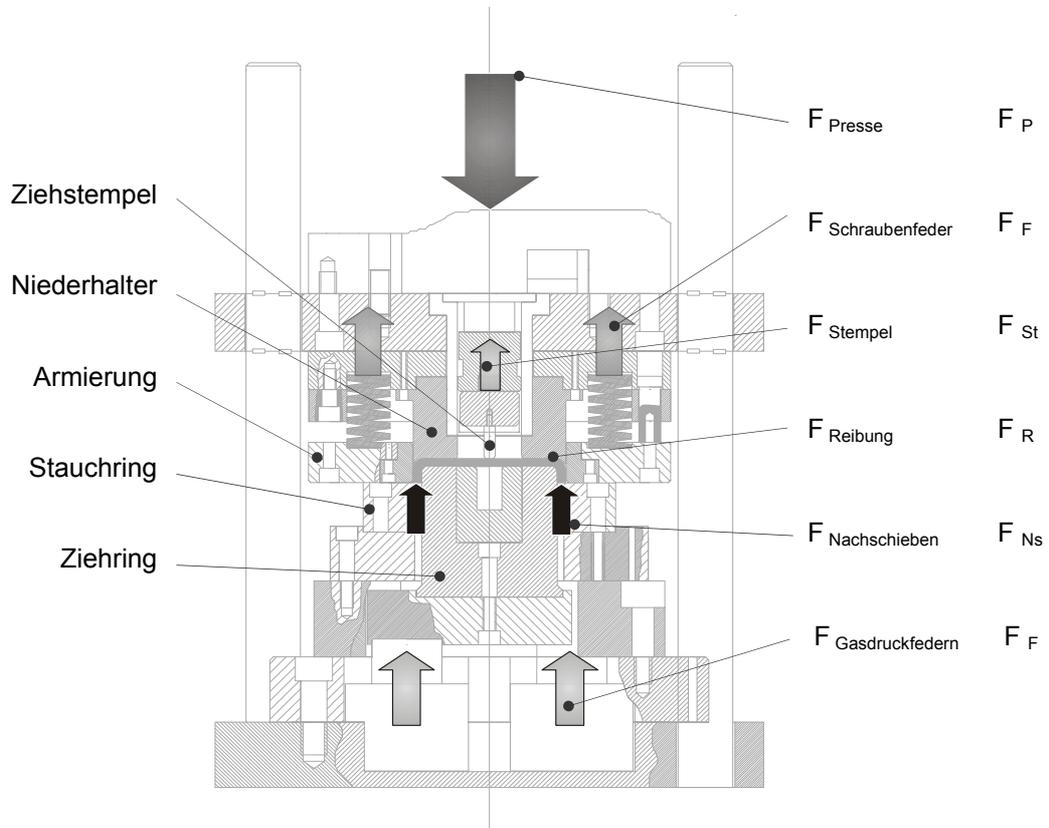


Bild 6-17: Kräfte im Werkzeug beim TNWW.

Die einzelnen Teilkräfte der Nachschiebekraft sind in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$F_{Ns} = F_{B1} + F_{R1} + F_{id} + F_{B2} + F_{R2} + F_{R3} - F_{St} \quad (14)$$

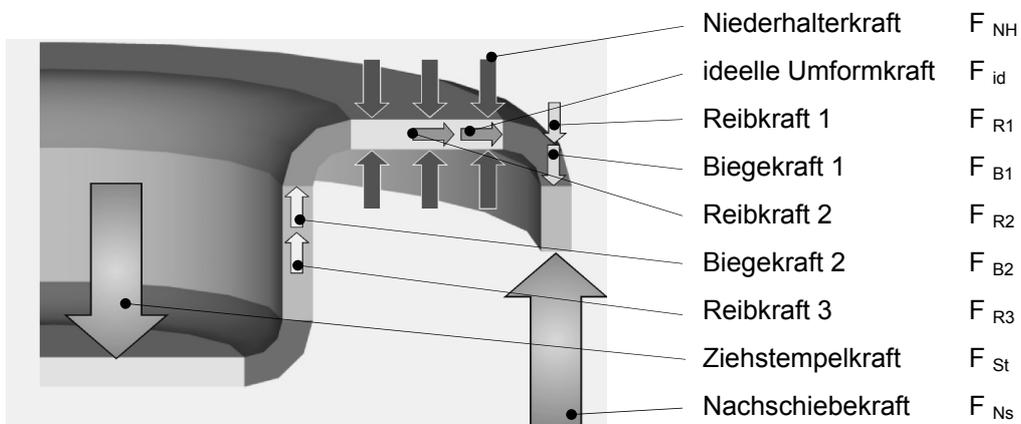


Bild 6-18: Kräfte beim TNWW.

Dabei wird die beim TNWW auftretende einfache Biegung um die Rundung des Stempels zu Beginn des Umformvorgangs vernachlässigt.

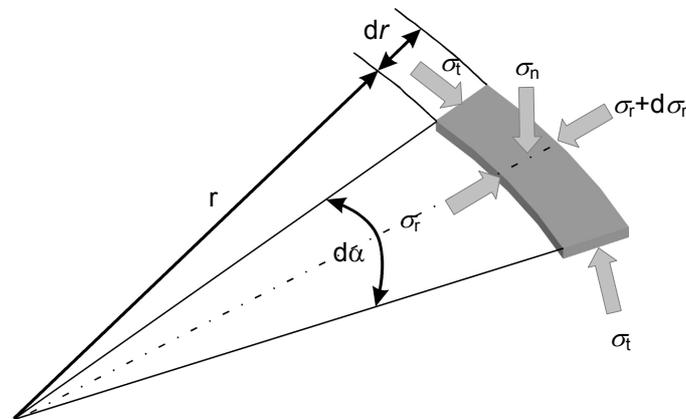


Bild 6-19: Spannungen im Flansch beim TNWW.

Die in Bild 6-18 dargestellten Biegekräfte F_{B1} und F_{B2} ergeben sich aus der doppelten Biegung (Biege- und Rückbiegevorgang) des Materials an dem äußeren und inneren Radius des Ziehrings. Für die Berechnung der ideellen Umformkraft für das TNWW wird vereinfachend angenommen, dass nur eine Nachschiebebewegung stattfindet. Durch den Ziehstempel soll keine Kraft über den Querschnitt der Zarge in die Umformzone eingebracht werden (Grenzfall; Bild 4-2b). Demnach stellen sich an einem Volumenelement im Flansch die im **Bild 6-19** gezeigten Spannungen ein.

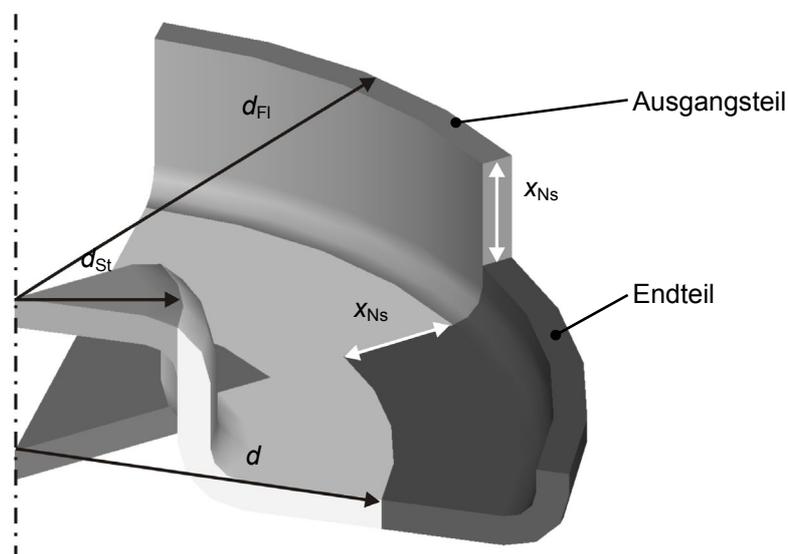


Bild 6-20: Geometrische Verhältnisse beim TNWW.

Die notwendige ideelle Umformkraft F_{id} kann für jeden beliebigen Durchmesser d und dementsprechend für jeden beliebigen Nachschiebeweg x_{Ns} aus der am Flanschrand vorliegenden radialen Druckspannung σ_r multipliziert mit der Fläche des Ringquerschnitts am Flanschrand ermittelt werden:

$$F_{id} = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot \sigma_r \tag{15}$$

Die Kenntnis der Spannungen und des Spannungszustands in der Umformzone ist nicht nur notwendig, um die benötigten Umformkräfte und Umformarbeiten abschätzen zu können, sondern die Kenntnis der Spannungen ist auch wichtig für die Beurteilung des Werkstoffverhaltens beim Umformen und der erreichbaren Eigenschaften der hergestellten Werkstücke.

Die am Flanschrand vorliegende radiale Druckspannung lässt sich beim TNWW wie folgt ermitteln: Nach der Schubspannungshypothese (Tresca-Venant) tritt dann plastisches Fließen ein, wenn die Differenz der größten Hauptspannung σ_1 und der kleinsten Hauptspannung σ_3 gleich der Fließspannung k_f ist, unabhängig von der Größe der mittleren Hauptspannung σ_2 :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_f \quad (16)$$

Für den Fall, dass beim TNWW kein Niederhalter verwendet wird, verschiebt sich der Mohrsche Spannungskreis. Die Ordinate wird zur Tangente des Spannungskreises, da die Normalspannung σ_n zu Null wird (**Bild 6-21**).

$$\sigma_1 = \sigma_n = 0 \quad (17)$$

Unter der Annahme, dass die radiale Druckspannung im Flansch im Extremfall die kleinste Spannung ist, ergibt sich:

$$\sigma_3 = \sigma_r \quad (18)$$

Wird beim TNWW kein Niederhalter verwendet (Gleichung 17), dann entspricht die radiale Druckspannung im Flansch des Werkstücks gemäß Gleichung 16 der Fließspannung. Die Fließkurven von niedriglegierten Stählen und von Aluminiumlegierungen, welche noch nicht vorverfestigt wurden, sind bei Raumtemperatur bis zu Umformgraden von $\varphi \approx 1$ in doppeltlogarithmischer Darstellung Geraden. Für diese Fließkurven gilt nach /111/ und /112/:

$$k_f(\varphi) = C \cdot \varphi^n \quad (19)$$

Dabei ist die Konstante C wie folgt definiert:

$$C = R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \right)^n \quad (20)$$

Zur Ermittlung der Fließspannung k_f für einen bestimmten Umformgrad φ werden demnach die Zugfestigkeit, der Verfestigungsexponent und die Gleichmaßdehnung benötigt. In Gleichung (20) repräsentiert e die Basis der natürlichen Logarithmen. Mit Gleichungen (20) und (19) in Gleichung (15) eingesetzt, ergibt sich die ideale Umformkraft für (**Bild 6-20**) für kleine Nachschiebewege x_{Ns} zu:

$$F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n \quad (21)$$

6 Untersuchungsergebnisse: Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (TNWW)

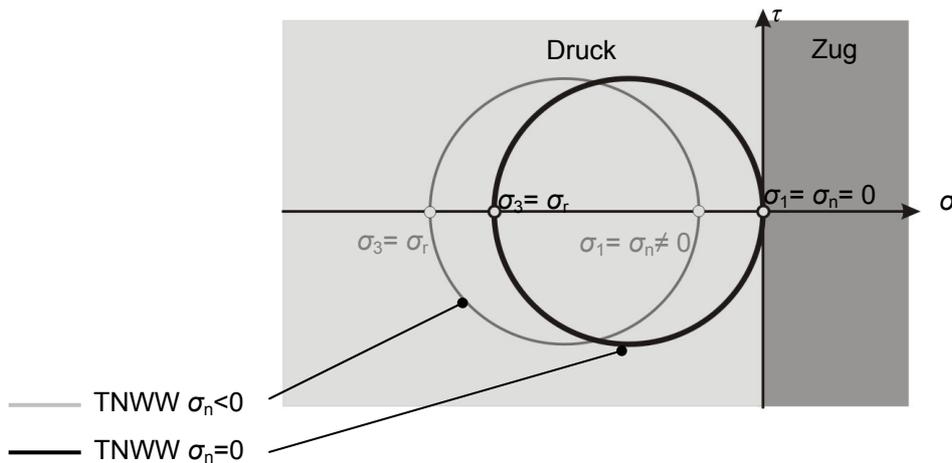


Bild 6-21: Mohrscher Spannungskreis beim TNWW.

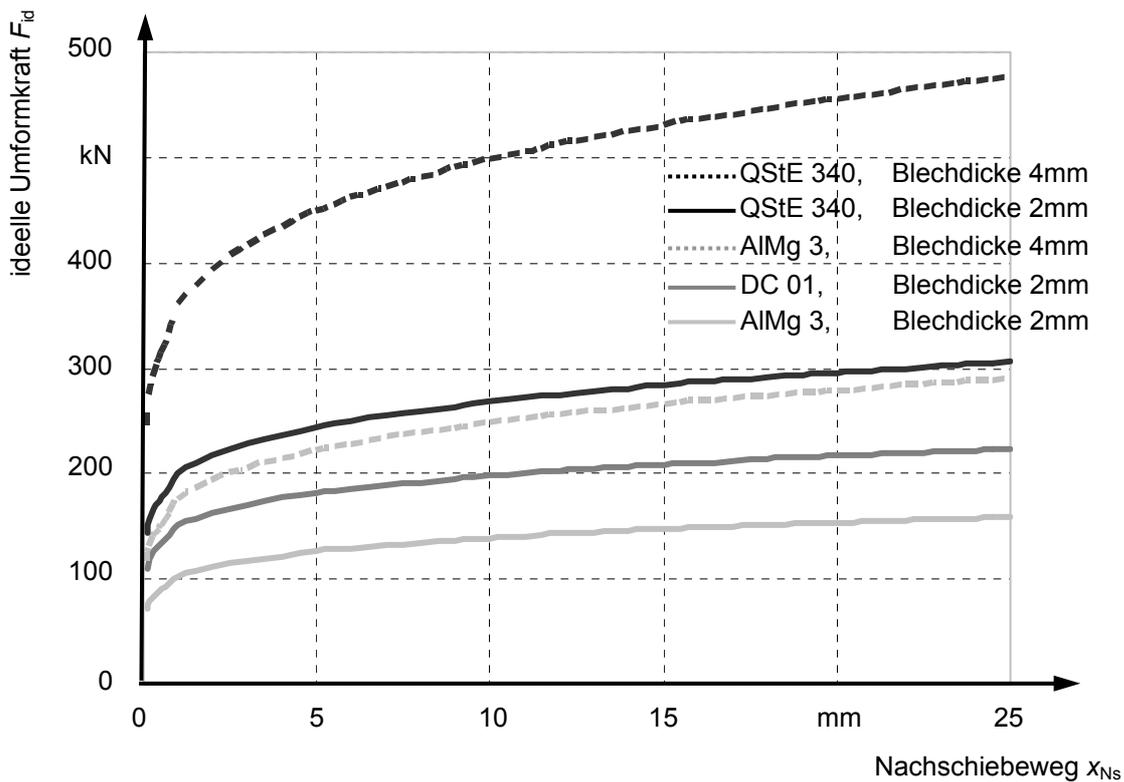


Bild 6-22: Verlauf der ideellen Umformkraft beim TNWW.

Die Größe, welche sich mit zunehmendem Nachschiebeweg bzw. abnehmendem Durchmesser d in Gleichung (21) verändert, ist die Fließspannung. Der Verlauf der ideellen Umformkraft wird daher auch mit dem Verlauf der Fließkurve übereinstimmen. Die Verläufe der nach Gleichung (21) berechneten ideellen Umformkraft für die beim TNWW verwendeten Werkstoffe DC 01, QStE 340 und AlMg 3 zeigt **Bild 6-22**. Die notwendige Pressenkraft F_P wird einen ähnlichen Verlauf annehmen wie die im

Bild 6-22 dargestellte ideale Umformkraft. Die absoluten Werte der notwendigen Pressenkraft sind höher, da sich die Pressenkraft gemäß Gleichung (12) nicht nur aus der ideellen Umformkraft, sondern aus verschiedenen Teilkräften ergibt.

6.4.2 Pressenkräfte beim TNWW

Wie vorstehend erläutert setzt sich beim Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss die Pressenkraft (F_P) aus den Teilkräften Umform- (F_U), Feder- (F_F) und Reibkraft (F_R) zusammen. Die Umformkraft addiert sich aus der Nachschiebekraft (F_{NS}) und der Ziehstempelkraft (F_{St}). Die Federkraft setzt sich aus der Kraft der Schraubenfedern und der Kraft der Gasdruckfedern zusammen. Sowohl die Kraft der Schraubenfedern als auch die Kraft der Gasdruckfedern sind notwendig, um die Relativbewegungen für das Nachschieben von Werkstoff und das Aufbringen der Niederhalterkraft zu realisieren.

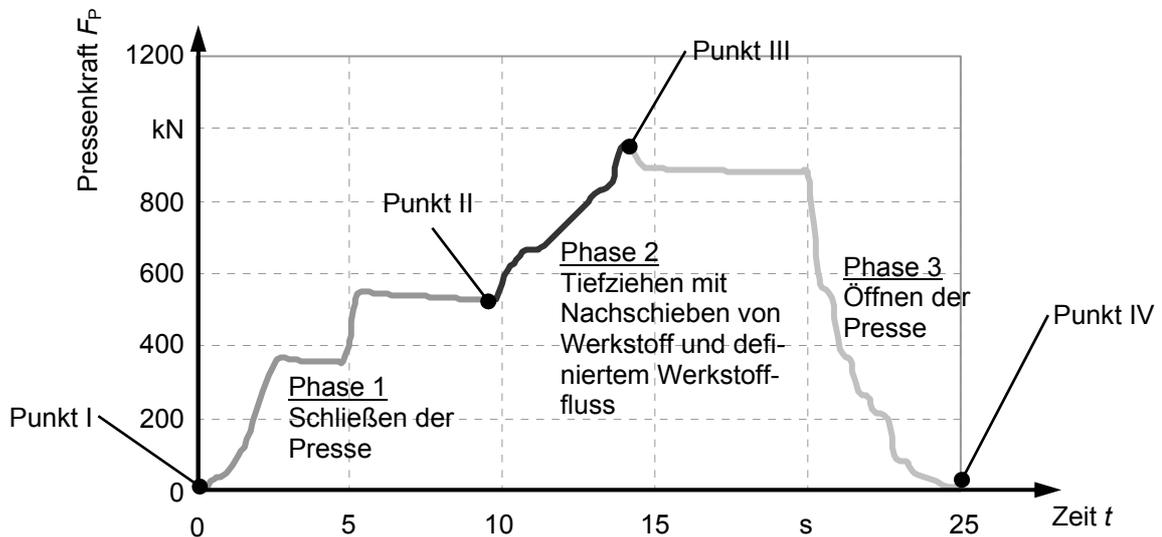


Bild 6-23: Verlauf der Pressenkraft beim TNWW (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN, Nachschiebeweg: 20 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 4,0).

Das Nachschiebe-Ziehverhältnis hat beim TNWW einen analogen Einfluss auf das Kraftmaximum wie das Ziehverhältnis auf das Kraftmaximum beim konventionellen Tiefziehen. Mit größer werdendem Nachschiebe-Ziehverhältnis vergrößert sich auch die zur Umformung notwendige Pressenkraft. Einfluss auf die benötigte Pressenkraft nehmen auch die mechanischen Kennwerte des Materials. Werkstoffe, die bei vergleichbaren Hauptumformgraden höhere Fließspannungen aufweisen, benötigen beim TNWW höhere Pressenkräfte als Werkstoffe, die bei vergleichbaren Hauptumformgraden geringere Fließspannungen besitzen.

Einen charakteristischen Verlauf der notwendigen Pressenkraft beim TNWW zeigt **Bild 6-23**. Während der ersten Phase von Punkt I zu Punkt II wird die Presse zusammengefahren, bis der Rand der Zwischenform auf dem Stauchring und der Ziehstempel auf der Zwischenform aufliegt. In der zweiten Phase wird der Vorgang des

TNWW durchgeführt. Die dritte Phase vom Punkt III zum Punkt IV charakterisiert das Öffnen der Presse.

Einen charakteristischen Verlauf der Pressenkraft F_P für die zweite Phase, dem eigentlichen Tiefziehen und Nachschieben von Werkstoff, zeigt **Bild 6-24**. Deutlich zu erkennen ist das Kraftmaximum am Ende des Umformprozesses, wie beim Verlauf der ideellen Umformkraft. Während des Umformprozesses steigt die Pressenkraft nahezu linear an, während die ideelle Umformkraft beim TNWW mit zunehmendem Nachschiebeweg weniger stark ansteigt. Zieht man von der Pressenkraft die Federkräfte ab, so erhält man die für das Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss typische Umformkraft einschließlich der Reibkräfte (F_U+F_R). Die Federkräfte können ermittelt werden, indem das Werkzeug ohne eingelegtes Werkstück betätigt wird und die dann auftretenden Pressenkräfte gemessen werden. Deutlich ist der hohe Anteil der Reibkräfte F_R zu erkennen, wenn davon ausgegangen wird, dass die Umformkraft F_U durch die theoretisch ermittelte ideelle Umformkraft F_{id} repräsentiert wird. Um diese hohen Reibkräfte so gering wie möglich zu halten, ist eine optimale Gestaltung des tribologischen Systems notwendig.

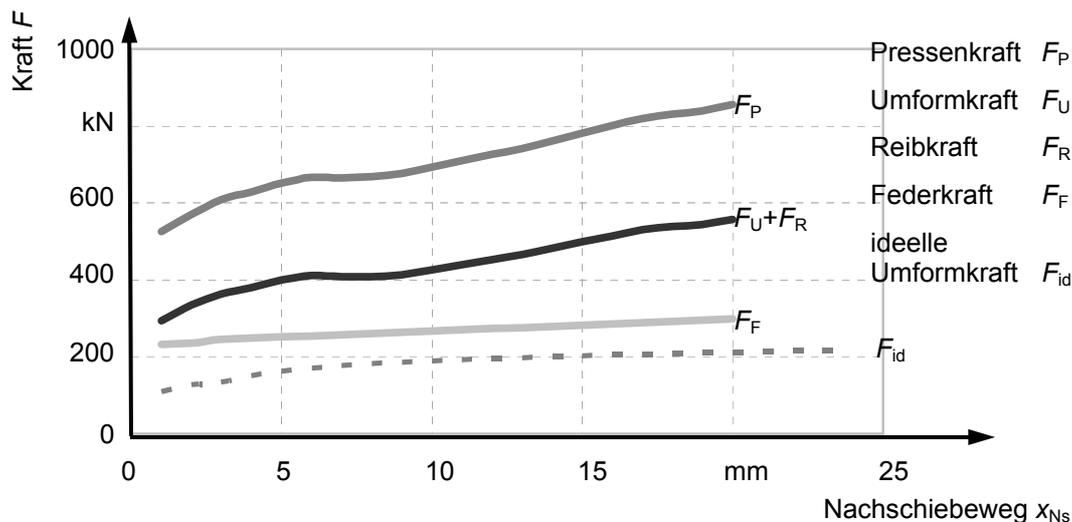


Bild 6-24: Verlauf der realen und ideellen Pressenkraft während des Nachschiebens (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN, Nachschiebeweg: 20 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 4,0).

Wird die theoretisch ermittelte ideelle Umformkraft mit der Kraft verglichen, die zur Umformung beim TNWW und zur Überwindung der Reibung benötigt wird, so kann festgestellt werden, dass die Summe aus der Umformkraft (F_U) und der Reibkraft (F_R) für die untersuchten Werkstoffe und Blechdicken dem 1,5fachen der ideellen Umformkraft (F_{id}) entspricht. Da sich die Federkraft (F_F) hauptsächlich aus der Niederhalterkraft (F_{NH}) ergibt, kann die notwendige Pressenkraft (F_P) für das untersuchte Verfahren zum TNWW für eine praktische Anwendung wie folgt abgeschätzt werden:

$$F_P = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH} \quad (22)$$

Die folgenden Bilder zeigen den Verlauf der Pressenkraft für verschiedene Versuchparameter. Die Messwerte für die Pressenkraft wurden im Abstand von 0,2 s ermittelt.

Im **Bild 6-25** ist der Verlauf der Pressenkraft beim TNWW für den Werkstoff DC 01 mit der Blechdicke 2 mm für ein Nachschiebe-Ziehverhältnis von 2,2 sowie für die Niederhalterkräfte 206 kN und 123 kN dargestellt. Im Vergleich dazu das Nachschiebe-Ziehverhältnis von 3,3 im **Bild 6-26** und für das Nachschiebe-Ziehverhältnis 4,0 im **Bild 6-27** für den gleichen Werkstoff mit der gleichen Blechdicke und gleichen Niederhalterkräften. Für den Werkstoff QStE 340 mit der höheren Festigkeit ist bei sonst gleichen Bedingungen wie beim Werkstoff DC 01 (Bild 6-26) der Verlauf der Pressenkraft im **Bild 6-28** dargestellt.

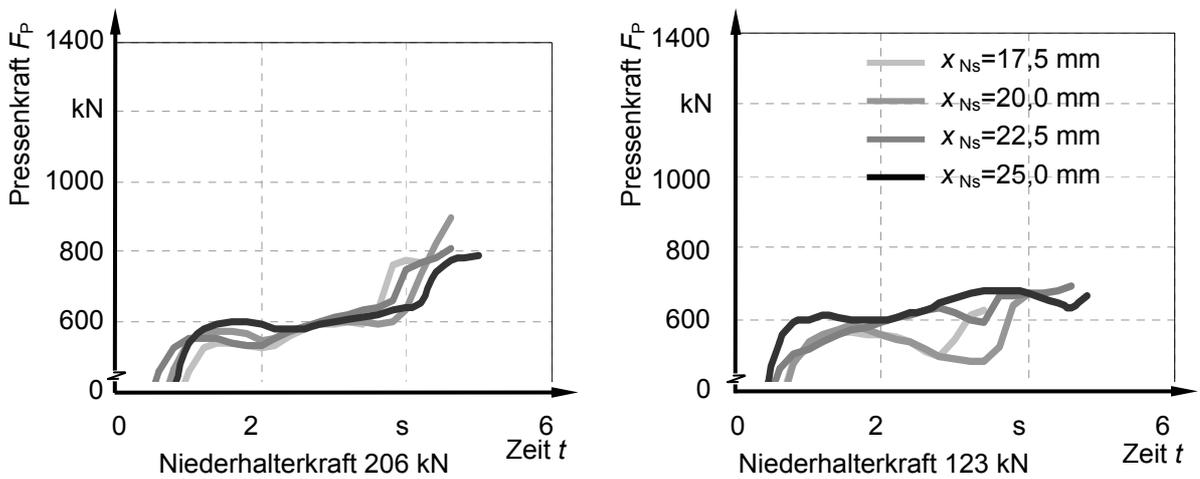


Bild 6-25: Pressenkraft beim TNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 2,2).

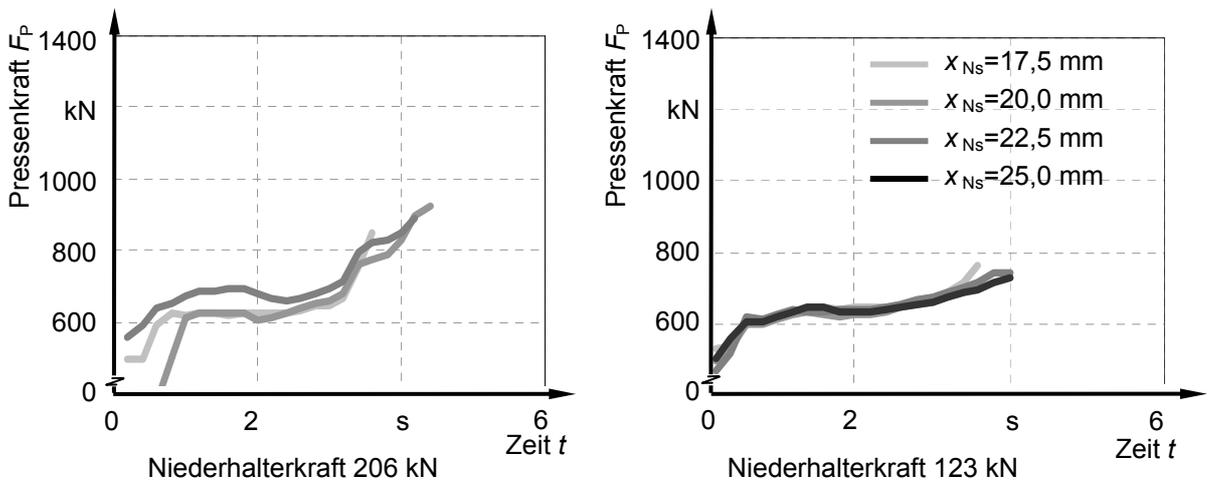


Bild 6-26: Pressenkraft beim TNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

6 Untersuchungsergebnisse: Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (TNWW)

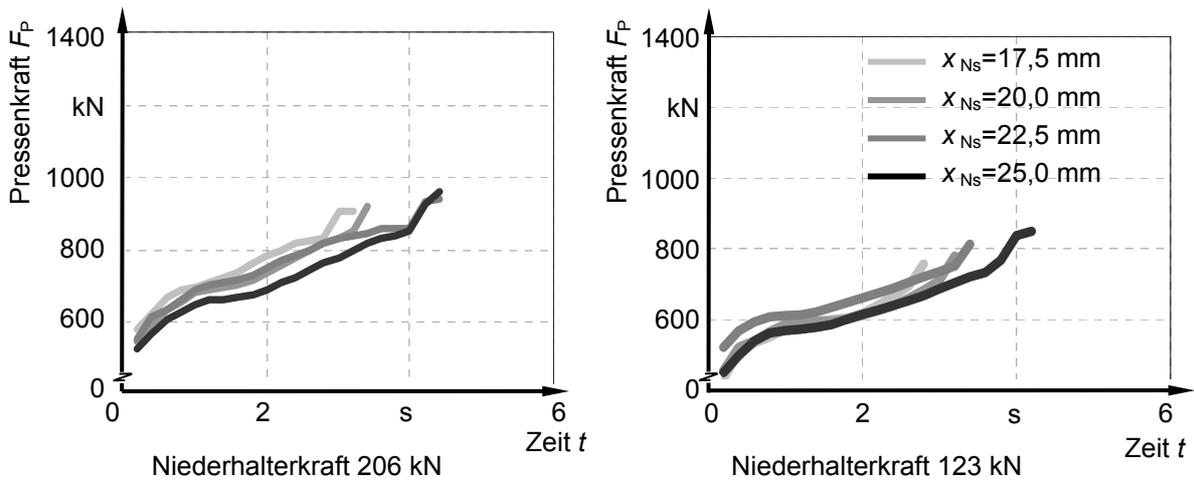


Bild 6-27: Pressenkraft beim TNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 4,0).

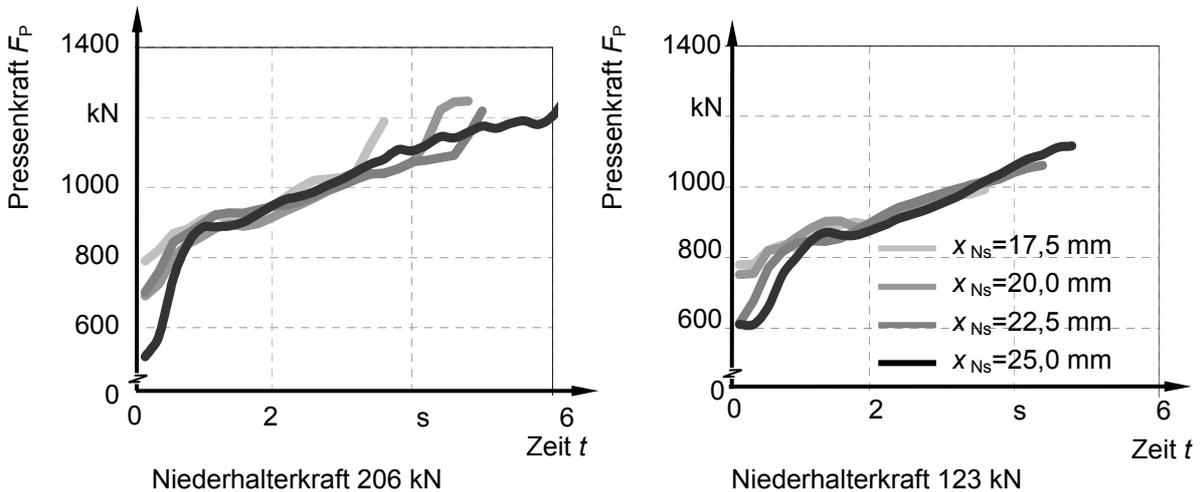


Bild 6-28: Pressenkraft beim TNWW, (Werkstoff: QStE 340, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

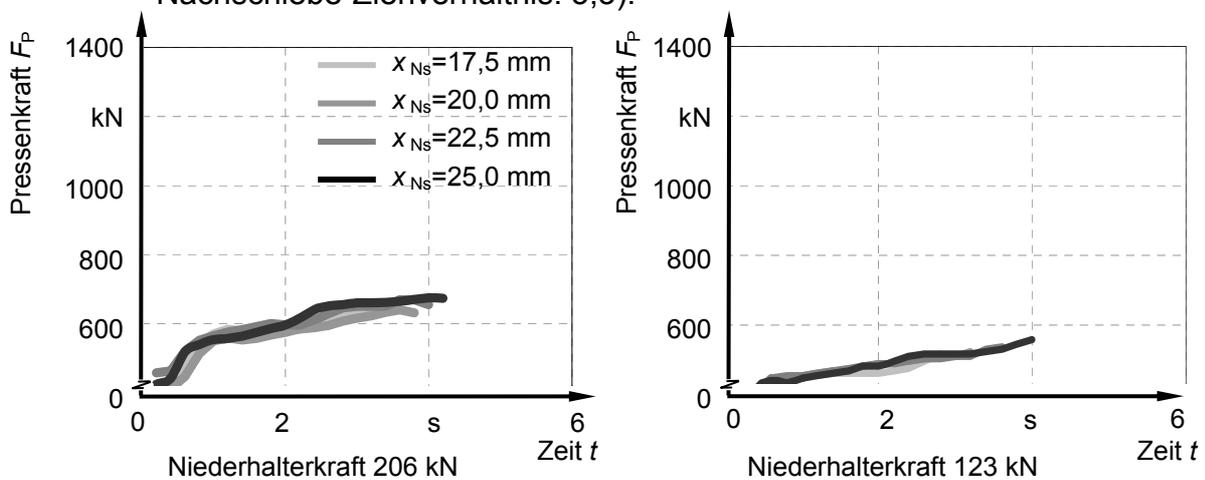


Bild 6-29: Pressenkraft beim TNWW, (Werkstoff: AIMg 3, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 2,2).

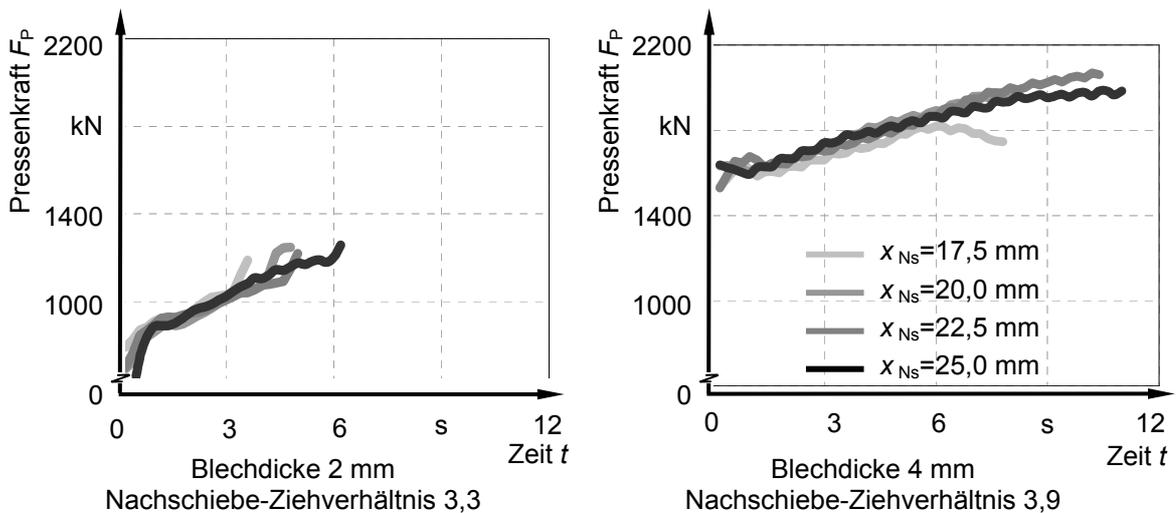


Bild 6-30: Pressenkraft beim TNWW, (Werkstoff: QStE 340, Niederhalterkraft: 206 kN).

Einen weiteren wesentlichen Einfluss auf die notwendige Pressenkraft hat beim TNWW die Blechdicke. Einen Vergleich der für den Werkstoff QStE 340 benötigten Pressenkräfte bei den Blechdicken 2 mm und 4 mm zeigt das **Bild 6-30**. Mit zunehmender Blechdicke steigt der Bedarf an Pressenkraft. Deutlich ist bei diesem Vergleich der Pressenkraft bei unterschiedlichen Blechdicken zu erkennen, dass die zu verrichtende Umformarbeit (Fläche unter der Pressenkraft-Kurve im Kraft-Weg-Diagramm) bei der Umformung von Werkstücken mit einer Blechdicke 4 mm wesentlich höher ist, als bei der Umformung von Werkstücken mit einer Blechdicke 2 mm.

6.5 Endteileigenschaften

6.5.1 Verlauf der Blechdicke

Wichtiges Beurteilungskriterium für das Ergebnis des TNWW sind neben den Verfahrensgrenzen bzw. den benötigten Umform- und Pressenkräften auch die stofflichen und geometrischen Eigenschaften der Endteile. Die Messverfahren, mit denen die stofflichen und geometrischen Endteileigenschaften bestimmt werden, sind im Abschnitt 5.6 beschrieben.

Während des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss bleibt die Ausgangsblechdicke nicht erhalten, sondern ändert sich unter Wirkung der vorliegenden Spannungen. Bedingt durch die Werkstoffbeanspruchung beim TNWW weisen die hergestellten Werkstücke charakteristische Wanddickenverläufe auf (**Bild 6-31**). Sie unterscheiden sich von den Wanddickenverläufen an Werkstücken, welche durch konventionelles Tiefziehen hergestellt wurden. Der Verlauf der Blechdicke ist als Abwicklung über den Querschnitt des Werkstücks ermittelt worden. Die Messpunkte bei der Ermittlung des Verlaufs der Blechdicke liegen jeweils 0,25 mm auseinander.

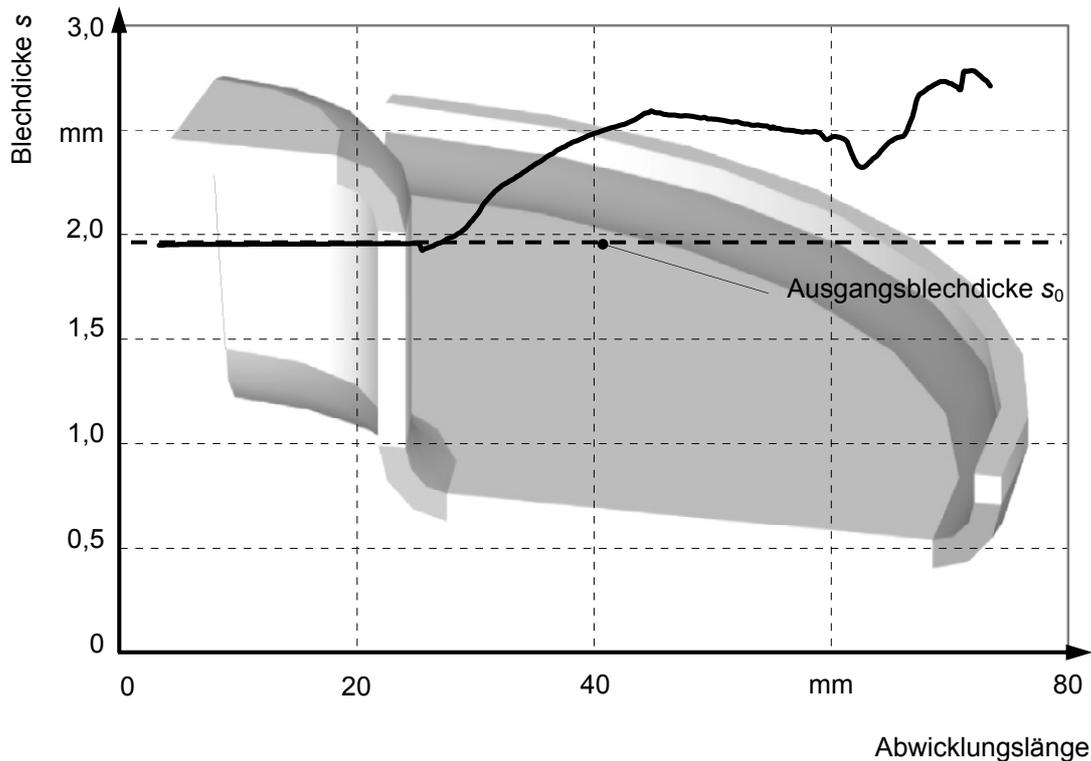


Bild 6-31: Verlauf der Blechdicke (Abwicklung) beim TNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

Bei konventionell tiefgezogenen Teilen nimmt die Blechdicke vom Übergang Napfboden/Zarge in Richtung des Flanschrandes hin zu. Die Blechdicke beim TNWW erhöht sich im Flansch relativ konstant mit einer leichten Zunahme in Richtung der Zarge. Die Schwankungen in der Nähe des Flanschrandes resultieren aus der zweifachen Biegung beim Nachschieben des Werkstoffes aus dem Rand in den Flansch des Werkstücks. In der Zarge ist die Blechdicke geringer als im Flansch. Durch ein verfahrensentsprechendes Verhältnis der Geschwindigkeit des Nachschiebens und des Ziehstempels lässt sich eine ausgeprägte Verringerung der Blechdicke am Übergang zwischen Zarge und Napfboden, wie sie bei konventionell tiefgezogenen Teilen charakteristisch ist, vermeiden. Die Blechdicke des Napfbodens bleibt konstant. Die Verläufe der Blechdicken sind für die unterschiedlichen Werkstoffe bei gleichen Blechdicken ähnlich (Bild 6-31, Bild 6-32). Auffallend ist die extreme Zunahme der Blechdicke am Rand bei den Werkstücken mit der Ausgangsblechdicke 4 mm beim Werkstoff QStE 340 (Bild 6-33). Durch die extreme Stauchung des Werkstoffes im sich verringernden Rand des Werkstücks wird der Innendurchmesser der Armierung (Bild 5-2) aufgeweitet. Durch eine stärkere Vorspannung der Armierung kann diese extreme Stauchung im Rand des Flansches beim Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 4 mm vermieden werden.

Bei den anderen Werkstoffen findet die größte Veränderung der Blechdicke im Flansch des Werkstücks statt. Dabei haben die Verfahrensparameter Nachschiebeweg und Nachschiebe-Ziehverhältnis den größten Einfluss auf die Zunahme der

Blechdicke. Wird das Nachschiebe-Ziehverhältnis für einen Werkstoff bei sonst vergleichbaren Verfahrensparametern vergrößert, so ist eine verstärkte Zunahme der Blechdicke im Flansch des Werkstücks zu verzeichnen. Auch eine Vergrößerung des Nachschiebeweges bewirkt eine verstärkte Zunahme der Blechdicke. Der Werkstoff QStE 340 zeigt im Vergleich zu den Werkstoffen DC 01 und AlMg 3 die größte Zunahme der Blechdicke im Flansch des Werkstücks.

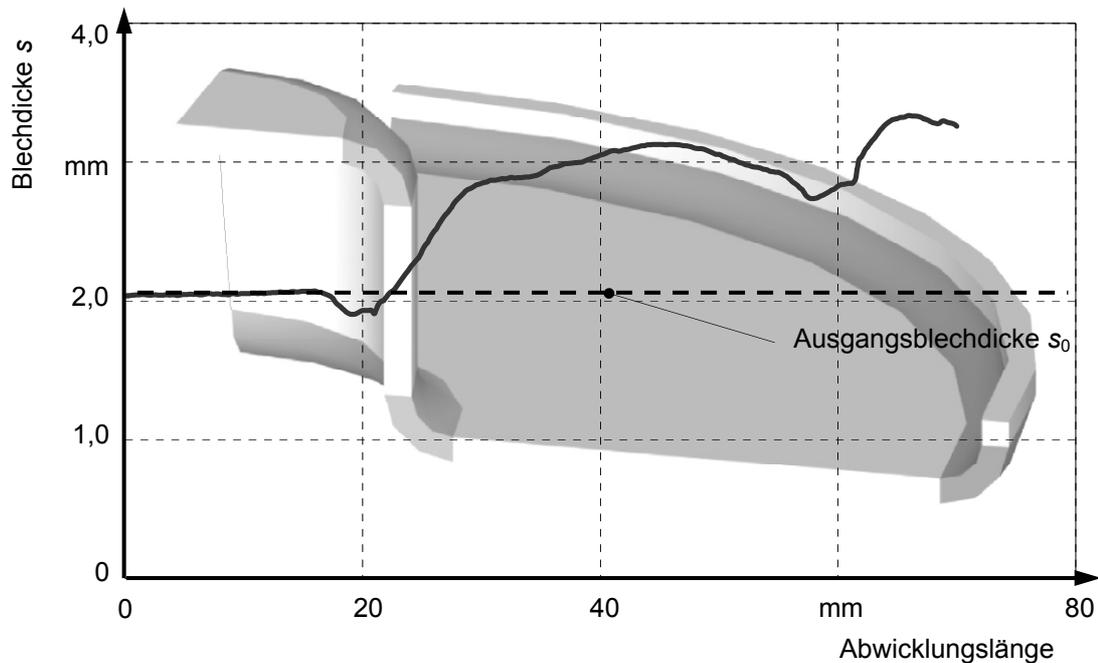


Bild 6-32: Verlauf der Blechdicke (Abwicklung) beim TNWW, (Werkstoff: QStE 340, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

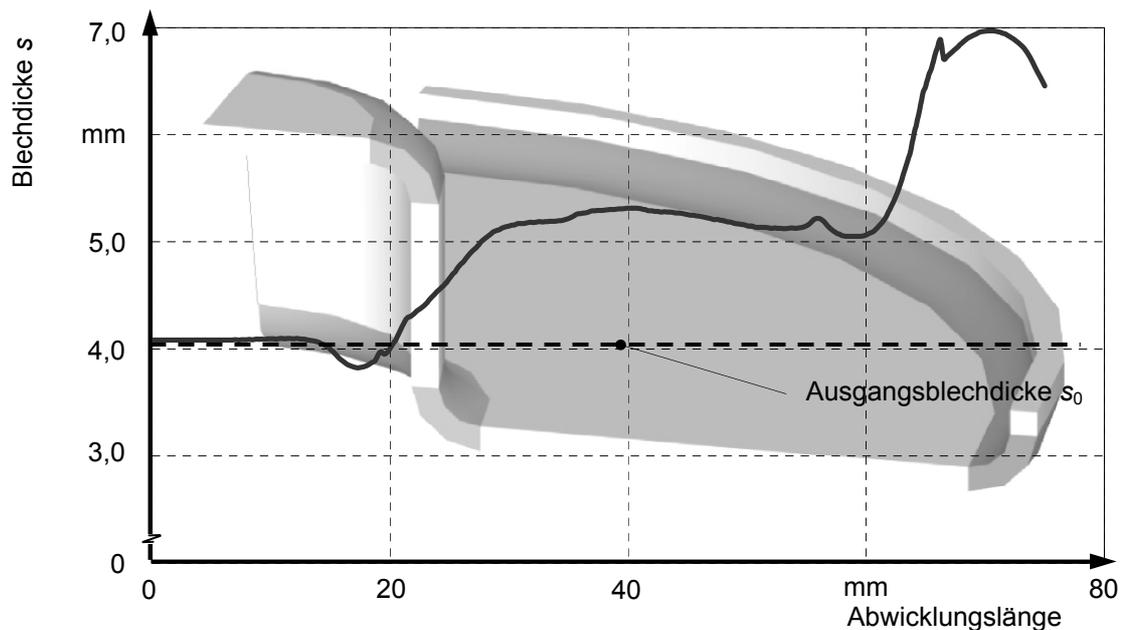


Bild 6-33: Verlauf der Blechdicke (Abwicklung) beim TNWW, (Werkstoff: QStE 340, Blechdicke: 4 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,9).

6.5.2 Höhe der Formelemente (Napfhöhen)

Das Ziel bei der Fertigung von napfförmigen Nebenformelementen an scheibenförmigen Grundkörpern ist es, eine ausreichende Höhe des Formelementes herzustellen, um den funktionalen Anforderungen, welche an das Formelement gestellt werden, gerecht zu werden.

Der Nachschiebeweg hat beim TNWW den größten Einfluss auf die sich einstellenden Napfhöhen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Nachschiebeweg und der Napfhöhe besteht, wobei ein größerer Nachschiebeweg eine Zunahme der Höhe des Formelementes bewirkt. Für das gewählte Verfahrensprinzip und für die spezielle Werkzeugkonstruktion konnten Zwischenteile mit einer Randhöhe von bis zu 30 mm verwendet werden. Der maximale Nachschiebeweg ist auf 25 mm begrenzt worden, um einen Kontakt von Niederhalter und Stauchring zu vermeiden (Bild 5-2). Die sich einstellenden Napfhöhen sind für vier Nachschiebewege an den durch TNWW hergestellten Werkstücken gemessen worden (siehe **Bild 6-34**, Werkstoff QStE 340).

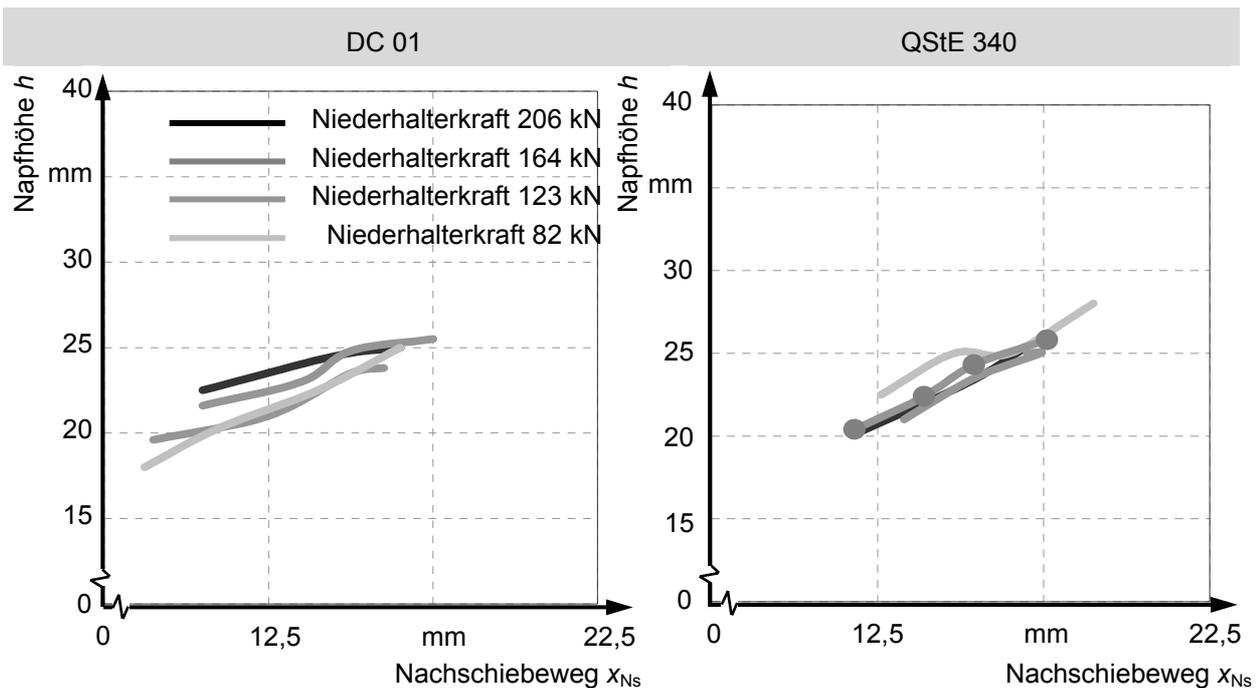


Bild 6-34: Napfhöhen beim TNWW. (Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3)

Die sich einstellenden Napfhöhen sind in Abhängigkeit vom Nachschiebeweg und von der Niederhalterkraft für den Werkstoff DC 01 und den Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke von 2 mm beim Nachschiebe-Ziehverhältnis von 3,3 in Bild 6-34 dargestellt. **Bild 6-35** zeigt die erreichbaren Napfhöhen für den Werkstoff AlMg 3 und den Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 4 mm bei einem Nachschiebe-Ziehverhältnis von 3,9.

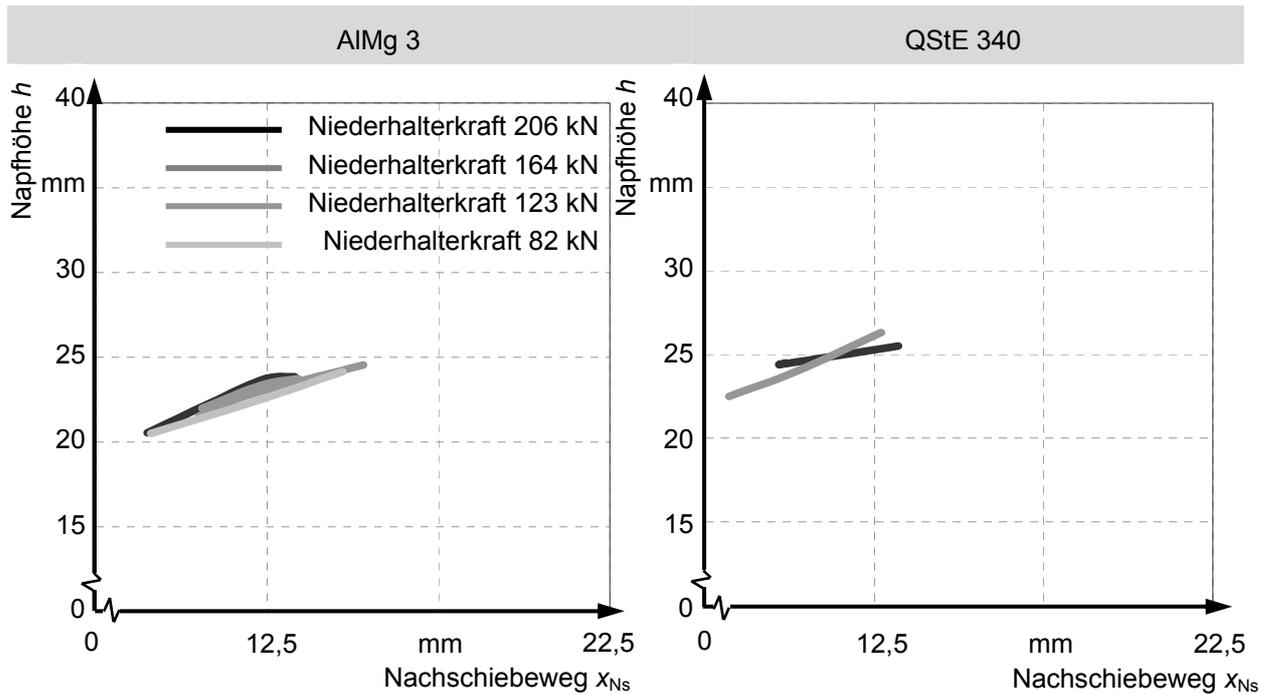


Bild 6-35: Napfhöhen beim TNWW. (Blechdicke: 4 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,9)

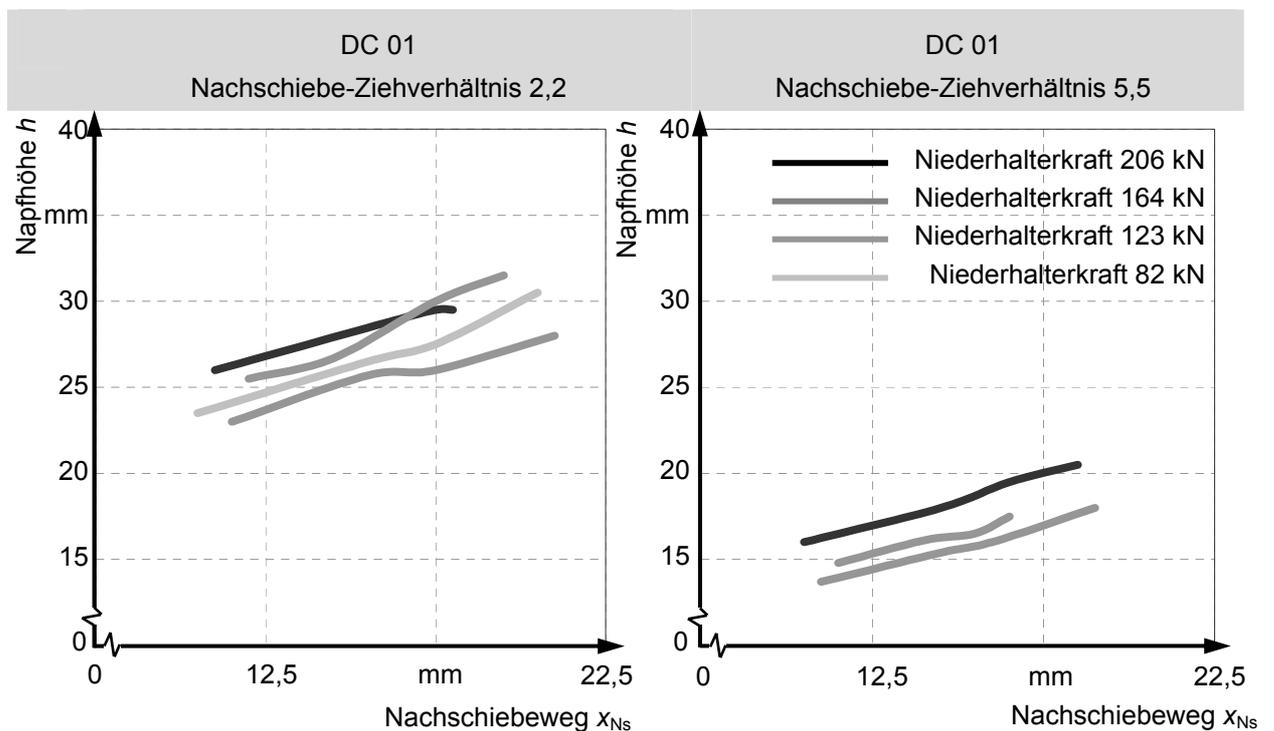


Bild 6-36: Napfhöhen beim TNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm)

Auch das Nachschiebe-Ziehverhältnis hat einen Einfluss auf die Napfhöhen. Bei größeren Nachschiebe-Ziehverhältnissen sind die sich einstellenden Napfhöhen geringer als bei kleineren Nachschiebe-Ziehverhältnissen (**Bild 6-36**). Dies resultiert daraus, dass bei größeren Nachschiebe-Ziehverhältnissen nicht mehr so viel Material in das Formelement eingebracht werden kann, als das bei kleineren Nachschiebe-

Ziehverhältnissen möglich ist. Der Einfluss der Niederhalterkraft auf die sich beim TNWW einstellenden Napfhöhen ist nicht signifikant.

6.5.3 Verlauf der Härte

Mikrohärtemessungen erlauben es, zerstörungsfrei, indirekt über die erfasste Härteverteilung, Aussagen zu den Festigkeitseigenschaften der hergestellten Werkstücke treffen und somit die örtlichen Änderungen der stofflichen Eigenschaften charakterisieren zu können. Wird das Material während der Umformung verfestigt, steigt die Härte des hergestellten Werkstücks an. Aussagen bezüglich der Art der Beanspruchungen des Werkstoffes lassen sich jedoch aus dem Verlauf der Härte nicht ableiten. Aufbauend auf den ermittelten Härteverteilungen lassen sich Optimierungen des Umformvorgangs und des Umformwerkzeuges im Hinblick auf eine gleichmäßigere Verteilung der Festigkeitseigenschaften durchführen.

Zur Beschreibung der stofflichen Eigenschaften des Werkstücks ist für das Verfahren TNWW an den Ausgangsteilen, Zwischen- und Endteilen die Härte nach Vickers (HV2) bestimmt worden. Dafür werden die Proben in einer Matrix aus einem schnellhärtenden Kalteinbettmittel fixiert, anschließend geschliffen und poliert. Mit dem Verfahren nach Vickers (HV2) wurde in einem Abstand von 5 mm die Härte ausgehend vom Rand in Richtung des Formelementes im Flansch ermittelt (**Bild 6-37**). Ab dem Übergang vom Flansch in die Zarge ist der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten der Härtemessung auf 2,5 mm verringert worden. Im Ziehteilboden beträgt der Abstand der einzelnen Messpunkte wieder 5 mm.

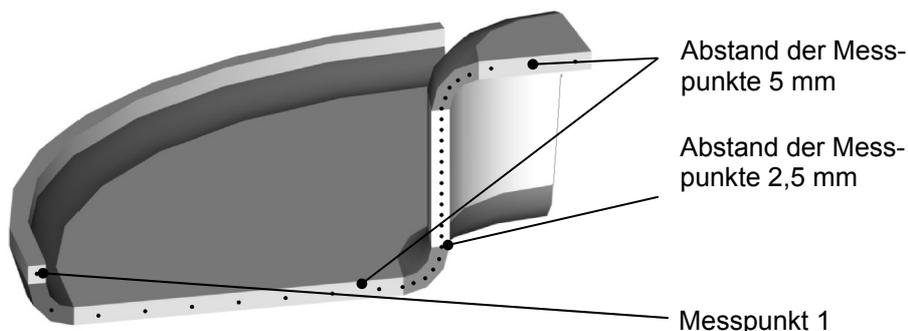


Bild 6-37: Abstand der Messpunkte bei der Bestimmung der Härte.

Einen typischen Verlauf der Härte über den Querschnitt für ein Werkstück, welches durch TNWW hergestellt wurde, zeigt **Bild 6-38**. Deutlich ist zu erkennen, dass die Härte im Flansch des Werkstücks nahezu gleichmäßig zunimmt. Der Maximalwert der Härte befindet sich entsprechend der starken axialen Stauchung des Materials immer im Rand des Werkstücks. Ein weiteres Maximum der Härte befindet sich am Übergang zwischen Flansch und Zarge. In der Zarge verringert sich die Härte und nähert sich im Napfboden dem Wert der Ausgangshärte an.

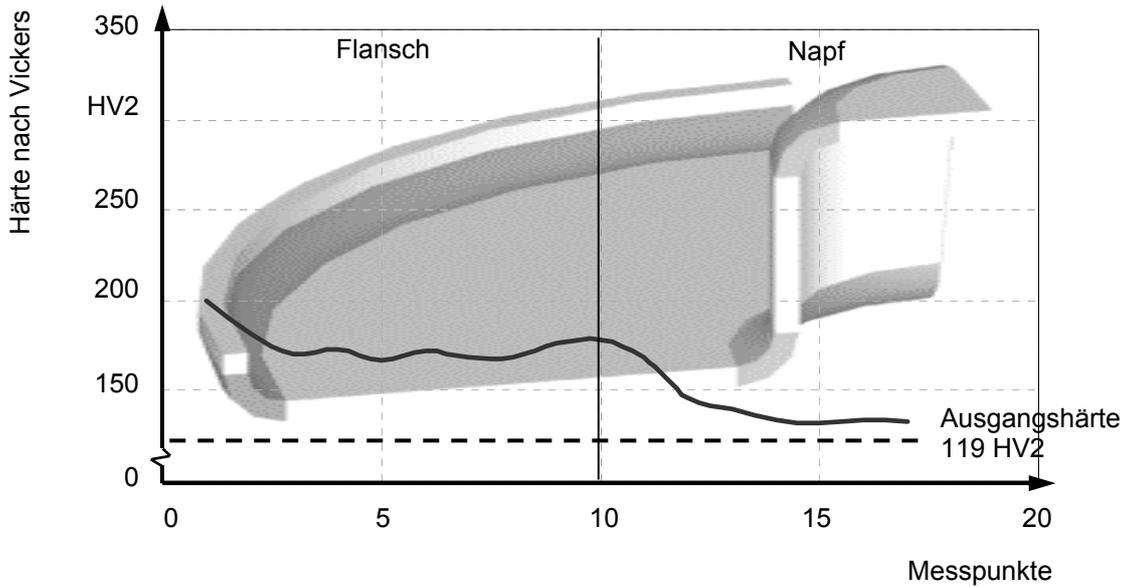


Bild 6-38: Härteverteilung (Abwicklung) beim TNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN, Nachschiebeweg: 17,5 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3)

Dieser Verlauf der Härte spiegelt den Verlauf der ermittelten Formänderungen wieder. Gemäß Abschnitt 6.2 weisen die tangentialen und radialen Formänderungen am Übergang vom Flansch zur Zarge ein Maximum auf. In der Zarge nehmen die tangentialen, radialen und normalen Formänderungen in Richtung des Napfbodens ab.

Bild 6-39 zeigt die Verteilung der Härte bei einem Nachschiebe-Ziehverhältnis von 3,3 für den höherfesten Werkstoff QStE 340 und den Werkstoff DC 01 mit der Blechdicke 2 mm. Der Unterschied bei verschiedenen untersuchten Niederhalterkräften ist nicht signifikant.

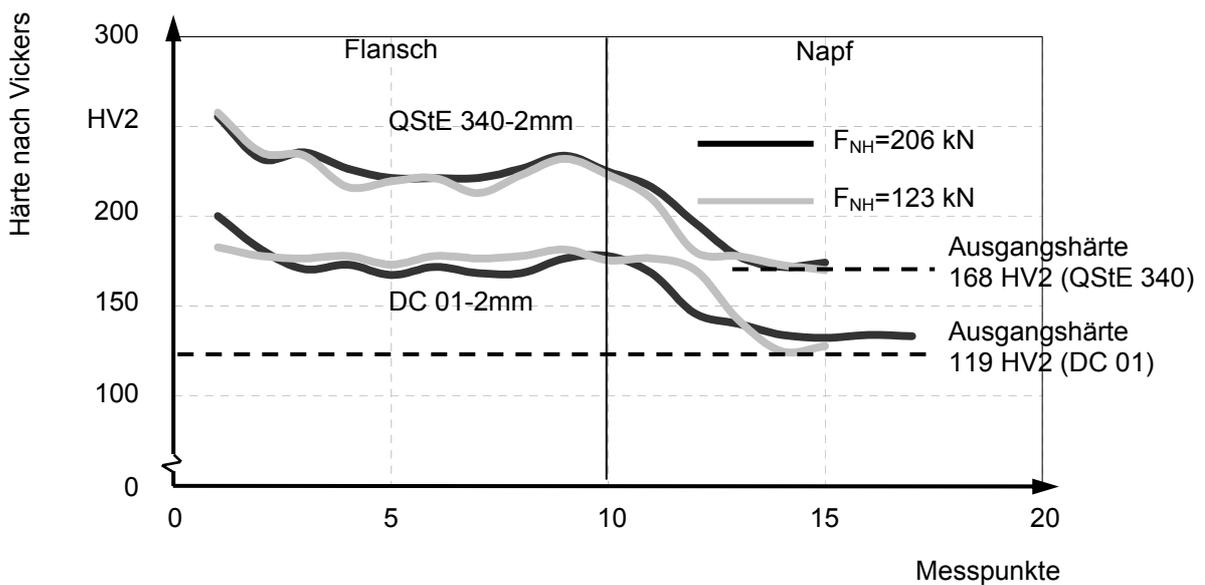


Bild 6-39: Härteverteilung (Abwicklung) beim TNWW. (Nachschiebeweg: 17,5 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3)

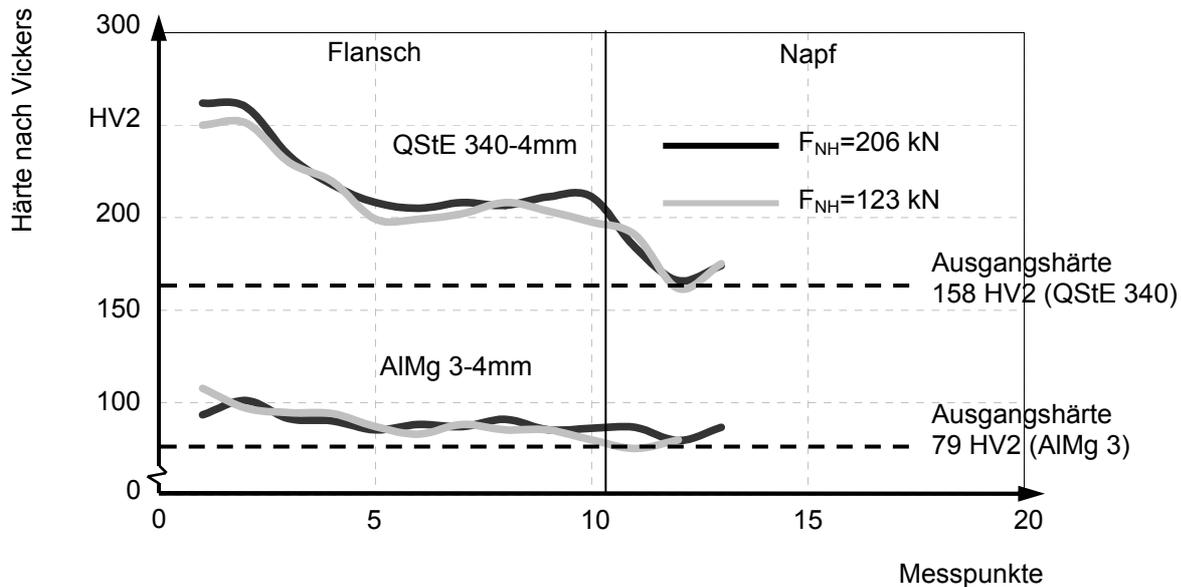


Bild 6-40: Härteverteilung (Abwicklung) beim TNWW. (Nachschiebeweg: 17,5 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,9)

Die Veränderung der Härtewerte bei dem Werkstoff AlMg 3 ist nicht so ausgeprägt wie bei den Werkstoffen DC 01 und QStE 340. Einen Vergleich der Härteverteilung bei einem Nachschiebe-Ziehverhältnis von 3,9 für die Blechdicke 4 mm zeigt **Bild 6-40**. Typisch für den Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 4 mm ist die starke Zunahme der Härte im Rand des durch TNWW hergestellten Werkstücks. Bedingt wird diese Zunahme der Härte durch die überproportionale Stauchung des Werkstoffs in dieser Zone, verursacht durch das Ausweichen der Armierung und die damit verbundene Zunahme des Spaltes zwischen Ziehring und Armierung.

6.6 Prozesssimulation

6.6.1 Vorbemerkungen

Experimentelle Untersuchungen zur technologischen Determinierung eines Verfahrensprinzips und zur Bestimmung der charakteristischen Verfahrensgrenzen sind in vielen Fällen mit einem hohen technischen, zeitlichen, personellen und somit finanziellen Aufwand verbunden. Zudem können bei vielen experimentellen Untersuchungen die verfahrensrelevanten Parameter nur in einem engen Parameterbereich variiert werden. Bedingt durch das Umformprinzip können bei den Verfahren des Tiefziehens ohne erheblichen technischen Aufwand weder Einblick in den Umformvorgang genommen werden, noch Messungen in der unmittelbaren Umformzone online durchgeführt werden, so dass der Umformvorgang nur für ausgewählte Beispielfälle visualisiert werden könnte.

Mit der Methode der Finiten Elemente hat sich in der Blechbearbeitung ein wesentliches Werkzeug zur Vorausberechnung von Umformparametern und –grenzen unter realitätsnaher Berücksichtigung wesentlicher Stoff- und Vorgangsbedingungen

durchgesetzt. Somit können die Machbarkeit und Prozesssicherheit einer gewählten Verfahrensvariante numerisch nachgewiesen werden, der Verfahrensablauf visualisiert und Aussagen über das Materialverhalten, das Versagen der Bauteile sowie über die Prozess- und Endteileigenschaften der Bauteile getroffen werden. Spezielle FE-Programme zur Simulation von Umformprozessen, wie z.B. PAM-STAMPTM, AutoForm[®], LS-DYNATM u.a., haben einen sehr hohen Entwicklungsstand erreicht /113 bis 118/.

Bei den durchgeführten experimentellen Untersuchungen zum TNWW konnten die Verfahrensparameter Niederhalterkraft und Nachschiebeweg, aufgrund des gewählten Werkzeugkonzeptes, nur in einem eingeschränkten Bereich ($F_{NHmin} = 82 \text{ kN}$, $F_{NHmax} = 206 \text{ kN}$) variiert werden. Somit ist auch für das TNWW die Analyse des Umformvorganges in Abhängigkeit von ausgewählten, erweiterten Verfahrensparametern mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente von besonderem Interesse, um weitere Umformbedingungen untersuchen und die Aussagekraft der Ergebnisse ausdehnen zu können.

Die korrekte Beschreibung des Werkstoffverhaltens, des Prozessablaufs und der Reibvorgänge zwischen Werkstück und Werkzeug ist ein maßgebliches Qualitätskriterium bei der Simulation eines Umformprozesses, wobei bei der Beschreibung des realen Werkstoffverhaltens und der realen Reibvorgänge weiterhin Forschungsbedarf besteht. Durch eine Prüfung der Ausgangseigenschaften (Abschnitt 5.2) wurden wichtige qualitative und quantitative Basisinformationen vorab experimentell ermittelt (mechanische Kennwerte, Fließkurve) und fließen mit dem Ziel einer praxisnahen FE-Simulation in die FE-Modellbildung ein. Das Werkzeug wird als starr angenommen und benötigt demnach keine Werkstoffdaten.

Die bei der Simulation verwendeten Lastpfade vom Ziehweg und Nachschiebeweg entsprechen den Lastpfaden, die im Experiment verwendet wurden. Für die Simulation des TNWW wurde das Programmpaket PAM-STAMPTM benutzt. PAM-STAMPTM ist ein auf die Blechumformung spezialisiertes FE-Programm, welches nach einem expliziten Verfahren arbeitet. Das verwendete Schalenelement vom Materialtyp 107 berücksichtigt das Fließkriterium nach Hill /119/. Trotz der sich zeitlich und örtlich beim TNWW verändernden tribologischen Bedingungen ist die Beschreibung der Reibungsverhältnisse über konstante Reibwerte hinreichend genau. Für alle Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück wurde Coulomb'sche Reibung mit einem konstanten Reibwert von 0,12 in Anlehnung an /120, 121, 122/ angenommen.

6.6.2 Verifizierung des FE-Modells

Ergebnisse, die mit Hilfe von numerischen Verfahren ermittelt werden, sind Näherungen und müssen aus diesem Grund stets sorgfältig auf vorhandene Fehler kontrolliert werden. Eine Überprüfung der numerisch ermittelten Ergebnisse kann auf analytischem Wege geschehen. Ebenso ist eine Kontrollrechnung mit vereinfachten und so analytisch überprüfbareren FE-Modellen oder eine Berechnung nach verschiedenen Verfahren mit unterschiedlichen Rechenprogrammen denkbar. Die verläss-

lichste aber auch aufwändigste Kontrolle, um die numerisch ermittelten Resultate zu verifizieren, bieten experimentelle Untersuchungen.

Um einen Vergleich zwischen den Ergebnisse der Prozesssimulation und den experimentellen Untersuchungen vornehmen zu können, ist es notwendig, nicht nur das TNWW sondern die komplette Fertigungsfolge (Bild 5-3) einschließlich der Herstellung der Zwischenform numerisch zu betrachten. Die Simulationsergebnisse (Blechdicke, Spannungswerte, Dehnungswerte) des konventionellen Tiefziehens zur Herstellung der Zwischenform werden als Initialdaten für die Simulation des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss verwendet.

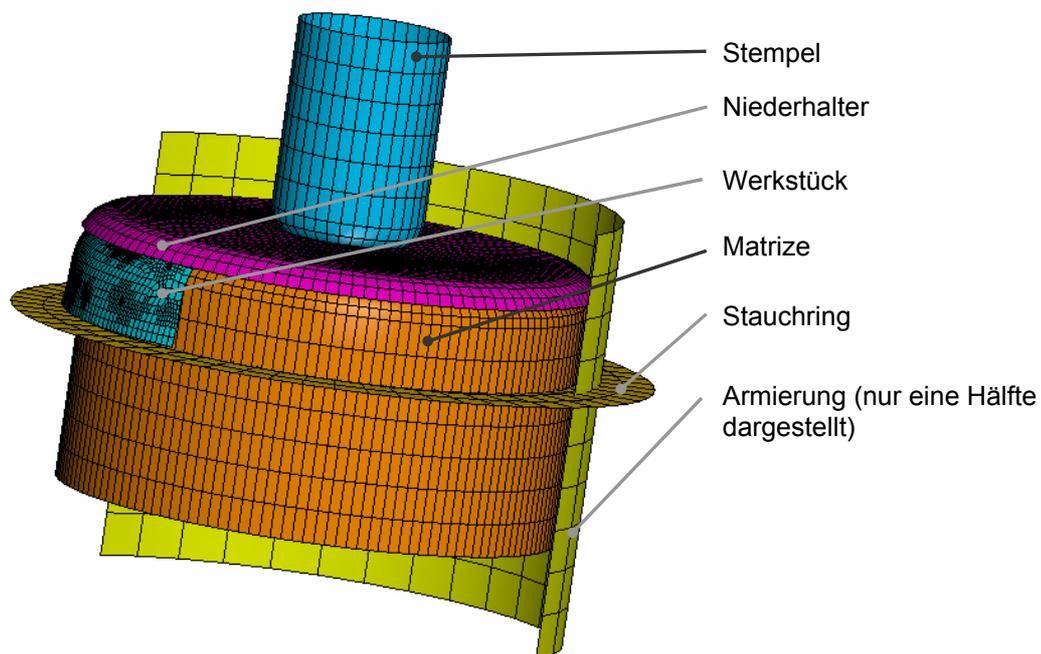


Bild 6-41: FE-Modell für das TNWW.

Ausgehend von den CAD-Daten des Versuchswerkzeugs für den Stempeldurchmesser 36 mm ist das FE-Modell (**Bild 6-41**) für den Werkstoff DC 01 mit der Blechdicke 2 mm für das TNWW erzeugt worden. Die Niederhalterkraft beträgt 206 kN und der Rand des Werkstücks wurde 20 mm nachgeschoben. Durch die gegebene Symmetrie des Werkstücks konnten sowohl die Rechenzeit als auch der benötigte Speicherplatz reduziert werden, indem nur mit einem Viertel des gesamten Werkstücks gerechnet wurde. Um die Genauigkeit dieses erstellten und angewendeten FE-Modells beurteilen zu können, sind die numerisch ermittelten Werte der Formänderungen, der Blechdicke und der Kräfte mit den experimentell ermittelten Werten verglichen worden.

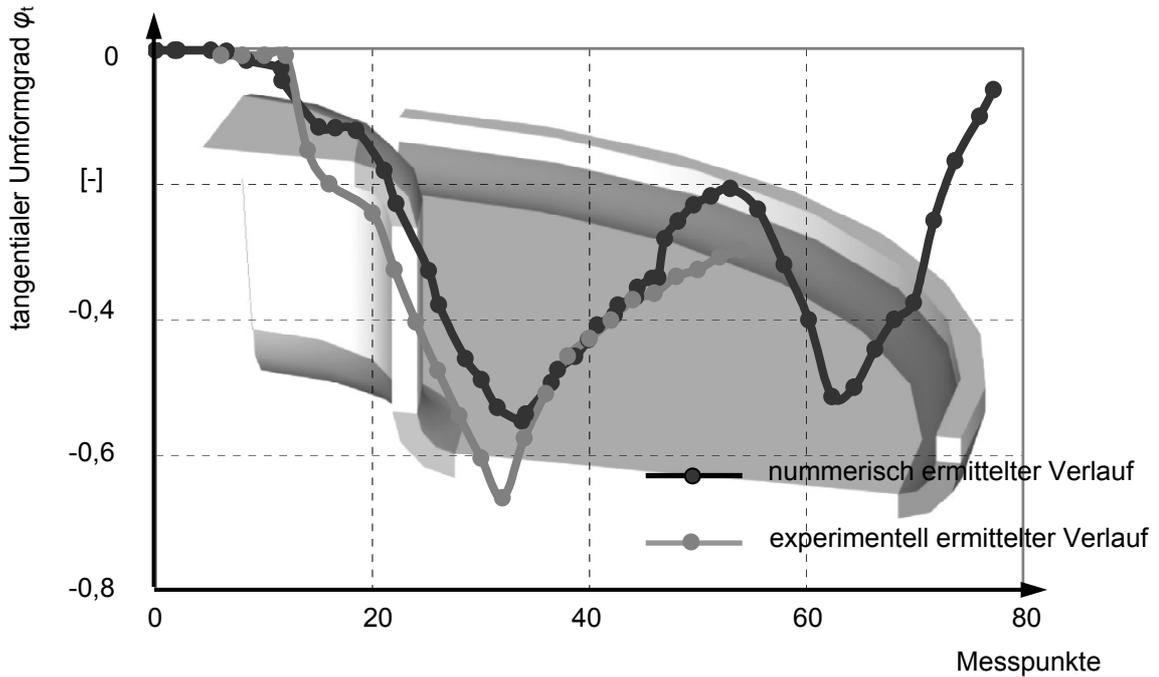


Bild 6-42: Numerisch und exp. ermittelter tangentialer Umformgrad (Abwicklung).
 (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN)

Das **Bild 6-42** zeigt den Vergleich zwischen den experimentell und numerisch ermittelten Werten des tangentialen Umformgrades φ_t . Beide Verläufe besitzen ein Maximum am Übergang zwischen Zarge und Flansch des Werkstücks. Aufgrund der Zunahme der Blechdicke im Flansch in Richtung des Werkstückrandes und infolge des Werkstoffflusses vom Werkstückrand in Richtung des sich ausbildenden Formelementes ist das auf das Werkstück elektrolytisch aufgebraute Messraster am Rand des Werkstücks nicht mehr auswertbar. Der Verlauf des numerisch ermittelten tangentialen Umformgrades kann aufgrund des nicht auswertbaren Messrasters am Werkstückrand nicht mit dem experimentell ermittelten Verlauf verglichen werden.

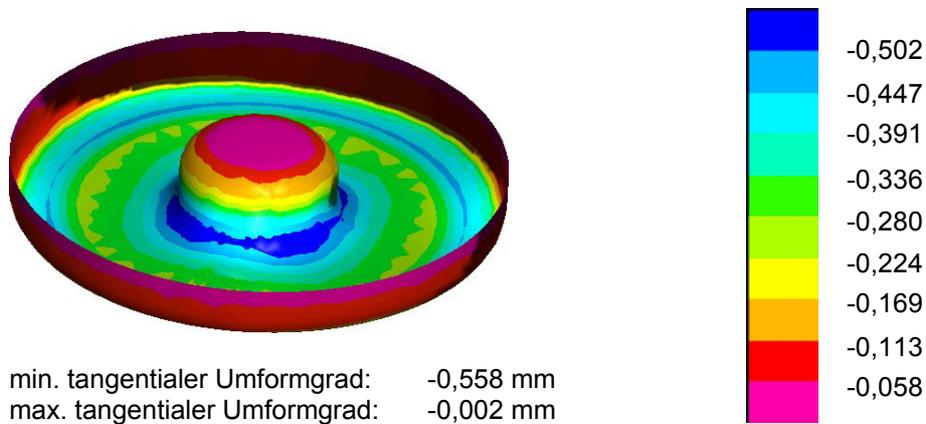


Bild 6-43: Numerisch ermittelter tangentialer Umformgrad beim TNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN, Nachschiebeweg: 20 mm)

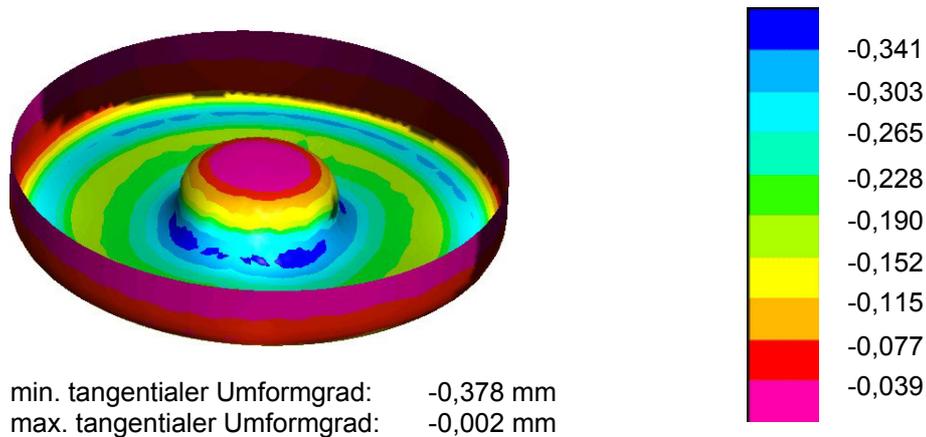


Bild 6-44: Numerisch ermittelter tangentialer Umformgrad beim TNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN, Nachschiebeweg: 10 mm)

Bild 6-43 und **Bild 6-44** zeigen den numerisch ermittelten tangentialen Umformgrad für das gesamte Werkstück beim TNWW für unterschiedliche Nachschiebewege.

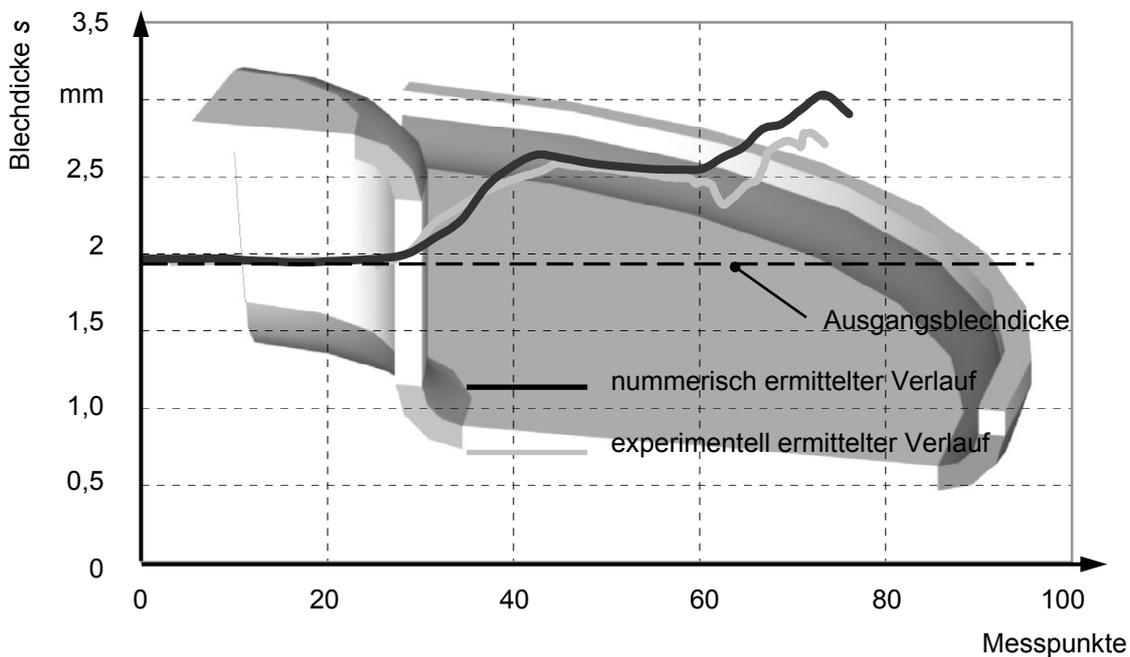


Bild 6-45: Numerisch und exp. ermittelte Blechdicke beim TNWW (Abwicklung). (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN)

Im **Bild 6-45** sind der experimentell und numerisch ermittelte Verlauf der Blechdicke vergleichend dargestellt. Der numerisch ermittelte Verlauf der Blechdicke im Ziehteilboden, in der Zarge und im Flansch des Werkstücks stimmt mit den an Realteilen gemessenen Werten gut überein. In der Zone der Doppelbiegung des Materi-

als am Ziehringradius weichen die mit Hilfe der FEM ermittelten Werte für die Blechdicke von den experimentell ermittelten Werten der Blechdicke ab. **Bild 6-46** zeigt die numerisch ermittelte Blechdicke für das gesamte Werkstück beim TNWW.

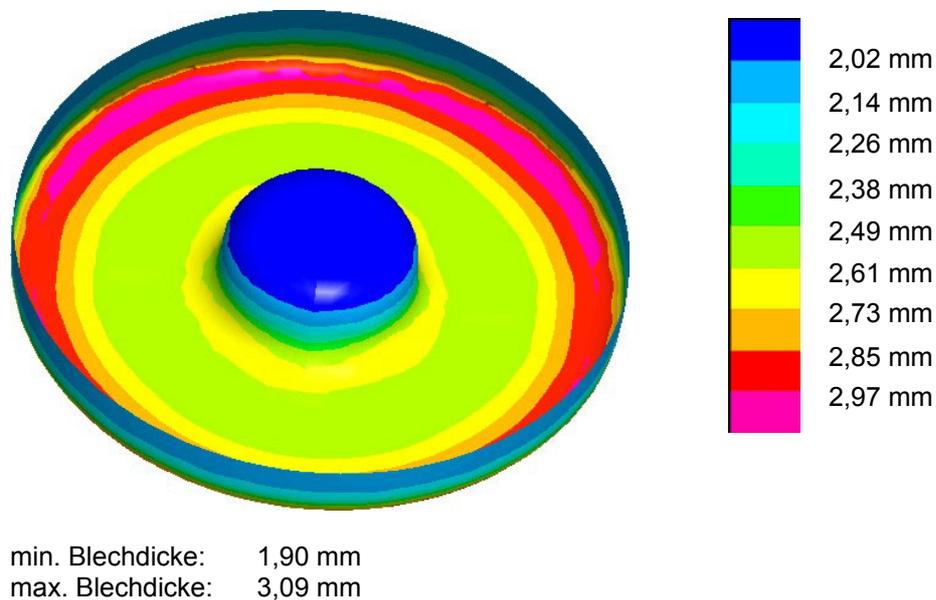


Bild 6-46: Numerisch ermittelte Blechdicke beim TNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN)

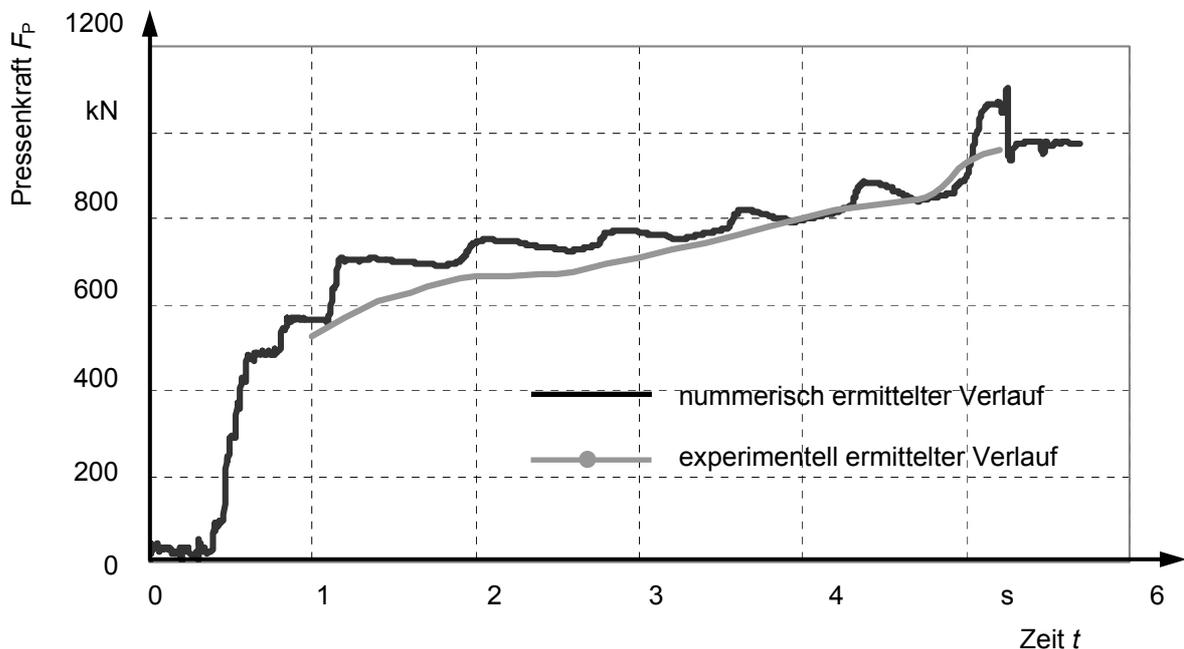


Bild 6-47: Verlauf der Pressenkraft. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN)

Wegen der guten Übereinstimmung der experimentell und numerisch ermittelten Verläufe für den tangentialen Umformgrad, die Blechdicke und den Verlauf der Pressenkraft (**Bild 6-47**) kann davon ausgegangen werden, dass das aufgestellte FE-Modell zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstoff-

fluss eine ausreichende Genauigkeit besitzt, um nun mit diesem verifizierten FE-Modell weitere Verfahrensparameter variieren und somit zusätzliche Verbesserungspotenziale ohne aufwändige zusätzliche experimentelle Untersuchungen aufzeigen zu können.

6.6.3 Numerische Ermittlung der Verfahrensgrenzen

Nachdem gezeigt werden konnte, dass das FE-Modell den Prozess und die erreichbaren Endteileigenschaften hinreichend genau abbilden kann, können die Verfahrensparameter Nachschiebeweg und Niederhalterkraft variiert werden, die aufgrund des ausgewählten Werkzeugaufbaus nur in den Grenzen (Nachschiebeweg $x_{Ns} \leq 25\text{mm}$; Niederhalterkraft $F_{NH} \leq 206\text{ kN}$) experimentell untersucht werden konnten.

Durch das exakte Einhalten der vorgegebenen Werte für den Nachschiebeweg konnte der Einfluss des Nachschiebeweges auf die erreichbaren Verfahrensgrenzen wesentlich genauer als in den experimentellen Untersuchungen untersucht und somit der theoretisch vorausgesagte Einfluss des Nachschiebeweges auf die erreichbaren Verfahrensgrenzen deutlicher herausgestellt werden. **Bild 6-48** zeigt das mit Hilfe der Simulation ermittelte Verfahrensfenster beim Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss für unterschiedliche Nachschiebewege und Niederhalterkräften für den Werkstoff DC 01 mit der Blechdicke 2 mm bei einem Stempeldurchmesser von 36 mm (Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

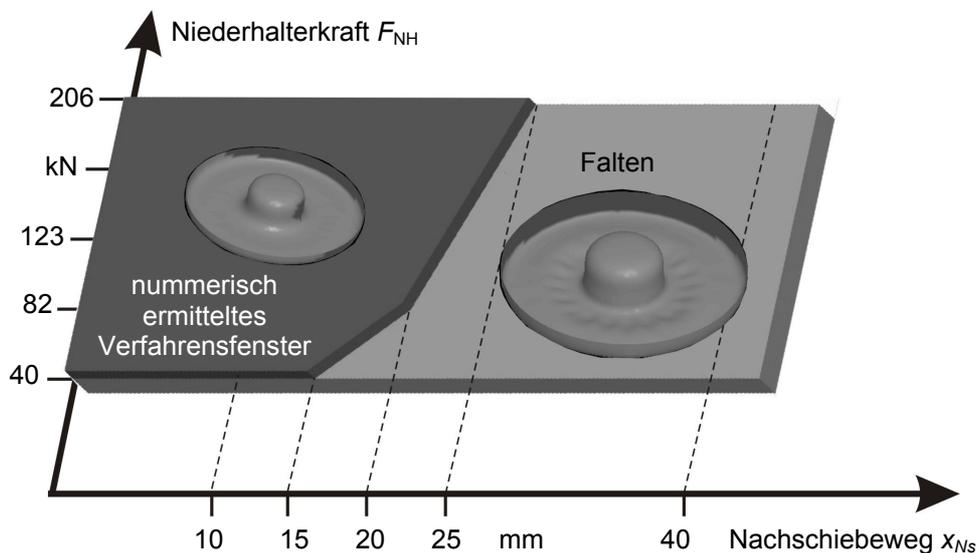


Bild 6-48: Einfluss des Nachschiebeweges auf die Verfahrensgrenzen beim TNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3)

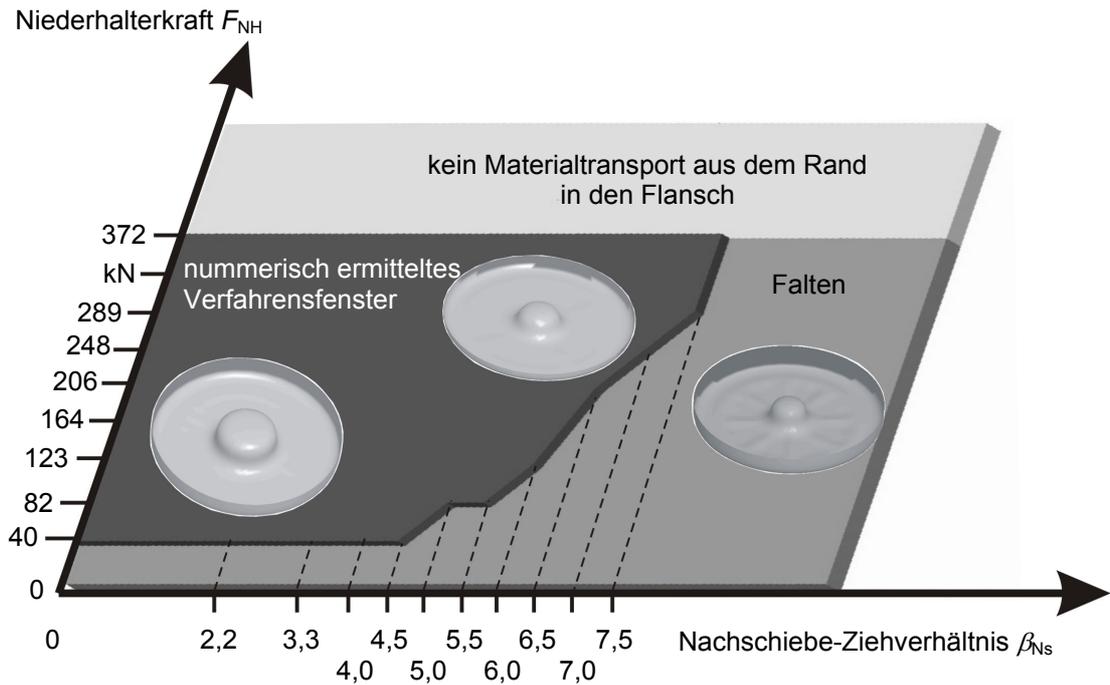


Bild 6-49: Numerisch ermittelte Verfahrensgrenzen beim TNWW.
(Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm)

Zusätzlich zum Einfluss des Nachschiebeweges auf die erreichbaren Verfahrensgrenzen wurde die Niederhalterkraft variiert, um das Verfahrensfenster des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss für Niederhalterkräfte größer 206 kN zu bestimmen. Bedingt durch den gewählten Werkzeugaufbau und der damit verbundenen maximalen Einbauhöhe für die Stickstoffedern konnte keine Niederhalterkraft größer als 206 kN (F_{NHmax}) experimentell untersucht werden. **Bild 6-49** zeigt das numerisch ermittelte Verfahrensfenster für das TNWW bei einem Nachschiebeweg von 15 mm. Demnach können durch das TNWW auch Formelemente bei einem Nachschiebe-Ziehverhältnis von 7,5 bei entsprechend hohen Niederhalterkräften geformt werden, ohne dass der Hauptversagensfall der Faltenbildung im Flansch des Werkstücks auftritt. Ab einer Niederhalterkraft größer als 372 kN kann aufgrund der großen Reibkräfte zwischen Niederhalter und Werkstück sowie zwischen Werkstück und Ziehring kein Material aus dem Rand in den Flansch transportiert werden. Somit wird durch das Nachschieben von Werkstoff nur der Rand des Werkstücks am Übergang zwischen Rand und Flansch (**Bild 6-50**) stark gestaucht und die obere Grenze des Verfahrensfensters beim TNWW ist erreicht. Das Formelement im Zentrum des Werkstücks kann ohne den Werkstofffluss im Flansch nicht mehr ausgeformt werden.

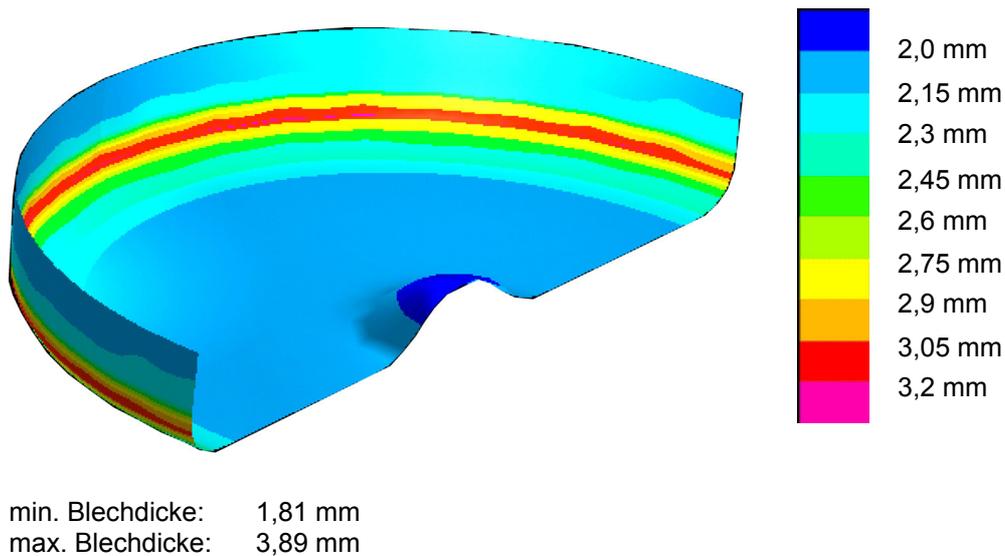


Bild 6-50: Numerisch ermittelte Blechdicke beim TNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 6,5; Niederhalterkraft: 372 kN)

6.7 Resümee

Durch das TNWW können umformtechnisch Werkstücke hergestellt werden, bei denen der Durchmesser des napfförmigen Formelementes (**Bild 6-51**) klein ist im Verhältnis zum Außendurchmesser der scheibenförmigen Grundgeometrie.

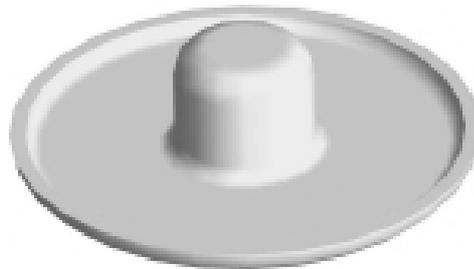


Bild 6-51: Scheibenförmiger Grundkörper mit napfförmigem Formelement.

Das zusätzliche Einbringen einer Kraft in den Flansch des Werkstücks durch das Nachschieben von Werkstoff bewirkt eine Entlastung der Kraftübertragungszone in der Zarge. Bei einem verfahrensentsprechenden Verhältnis von Ziehgeschwindigkeit zur Nachschiebegeschwindigkeit kann der Versagensfall des Bodenreißers vollständig vermieden werden. Der Hauptversagensfall beim TNWW ist vielmehr das Eintreten einer Instabilität in Form von Falten im Flansch. Falten entstehen dann, wenn die tangentialen Spannungen einen Grenzwert für das Knicken /21, 22/ überschreiten und die Stabilität des Flansches nicht mehr gegeben ist. In dem experimentell untersuchten Parameterbereich der Niederhalterkraft (86 kN bis 206 kN) konnten bei entsprechend hohen Niederhalterkräften (206 kN) für 2 mm dicke Ausgangsteile Nachschiebe-Ziehverhältnisse (Verhältnis des Flanschdurchmessers zum Stempeldurch-

messer) von 5,5 und für die Ausgangsteile mit der Blechdicke 4 mm Nachschiebe-Ziehverhältnisse von 7,3 erzielt werden. Somit steigert sich das mögliche Ziehverhältnis beim TNWW um 250% (Blechdicke 2,2) bzw. 330% (Blechdicke 4mm) gegenüber dem konventionellen Tiefziehen.

Bedingt durch die Werkstoffbeanspruchung beim TNWW, weisen die hergestellten Werkstücke charakteristische Wanddickenverläufe auf, die sich von den Wanddickenverläufen an Werkstücken unterscheiden, welche durch konventionelles Tiefziehen hergestellt wurden. Charakteristisch ist eine Zunahme der Blechdicke im Flansch des Werkstücks. Eine Blechdickenverringerung am Übergang vom Ziehteilboden zur Zarge wird durch das neuartige Verfahrensprinzip vermieden, da die Kraftübertragungszone entlastet wird und zu Beginn des Umformvorgangs kein ausgesprochener Streckziehvorgang in der Zone des entstehenden Formelementes, wie beim konventionellen Tiefziehen, vorliegt.

Näherungsweise kann für eine praktische Anwendung die für den Umformvorgang benötigte Pressenkraft aus dem 1,5fachen der nach Gleichung (22) berechenbaren ideellen Umformkraft F_{id} , addiert mit dem Betrag der, für eine faltenfreie Werkstück minimal notwendigen Niederhalterkraft F_{NH} , ermittelt werden.

Das für die numerische Simulation des TNWW generierte und verwendete FE-Modell liefert Aussagen über die erreichbaren Verfahrensgrenzen und die sich einstellenden Endteileigenschaften. Diese Aussagen stimmen mit den experimentell bestimmten Verfahrensgrenzen und Endteileigenschaften gut überein. Mit Hilfe der FE-Prozesssimulation konnten die Verfahrensparameter Nachschiebeweg und Niederhalterkraft in einem breiteren Spektrum untersucht werden, um weitere vorhandene Verbesserungspotenziale beim Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss aufzuzeigen.

Zur Fertigung von nabenförmigen Formelementen an scheibenförmigen Dickblechteilen (**Bild 6-52**), die im Verhältnis zur Grundgeometrie kleine Durchmesser aufweisen, wird neben dem mehrstufigen Tiefziehen und einem anschließenden Lochen des Ziehteilbodens auch das konventionelle Kragenziehen eingesetzt. Sind die Durchmesser der herzustellenden Kragen klein, können durch das konventionelle Kragenziehen nur geringe Kragenhöhen erreicht werden, die in vielen Fällen funktionell nicht ausreichend sind.

Das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Verfahrensprinzip des Nachschiebens von Werkstoff ermöglicht nachweislich einen Werkstofffluss in Richtung des entstehenden Formelementes. Wird das Nachschieben von Werkstoff bei dem Verfahren des konventionellen Kragenziehens angewendet, kann dieser nachgewiesene Werkstofffluss die erreichbaren Kragenhöhen wesentlich erhöhen. Um Werkstücke mit nabenförmigen Formelementen und einer funktionell ausreichenden Formelementhöhe ohne anschließendes Lochen der durch Tiefziehen hergestellten Werkstücke fertigen zu können, bietet es sich an, das neuartige Verfahrensprinzip des Nachschiebens von Werkstoff weiterzuentwickeln und auf einen Kragenziehvorgang anzuwenden.

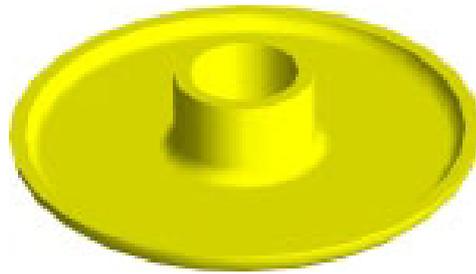


Bild 6-52: Scheibenförmiger Grundkörper mit nabenförmigem Formelement.

Somit können die beim TNWW gewonnenen Erkenntnisse auf eine ähnliche Fertigungsaufgabe zum Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (KNWW) übertragen werden. Für das KNWW werden die Voraussetzungen für eine wissenschaftlich fundierte Planung und Realisierung des neuartigen Verfahrens geschaffen. Das aus dem TNWW entwickelte KNWW wird technologisch determiniert, die Verbesserungspotenziale gegenüber dem konventionellen Kragenziehen über die erzielbaren Endteileigenschaften nachgewiesen und die Verfahrensgrenzen und –parameter ermittelt.

Im anschließenden Abschnitt sind die wesentlichen Untersuchungsergebnisse zum KNWW dargestellt.

7 Untersuchungsergebnisse: Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (KNWW)

7.1 Verfahrensprinzip KNWW

Aufbauend auf den Ergebnissen zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss wurde das Verfahrensprinzip des Nachschiebens von Werkstoff auch für einen Kragenziehvorgang angewendet und weiterentwickelt, um den beim TNWW nachgewiesenen Werkstofffluss im Flansch des Werkstücks für das Erzeugen von wesentlich höheren Nebenformelementen zu nutzen. Das Grundprinzip der weiterentwickelten Verfahrensvariante ist in **Bild 7-1** dargestellt.

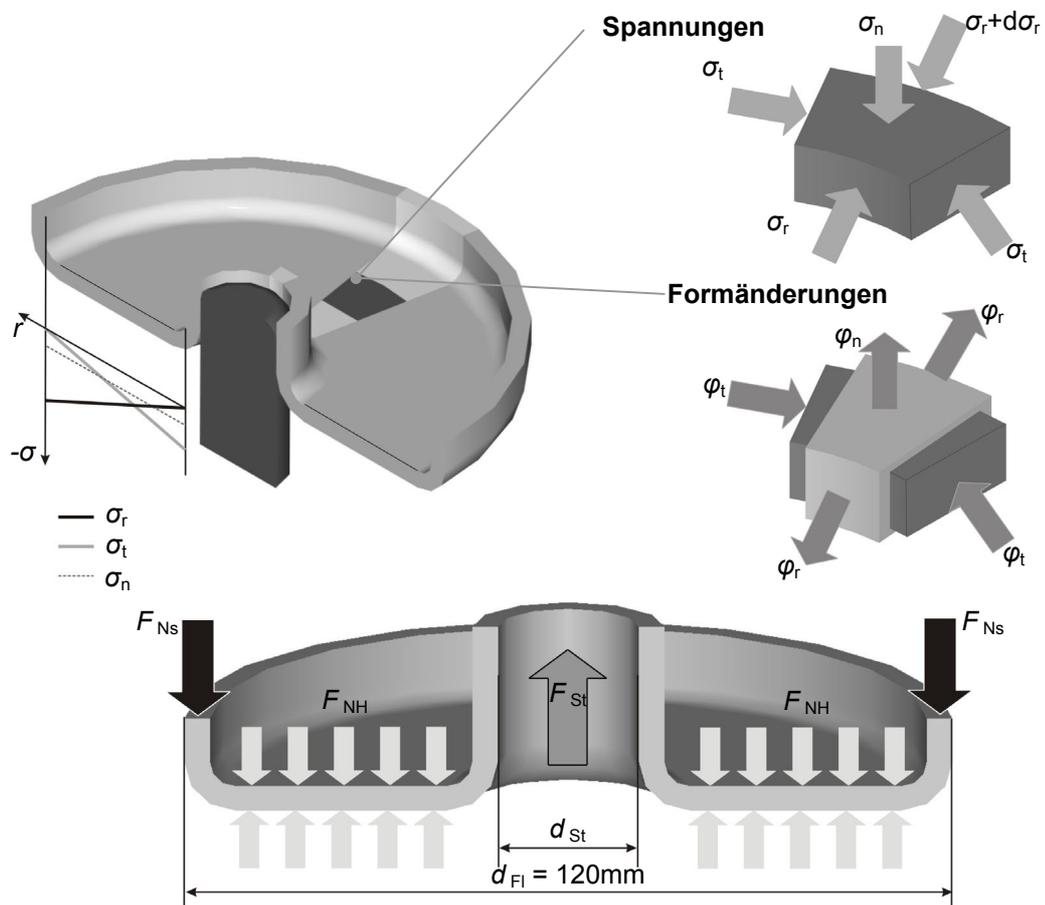


Bild 7-1: Grundprinzip beim KNWW.

Beim konventionellen Kragenziehen beschränkt sich der Umformvorgang überwiegend auf die Zone des entstehenden Formelementes. Dabei wird kein Material aus dem Flansch in das entstehende Formelement eingezogen. Die Höhe des herzustellenden Kragens wird daher durch das erreichbare Aufweitverhältnis begrenzt. Beim KNWW kann ein Materialfluss in Richtung des sich ausbildenden Kragens durch das Wirken einer radialen Druckspannung im Flansch erzeugt werden. Dieser Material-

fluss vergrößert die Kragenhöhe und die wirkenden Druckspannungen erhöhen das Aufweitverhältnis. Der Werkstoff darf hierbei nur in dem Maße nachgeschoben werden, wie die zum Aufweiten des Vorlochs notwendige Stempelkraft aufgebracht werden kann. Beim KNWW ergeben sich während des Umformvorganges im Werkstück die folgenden Beanspruchungszonen: Im Rand des Werkstücks findet eine axiale Stauchung des Werkstoffs statt. Im Flansch wird der Werkstoff, wie auch beim TNWW, tangential gestaucht sowie radial gestreckt und fließt in das entstehende Formelement. In normaler Richtung kommt es ebenfalls wie beim TNWW zu einer Zunahme der Blechdicke. Der Teil des Kragens, der durch das Aufweiten entsteht, erfährt unter einer tangentialer Zugbeanspruchung eine tangentielle Streckung.

Stempel- durchmesser	36 mm	30 mm	26 mm	24 mm	22 mm
Nachschiebe- Ziehverhältnis d_F/d_{St}	3,3	4,0	4,5	5,0	5,5

Kragenziehen



Bild 7-2: Vergleich konventionelles Kragenziehen - KNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm)

Die im Rahmen dieser Arbeit zum KNWW durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass beim Anwenden des neuen Verfahrensprinzips die erreichbaren Kragenhöhen vergrößert werden können (**Bild 7-2**). Die Begriffe Flansch, Rand und Kragen sind im **Bild 7-3** am Werkstück erläutert. Das Aufweitverhältnis beim KNWW wird als das Verhältnis k von Stempeldurchmesser d_{St} zum Vorlochdurchmesser d_{Kr0} definiert.

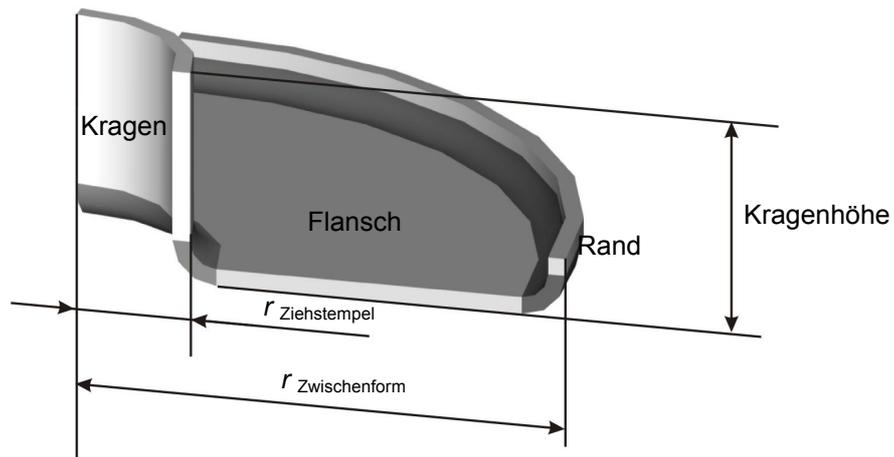


Bild 7-3: Begriffserklärung für das KNWW.

7.2 Formänderungen

Beim Verfahren KNWW liegen im Werkstück Formänderungen in tangentialer, radialer und normaler Richtung vor. Charakterisiert ist der Verlauf der Formänderung dadurch, dass es infolge des Nachschiebens im Flansch des Ziehteils zu einer tangentialen Stauchung kommt, die am Übergang vom Flansch zum Kragen ihr Maximum erreicht.

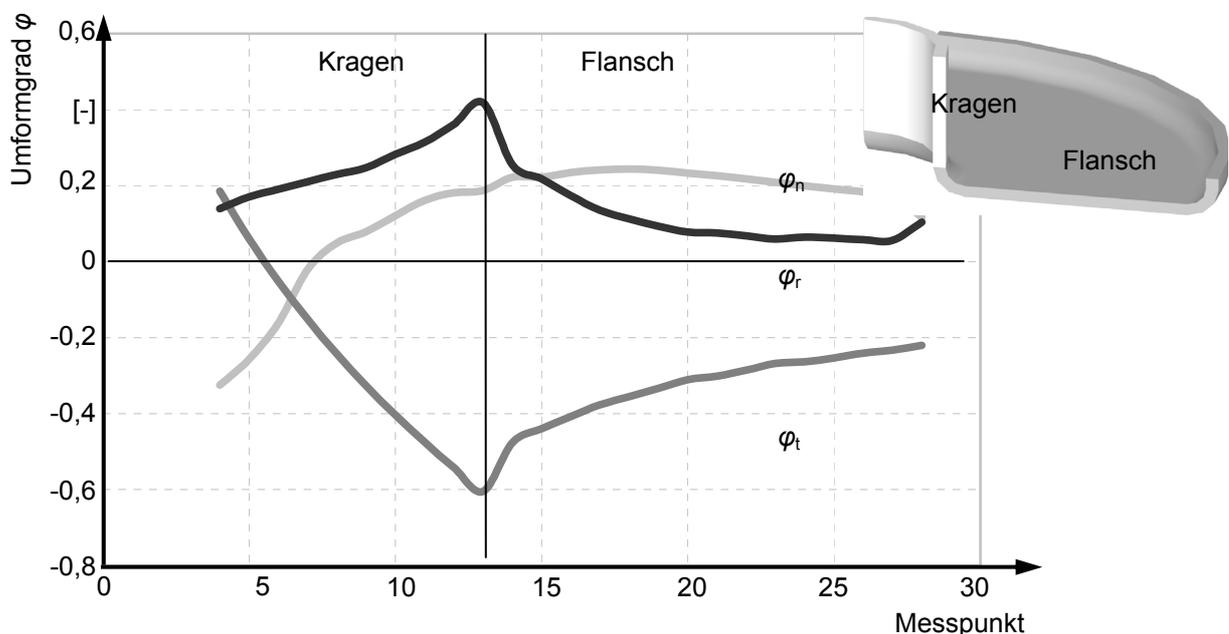


Bild 7-4: Formänderungsverlauf (Abwicklung) beim KNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft: 206 kN; Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

Infolge der tangentialen Stauchung wird der Werkstoff im Flansch überwiegend radial gestreckt. Der radiale Umformgrad erreicht am Übergang zum Kragen seinen Maxi-

malwert. Die radiale Streckung wird in Richtung zum Flanschrand durch eine stattfindende Materialstauchung verringert, die durch das Nachschieben von Werkstoff hervorgerufen wird. Mit Zunahme des Nachschiebe-Ziehverhältnisses ($\beta_{Ns} > 3,3$) gehen die radialen Dehnungen am Flanschrand in radiale Stauchungen über. Aufgrund der genannten Beanspruchungen kommt es zu einer relativ gleichmäßigen Aufdickung des Werkstoffes im Flansch. Innerhalb des Kragens gehen die tangentialen Stauchungen zum Rand des Kragens hin in tangentielle Dehnungen über. Die vorliegende Blechdickenzunahme am Fuß des Kragens verringert sich in Richtung des Kragensrandes infolge des Aufweitvorganges unter den Wert der Ausgangsblechdicke. Einen typischen Verlauf der experimentell ermittelten Umformgrade beim KNWW zeigt **Bild 7-4**. Das Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss stellt sich gemäß der auftretenden Formänderungen als eine Kombination von konventionellem Kragenziehen (Aufweiten des Vorlochs) und Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss dar (Formänderungen im Flansch). Die Formänderungen sind an einzelnen Messpunkten, welche einen Abstand von 2 mm haben, über den Querschnitt des Werkstücks ermittelt worden. An Werkstücken, die durch KNWW gefertigt wurden, liegt der 1. Messpunkt am Kragensrand.

Den Einfluss des Nachschiebeweges auf den Verlauf der Formänderungen im Flansch des Werkstücks beim KNWW zeigt **Bild 7-5a**. Mit zunehmendem Nachschiebeweg vergrößert sich die infolge des Nachschiebens auftretende tangentielle Stauchung im Flansch des Werkstücks wie auch beim TNWW. Dies bedeutet, dass mit zunehmendem Nachschiebeweg die Neigung zur Bildung von Falten zunimmt. Dieser Versagensfall wird beim KNWW bei größeren Nachschiebewegen verstärkt auftreten. Der Einfluss der Niederhalterkraft auf den Verlauf der Formänderungen im Flansch des Werkstücks ist nicht signifikant (**Bild 7-5b**). Auch beim Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss hat das Nachschiebe-Ziehverhältnis einen deutlichen Einfluss auf die radialen Formänderungen. Vergleichbar zum TNWW gehen die radialen Dehnungen am Flanschrand mit zunehmenden Nachschiebe-Ziehverhältnissen in radiale Stauchungen über. Die Zone, in denen radiale Stauchungen vorliegen, vergrößert sich mit zunehmenden Nachschiebe-Ziehverhältnissen ausgehend vom Rand des Flansches in Richtung des sich ausbildenden Formelementes. Bei den Werkstücken mit der Blechdicke 2 mm und 4 mm liegen beim KNWW vergleichbare Verläufe der Formänderungen vor. Radiale Stauchungen treten bei Werkstücken mit der Blechdicke 4 mm schon bei Nachschiebe-Ziehverhältnissen β_{Ns} von 3,9 in den äußeren Zonen des Flansches auf.

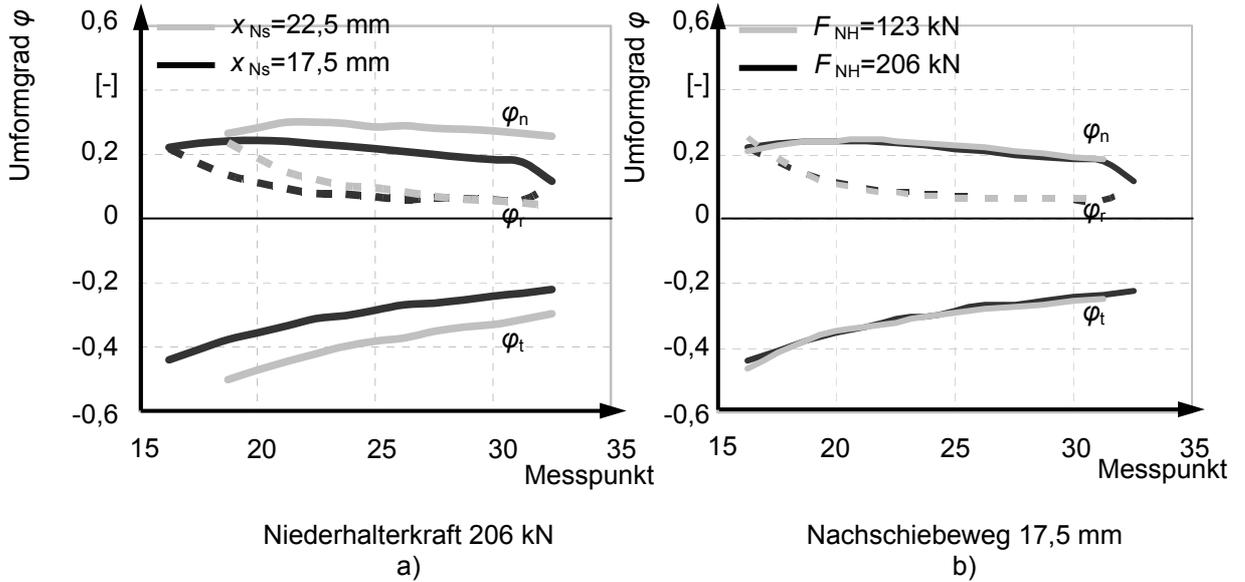


Bild 7-5: Formänderungsverlauf im Flansch beim KNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

7.3 Verfahrensgrenzen

Beim KNWW wurde bei jedem Versuch das Aufweitverhältnis k mit $k=2,0$ konstant gehalten. Der Versagensfall „Riss am Kragen“ trat bei diesem Aufweitverhältnis nicht auf. Aufgrund der vorliegenden Formänderungen ergeben sich beim KNWW die folgenden charakteristischen Verfahrensgrenzen. Die sich beim KNWW einstellenden typischen Verfahrensgrenzen sind aufgrund des gleichen Verfahrensprinzips (Nachschieben von Werkstoff) mit den Verfahrensgrenzen beim TNWW vergleichbar.

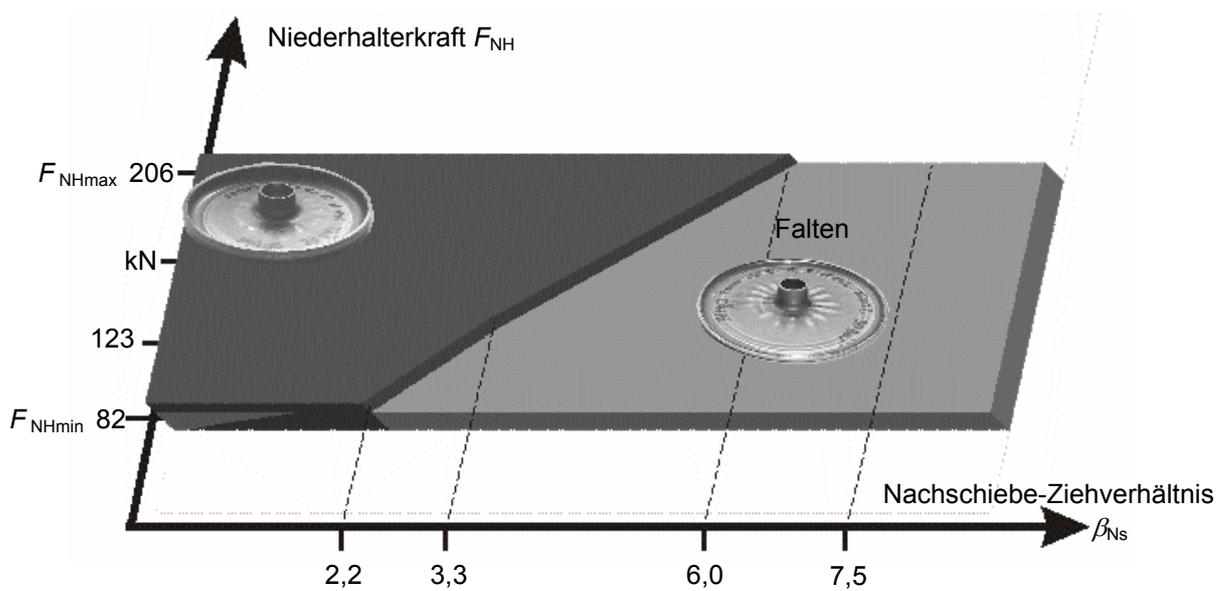


Bild 7-6: Verfahrensfenster beim KNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm).

7 Untersuchungsergebnisse: Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (KNWW)

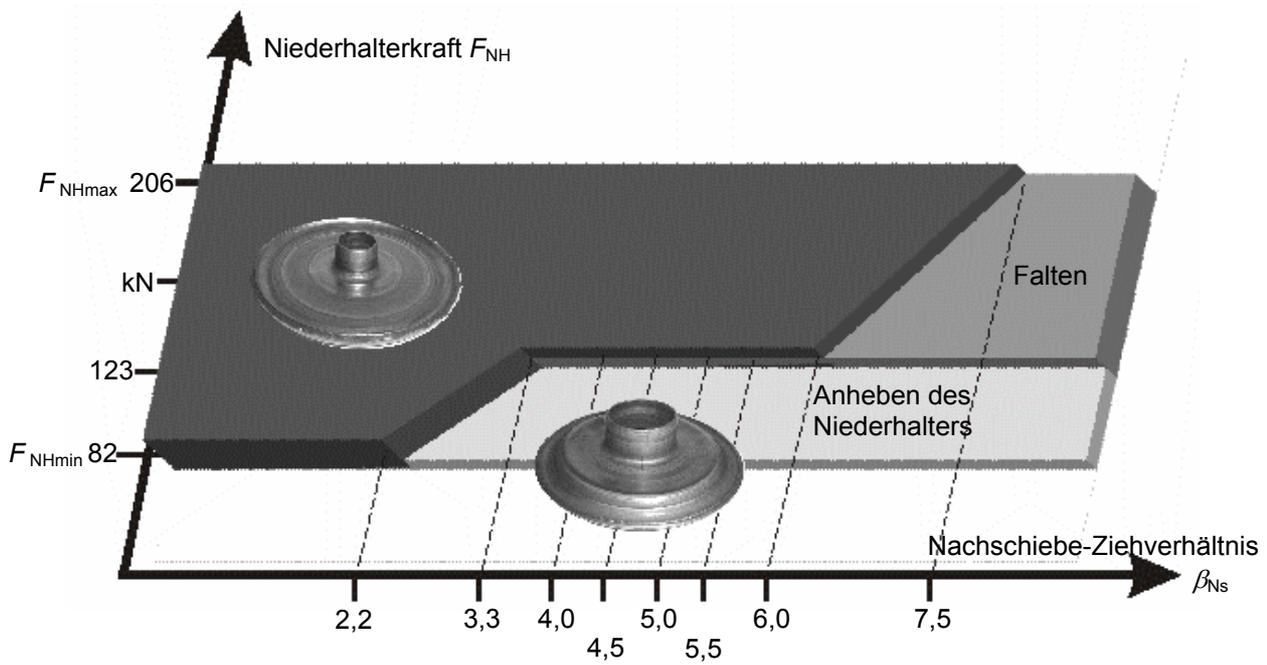


Bild 7-7: Verfahrensfenster beim KNWW, (Werkstoff: QStE 340, Blechdicke: 2 mm).

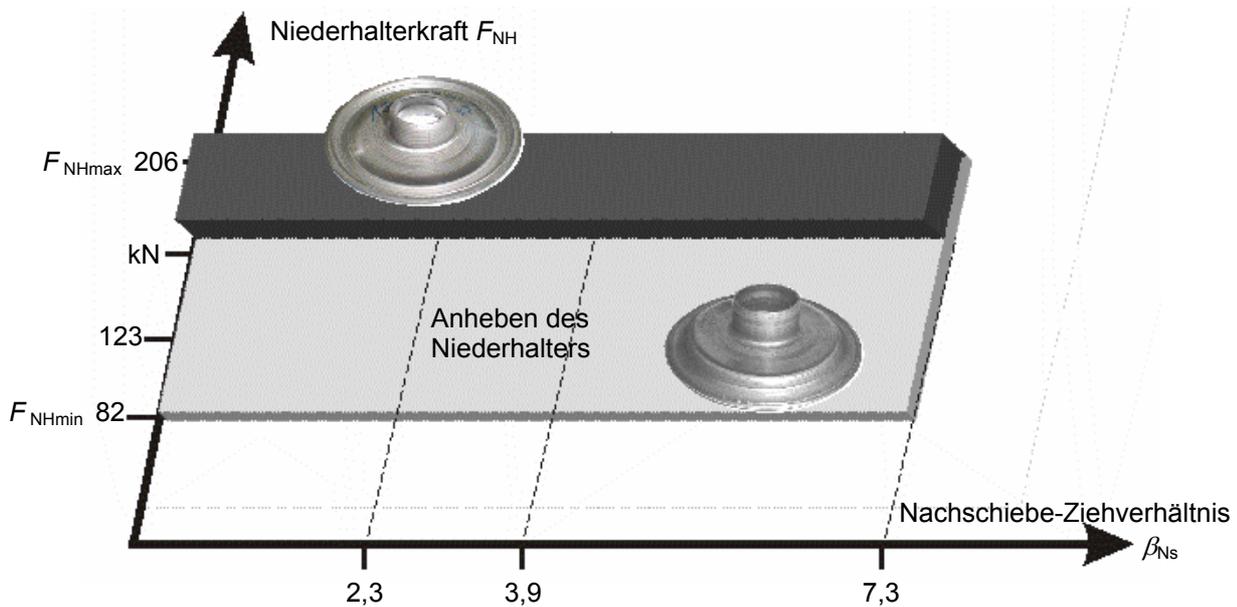


Bild 7-8: Verfahrensfenster beim KNWW, (Werkstoff: QStE 340, Blechdicke: 4 mm).

Beim Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss können im Gegensatz zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss auch Gutteile bei einem Nachschiebe-Ziehverhältnis von 6,0 (DC 01 – 2 mm) bzw. 7,5 (QStE 340 – 2 mm, 4 mm) erzielt werden, ohne dass es zur Faltenbildung kommt. Im **Bild 7-6** bis **Bild 7-10** sind die Verfahrensfenster für das KNWW im Vergleich dargestellt.

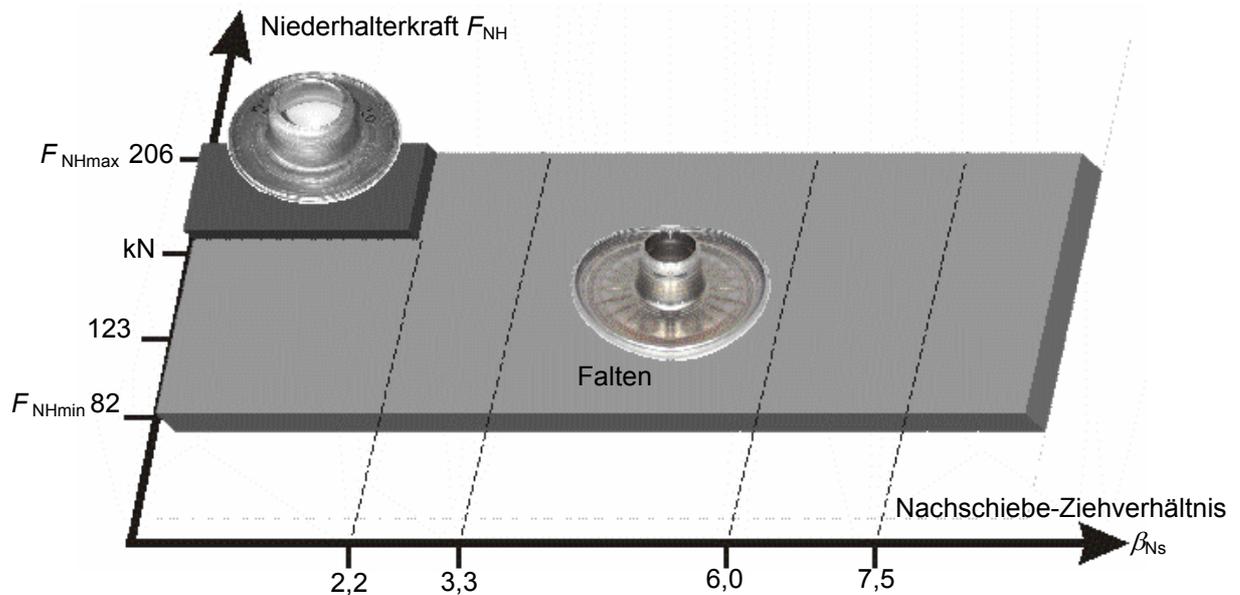


Bild 7-9: Verfahrensfenster beim KNWW, (Werkstoff: AIMg 3, Blechdicke: 2 mm).

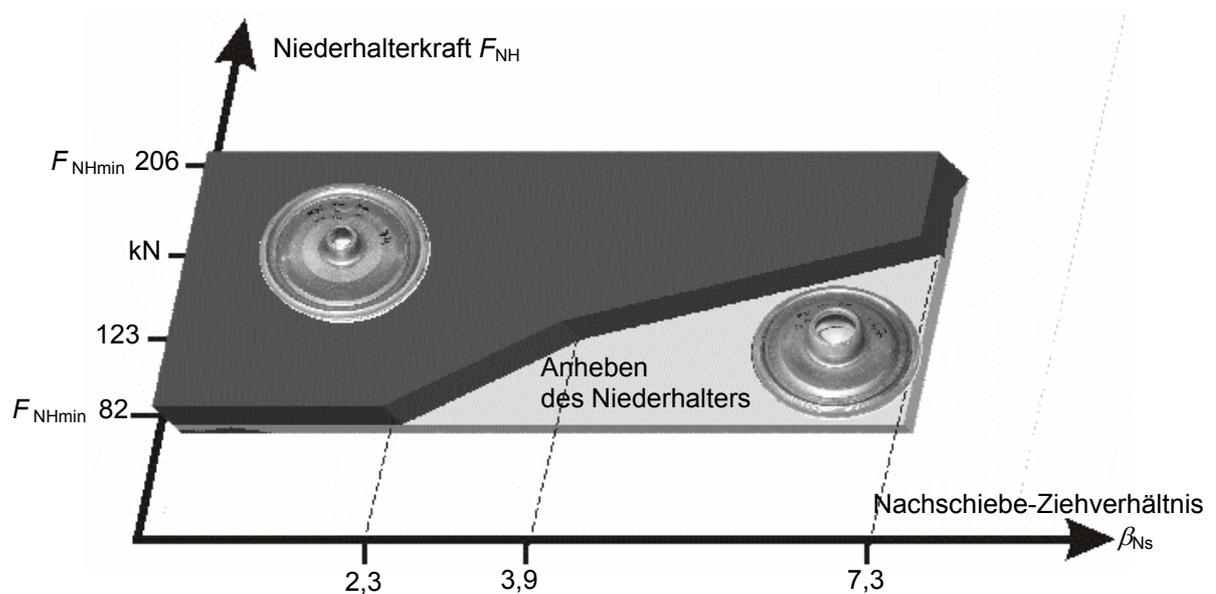


Bild 7-10: Verfahrensfenster beim KNWW, (Werkstoff: AIMg 3, Blechdicke: 4 mm).

Bei dem Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 2 mm kommt es beim KNWW unterhalb einer Niederhalterkraft von 123 kN zu einem unerwünschten Anheben des Niederhalters, so dass kein Material mehr in das Formelement transportiert werden kann (**Bild 7-7**). Der gleiche Versagensfall tritt beim Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 4 mm unterhalb einer Niederhalterkraft von 164 kN auf (**Bild 7-8**). Instabilitäten in Form von Falten konnten beim Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 4 mm nicht beobachtet werden.

Für den Werkstoff DD 11 mit den Ausgangsblechdicken 2 mm und 4 mm und einem Verhältnis d_{F1}/d_{St} 4 bzw. 5,5 wurden für das KNWW die maximal möglichen Aufweitverhältnisse k_{max} für verschiedene auf die Ausgangsblechdicke bezogene Stempeldurchmesser d_{St}/s_0 (**Tabelle 7-1**) ermittelt. Um einen Vergleich zum konventionellen Kragenziehen zu erhalten, sind für den gleichen Werkstoff mit den gleichen Ausgangsblechdicken Werkstücke durch konventionelles Kragenziehen und durch KNWW hergestellt worden.

Tabelle 7-1: Bezogener Stempeldurchmesser (d_{St}/s_0).

Ausgangsblechdicke	Stempeldurchmesser	
	22 mm ($d_{F1}/d_{St}=5,5$)	30 mm ($d_{F1}/d_{St}=4,0$)
2 mm	$d_{St}/s_0 = 11$	$d_{St}/s_0 = 15$
4 mm	$d_{St}/s_0 = 5,5$	$d_{St}/s_0 = 7,5$

Im **Bild 7-11** sind die experimentell ermittelten maximal erreichbaren Aufweitverhältnisse für verschiedene bezogene Stempeldurchmesser (d_{St}/s_0) für die Verfahren KNWW und konventionelles Kragenziehen gegenübergestellt.

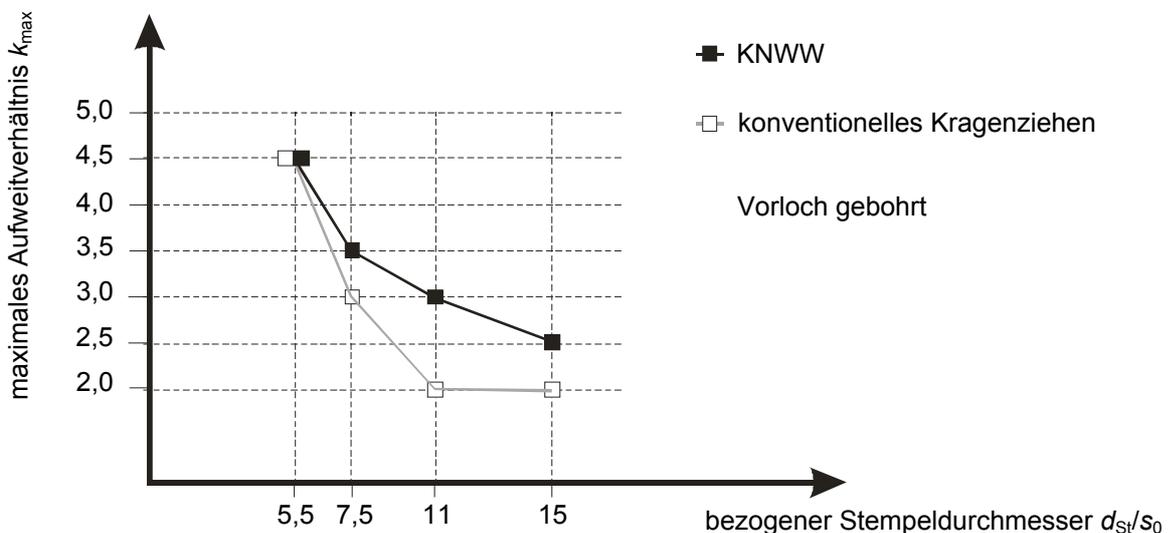


Bild 7-11: Maximal erreichbare Aufweitverhältnisse (Werkstoff: DD 11, Niederhalterkraft: 206 kN, Nachschiebeweg: 17,5 mm).

Das maximal erreichbare Aufweitverhältnis ist definiert durch das Verhältnis von Stempeldurchmesser zum Durchmesser des Vorlochs, bei dem ein Kragen ohne erkennbare Einschnürungen gefertigt werden kann. Wie auch beim konventionellen Kragenziehen nimmt beim KNWW das maximal erreichbare Aufweitverhältnis zu, wenn das Verhältnis von Stempeldurchmesser zur Ausgangsblechdicke abnimmt. Beim KNWW kann im Vergleich zum konventionellen Kragenziehen infolge der im Flansch auftretenden und in den Kragen eingeleiteten Druckspannungen ein bis zu

150 % größeres Aufweitverhältnis für den untersuchten Parameterbereich d_{S1}/s_0 7,5...15 erzielt werden (Bild 7-11).

Auf eine Prozesssimulation zur numerischen Ermittlung der Verfahrensgrenzen für das KNWW wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da die Verfahrensgrenzen beim KNWW bedingt durch das ähnliche Verfahrensprinzip des Nachschiebens von Werkstoff mit denen des TNWW vergleichbar sind.

7.4 Umform- und Pressenkräfte

Die für das KNWW notwendige Pressenkraft (F_P) setzt sich wie auch beim TNWW aus den Teilkräften Umform- (F_U), Feder- (F_F) und Reibkraft (F_R) zusammen (Abschnitt 6.4.1). Die Umformkraft ist beim Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss die Kraft, welche für das Nachschieben des Randes und das Aufweiten des Vorloches benötigt wird. Die Federkraft setzt sich aus der Summe der Kraft der Schraubenfedern und der Kraft der Gasdruckfedern zusammen. Während beim konventionellen Kragenziehen der Kraftverlauf einen nahezu symmetrischen Verlauf im Kraft-Weg-Diagramm annimmt, verlagert sich beim KNWW bedingt durch das Verfahrensprinzip wie auch beim TNWW das Kraftmaximum zum Ende des Ziehweges hin.

Im Gegensatz zum TNWW wird beim KNWW die Nachschiebekraft nicht in dem Maße verringert, wie eine Kraft durch den Ziehstempel aufgebracht wird. Beim Kragenziehen kann durch den Stempel keine für eine Umformung ausreichende Kraft in den Flansch eingeleitet werden, sondern durch den Stempel wird lediglich das Vorloch auf den Durchmesser des Stempels aufgeweitet. Aus diesem Grund muss die Stempelkraft auch immer zusätzlich zur Nachschiebekraft aufgebracht werden. Da die anderen an der Umformung beteiligten Kräfte (Reib- und Federkräfte) beim TNWW und beim Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss vergleichbar sind, ist beim KNWW wegen der zusätzlichen Aufweitung des Vorlochs, bei sonst gleichen Verfahrensparametern, eine größere Pressenkraft notwendig (Bild 7-12).

Die Verfahrensparameter, die Einfluss auf die Umform- und Pressenkräfte beim KNWW nehmen, sind mit den Verfahrensparametern des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss vergleichbar. Ein größer werdendes Nachschiebe-Ziehverhältnis lässt auch die zur Umformung notwendige Pressenkraft größer werden. Werkstoffe, die bei vergleichbaren Hauptumformgraden höhere Fließspannungen aufweisen, benötigen beim KNWW höhere Pressenkräfte als Werkstoffe, die bei vergleichbaren Hauptumformgraden geringere Fließspannungen besitzen.

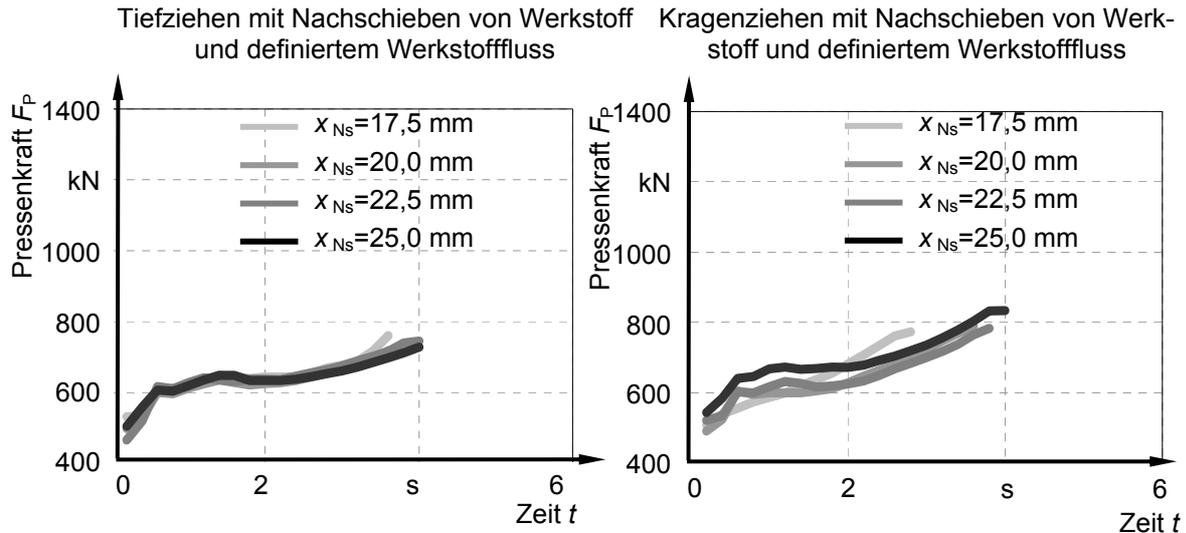


Bild 7-12: Vergleich der Pressenkraft beim TNWW und KNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Niederhalterkraft 123 kN, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

7.5 Endteileigenschaften

7.5.1 Verlauf der Blechdicke

Wichtige Beurteilungskriterien für das Ergebnis des Kragenziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss sind neben den Verfahrensgrenzen bzw. der benötigten Umform- und Pressenkräfte auch die stofflichen und geometrischen Eigenschaften der Endteile. Die Messverfahren, mit denen die stofflichen und geometrischen Endteileigenschaften bestimmt werden, sind unter Abschnitt 5.6 beschrieben.

Während des Kragenziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss bleibt die Ausgangsblechdicke nicht erhalten, sondern sie ändert sich unter Wirkung der vorliegenden Spannungen. Die durch KNWW hergestellten Werkstücke unterscheiden sich im Verlauf der Blechdicke von Werkstücken, die durch konventionelles Kragenziehen gefertigt wurden. Beim konventionellen Kragenziehen kommt es im Flansch des Werkstücks zu keiner Änderung der Blechdicke. Beim KNWW erhöht sich im Flansch die Blechdicke mit einer leichten Zunahme in Richtung des sich ausbildenden Kragens. Der Verlauf der Blechdicke im Flansch beim Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss ist mit dem Verlauf der Blechdicke im Flansch beim TNWW vergleichbar.

Die Schwankungen der Blechdicke in der Nähe des Flanschrandes resultieren beim KNWW aus der zweifachen Biegung, bei der Werkstoff aus dem Rand in den Flansch des Werkstücks nachgeschoben wird. Im Kragen verringert sich beim KNWW die Blechdicke nur in einer Zone, die auf den oberen Kragen beschränkt ist. Wie auch beim konventionellen Kragenziehen befindet sich die geringste Blechdicke

am Kragenrand, wobei beim KNWW höhere Werte der Blechdicke am Kragenrand vorliegen.

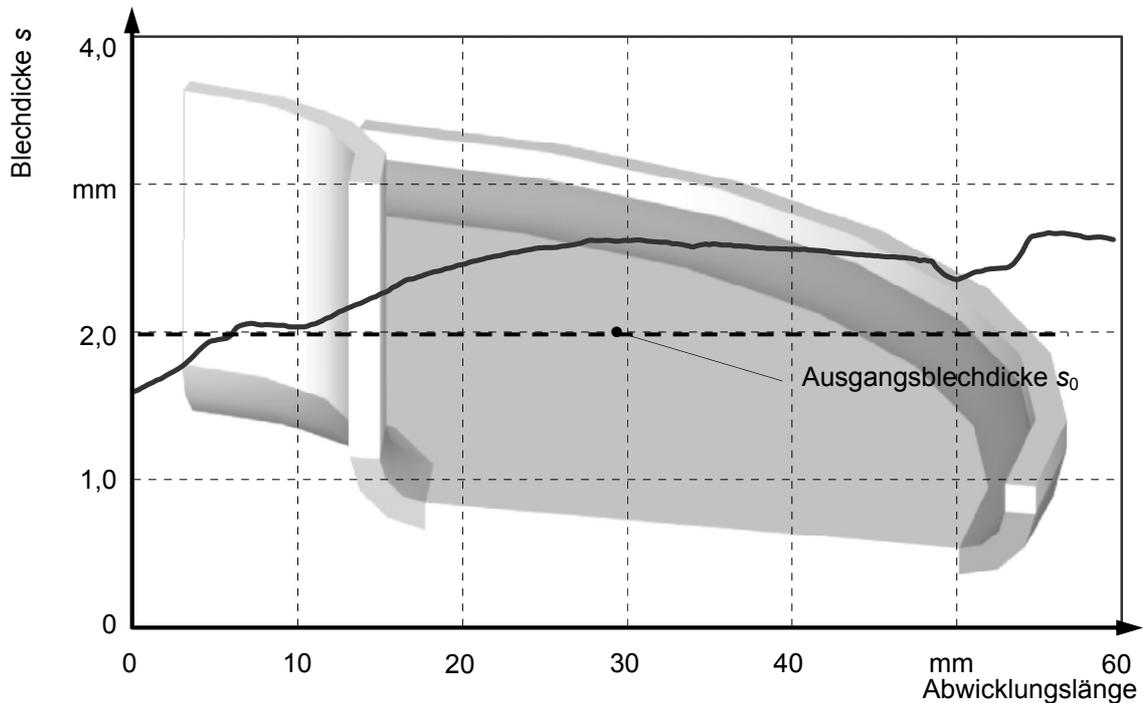


Bild 7-13: Verlauf der Blechdicke (Abwicklung) beim KNWW, (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3).

Die Messpunkte bei der Ermittlung des Verlaufs der Blechdicke für das KNWW liegen jeweils 0,25 mm auseinander. Der Verlauf der Blechdicke ist als Abwicklung über den Querschnitt des Werkstücks ermittelt worden.

Beim KNWW ist der Verlauf der Blechdicke im Flansch bei Werkstoffen mit gleicher Blechdicke ähnlich. Wie auch beim TNWW nimmt beim Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss durch die Stauchung in der Randzone des Flansches die Blechdicke zu. Im Kragen kommt es beim Werkstoff DC 01 nur zu einer geringen Reduktion der Blechdicke im oberen Kragenrand (**Bild 7-13**). Bei dem Werkstoff QStE 340 wird bei der Blechdicke 2 mm und der Blechdicke 4 mm die Blechdicke auf Grund des geringeren r -Wertes wesentlich stärker geschwächt als beim Werkstoff DC 01. Bei einem größeren r -Wert ist der Widerstand des Werkstoffs gegenüber einer Formänderung in Dickenrichtung größer als bei einem kleineren r -Wert. Die Verfahrensparameter Nachschiebeweg und Nachschiebe-Ziehverhältnis besitzen den größten Einfluss auf die Zunahme der Blechdicke. Wird das Nachschiebe-Ziehverhältnis für einen Werkstoff beim KNWW bei sonst vergleichbaren Verfahrensparametern vergrößert, so nimmt auch die Blechdicke im Flansch des Werkstücks verstärkt zu. Bei einer Vergrößerung des Nachschiebeweges verstärkt sich ebenfalls die Zunahme der Blechdicke im Flansch. Der Werkstoff

QStE 340 mit der höchsten Zugfestigkeit zeigt die größte Zunahme der Blechdicke im Flansch.

7.5.2 Höhe der Formelemente (Kragenhöhen)

Im Gegensatz zum konventionellen Kragenziehen resultiert die Kragenhöhe beim KNWW aus der Aufweitung des Vorlochs und aus den infolge des Nachschiebens auftretenden radialen Formänderungen des Materials, welches im Flansch des Werkstücks tangential gestaucht und radial gestreckt wurde (Bild 7-4).

Wird das KNWW ohne Nachschiebewirkung durchgeführt, ergibt sich die theoretisch erreichbare Kragenhöhe (**Tabelle 7-2**) infolge der Aufweitung des Vorlochs h_{thk} bei den vorliegenden geometrischen Verhältnissen nach:

$$h_{thk} = s_0 \left(\frac{d_{Ka}^2 - d_{Kr0}^2}{d_{Ka}^2 - d_{Ki}^2} \right) \quad (23)$$

Tabelle 7-2: Theoretisch erreichbare Kragenhöhe durch Aufweitung des Vorlochs.

Verhältnis von Flanschaußendurchmesser zu Stempeldurchmesser d_{Fi}/d_{St} (Aufweitverhältnis $d_{St}/d_0 = 2,0$)	Kragenhöhe durch Aufweitung des Vorlochs beim KNWW h_{thk}
2,2	11,9 mm
3,3	8,5 mm
3,0	5,4 mm
7,5	4,6 mm

Unter der Annahme, dass die Blechdicke während der Umformung beim KNWW konstant bleibt ($\varphi_n=0$) und unter der Annahme, dass das Vorloch zuerst aufgeweitet wird (**Bild 7-14-a**), bevor Material nachgeschoben wird (Bild 7-14-b), kann die theoretisch erreichbare Kragenhöhe infolge des Kragenziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss h_{Kr} wie folgt bestimmt werden:

Die Fläche des Teilstücks I setzt sich bei einer Vernachlässigung der Radien am Übergang vom Rand zum Flansch und am Übergang vom Flansch in den Kragen aus der Kreisringfläche, begrenzt durch den Flanschdurchmesser d_{Fi} und den Vorlochdurchmesser d_{Kr0} und der Mantelfläche eines Kreiszyinders mit dem Flanschdurchmesser und der Höhe des Randes h_R zusammen.

Die Fläche des Teilstücks II wird durch eine innere und eine äußere Mantelfläche eines Kreiszyinders und eine Kreisringfläche charakterisiert. Die innere Mantelfläche des Kreiszyinders ist bestimmt durch den Stempeldurchmesser d_{St} und durch die Höhe des durch Aufweiten hergestellten Kragens h_{th} und die äußere Mantelfläche

ermittelt sich wie auch beim Teilstück I aus dem Flanschdurchmesser und der Höhe des Randes. Die Kreisringfläche beim Teilstück II ist begrenzt durch den Stempeldurchmesser und den Flanschdurchmesser. Auch die Fläche des Teilstücks III ist durch eine innere und eine äußere Mantelfläche eines Kreiszyinders und eine Kreisringfläche charakterisiert. Dabei lässt sich die innere Mantelfläche des Kreiszyinders aus dem Stempeldurchmesser und der Höhe des Kragens ermitteln. Die äußere Mantelfläche des Kreiszyinders bestimmt sich aus dem Flanschdurchmesser und der Resthöhe des Randes ($h_R - x_{Ns}$).

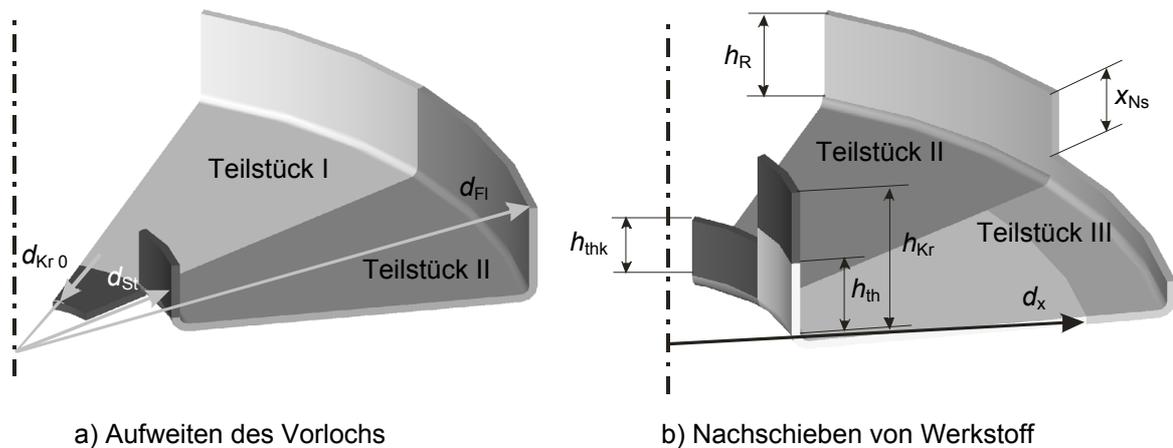


Bild 7-14: Fertigungsfolgen beim idealisierten KNWW.

Unter der Annahme der Volumenkonstanz und der bereits oben erwähnten Annahme des zweiachsigen Formänderungszustands (keine normale Formänderung) müssen die Flächen des Teilstücks II vor der Umformung summiert den gleichen Betrag ergeben wie die Flächen des Teilstücks III nach der Umformung.

$$\pi \cdot d_{St} \cdot h_{thk} + \frac{\pi}{4} (d_{Fl}^2 - d_{St}^2) + \pi \cdot d_{Fl} \cdot h_R = \quad (24)$$

$$\pi \cdot d_{St} \cdot h_{Kr} + \frac{\pi}{4} (d_{Fl}^2 - d_{St}^2) + \pi \cdot d_{Fl} \cdot (h_R - x_{Ns})$$

$$d_{St} \cdot h_{thk} + d_{Fl} \cdot h_R = d_{St} \cdot h_{Kr} + d_{Fl} \cdot (h_R - x_{Ns}) \quad (25)$$

Umgestellt nach h_{Kr} ergibt sich die durch KNWW herstellbare maximale Kragenhöhe bei einem ebenen Formänderungszustand zu:

$$h_{Kr} = h_{thk} + \frac{d_{Fl}}{d_{St}} \cdot x_{Ns} \quad (26)$$

$$h_{Kr} = h_{thk} + \beta_{Ns} \cdot x_{Ns} \quad (27)$$

Da, wie im Abschnitt 7.5.1 dargestellt, die Blechdicke im Flansch nicht konstant bleibt, sondern sich vergrößert und einen charakteristischen Verlauf gemäß Bild 7-13 annimmt, können nur geringere Kragenhöhen erreicht werden, als die mit Glei-

chung 27 berechneten Kragenhöhen. Die Verfahrensparameter Nachschiebe-Ziehverhältnis β_{Ns} und Nachschiebeweg x_{Ns} haben den größten Einfluss auf die Zunahme der Blechdicke im Flansch des Werkstücks. Werden das Nachschiebe-Ziehverhältnis oder der Nachschiebeweg bei sonst gleich bleibenden Verfahrensparametern erhöht, dann nimmt auch die Blechdicke im Flansch stärker zu als bei kleineren Nachschiebe-Ziehverhältnissen oder kleineren Nachschiebewegen. Aus diesem Grund können bei größeren Nachschiebe-Ziehverhältnissen nicht die theoretischen erreichbaren Kragenhöhen erzielt werden. Die im Flansch durch die tangentialen Druckspannungen auftretenden radialen Dehnungen sind infolge der stattfindenden normalen Dehnungen kleiner als sie bei einem angenommenen idealisierten ebenen Formänderungszustand (nur tangentiale und radiale Formänderungen, keine normalen Formänderungen) wären.

Bild 7-15 zeigt für verschiedene Nachschiebe-Ziehverhältnisse die nach Gleichung 27 theoretisch durch KNWW erreichbaren gesamten Kragenhöhen h_{Kr} (Aufweiten und Nachschieben) sowie die nur durch das Nachschieben von Werkstoff theoretisch berechneten Kragenhöhen h_{th} .

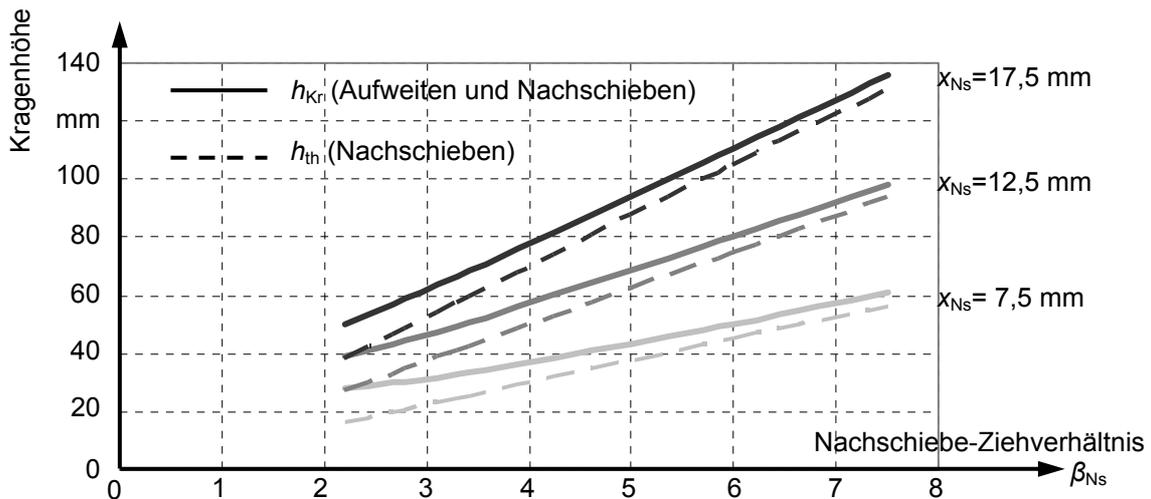


Bild 7-15: Theoretisch erreichbare Kragenhöhe beim KNWW ($\varphi_n = 0$).

Einen Vergleich zwischen der theoretisch bei einem ebenen Formänderungszustand erreichbaren Kragenhöhe und der real durch KNWW erreichbaren Kragenhöhe zeigt **Bild 7-16**. Deutlich ist zu erkennen, dass die nach Gleichung (27) berechneten theoretischen Kragenhöhen aufgrund der nicht berücksichtigten normalen Formänderung wesentlich größer als die experimentell ermittelten Kragenhöhen sind, wenn die Nachschiebe-Ziehverhältnisse größer werden.

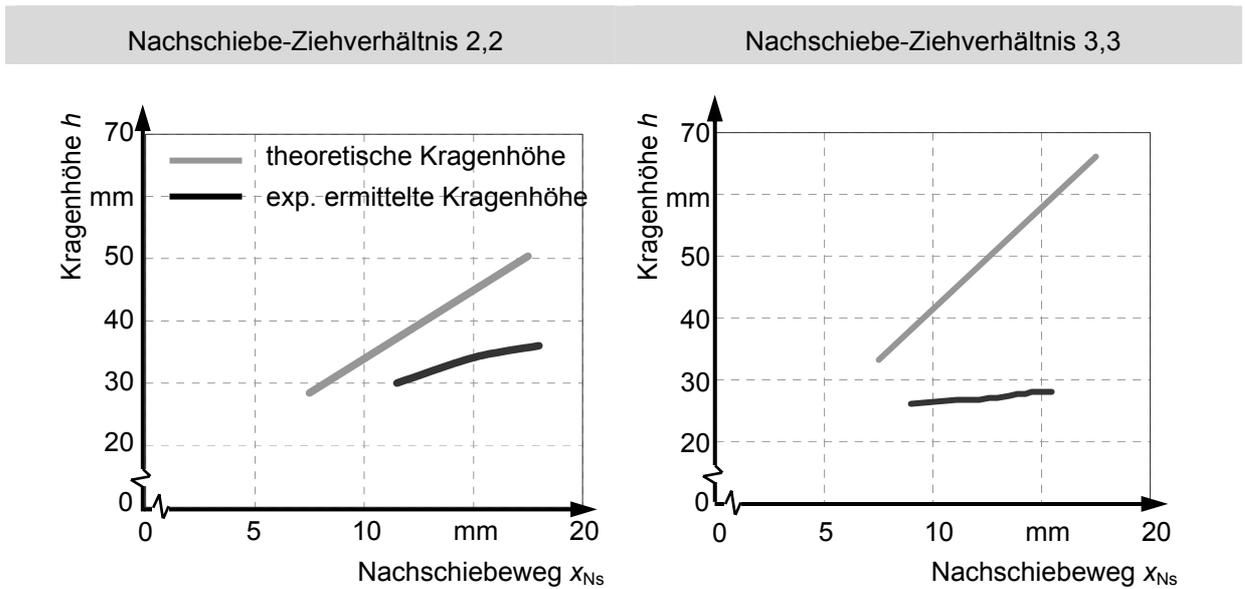


Bild 7-16: Vergleich theoretisch erreichbare Kragenhöhe mit der experimentell ermittelten Kragenhöhe beim KNWW (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm).

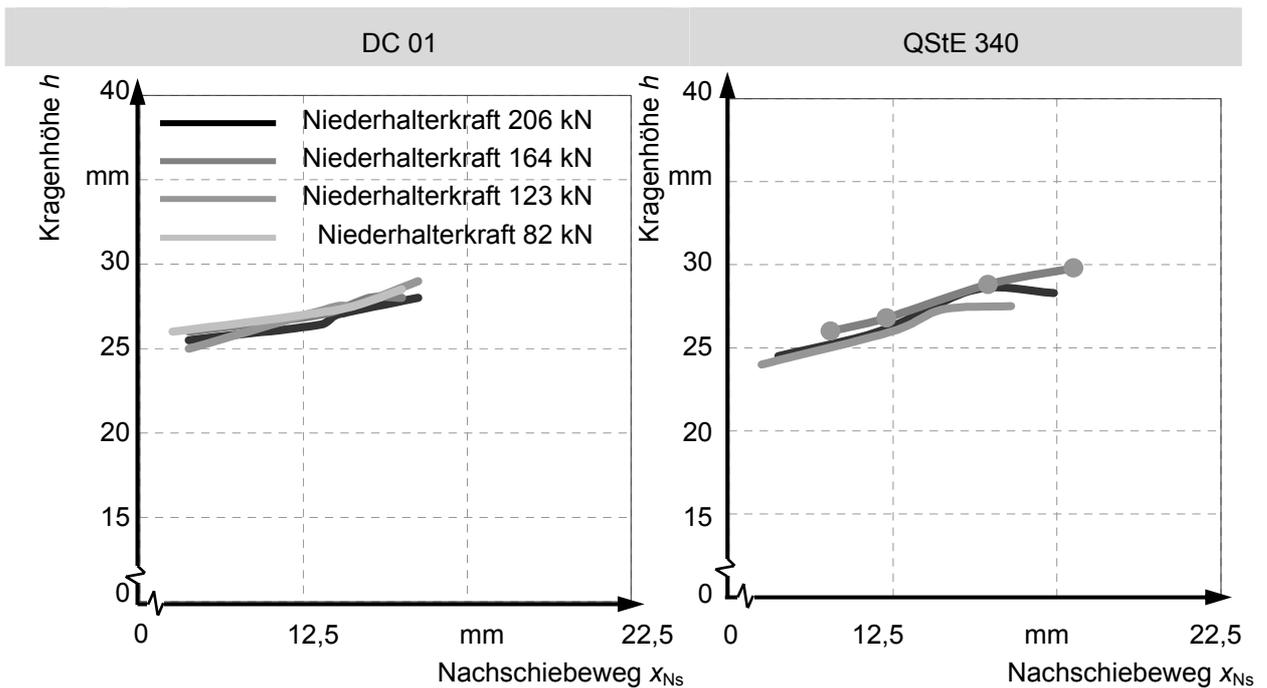


Bild 7-17: Kragenhöhen beim KNWW. (Blechdicke: 2 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3)

Beim KNWW hat der Nachschiebeweg den größten Einfluss auf die sich einstellenden Kragenhöhen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass beim KNWW ein linearer Zusammenhang zwischen Nachschiebeweg und den sich einstellenden Kragenhöhen besteht. Dabei bewirkt ein größerer Nachschiebeweg eine Zunahme der Höhe des Formelementes. Beim Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss gelten die gleichen Restriktionen wie beim TNWW. Der maximale Nachschiebeweg ist unter den gegebenen Versuchsbedingungen auf

25 mm begrenzt, um einen Kontakt von Ziehring und Stauchring zu vermeiden (Bild 5-2).

Die Kragenhöhen sind in Abhängigkeit vom Nachschiebeweg und von der Niederhalterkraft für den Werkstoff DC 01 und den Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 2 mm beim Nachschiebe-Ziehverhältnis 3,3 in **Bild 7-17** dargestellt. Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass die Kragenhöhe beim KNWW im Vergleich zum konventionellen Kragenziehen auf 300% gesteigert werden kann.

Auch das Nachschiebe-Ziehverhältnis hat einen Einfluss auf die sich einstellenden Höhen der Formelemente. Bei größeren Nachschiebe-Ziehverhältnissen sind die Kragenhöhen bei sonst gleichen Verfahrensparametern geringer als bei kleineren Nachschiebe-Ziehverhältnissen (**Bild 7-18**), da, wie oben erläutert, bei größeren Nachschiebe-Ziehverhältnissen die normalen Formänderungen im Flansch des Werkstücks zunehmen. Die Niederhalterkraft hat dagegen keinen signifikanten Einfluss auf die sich einstellende Kragenhöhe.

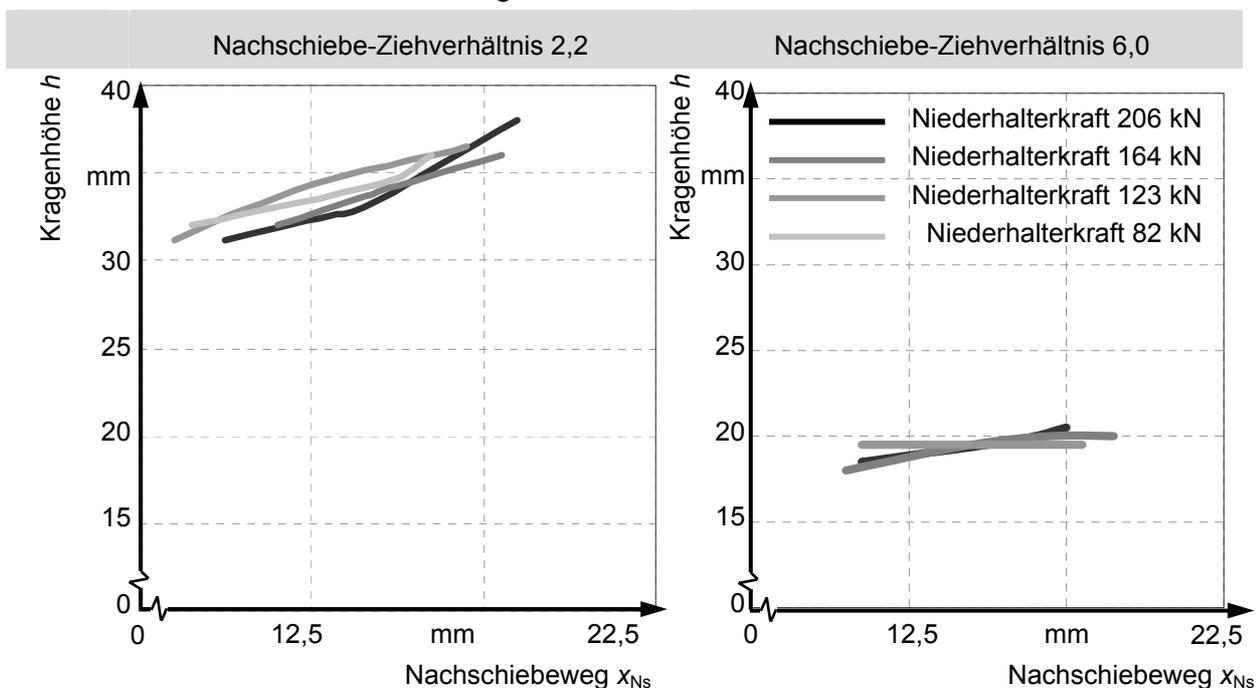


Bild 7-18: Kragenhöhen beim KNWW. (Werkstoff: DC 01, Blechdicke: 2 mm)

7.5.3 Verlauf der Härte

Auch beim KNWW ist zur Beschreibung der stofflichen Eigenschaften des Werkstoffs an den Ausgangsteilen, Zwischen- und Endteilen die Härte bestimmt worden, um Aussagen zu den Festigkeitseigenschaften der hergestellten Werkstücke treffen zu können. Aufbauend auf den ermittelten Härteverteilungen lassen sich Optimierungen des Umformvorgangs und des Umformwerkzeuges im Hinblick auf eine gleichmäßigere Verteilung der Festigkeitseigenschaften durchführen.

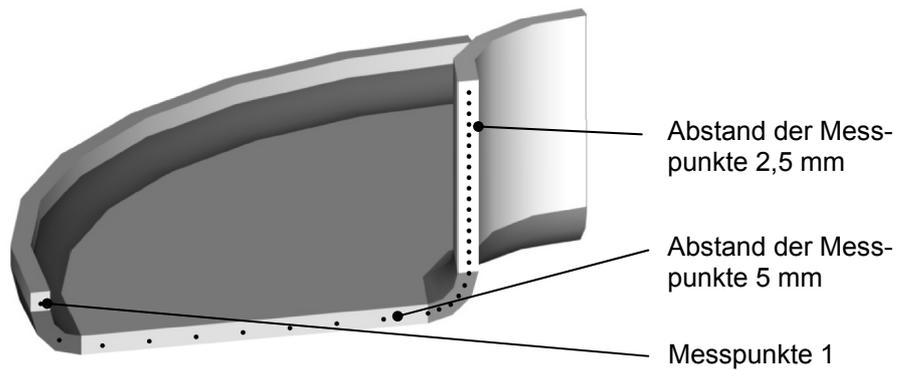


Bild 7-19: Abstand der Messpunkte bei der Bestimmung der Härte.

Mit dem Verfahren nach Vickers (HV2) wurde in einem Abstand von 5 mm die Härte ausgehend vom Rand in Richtung des Formelementes im Flansch ermittelt (**Bild 7-19**). Ab dem Übergang vom Flansch in das Formelement ist der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten der Härtemessung auf 2,5 mm verringert worden. **Bild 7-20** zeigt die typische Verteilung der Härte bei einem Nachschiebe-Ziehverhältnis von 3,3 im Vergleich zwischen dem höherfesten Werkstoff QStE 340 und dem Werkstoff DC 01 mit der Blechdicke 2 mm. Auch beim KNWW ist wie beim TNWW der Unterschied bei verschiedenen untersuchten Niederhalterkräften nicht signifikant.

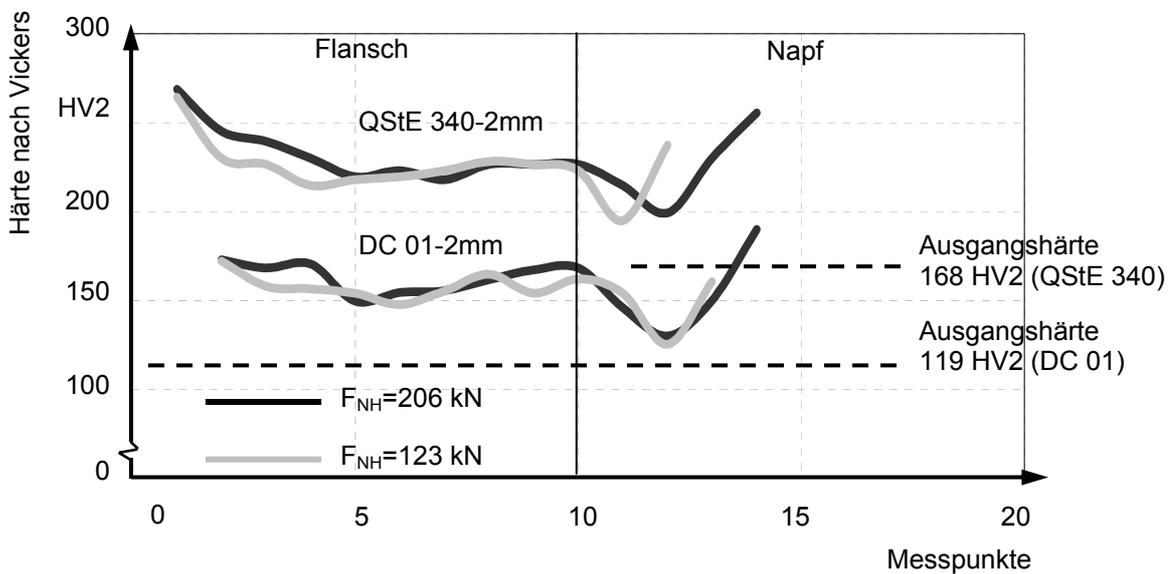


Bild 7-20: Härteverteilung (Abwicklung) beim KNWW. (Nachschiebeweg: 17,5 mm, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 3,3)

Deutlich ist zu erkennen, dass die Härte im Flansch des Werkstücks nahezu gleichmäßig zunimmt. Der Maximalwert der Härte befindet sich durch die starke axiale Stauchung des Materials wie auch beim TNWW immer im Rand des Werkstücks. Ein weiteres Maximum der Härte befindet sich am Übergang zwischen Flansch und Kragen. In der Zone des Formelementes verringert sich die Härte zunächst, um dann in Richtung des Kragenrandes infolge des stattfindenden Aufweitvorgangs wieder zu-

zunehmen. Der Maximalwert der Härte im Formelement befindet sich am Kragenrand. Der Verlauf der Härte bei dem Werkstoff AlMg 3 ist nicht so ausgeprägt wie bei den Werkstoffen DC 01 und QStE 340. Typisch für den Werkstoff QStE 340 mit der Blechdicke 4 mm ist auch beim KNWW die starke Zunahme der Härte im Rand des Werkstücks. Bedingt wird diese Zunahme der Härte durch die überproportionale Stauchung des Werkstoffs in dieser Zone und die damit verbundene große normale Formänderung in Form der Blechdickenzunahme, da sich der Innendurchmesser der Armierung aufweitet.

7.5.4 Kragenziehen mit überwiegendem Nachschieben von Werkstoff bei geringen Aufweitverhältnissen

Infolge der am Kragenrand herrschenden tangentialen Zugspannungen verringert sich die Blechdicke beim konventionellen Kragenziehen und beim KNWW in Richtung des Kragenrandes (Bild 7-13). In vielen Fällen kann diese Blechdickenverringering dazu führen, dass der Kragen die an ihn gestellten funktionellen Anforderungen nicht mehr erfüllen kann. Ausgehend von den Ergebnissen der Blechdickenuntersuchungen für das KNWW ist eine neuartige Verfahrensvariante des Kragenziehens mit überwiegendem Nachschieben von Werkstoff bei geringen Aufweitverhältnissen entwickelt worden, mit der es möglich ist, die beim konventionellen Kragenziehen typische Blechdickenverringering am Kragenrand zu vermeiden und trotzdem eine funktionell ausreichende Kragenhöhe zu erzielen (**Bild 7-21**).



Bild 7-21: Vergleich konventionelles Kragenziehen mit dem Kragenziehen mit überwiegendem Nachschieben von Werkstoff bei geringen Aufweitverhältnissen.

Beim konventionellen Kragenziehen kann die nach der Umformung vorliegende Blechdicke s_{min} am Kragenrand nach der folgenden Gleichung bestimmt werden /90/:

$$s_{\min k} = \frac{s_0}{\sqrt{d_{St}/d_0}} \quad (28)$$

Bei dem für die Bestimmung der Verfahrensgrenzen für das KNWW festgelegten Aufweitverhältnis von 2,0 verringert sich die Blechdicke ausgehend vom Übergang Flansch/Kragen in Richtung des Kragenrands bereits auf ca. 70% der Ausgangsblechdicke am Kragenrand. Aufgrund der beim Kragenziehen immer stattfindenden Verringerung der Blechdicke am Kragenrand, schließt sich an das konventionelle Kragenziehen häufig ein weiterer Arbeitsgang, das Stauchen an, um die erforderliche Blechdicke im Kragen zu erzielen. Durch ein Stauchen des Kragens wird allerdings die erreichte Kragenhöhe wieder verringert.

Um einen Kragen mit großer Kragenhöhe und ohne Blechdickenverringerung am Kragenrand ($s_{\min k} \approx s_0$) zu erzeugen, wird beim Kragenziehen mit überwiegendem Nachschieben von Werkstoff bei geringen Aufweitverhältnissen zuerst bei einem kleinen Aufweitverhältnis ($d_{St}/d_0 \leq 1,1$) der Kragen mit Hilfe des Kragenziehstempels wie auch beim konventionellen Kragenziehen aufgestellt (**Bild 7-22** Phase I). Anschließend wird das Material aus dem Flansch in den Kragen nachgeschoben (Bild 7-22 Phase II). Durch das Nachschieben von Werkstoff lässt sich die Höhe des Kragens beliebig einstellen, soweit die durch das Nachschieben von Werkstoff hervorgerufenen tangentialen Druckspannungen im Flansch nicht zu Instabilitäten in Form von Falten führen.

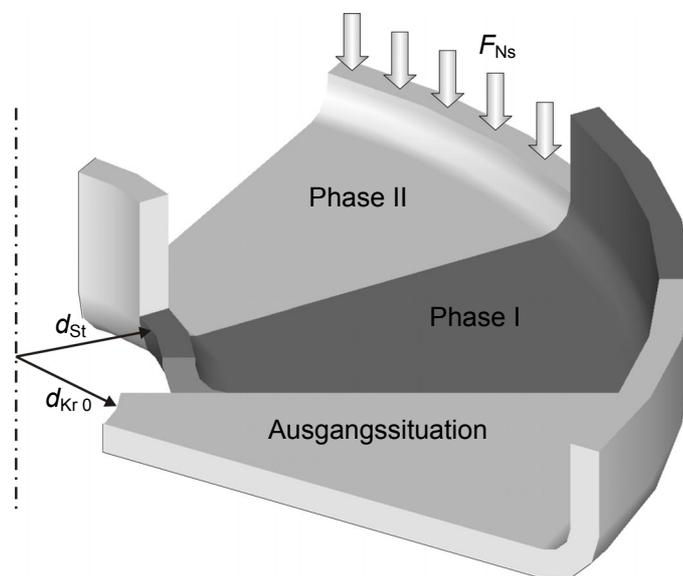


Bild 7-22: Fertigungsfolge beim Kragenziehen mit überwiegendem Nachschieben von Werkstoff bei geringen Aufweitverhältnissen.

Durch das in der beschriebenen Weise durchgeführte Kragenziehen mit überwiegendem Nachschieben von Werkstoff bei geringen Aufweitverhältnissen ist ein anschließendes Stauchen des Kragens nicht mehr notwendig, da sich die Blechdicke des Kragens durch die verwendeten geringen Aufweitverhältnisse ($\leq 1,1$) nicht wesentlich unter die Ausgangsblechdicke verringert. Auch eine Erhöhung der Ausgangsblechdi-

cke, um eine ausreichende Blechdicke am Rand des Kragens zu erzielen, ist beim KNWW nicht notwendig. Das Verfahren des Kragenziehens mit überwiegendem Nachschieben von Werkstoff bei geringen Aufweitverhältnissen kann innerhalb der im Abschnitt 7.3 dargestellten Verfahrensgrenzen angewendet werden. Eine Untersuchung der für dieses Verfahren charakteristischen Verfahrensgrenzen wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

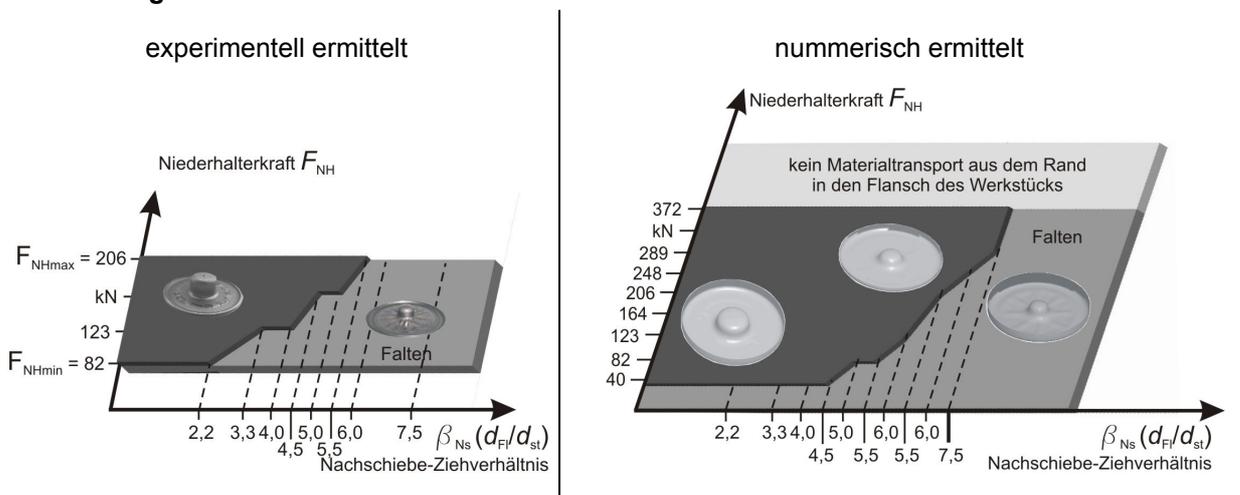
8 Anwenderrichtlinien

Für die praktische Anwendung einer neuartigen Verfahrensvariante sind die Kenntnisse der Verfahrensparameter und Verfahrensgrenzen sowie der notwendigen Pressenkräfte von vorrangiger Bedeutung. Für das Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss sind in **Tabelle 8-1** bis **Tabelle 8-3** für die Werkstoffe DC 01, QStE 340 und AlMg 3 die Verfahrensfenster für die untersuchten Verfahrensparameter Niederhalterkraft F_{NH} und Nachschiebe-Ziehverhältnis β_{Ns} (d_{Fl}/d_{St}) dargestellt. Mit Hilfe der für verschiedene Nachschiebewege x_{Ns} angegebenen ideellen Umformkraft F_{id} kann die Pressenkraft F_P für das Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss bestimmt werden.

Tabelle 8-1: Anwenderrichtlinien zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss DC 01.

Werkstoff: DC 01
Blechdicke: 2 mm

Verfahrensgrenze:



ideelle Umformkraft F_{id} :

$$F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$$

notwendige Pressenkraft F_P :

$$F_P = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$$

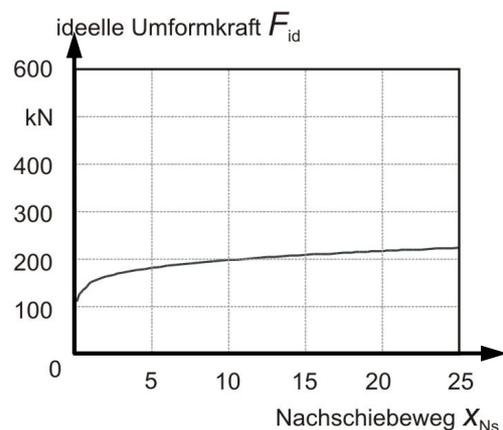


Tabelle 8-2: Anwenderrichtlinien zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss QStE 340.

Werkstoff: QStE 340	
Blechdicke: 2 mm	4 mm
Verfahrensgrenze:	
ideelle Umformkraft F_{id}:	ideelle Umformkraft F_{id}:
$F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$	$F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$
notwendige Pressenkraft F_P:	notwendige Pressenkraft F_P:
$F_P = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$	$F_P = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$

Tabelle 8-3: Anwenderrichtlinien zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss AIMg 3.

Werkstoff: AIMg 3	
Blechdicke: 2 mm	4 mm
Verfahrensgrenze:	
<p>Niederhalterkraft F_{NH}</p> <p>$F_{NHmax} = 206$ kN</p> <p>123</p> <p>$F_{NHmin} = 82$</p> <p>2,2 3,3 6,0 7,5 $\beta_{Ns} (d_{Fl}/d_{st})$</p> <p>Nachschiebe-Ziehverhältnis</p> <p>Falten</p>	<p>Niederhalterkraft F_{NH}</p> <p>$F_{NHmax} = 206$ kN</p> <p>123</p> <p>$F_{NHmin} = 82$</p> <p>2,3 3,9 7,3 $\beta_{Ns} (d_{Fl}/d_{st})$</p> <p>Nachschiebe-Ziehverhältnis</p> <p>Anheben des Niederhalters</p>
ideelle Umformkraft F_{id}:	ideelle Umformkraft F_{id}:
$F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$	$F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$
<p>ideelle Umformkraft F_{id}</p> <p>600 kN</p> <p>400</p> <p>300</p> <p>200</p> <p>100</p> <p>0</p> <p>5 10 15 20 25</p> <p>Nachschiebeweg X_{Ns}</p>	<p>ideelle Umformkraft F_{id}</p> <p>600 kN</p> <p>400</p> <p>300</p> <p>200</p> <p>100</p> <p>0</p> <p>5 10 15 20 25</p> <p>Nachschiebeweg X_{Ns}</p>
notwendige Pressenkraft F_P:	notwendige Pressenkraft F_P:
$F_P = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$	$F_P = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$

Für das Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss sind in **Tabelle 8-4** bis **Tabelle 8-6** für die Werkstoffe DC 01, QStE 340 und AlMg 3 die Verfahrensfenster für die untersuchten Verfahrensparameter Niederhalterkraft F_{NH} und Nachschiebe-Ziehverhältnis β_{Ns} dargestellt. Mit Hilfe der für verschiedene Nachschiebewege x_{Ns} angegebenen ideellen Umformkraft F_{id} kann die für die Umformung notwendige Pressenkraft F_P für das Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss bestimmt werden.

Tabelle 8-4: Anwenderrichtlinien zum Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss DC 01.

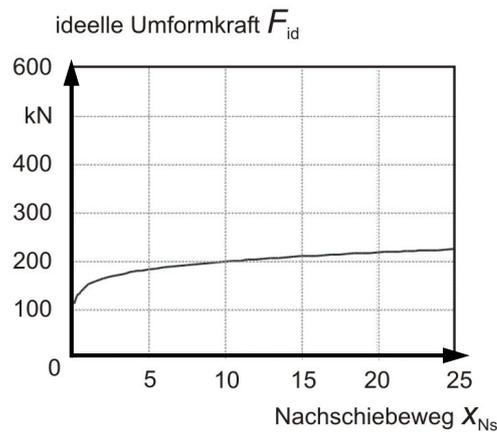
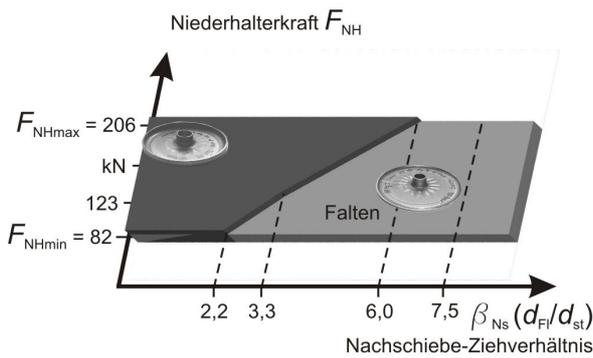
Werkstoff: DC 01

Blechdicke: 2 mm

Verfahrensgrenze:

ideelle Umformkraft F_{id} :

$$F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$$



notwendige Pressenkraft F_P : $F_P = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$

Tabelle 8-5: Anwenderrichtlinien zum Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss QStE 340.

Werkstoff: QStE 340	
Blechdicke: 2 mm	4 mm
Verfahrensgrenze: 	
ideelle Umformkraft F_{id}: $F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$	ideelle Umformkraft F_{id}: $F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$
notwendige Pressenkraft F_P: $F_P = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$	notwendige Pressenkraft F_P: $F_P = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$

Tabelle 8-6: Anwenderrichtlinien zum Krageziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss AIMg 3.

Werkstoff: AIMg 3	
Blechdicke: 2 mm	4 mm
Verfahrensgrenze:	
<p>Niederhalterkraft F_{NH}</p> <p>$F_{NHmax} = 206$ kN</p> <p>$F_{NHmin} = 82$ kN</p> <p>2,2 3,3 4,0 4,5 5,0 5,5 6,0 7,5 $\beta_{Ns} (d_{Fl}/d_{st})$</p> <p>Nachschiebe-Ziehverhältnis</p> <p>Falten</p>	<p>Niederhalterkraft F_{NH}</p> <p>$F_{NHmax} = 206$ kN</p> <p>$F_{NHmin} = 82$ kN</p> <p>2,3 3,9 7,3 $\beta_{Ns} (d_{Fl}/d_{st})$</p> <p>Nachschiebe-Ziehverhältnis</p> <p>Anheben des Niederhalters</p>
ideelle Umformkraft F_{id}:	ideelle Umformkraft F_{id}:
$F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$	$F_{id}(d) = \pi \cdot d_{Fl} \cdot s_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{e}{\ln(1 + A_{gl})} \cdot \ln \frac{d}{d_{Fl}} \right)^n$
<p>ideelle Umformkraft F_{id}</p> <p>600 kN</p> <p>300 kN</p> <p>150 kN</p> <p>100 kN</p> <p>0 kN</p> <p>0 5 10 15 20 25</p> <p>Nachschiebeweg X_{Ns}</p>	<p>ideelle Umformkraft F_{id}</p> <p>600 kN</p> <p>300 kN</p> <p>200 kN</p> <p>100 kN</p> <p>0 kN</p> <p>0 5 10 15 20 25</p> <p>Nachschiebeweg X_{Ns}</p>
notwendige Pressenkraft F_p:	notwendige Pressenkraft F_p:
$F_p = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$	$F_p = 1,5 \cdot F_{id} + F_{NH}$

Für eine bessere Veranschaulichung der Untersuchungsergebnisse sind einzelne durch Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss hergestellte Werkstücke im Vergleich zu konventionell tiefgezogenen Werkstücken in **Bild 8-1** im Maßstab 1:2 dargestellt. Die Verfahren Tief- und Krageziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss sind im **Bild 8-2** gegenübergestellt. Einen Vergleich zwischen konventionellen Krageziehen und Krageziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss zeigt **Bild 8-3**.

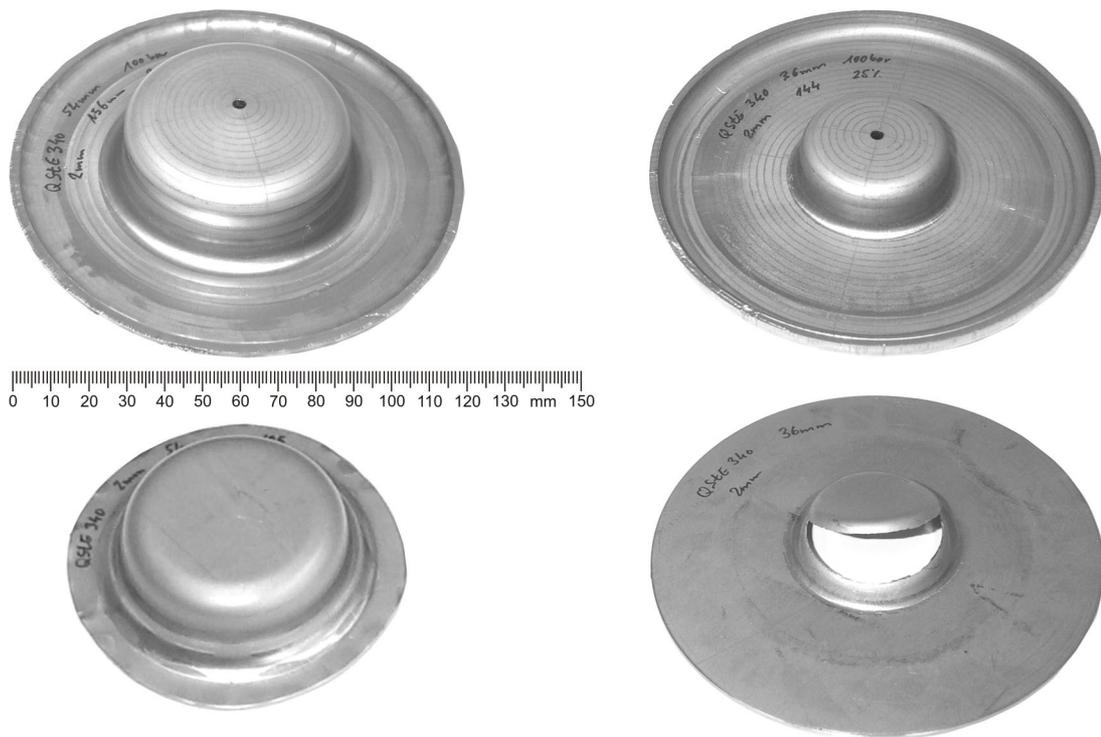


Bild 8-1: Realteile; oben, Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss; unten, konventionelles Tiefziehen; (Blechdicke: 2 mm, Werkstoff: QStE 340, Nachschiebe-Ziehverhältnis: links 2,2; rechts 3,3; Maßstab: 1:2).

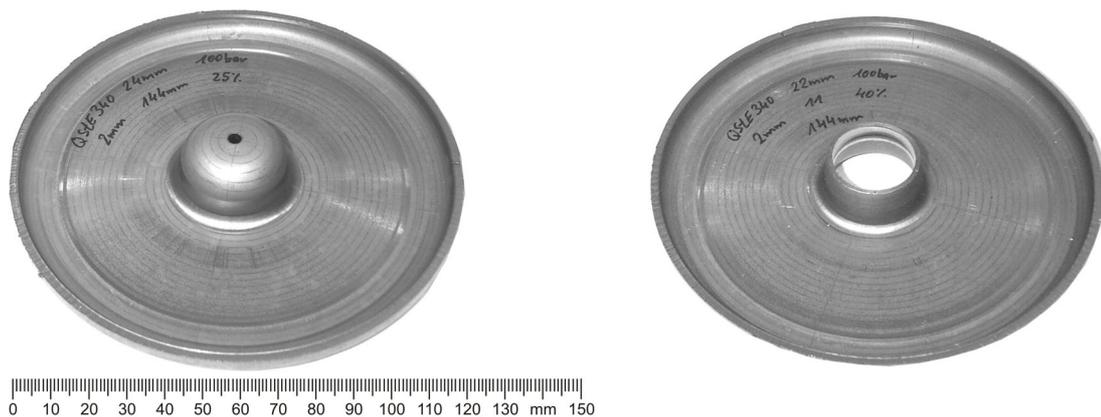


Bild 8-2: Realteile; links Tiefziehen und rechts Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (Blechdicke: 2 mm, Werkstoff: QStE 340, Nachschiebe-Ziehverhältnis: 5,0; Maßstab: 1:2).



Bild 8-3: Realteile; oben, Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss; unten konventionelles Kragenziehen; (Blechdicke: 2 mm, Werkstoff: QStE 340, Nachschiebe-Ziehverhältnis: links 3,3; rechts 4,0; Maßstab: 1:2).

9 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Das Fertigen von Konstruktionsteilen des Maschinen- und Fahrzeugbaus durch Umformen von Dickblech ist eine innovative Alternative zum Gießen und Schmieden in Bezug auf die Verwirklichung von Leichtbaupotenzialen. Sollen napf- oder nabenförmige Formelemente an scheibenförmigen, rotationssymmetrischen Dickblechteilen durch konventionelles Tiefziehen „aus einem Stück“ gefertigt werden, ist die Fertigung nur mit einem hohen Aufwand möglich, wenn die Durchmesser der Formelemente klein sind im Verhältnis zum scheibenförmigen Grundkörper. Eine viel versprechende Lösung, um Fertigungsstufen und damit den umformtechnischen Aufwand bei der Fertigung von Werkstücken mit den oben genannten Geometrien zu minimieren, stellen Verfahren dar, bei denen Werkstoff mechanisch in die Umformzone nachgeschoben wird.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, ein mechanisches Verfahrensprinzip zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss zu entwerfen und zum Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss weiterzuentwickeln sowie die Voraussetzungen für die wissenschaftlich fundierte Verfahrensplanung und Verfahrensrealisierung zu schaffen. Durch das Nachschieben von Werkstoff wird im Flansch des Werkstücks eine radial gerichtete Druckspannungskomponente erzeugt. Diese Druckspannungskomponente bewirkt einen Werkstofffluss in Richtung des sich ausbildenden Formelementes im Zentrum des Werkstücks und führt dazu, dass die Verfahrensgrenzen für das Verfahren Tiefziehen wesentlich erweitert, die Endteileigenschaften verbessert, Umformstufen eingespart und schwer umformbare Werkstoffe angewendet werden können.

Die vorliegende Dissertation beinhaltet Untersuchungen zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (TNWW) sowie dessen Weiterentwicklung zum Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss (KNWW). Den Schwerpunkt bilden theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung von Verfahrensparametern und Verfahrensgrenzen sowie zu den erreichbaren Endteileigenschaften. Die Verfahrensgrenzen der Verfahrensvarianten Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss und Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss wurden für die Werkstoffe DC 01 (Blechdicke 2 mm), QStE 380 (Blechdicke 2 mm und 4 mm) und AlMg 3 (Blechdicke 2 mm und 4 mm) definiert. Die beim Umformvorgang eintretenden Formänderungen sowie die notwendigen Pressenkräfte sind ermittelt worden. Die verbesserten Gebrauchseigenschaften der hergestellten Werkstücke wurden über die Endteileigenschaften wie beispielsweise den Verlauf der Blechdicke, die Höhe der Formelemente (Napfhöhe, Kragenhöhe) und den Verlauf der Härte nachgewiesen.

Durch das Nachschieben von Werkstoff ergeben sich für die Verfahren Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss und Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss eine Reihe von wesentlichen Vorteilen, von denen die wichtigsten hier herausgestellt werden sollen:

Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss:

Werden beim TNWW der Vorgang des Tiefziehens durch den Ziehstempel und der Vorgang des Nachschiebens mit einer verfahrensentsprechenden Geschwindigkeit durchgeführt, dann kann der beim konventionellen Tiefziehen auftretende Versagensfall des Bodenreißers vermieden werden.

Die Hauptverfahrensgrenze beim Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss ist vielmehr das Eintreten einer Instabilität in Form von Falten im Flansch. Falten entstehen dann, wenn die tangentialen Druckspannungen im Flansch einen Grenzwert für das Knicken /21, 22/ überschreiten und die Stabilität des Flansches nicht mehr gegeben ist.

Bei dem Verfahren TNWW können Nachschiebe-Ziehverhältnisse (Verhältnis Außendurchmesser des Flansches zum Ziehstempeldurchmesser) von 5,5 bei einer Blechdicke von 2 mm und 7,3 bei einer Blechdicke von 4 mm erreicht werden. Die Fertigung von Formelementen, deren Durchmesser im Verhältnis zum Durchmesser der Grundgeometrie klein sind, kann mit dem hier untersuchten Verfahren in einem Zug realisiert werden.

Die Reduktion der Blechdicke am Übergang vom Ziehteilboden zur Zarge ist wesentlich geringer als beim konventionellen Tiefziehen. Bei dem Verfahren TNWW können Werkstoffe mit geringerer Eignung zum Tiefziehen oder auch höherfeste Werkstoffe eingesetzt werden.

Mit Hilfe der numerischen Prozesssimulation konnten, aufbauend auf ein durch den Vergleich mit den experimentellen Untersuchungsergebnissen verifiziertes FE-Modell, die verfahrensrelevanten Parameter Nachschiebeweg und Niederhalterkraft in einem breiterem Spektrum untersucht werden, um die vorhandenen weiteren Verbesserungspotenziale beim TNWW aufzeigen und die Verfahrensgrenzen bestimmen zu können.

Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss:

Beim Verfahren KNWW können durch das Nachschieben von Werkstoff und den damit verbundenem Werkstoffeintrag aus dem Flansch in den entstehenden Kragen wesentlich höhere Kragen im Vergleich zum konventionellen Kragenziehen erzielt werden (Vergrößerung der Kragenhöhe auf 300%).

Bei kleinen Aufweitverhältnissen (Verhältnis von Stempeldurchmesser zum Durchmesser des Vorlochs; d_{St}/d_{Kr0}) können durch den Werkstoffeintrag in das entstehende Formelement hohe Kragen hergestellt werden, deren Blechdicke im Gegensatz zum konventionellen Kragenziehen konstant ist und nicht kleiner als die Ausgangsblechdicke wird.

Beim KNWW kann im Vergleich zum konventionellen Kragenziehen infolge der im Flansch auftretenden und in den Kragen eingeleiteten Druckspannungen ein bis zu 150 % größeres Aufweitverhältnis für den untersuchten Parameterbereich d_{St}/s_0 7,5...15 erzielt werden.

9.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die durchgeführten experimentellen, theoretischen und numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass das Nachschieben von Werkstoff in den in dieser Arbeit untersuchten mechanischen Verfahrensvarianten zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss und zum Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss ein wirksames Verfahren ist, um die Verfahrensgrenzen im Vergleich zum konventionellem Tiefziehen oder konventionellem Kragenziehen wesentlich zu erweitern. Die aus dem Stand der Technik erkannten Defizite bei bestehenden Verfahrenvarianten zum Nachschieben von Werkstoff (Faltenbildung im Flansch des Werkstücks, Ausknicken des Randes, kein gezielter Werkstofffluss aus dem Rand in den Flansch gewährleistet) wurden in der neu entworfenen Verfahrensvariante beseitigt, so dass umformtechnisch Werkstücke hergestellt werden können, bei denen der Durchmesser des napf- oder nabenförmigen Formelementes klein ist im Verhältnis zum Außendurchmesser der scheibenförmigen Grundgeometrie.

Die gestellten Forschungsziele konnten erfüllt werden, indem im Rahmen dieser Arbeit die Voraussetzungen für eine rationelle und wissenschaftlich fundierte Verfahrensplanung und –realisierung geschaffen, die Verbesserungspotenziale des TNWW und des KNWW über die Endteileigenschaften nachgewiesen und die Verfahrensgrenzen und Verfahrensparameter experimentell und numerisch ermittelt wurden.

Konventionelles Tiefziehen
von Magnesium bei Raumtemperatur



AZ 31
Ziehverhältnis $\beta = 2,2$
Werkstoffversagen bei Ziehtiefe 8,6 mm

TNWW
von Magnesium bei Raumtemperatur



AZ 31
Nachschiebe-Ziehverhältnis $\beta_{Ns} = 2,2$
Ohne Werkstoffversagen bis Ziehtiefe 15,2 mm
Nachschiebeweg = 7 mm

Bild 9-1: Vergleich konventionelles Tiefziehen und TNWW (Werkstoff: AZ 31, Raumtemperatur)

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen ebenfalls, dass beim TNWW auch Werkstoffe (QStE 340) mit geringerer Eignung zum Tiefziehen eingesetzt werden können. Außerdem lassen Untersuchungen zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss an schwer umformbaren Werkstoffen erkennen (z.B. Magnesium der Legierung AM 20 und AZ 31), dass die in den Flansch des Werkstücks eingebrachten Druckspannungen das Umformvermögen wesentlich erhöhen (**Bild 9-1**).

Durch das TNWW ist es möglich, napfförmige Nebenformelemente ohne Versagen bei Raumtemperatur an Werkstücken aus schwer umformbaren Werkstoffen zu fertigen. Systematische experimentelle und theoretische Untersuchungen des Wirkprinzips für die Anwendung auf schwer umformbare Werkstoffe liegen derzeit nicht vor. Um Aussagen über die Potenziale des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss für die Anwendung bei schwer umformbaren Werkstoffen treffen zu können, sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Aus den Ergebnissen der vorliegenden Dissertation schlussfolgernd besteht auch Bedarf an weiterführenden Untersuchungen, welche den Einfluss eines größeren Nachschiebeweges auf den Hauptversagensfall Faltenbildung bei erhöhten Nachschiebe-Ziehverhältnissen determinieren. Um die Endteileigenschaften der Werkstücke, welche durch das TNWW und durch das Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss hergestellt wurden, weiter zu verbessern, ist eine gleichmäßige Blechdicke im Flansch anzustreben. Daher besteht die Möglichkeit, die Potenziale des Wirkprinzips „Nachschiebens von Werkstoff“ durch eine weiterentwickelte Verfahrensvariante /125/ vollständig auszuschöpfen (**Bild 9-2**).

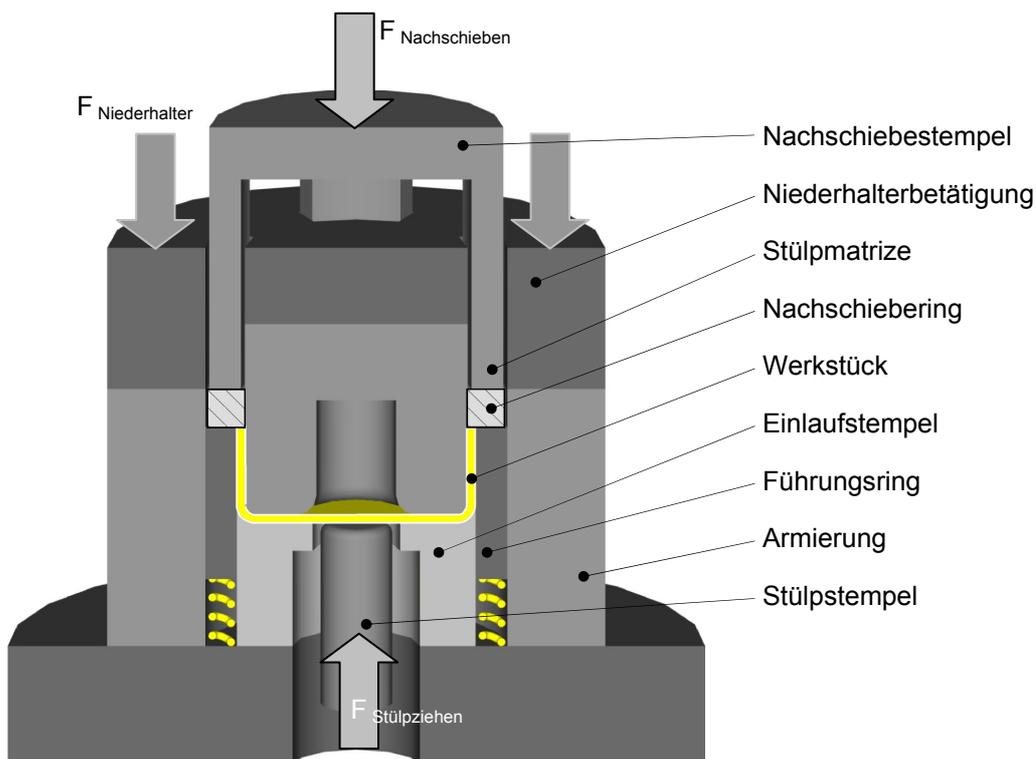


Bild 9-2: Weiterentwickeltes Verfahren zum Nachschieben von Werkstoff /125/.

Durch diese weiterentwickelte Verfahrensvariante zum Tiefziehen oder Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss, insbesondere durch die größeren erreichbaren Nachschiebewege, kann die durch das Verfahrensprinzip des Nachschiebens von Werkstoff herstellbare Teilegeometrie erweitert werden und nun nicht nur scheibenförmige Grundkörper mit höheren napf- oder nabenförmigen Formelementen hergestellt werden, sondern auch napfförmige Grundkörper mit napf- oder nabenförmigen Formelementen (**Bild 9-3** und **Bild 9-4**).

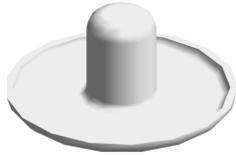
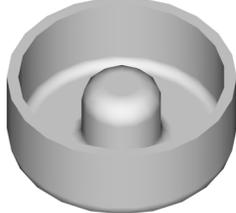
TNWW	Weiterentwickeltes Verfahren zum Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff (Bild 9-2)	
		
<p>scheibenförmige Grundgeometrien mit napfförmigen Formelementen</p>	<p>scheibenförmige Grundgeometrie mit höheren napfförmigen Formelemente möglich</p>	<p>napfförmige Grundgeometrie mit napfförmigen Formelementen</p>

Bild 9-3: Mögliche Geometrien beim weiterentwickelten Tiefziehen mit Nachschieben von Werkstoff im Vergleich zum TNWW.

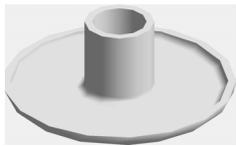
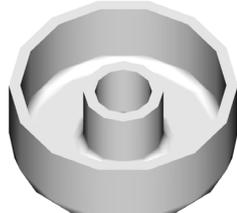
KNWW	Weiterentwickeltes Verfahren zum Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff (Bild 9-2)	
		
<p>scheibenförmige Grundgeometrien mit nabenförmigen Formelementen</p>	<p>scheibenförmige Grundgeometrie mit höheren nabenförmigen Formelemente möglich</p>	<p>napfförmige Grundgeometrie mit nabenförmigen Formelementen</p>

Bild 9-4: Mögliche Geometrien beim weiterentwickelten Kragenziehen mit Nachschieben von Werkstoff im Vergleich zum KNWW.

10 Literatur

- / 1 / Petzold, W.:
Leichtbau durch innovative Blechumformung.
Tagungsband zur Fachtagung „Innovation und Tradition“, Magdeburg, 1998
- / 2 / Lange, K.; Brückner, L.:
Verbindung von Werkstoffentwicklung und Technologie am Beispiel der
Blecbearbeitung.
Blech Rohre Profile 36 (1989) 9, S. 717-718
- / 3 / Schmöckel, D.:
Fertigung von Werkstücken aus dicken Blechen.
Seminar „Neuere Entwicklungen in der Massivumformung“, IFU Stuttgart,
26. – 27. Juni 1979
- / 4 / Kübert, M.; Wieland, R.:
Grundlagen und Anwendung des Tiefziehens von Mittel- und Grobblech.
1. Umformtechnisches Kolloquium, IFU Darmstadt, 1980
- / 5 / Becker, H.; Kübert, M.:
Umformen dicker Bleche.
Werkstatt und Betrieb 112 (1979) 10, S. 709-720
- / 6 / Schacher, H.-D.:
Fertigung von Werkstücken aus dickem Blech durch Umformen und
Schneiden.
Seminar „Neuere Entwicklungen in der Massivumformung“, IFU Stuttgart,
10. – 11. Juni 1980
- / 7 / Schmöckel, D.:
Perspektiven der Umformtechnik.
Tagungsband 3. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, 1988
- / 8 / Schmöckel, D.; Böhm, E.; Engel, H.-E.:
Möglichkeiten der Umformung von Mittel- und Grobblech durch Tiefziehen
zur Substitution von Guss- und Schmiedeprodukten.
Vortragsheft 3. Fachtagung Gestaltung von Fertigungsprozessen im Ma-
schinenbau, Magdeburg 1985
- / 9 / N.N.:
Anlasserkrans aus einer Stahlblechrunde gefertigt.
Stahl-Innovationspreis 1989, Stahl-Informationszentrum Düsseldorf, 1989
- / 10 / Niefer, W.:
Die Umformtechnik in den 90er Jahren.
Tagungsband 2. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, 1985
- / 11 / Niefer, W.:
Die Umformtechnik im Substitutionswettbewerb mit anderen Technologien.
Tagungsband 3. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, 1988

- / 12 / Harenkamp, P.; Zirnsak, H.:
Offenlegungsschrift DE 196 29 738 A1
Anmelder: Leifeld GmbH & Co Ahlen,
23. Juli 1996 / 15 Mai 1997
- / 13 / Friese, U.:
Patentschrift DE 44 00 257 C1
Patentinhaber: WF - Maschinenbau und Blechformtechnik GmbH & Co KG,
07. Januar 1994 / 01. Dezember 1994
- / 14 / Petzold, W.; Eckert, A.:
Untersuchungen zur Umformtechnischen Erzeugung von partiellen Materialanhäufungen an scheibenförmigen Dickblechteilen.
Abschlussbericht 80 B zum EFB/AiF - Forschungsvorhaben 9423 B, Magdeburg, 1996
- / 15 / Petzold, W.; Eckert, A.:
Erzeugung partieller Materialanhäufungen an scheibenförmigen Dickblechteilen.
Blech Rohre Profile 43 (1998) 9, S. 451-454
- / 16 / Scheler, U.:
Untersuchung zur Erzeugung von partiellen Materialanhäufungen an scheibenförmigen Dickblechteilen durch translatorisches Kaltumformen.
Diss., Magdeburg, 1995
- / 17 / Keeler, S. P.:
Sheet metal stamping technology-need for fundamental understanding.
New York – London: Tagungsband Mechanics of Sheet metal forming Plenum Press, 1987
- / 18 / Progress-Werk Oberkirch AG
Prospekt PWO Zulieferteile/Systeme
Oberkirch, 1999
- / 19 / DIN 8584
Fertigungsverfahren Zugdruckumformen.
Beuth Verlag, 1971
- / 20 / Doege, E.:
Untersuchungen der maximal übertragbaren Stempelkraft beim Tiefziehen rotationssymmetrischer, zylindrischer Teile.
Diss., Berlin, 1963
- / 21 / Siebel, E.:
Der Niederhalterdruck beim Tiefziehen.
Stahl und Eisen 74 (1954) 3, S. 155-158
- / 22 / Siebel, E.; Beisswänger, H.:
Tiefziehen.
Carl Hanser Verlag, München, 1955
- / 23 / Lange, K.:
Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft.
Band 3: Blechbearbeitung.
2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1990

- / 24 / Siebel, E.; Panknin, W.:
Das Tiefziehen im Anschlag.
Werkstatttechnik und Maschinenbau 46 (1956) 6, S.321-326
- / 25 / Doege, E.; Witthüser, K.-P.; Grahnert, R.:
Untersuchungen des Reibungsverhaltens beim Tiefziehen unter besonderer
Berücksichtigung des Werkzeugwerkstoffs.
VDI-Berichte Nr. 372, VDI-Verlag, Düsseldorf 1980
- / 26 / Bartz, W.:
Gesichtspunkte für die gezielte Auswahl von Schmierstoffen für die Umfor-
mung.
Blech Rohre Profile 26 (1979) 12, S. 653-658
- / 27 / Kasik, N.; Reissner, J.:
Reibungsverhältnisse im Flansch beim Tiefziehen rotationssymmetrischer
Teile.
Blech Rohre Profile 27 (1980) 5, S303-308
- / 28 / Nakamura, K.; Nakagawa, T.:
Reverse deep drawing with hydraulic counter pressure using the peripheral
pushing effect.
Annals of the CIRP 35 (1986), S. 173-176
- / 29 / Thiruvarudchelvan, S.; Travis F. W.:
An exploration of the hydraulic-pressure assisted redrawing of cups.
Journal of Materials Processing Technology 72 (1997) 1, S. 117-123
- / 30 / Thiruvarudchelvan, S.:
A novel hydraulic-pressure augmented deep-drawing process for high draw-
ing ratios.
Journal of Materials Processing Technology 54 (1995), S. 355-361
- / 31 / Thiruvarudchelvan, S.; Wang, H. B.:
Pressure generated in the hydraulic-pressure augmented deep-drawing
process.
Journal of Materials Processing Technology 74 (1998), S.286-291
- / 32 / Thiruvarudchelvan, S.; Wang, H. B.; Seet, G.:
Hydraulic pressure enhancement of the deep-drawing process to yield
deeper cups.
Journal of Materials Processing Technology 82 (1998) 1-3, S. 156-164
- / 33 / Thiruvarudchelvan, S.; Wang, H.:
Investigations into the hydraulic-pressure augmented deep drawing proc-
ess.
Journal of Materials Processing Technology, 105 (2000) 1/2, S. 161-175
- / 34 / Nakagawa, T.:
New technologies of metal forming.
Annals of the CIRP 35 (1986), S. 481-486
- / 35 / Nakamura, K.; Nakagawa, T.:
Hydraulic counter pressure deep drawing assisted by radial pressure.
Proceedings of 1st ICTP (1984), S. 755-780
- / 36 / Nakamura, K.:
Sheet metal forming with hydraulic counter pressure in Japan.
Annals of the CIRP 36 (1987) 1, S. 191-194

- / 37 / Sizov, E.; Antonov, E. A.; Petrov, S. A.:
Tiefziehen von Teilen mit Flüssigkeitsabstützung.
Umformtechnik 4 (1970) 2, S. 36-40
- / 38 / Engel, H. E.:
Niederhalterloses Stülpziehen rotationssymmetrischer Werkstücke aus Mittel- und Groblech.
Diss., TH Darmstadt, 1985
- / 39 / Engel, H. E.:
Stülpen von Näpfen und Rohren.
Tagungsband zum 2. Umformtechnischen Kolloquium, Darmstadt, 1985
- / 40 / Schmoeckel, D.; Böhm, E.; Engel, H.-E.:
Gleichlaufweiterziehen mit druckbeaufschlagter Restzarge.
Werkstatt und Betrieb 118 (1985) 3, S. 163-166
- / 41 / Schmoeckel, D.; Böhm, E.; Engel, H.-E.:
Deep-Drawing with a compressive loaded cup-rim.
Annals of the CIRP 34 (1985) 1, S. 201-204
- / 42 / Maslennikov, N. A.:
Russians develop „punchless“ drawing.
Metalworking Prod. (1957/58), S. 1417-1420
- / 43 / Maslennikov, N. A.:
Deep drawing of sheet metal by friction forces.
Vestnik masinostroenija, (1956) Heft 5, S. 59-63,
Engl. Übersetzung in: The Engineers Digest 17 (1965) 9
- / 44 / Thiruvarudchelvan, S.; Lewis, W.:
The redrawing of cups at a redraw ratio of 3 using an annular urethane pad.
Journal of Materials Processing Technology, 87 (1999) Heft 1-3, S. 128-130
- / 45 / Thiruvarudchelvan, S.:
Three novel techniques for forming hemispherical cups with flexible tooling.
Journal of Materials Processing Technology 54 (1995) 1-4, S. 129-136
- / 46 / Thiruvarudchelvan, S.:
Stampaggio dei metalli con materiali uretanici. 1a parte.
Sheet forming assisted by uretanic materials. Part 1.
Lamiera 32 (1995) 3, S. 50-58
- / 47 / Thiruvarudchelvan, S.:
Stampaggio dei metalli con materiali uretanici.
Sheet forming and cutting with polyurethane - 2nd part.
Lamiera 32 (1995) 5, S. 130-134
- / 48 / Brakman, C. M.; de Bruin, B. A.; Borsboom, C. G.:
High-drawing ratio ($\beta=6$) single-stroke deep-drawing of tinplate, steel and aluminum sheet materials.
Annals of The International Institution for Production Engineering Research CIRP Vol. 37/1 (1988), S. 275-279
- / 49 / Sato, E.; Fuchizawa, S.; Shimizu, T.; Sano, T.; Ohuchi, K.:
Square-cup deep drawing of thick plate by multi-axial loading.
Advanced Technology of Plasticity 1993, Proc. of the 4th Internat. Conf., 3 (1993) S. 1770-1775

- / 50 / Sato, E.; Shimizu, T.; Sano, T.; Fuchizawa, S.:
Square cup deep drawing of thick plate by multi-axial loading, Part 1: Finite element analysis.
Journal of Materials Processing Technology 48 (1995) 1-4, S. 69-74
- / 51 / Sato, E.; Shimizu, T.; Sano, T.; Fuchizawa, S.:
Square cup deep drawing of thick plate by multi-axial loading, Part 2: Experimental study.
Journal of Materials Processing Technology 48 (1996) 1-4, S. 75-80
- / 52 / Sato, E.; Shimizu, T.; Sano, T.; Fuchizawa, S.:
Effect of multi-axial loading path on limiting drawing ratio.
Journal of Materials Processing Technology 63 (1997) 1-4, S. 60-65
- / 53 / Klamser, M.:
Faltenfrei, Vielpunkt-Zieheinrichtung verbessert Qualität beim Umformen großer Blechteile.
Maschinenmarkt 42 (1992), S. 40-47
- / 54 / Siegert, K.; Hohnhaus, J.:
Steuerbare Stickstoffedersysteme.
Tagungsband zum Symposium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ (1996), S. 371-400
- / 55 / Siegert, K.; Ziegler, M.:
Geschlossener Regelkreis beim Tiefziehen.
Tagungsband zum Symposium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ (1996), S. 503-516
- / 56 / Siegert, K.; Dannemann, E.; Galeiko, A.:
Closed-Loop control system for blank holder force in deep drawing.
Annals of The International Institution for Production Engineering Research CIRP Vol. 44/1 (1995), S. 251-254
- / 57 / Hohnhaus, J.:
Optimierung des Systems Vielpunkt - Zieheinrichtung / Werkzeug.
Beiträge zur Umformtechnik Nr. 20, Stuttgart, 1999
- / 58 / Neugebauer, R.; Braeunlich, H.; Praessler, T.:
Leichtbau durch Verschiebung der umformtechnischen Grenzen mittels intelligenter Ziehtechnik.
Leichtbau durch intelligente Blechbearbeitung, EFB-Kolloquium, Band T17 (1997) S. 16.1-12
- / 59 / Haeussermann, M.:
Vielpunktziehtechnik - Möglichkeiten und Werkzeuggestaltung.
Tagungsband zum Symposium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ (2000), S. 345-372
- / 60 / Klose, L.; Bräunlich, H.:
Einsatz der Vielpunktziehtechnik von Serienbetrieb der Presswerke.
Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Forschung für die Praxis, P 336 (2000)
- / 61 / Siegert, K.; Beck, S.:
Deep drawing with segment-elastic binders.
Production Engineering. Research and Development 8 (2001) 2, S. 35-40

- / 62 / Siegert, K.; Häusermann, M.; Markstädter, H.:
Neues Werkzeugkonzept für das Tiefziehen.
Vom CAD-Modell zum hochgenauen Blechteil, EFB-Kolloquium, Band T22
(2002)
- / 63 / Bräunlich, H.:
Blecheinzugsregelung beim Tiefziehen mit Niederhalter – ein Beitrag zur
Erhöhung der Prozessstabilität.
Diss., TU Chemnitz, 2002
- / 64 / Kergen, R.:
Regelbarer Niederhalter: Ein System, das eine unabhängige Regelung der
Niederhalterkraft an verschiedenen Stellen des Niederhalters ermöglicht.
Tagungsband zum Symposium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“ (1996), S. 401-416
- / 65 / Doege, E.; Doermann, D.; Frank, C.:
Tiefziehen mit pulsierendem Niederhalter.
Konferenz-Einzelbericht: Innovative Karosserieteilfertigung, Band 706
(1996) Seite 3.1-14
- / 66 / Jimma, T.; Kasuga, Y.; Iwaki, N.; Miyazawa, O.; Mori, E.; Ito, K.; Hatano, H.:
An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process.
Journal of Materials Processing Technology 80-81 (1998), S. 406-412
- / 67 / Siegert, K.; Ziegler, M.:
Pulsating blankholder forces.
Production Engineering 5 (1998) 1, S. 27-30
- / 68 / Siegert, K.; Wagner, A.; Ziegler, M.:
Robust Forming Process by Pulsating Blankholder Forces, Multipoint Cushion Systems and Closed Loop Control.
Proceedings of the International Sheet Metal Forming Technology Symposium, San Diego, 1999
- / 69 / Ziegler, M.:
Pulsating Blankholder Technology.
In: Schriftliche Fassung der Vorträge der International Body Engineering Conference (IBEC), Detroit, 27.-29. September 1999
- / 70 / Ziegler, M.:
Schwingende Niederhalterkräfte und Regelkreise beim Tiefziehen axial-symmetrischer Blechformteile.
Beiträge zur Umformtechnik Nr. 19, Stuttgart, 1999
- / 71 / Doege, E.; Frank, C.; Kurz, G.:
Schwingende Niederhalterkraft verbessert die Tiefziehergebnisse.
Maschinenmarkt 106 (2000) 37, S. 28-34
- / 72 / Klose, L.; Braeunlich, H.:
Erweiterung umformtechnischer Grenzen durch vibrationsüberlagerten Tiefziehprozess.
Monografie Forschung für die Praxis, Düsseldorf, Band P383 (2000), S. 1-64
- / 73 / Schöck, J.; Kröplin, B.:
Schwingungsüberlagerte Umformprozesse.
UTF science 1 (2000) 1, S. 9-13

- / 74 / Doege, E.; Frank, C.; Kurz, G.:
Migliori imbutiture con carico pulsante al premilamiera.
Drawings improved by using a swinging load imposed on the blank holder.
Lamiera 38 (2001) 7, S. 74-77
- / 75 / Jin, M.; Kaewtatip, P.; Murakawa, M.:
Utility of ultrasonic vibration applied to metal-forming processes.
Advanced Technology of Plasticity, Vol. III, Proceedings of the 6th ICTP,
1999, S. 2193-2198
- / 76 / Siegert, K.; Ziegler, M.:
Pulsating blankholder forces in the deep-draw process.
Annals of The International Institution for Production Engineering Research
CIRP Vol. 46/1 (1997), S. 205-208
- / 77 / Siegert, K.; Ziegler, M.:
Schwingungsüberlagerte Niederhalterkraft.
Tagungsband zum Symposium "Neuere Entwicklungen in der Blechumformung (1996), S. 371-400
- / 78 / Mayer, A.; Fischer, F.; Sonntag, G.:
Über die Verbesserung des Grenzziehverhältnisses durch differenzierte Kraftübertragung.
Bänder Bleche Rohre 10 (1974), S. 395-399
- / 79 / Mayer, A.:
Über die Verbesserung des Grenzziehverhältnisses beim Tiefziehen.
Diss., TU München, 1974
- / 80 / Yamaguchi, K.; Nihara, M.; Takakura, N.; Shirakawa, N.:
Production of deep cups from developed blanks.
Advanced Technology of Plasticity, Vol. III, Proceedings of the 6th ICTP,
1999, S.2039-2044
- / 81 / Parsa, M. H.; Yamaguchi, K.; Takakura, N.:
Increase in limiting drawing ratio by using partially thickened blanks.
International Journal Mach. Tools Manufact. 33 (1993) 3, S. 465-474
- / 82 / Lange, K.:
Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft.
Band 4: Sonderverfahren, Prozesssimulation, Werkzeugtechnik, Produktion.
2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1990
- / 83 / Deh, R.; Weisel, B.:
Untersuchungsergebnisse zum Kaltaufweiten dicker Bleche.
Fertigungstechnik und Betrieb 21 (1971) 6, S. 367-371
- / 84 / Kienzle, O.; Timmerbeil, H.:
Herstellung und Gestaltung durchgezogener enger Kragen an Fein- und Mittelblech.
Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen, 4 (1953), 5 (1954)
- / 85 / Wilken, R.:
Das Biegen von Innenborden mit Stempeln.
Diss., TH Hannover, 1957

- / 86 / Brambauer, F.:
Ermittlung der maximalen Aufweitverhältnisse beim Kragenziehen.
Umformtechnik 5 (1971) 3, S. 45-48
- / 87 / Küppers, W.:
Das Verhalten nichtrostender Feinbleche beim Kragenziehen.
Blech Rohre Profile (1971) 10, S. 403-409
- / 88 / Wilken, R.:
Das Biegen von Innenborden mit Stempeln.
Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-
Westfalen, Nr. 794, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen,
- / 89 / Oehler, G.:
Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge.
Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1973, 8. Auflage
- / 90 / Spur, G.; Stöferle, T.:
Handbuch der Fertigungstechnik.
Band 2/3: Umformen, Zerteilen.
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1985
- / 91 / Kaczmarek, E.:
Praktische Stanzerei – Ziehen, Hohlstanzen, Pressen, Automatische Zu-
führ – Vorrichtungen.
Springer Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg, 1954, 4. Auflage
- / 92 / Schlagau, S.:
Verfahrensverbesserung beim Kragenziehen durch Überlagerung von
Druckspannungen.
Diss., TH Darmstadt, 1988
- / 93 / Schlagau, S.:
Kragenziehen mit Spannungsüberlagerung.
Industrie-Anzeiger 106 (1984) 102, S. 28-29
- / 94 / Schlagau, S.:
Kragenziehen mit Gegenhalter verringert Rissgefahr
Bänder Bleche Rohre 27 (1986) 1, S. 9-12
- / 95 / Schlagau, S.:
Einfluss überlagerter Druckspannungen auf die Verfahrensgrenzen beim
Kragenziehen von Aluminium.
Aluminium 62 (1986) 11, S 826-829
- / 96 / Oehler, G.:
Blechdurchzüge für Gewinde.
Werkstatttechnik 62 (1972) 7, S. 386-388
- / 97 / Offenlegungsschrift DE 196 29 738 A 1
- / 98 / Patentschrift DE 44 00 257 C 1
- / 99 / Nakamura, K.; Nakagawa, T.:
Hydraulic counter pressure forming of tube with flange.
Journal of the JSTP, 1986, Vol. 27, Nr-310, S. 1298-1304
- / 100 / DIN EN 10002
Zugversuch.
Beuth Verlag, 1991

- / 101 / Lange, E.:
Die Bedeutung von Kennwerten und Verfahren zur Beurteilung des Umformverhaltens beim Tiefziehen von Feinblechen.
Teil 1, Bänder Bleche Rohre 16 (1975) 12, S. 511-514
- / 102 / Lange, E.:
Die Bedeutung von Kennwerten und Verfahren zur Beurteilung des Umformverhaltens beim Tiefziehen von Feinblechen.
Teil 2, Bänder Bleche Rohre 17 (1976) 12, S. 9-12
- / 103 / Ziegler, W.:
Der Zugversuch als Hilfsmittel zur Beurteilung der Blechverarbeitungseigenschaften.
Stahl und Eisen 84 (1964) 20, S. 1274-1276
- / 104 / Müschenborn, W.:
Untersuchung der Formänderung an zwei Ziehteilen mit Hilfe eines photochemisch aufgetragenen Netzgitters.
Thyssenforschung 1 (1969) 3, S. 109-115
- / 105 / Müschenborn, W.; Sonne, H. M.; Meyer, L.:
Die Formänderungsanalyse nach dem Messrasterverfahren.
Bänder Bleche Rohre 15 (1974) 10, S. 407-414
- / 106 / Radtke, H.:
Der wirtschaftliche Einsatz des Messraster-Verfahrens in der Blech-Umformtechnik.
Industrie-Anzeiger 102 (1980) 84, S. 38-40
- / 107 / Reitzle, W.; Altner, W.; Drecker, H.; Fischer, F.:
Einsatz der Messraster-technik beim Blechumformen.
Stahl und Eisen 103 (1983) 19, S. 967-971
- / 108 / Funk, P.; Lange, E.:
Ermittlung von Formänderungen an tiefgezogenen Blechteilen durch Messraster.
Blech Rohre Profile 15 (1974) 6, S. 251-254
- / 109 / Romanowski, W. P.:
Handbuch der Stanzereitechnik.
VEB Verlag Technik, Berlin, 1965
- / 110 / Jahnke, H.; Retzke, R.; Weber, W.:
Umformen und Schneiden.
VEB Verlag Technik, Berlin, 1981
- / 111 / Ludwik, P.:
Elemente der technologischen Mechanik.
Springer-Verlag, Berlin, 1909
- / 112 / Hollomon, J. H.:
Tensile Deformation.
Trans Met. Soc AIME 162 (1945), S. 268-290
- / 113 / Lange, K.; Roll, K.; Tekkaya, A.; Wanheim, T.:
Prozesssimulation und -optimierung.
Umformtechnik Bd.4: Sonderverfahren, Prozesssimulation, Werkzeugtechnik, Produktion. 2. Auflage, Berlin Heidelberg, Springer Verlag 1993

- / 114 / Roll, K.; Gröber, M.:
Numerische Prozesssimulation in der Blechumformung – Möglichkeiten und Grenzen.
K. Siegert (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, 1994, S. 423-442
- / 115 / Carleer, B.:
Finite element analysis of deep drawing.
Diss., University of Twente (Netherlands), Enschede: FEBO druk BV, 1997
- / 116 / Tekkaya, A.:
State-of-the-Art of Simulation of Sheet Metal Forming.
Int. Conf. SheMet `98, University of Twente (Netherlands), Enschede, S. 53-66
- / 117 / Tekkaya, A.:
Stand der Simulation in der Blechumformung.
Blech Rohre Profile 45 (1998) 11, S. 62-69
- / 118 / Aust, M.; Häussermann, M.:
FEM-Berechnung von Umformwerkzeugen.
Konferenz-Einzelbericht: 19. CAD-FEM Users' Meeting 2001, Internat. FEM-Technologietage, Conf. Proc., Vol. 2, Potsdam, 2 (2001) S. 2.10.6.1-2.10.6.12
- / 119 / Hill, R.:
The mathematical theory of plasticity.
Oxford University Press, London, 1971
- / 120 / Eichhorn, A.; Häfke, F.; Motsch, S.; Felde, A.:
Reibung beim Innenhochdruckumformen mit Nachschieben von Werkstoff.
Abschlussbericht zum Forschungsthema EFB/AiF 10891, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1999
- / 121 / Yu, Y.:
Entwicklung eines Reibgesetzes für die Blechumformung.
Diss., TU Darmstadt, 1994
- / 122 / Staeves, J.:
Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung.
Diss., TU Darmstadt, 1994
- / 123 / Hilbert, H.:
Stanzereitechnik Band 2. Umformende Werkzeuge.
Carl Hanser Verlag, München, 1970
- / 124 / Lange, K.:
Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft.
Band 3: Blechbearbeitung.
2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1990
- / 125 / Eichhorn, A.; Otto, M.:
Stülpziehen mit Niederhalter und Nachschieben von Werkstoff.
Antrag zum AiF/EFB-Forschungsprojekt, AiF BR 11661/01, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2001

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Manuel Otto
Geburtsdatum: 6. November 1971
Geburtsort: Leinefelde
Familienstand: ledig

Schul- und Berufsausbildung:

09/78 - 06/88 Polytechnische Oberschule in Leinefelde,
Klasse mit erweitertem Russisch-Unterricht (**Abschlussnote: 1,2**)
09/88 - 06/91 Berufsausbildung mit Abitur
06/91 Abitur (**Abschlussnote: 1,7**)
Facharbeiter: Instandhaltungsmechaniker (**Abschlussnote: 1,9**)

Studium:

09/92 – 02/99 Maschinenbaustudium an der "Otto-von-Guericke-Universität" Magdeburg
07/94 Vordiplom (**Note: 2,1**)
09/94 - 07/96 Hauptstudium: Allgemeiner Maschinenbau, Vertiefungsrichtung
Baumaschinenkonstruktion/ -technik
08/96 - 12/97 Auslandsstudium (Masterprogramm) am Rose-Hulman Institute of
Technology in Terre Haute, Indiana, USA
Vertiefungsrichtung: Konstruktion/Simulation
Master-Thesis: "Vibration Analysis of a Large Support Structure of a
Paper Manufacturing Machine" für WESTON Paper, Terre Haute, In-
diana, USA (**Note: 1,0**)
01/98 - 02/99 Hauptstudium: Allgemeiner Maschinenbau
Diplomarbeit: „Optimierung einer Nutzfahrzeug - Kippbrücke“ mit der
Methode der Finiten Elemente für F.X. MEILLER, München
(**Note: 1,0**)

Tätigkeiten während des Studiums:

01/96 - 08/96 studentische Hilfskraft am Institut für Förder- und Baumaschinen-
technik, Stahlbau, Logistik
09/96 - 11/97 Graduate Assistant am Rose-Hulman Institute of Technology
02/98 - 10/98 wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Verfahrenstechnik

Studienabschlüsse:

11/97 Master of Science in Mechanical Engineering (M.Sc.)
(**Abschlussnote: 1,0**)
02/99 Diplomingenieur (Dipl.-Ing.) (**Abschlussnote: 1,7**)

Beruflicher Werdegang:

seit 03/99 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und
Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,
Lehrstuhl für Ur- und Umformtechnik

