

# **Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring von Hohlprofilen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

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

von           Dipl.-Ing. Dirk Bietke

geb. am       20.03.1971 in Eisenhüttenstadt

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

Gutachter:

Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Friedhelm Lierath

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

Honorarprof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn

Promotionskolloquium am 17.06.2005

In der Wissenschaft gleichen wir alle nur den Kindern,  
die am Rande des Wissens hie und da einen Kiesel aufheben,  
während sich der weite Ozean des Unbekannten  
vor unseren Augen erstreckt.

*Sir Isaac Newton*

*(1643 - 1727), englischer Mathematiker, Physiker und Astronom*

**Inhaltsverzeichnis**

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Einheiten .....	VI
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen .....	IX
1 Einleitung .....	1
2 Stand der Technik .....	3
2.1 Vorbemerkungen .....	3
2.2 Einordnung des Innenhochdruckschneidens als Fertigungsverfahren .....	4
2.3 Grundlagen zum Schneiden .....	5
2.3.1 Abgrenzung des Innenhochdruckschneidens .....	5
2.3.2 Analyse des Schneidvorganges .....	6
2.3.3 Scherschneiden als Basis für das Innenhochdruckschneiden .....	10
2.4 Schneiden mit flüssigem Wirkmedium .....	14
2.4.1 Innenhochdrucklöcher .....	14
2.4.2 Innenhochdruckabschneiden .....	17
2.5 Zusammenfassung zum Stand der Technik .....	18
3 Zielstellung und Vorgehensweise .....	20
4 Grundlegende Betrachtungen zum Innenhochdruckabschneiden .....	23
4.1 Erweiterte Einordnung der Verfahren des Innenhochdrucktrenns in die Systematik der Fertigungsverfahren .....	23
4.2 Erweiterung der Systematik des Trenns von Hohlprofilen .....	26
4.3 Verfahrensprinzip Innenhochdruckabschneiden .....	29
4.4 Innendruckwirkung und Spannungszustand .....	30
4.5 Modellierung des Schneidvorganges .....	32
5 Untersuchungsprogramm .....	40
5.1 Versuchsplanung .....	40
5.2 Versuchsstand .....	42
5.3 Messgrößen und Messverfahren .....	44
5.4 Versuchsrohre .....	47
5.4.1 Mechanische Kennwerte und Fließkurven .....	47
5.4.2 Härte .....	51
5.4.3 Wanddicke .....	52
5.5 Schmierstoff .....	54

---

6	Untersuchungsergebnisse zum Innenhochdruckabschneiden unverformter Rohre – Innenhochdruck-Einfachabschneiden (IH-EAS) .....	55
6.1	Einfluss der Werkzeuggestaltung auf den Ablauf des Schneidvorganges ....	55
6.1.1	Definition der geometrischen Werkzeugparameter .....	55
6.1.2	Einfluss der Schneidnuttiefe auf den Ablauf des Schneidvorganges .....	55
6.1.3	Einfluss der Schneidnutbreite auf den Ablauf des Schneidvorganges .....	60
6.1.4	Zusammenfassung und Festlegung der Geometrie des Versuchswerkzeuges.....	61
6.2	Schneidparameter.....	63
6.2.1	Schneidinnendrücker, Berechnung von Schneidinnendrücker.....	63
6.2.2	Prozessfenster und Arbeitsbereich .....	69
6.3	Schnittteileigenschaften .....	72
6.3.1	Schnittkantengeometrie .....	72
6.3.2	Schnittgrat.....	77
6.3.3	Schnittfläche .....	79
6.4	Prozesssimulation.....	84
6.5	Innenhochdruck-Einfachabschneiden unter axialen Nachschiebekräften .....	92
6.6	Innenhochdruck-Einfachabschneiden mit Elastomerabstützung.....	95
6.7	Innenhochdruck-Einfachabschneiden von geschweißten Rohren.....	98
6.8	Innenhochdruck-Doppelabschneiden von unverformten Rohren .....	101
6.9	Zusammenfassung und Anwenderrichtlinie zum Innenhochdruck-Einfachabschneiden von unverformten Rohren .....	105
7	Untersuchungsergebnisse zum Innenhochdruckabschneiden von innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen – Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden (IH-TAS) .....	108
7.1	Vorbemerkungen zum Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden.....	108
7.2	Geometrische Werkzeugparameter .....	109
7.3	Prozessführung und Prozessstrategien .....	110
7.4	Schneidbedingungen beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden.....	114
7.4.1	Entstehung inhomogener Schneidbedingungen .....	114
7.4.2	Geometrische Schneidbedingungen beim IH-TAS .....	115
7.4.3	Stoffliche Schneidbedingungen beim IH-TAS .....	119
7.4.4	Zusammenfassung - Schneidbedingungen beim IH-TAS .....	122
7.5	Prozessfenster und Arbeitsbereich .....	124

---

7.6	Schnittkantenqualität.....	131
7.7	Zusammenfassung und Anwenderrichtlinie zum IH-TAS.....	135
8	Zusammenfassung.....	138
9	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	140
10	Literaturverzeichnis .....	143
11	Anhang: Stützstempelgeometrien beim IH-TAS.....	151

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$A_{50}$	Bruchdehnung	%
$A_{gl}$	Gleichmaßdehnung	%
$A_N$	Fläche des Werkstücks über der Schneidnut	mm <sup>2</sup>
$A_S$	Schnittfläche	mm <sup>2</sup>
$b_E$	Kanteneinzugsbreite	mm
$b_G$	Schnittgratbreite	µm
$b_N$	Schneidnutbreite	mm
$b_{RZ}$	Beeinflusste Randzone	mm
$C$	Schädigungswert	-
$d$	Druckstempeldurchmesser bei der Elastomerprüfung	mm
$d_a$	Rohraußendurchmesser	mm
$d_i$	Rohrinnendurchmesser	mm
$d_m$	Mittlerer Rohrdurchmesser	mm
$d_0$	äußerer Ausgangsdurchmesser des Rohres	mm
$d_{TS}$	Formelementdurchmesser T-Stück	mm
$F_{ax}$	Axialkraft	N
$F_{max}$	Maximale Prüfkraft bei der Elastomerprüfung	N
$F_N$	Niederhalterkraft	N
$F_{rad}$	Radialkraft	N
$F_{Smax}$	Erforderliche Schneidkraft beim mechanischen Scherschneiden mit geschlossener Schnittlinie	N
$F_{SR}$	Resultierende Kraft am Schneidring beim Scherschneiden	N
$F_{St}$	Stempelkraft beim mechanischen Scherschneiden	N
$h_B$	Bruchflächenhöhe	mm
$h_E$	Kanteneinzugshöhe	mm
$h_G$	Schnittgrathöhe	µm
$h_S$	Glattschnitthöhe	mm
$h_{SK}$	Höhe (Lage) der Schneidkante	mm
$h_T$	Trennflächenhöhe	mm
$h_{TS}$	Formelementhöhe T-Stück	mm
$HV$	Härte nach Vickers	-
$HV_0$	Grundhärte	-
$HV_1$	Härte nach dem Schneidvorgang	-
$k$	Werkstoffspezifische Schubfließgrenze	N/mm <sup>2</sup>
$k_f$	Fließspannung	N/mm <sup>2</sup>

$k_S$	Schneidwiderstand beim mechanischen Scherschneiden mit geschlossener Schnittlinie	N/mm <sup>2</sup>
$k_{Sp}$	Schneidwiderstand beim IH-EAS von Rohren	N/mm <sup>2</sup>
$l_{NU}$	Länge der Schneidkante an der Schneidnut	mm
$l_S$	Länge der Schnittlinie	mm
$M_B$	Biegemoment zwischen $F_{St}$ und $F_{SR}$	Nm
$n$	Verfestigungsexponent	-
$p_{ax\_links}$	Druck am linken Axialzylinder	bar
$p_{ax\_rechts}$	Druck am rechten Axialzylinder	bar
$p_i$	Innendruck	bar
$p_{iB}$	Berstinnendruck beim IH-TAS	bar
$p_{iS}$	Schneidinnendruck	bar
$p_{iK}$	Kontaktinnendruck beim IH-TAS	bar
$p_{rad}$	Druck am Radialzylinder	bar
$r$	Senkrechte Anisotropie	-
$R_B$	Rauheit der Bruchfläche	$\mu\text{m}$
$r_B$	Radius der Biegekante	mm
$R_m$	Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$R_{p0,2}$	0,2% Dehngrenze, technische Streckgrenze	N/mm <sup>2</sup>
$R_S$	Rauheit der Glattschnittfläche	$\mu\text{m}$
$r_S$	Radius der Schneidkante	mm
$r_{ÜFE}$	Übergangsradius zum Formelement „T-Stück“	mm
$s$	Wanddicke, Blechdicke	mm
$s_0$	Ausgangswanddicke	mm
$t$	Zeit	s
$t_i$	Zeitpunkt i	s
$t_N$	Schneidnuttiefe	mm
$x_{ax}$	Axialer Nachschiebeweg (gesamt)	mm
$x_{ax\text{-Grenz}}$	Maximaler axialer Nachschiebeweg beim IH-EAS mit Nachschieben	mm
$x_{ax\_links}$	Weg des linken Axialzylinders	mm
$x_{ax\_rechts}$	Weg des rechten Axialzylinders	mm
$x_{rad}$	Radialweg	mm
$\alpha$	Glattschnittwinkel	°
$\beta$	Bruchflächenwinkel	°
$\varepsilon$	Dehnung	%
$\varepsilon_{Umax}$	Maximale Umfangsdehnung	%
$\gamma$	Winkel zwischen den Wirkrichtungen von $\sigma_{vSZ}$ und $\sigma_{vEZ}$	°

---

$\varphi_{BR}$	Umformgrad bei Einsetzen der Werkstofftrennung	-
$\sigma_1$	größte Hauptnormalspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_2$	mittlere Hauptnormalspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_3$	kleinste Hauptnormalspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_a$	axiale Spannungskomponente	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_r$	radiale Spannungskomponente	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_t$	tangentiale Spannungskomponente	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_v$	Vergleichsspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{VEZ}$	Vergleichsspannung in der Einformzone	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{VSZ}$	Vergleichsspannung in der Schnittzone	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{BR}$	Schubbruchgrenze	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{FL}$	Schubfließgrenze	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{FL-0}$	Schubfließgrenze des Ausgangsmaterials	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{FL(t_i)}$	Schubfließgrenze zum Zeitpunkt $t_i$ ; Momentanschubfließgrenze	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{max}$	maximale Schubspannung	N/mm <sup>2</sup>



**Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen**

DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
FEM	Finite Elemente Methode
IH-	Innenhochdruck-
IHAS	Innenhochdruckabschneiden
IHD	Innenhochdruckdurchsetzen
IH-DAS	Innenhochdruck-Doppelabschneiden
IH-EAS	Innenhochdruck-Einfachabschneiden
IHES	Innenhochdruckeinschneiden
IHF	Innenhochdruckfügen
IHL	Innenhochdrucklöcher
IH-MAS	Innenhochdruck-Mehrfachabschneiden
IHR	Innenhochdruckreißen
IHS	Innenhochdruckschneiden
IHST	Innenhochdruckstechen
IHT	Innenhochdrucktrennen
IH-TAS	Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden
IHU	Innenhochdruckumformen
IHV	Innenhochdruckverfahren
IHZ	Innenhochdruckzerteilen
Max	Maximum
Min	Minimum
n.e.	nicht ermittelt
NFE	Nebenformelement
ON	Ordnungsnummer
SF	Stempelform
VDI	Verein Deutscher Ingenieure



## 1 Einleitung

Der Leichtbau stellt in vielen Bereichen der industriellen Produktion, vor allem jedoch im Automobilbau, einen grundlegenden Aspekt der Entwicklung dar. Vor dem Hintergrund ansteigender Kraftstoffpreise sowie verschärfter Abgasnormen ist die Leichtbaustrategie als Möglichkeit der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von besonderem Interesse. Das Innenhochdruckumformen (IHU) hat sich als eine wesentliche Komponente der Leichtbaustrategie inzwischen fest etabliert. Der Hauptgrund dafür ist die Möglichkeit, Integralhohlformteile mit komplexer Geometrie reproduzierbar mit hoher Genauigkeit herstellen zu können /1/-/8/.

Bei der überwiegenden Zahl von Integralhohlformteilen, die durch Innenhochdruckumformen hergestellt werden, sind zusätzliche Trennoperationen notwendig, um qualitative bzw. funktionelle Anforderungen zu erfüllen. Die häufigsten Trennvorgänge sind:

- das Lochen der Hohlformteile,
- das Beschneiden der Bauteilenden,
- das Trennen von Doppelteilen sowie
- die Realisierung von funktionellen Schnitten an Nebenformelementen bzw. Bauteilenden.

Zur Verbesserung der Effektivität des Gesamtherstellungsprozesses wird das Lochen der Hohlformteile inzwischen mit Wirkmedium als Innenhochdrucklochen in Verfahrenskombination mit dem Innenhochdruckumformen realisiert /9/-/13/. Für andere Trennvorgänge wird gegenwärtig zumeist auf thermische, aber auch auf mechanische Trennverfahren zurückgegriffen. Hervorgerufen durch den zunehmenden Kostendruck und die damit verbundene Notwendigkeit zur weiteren Erhöhung der Effektivität der Produktion besteht die Forderung, in separaten Prozessstufen durchgeführte Schneidoperationen in den IHU-Prozess zu integrieren. Das Innenhochdruckabschneiden (IHAS) stellt in diesem Zusammenhang eine interessante Alternative zu den o.g. Trennverfahren dar. Die prinzipielle Machbarkeit des Innenhochdruckabschneidens konnte, abgeleitet aus dem Innenhochdrucklochen, in einzelnen Versuchen nachgewiesen werden /14/. Systematische Untersuchungen zu den Verfahrensgrundlagen sowie zu Verfahrensparametern und –grenzen des Innenhochdruckabschneidens fehlen bislang, sind jedoch zwingende Voraussetzung für die Anwendung dieser Technologie.

Die vorliegende Arbeit greift dieses Defizit auf und leistet einen Beitrag zur wissenschaftlich-technischen Erschließung des Innenhochdruckabschneidens. Durch theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren werden Verfahrensgrundlagen, –parameter und –grenzen zum IHAS unter homogenen Schneidbedingungen erarbeitet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden die Basis für die technische Anwendung des Innenhoch-

druckabschneidens. Hauptschwerpunkte sind die Machbarkeit des Trennvorganges sowie die wissenschaftlich basierte und reproduzierbare Anwendung des Innenhochdruckabschneidens in Abhängigkeit von den stofflichen Ausgangseigenschaften, der Werkzeuggestaltung und den erreichbaren Schnittteilqualitäten.

Darauf aufbauend wird das IHAS unter inhomogenen Schneidbedingungen am Beispiel des Innenhochdruckabschneidens der Kopfbereiche von zuvor innenhochdruckumgeformten T-Stücken untersucht. Mit dieser praxisrelevanten Fertigungsaufgabe wird das Innenhochdruckabschneiden erstmals in Verfahrenskombination mit dem Innenhochdruckumformen umfassend wissenschaftlich untersucht.

Die vorliegende Arbeit leistet mit wissenschaftlichen und technologischen Untersuchungen zum IHAS unter homogenen und inhomogenen Schneidbedingungen einen wesentlichen Beitrag zur Erschließung des Innenhochdruckabschneidens als effizientes Fertigungsverfahren sowie zu seiner Anwendung bei der Herstellung von Integralhohlformteilen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Vorbemerkungen

Herstellungstechnologien für einbaufertige Hohlformbauteile mit dem Kernverfahren Innenhochdruckumformen erfordern fast immer auch die Integration von Trennoperationen in den Prozessablauf. Dafür kommen bisher vorrangig thermische und mechanische Verfahren /15/-/17/, in jüngster Zeit jedoch auch Schneidvarianten mit Wirkmedium (Innenhochdruckschneiden) zur Anwendung /12/. Die notwendige Realisierung des thermischen und mechanischen Schneidens in einem separaten Fertigungsschritt wirkt sich nachteilig auf die Effektivität des gesamten IHU-Prozesses aus /17/,/18/. Das Innenhochdruckschneiden ist für IHU-Anwender gerade deshalb interessant, weil es in unmittelbarer Fertigungsfolge in einem Werkzeug mit dem Innenhochdruckumformen ausgeführt werden kann und so zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beiträgt. Bei entsprechender wissenschaftlich-technischer Erschließung werden sich neben dem schon praktizierten Innenhochdrucklochen weitere Varianten des Innenhochdruckschneidens durchsetzen, ohne die etablierten thermischen und mechanischen Schneidverfahren komplett ersetzen zu können. Tabelle 2-1 zeigt eine Zusammenstellung der für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit relevanten Eigenschaften der Trennverfahren in Verbindung mit dem Innenhochdruckumformen.

Tabelle 2-1: Bewertung von Trennverfahren in Verbindung mit dem Innenhochdruckumformen

	Thermisches Schneiden		Mechanisches Schneiden		Innenhochdruckschneiden	
<b>Formspeicher der Aktivelemente</b>	+	kein	-	hoch	-	mittel
<b>Flexibilität</b>	+	hoch	-	gering	-	gering
<b>Bearbeitungszeit</b>	-	hoch	+	gering	+	gering
<b>Schnittliniengeometrien</b>	+	variabel	-	eingeschränkt	-	eingeschränkt
<b>Gratbildung</b>	+	gering	-	ja	-	ja
<b>Verunreinigungen</b>	-	ja	+	nein	+	nein
<b>Anlagenkosten</b>	-	sehr hoch	+	gering	+	sehr gering
<b>Betriebskosten</b>	-	hoch	+	gering	+	sehr gering
<b>Stellung zum Umformprozess (IHU)</b>	-	separat	-	separat	+	integriert

- ..... negative Bewertung  
+ ..... positive Bewertung

Beim Innenhochdruckschneiden wirken ein geometrisch bestimmter Schneidkeil und das Wirkmedium auf das Schnittteil. Technisch angewendet wird dieses Prinzip bislang beim Innenhochdrucklochen. Beim klassischen, mechanischen Scherschneiden wirken zwei geometrisch bestimmte Schneidkeile auf das Schnittteil. Von

beiden Verfahren, dem Innenhochdrucklochen und dem Scherschneiden können grundlegende Erkenntnisse für das Innenhochdruckabschneiden abgeleitet werden. Zum Innenhochdruckabschneiden sind umfassende Untersuchungen bisher nicht bekannt. Der Stand der Technik zu diesem Verfahren beschränkt sich auf die bisher im Schrifttum vorliegenden Ansätze in Form von Patentschriften sowie erste experimentelle Untersuchungen zur technischen Realisierbarkeit.

Im Zusammenhang mit der Darstellung der wissenschaftlichen Grundlagen zum Innenhochdruckabschneiden sind eindeutige Begriffsbestimmungen und die Einordnung in die Systematik der Fertigungsverfahren notwendig und zweckmäßig. Der Entwicklungsstand dieser Arbeiten wird nachfolgend ebenfalls dargestellt.

## 2.2 Einordnung des Innenhochdruckschneidens als Fertigungsverfahren

In der DIN 8580 /19/ ist das Ordnungssystem der Fertigungsverfahren in seiner grundlegenden Struktur dargestellt. In der 3. Hauptgruppe, dem *Trennen*, ist darin unter der Ordnungsnummer 3.1 das *Zerteilen* eingeordnet (vgl. Bild 2-1). *Zerteilen* ist definiert als mechanisches Trennen von Werkstücken ohne Entstehen von formlosem Stoff. Eine weiterführende Gliederung des Zerteilens ist in der DIN 8588 /20/ angegeben und ebenfalls in Bild 2-1 enthalten. Das *Scherschneiden* ist unter der Ordnungsnummer 3.1.1 eingegliedert und als das Zerteilen von Werkstücken zwischen zwei Schneiden, die sich aneinander vorbei bewegen, definiert.

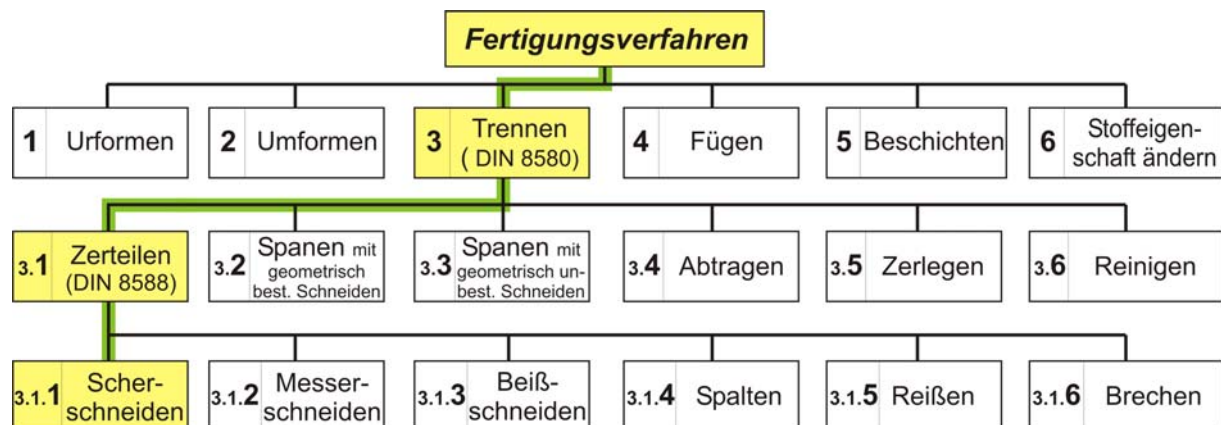


Bild 2-1: Einordnung des Scherschneidens in die Systematik der Fertigungsverfahren (nach DIN 8580 /19/ und DIN 8588 /20/)

In der jüngst aktualisierten Fassung der DIN 8588 wird die Definition des Scherschneidens so erweitert, dass einer der beiden Schneidkeile durch ein Wirkmedium ersetzt werden kann. Damit lassen sich die Verfahren des Innenhochdruckschneidens prinzipiell in diese Kategorie einordnen, wobei in der Norm als einziges Beispiel auf das Innenhochdrucklochen verwiesen wird. Im DIN-Regelwerk existiert somit bisher lediglich ein Hinweis auf Schneidverfahren mit einem Schneidkeil und Wirkmedium. Als systematische Erfassung und Definition der Innenhochdruckschneidverfahren ist dieser Stand jedoch noch völlig unzureichend.

Parallel dazu gibt es Bestrebungen, die Innenhochdruckverfahren selbst zu systematisieren. Diese Arbeiten sind in der VDI-Richtlinie 3146, Blatt 1 und 2 dokumentiert /21/. Hierin werden die Innenhochdruckverfahren (IHV) in das Innenhochdruckumformen (IHU), das Innenhochdrucktrennen (IHT) sowie das Innenhochdruckfügen (IHF) unterteilt. Das Innenhochdrucktrennen gliedert sich entsprechend Blatt 2 dieser VDI-Richtlinie in das Innenhochdrucklochen (IHL), Innenhochdruckeinschneiden (IHES), Innenhochdruckstechen (IHST) sowie das Innenhochdruckdurchsetzen (IHD) mit nachfolgendem mechanischen Lochen. Die VDI-Richtlinie 3146 enthält gegenüber der DIN-Systematik inhaltlich weiterführende Aussagen zu den Verfahren des Innenhochdruckschneidens, auch wenn dieser Begriff darin nicht angewendet wird. Positiv ist, dass verschiedene Verfahrensvarianten beschrieben und definiert werden. Nachteilig ist, dass diese Verfahrensvarianten mit z.T. unterschiedlichen Verfahrensprinzipien dem Innenhochdrucktrennen ohne Untergliederung zugeordnet werden. Zur systematischen Erfassung und Definition der Innenhochdrucktrenn- bzw. Innenhochdruckschneidverfahren sind weitere Arbeiten notwendig, wobei die VDI-Richtlinie 3146 eine wichtige Grundlage darstellen sollte.

*EICHHORN /22/* verwendet den Begriff des Innenhochdruckschneidens für das Trennen von Hohlprofilen unter der Wirkung eines mit Hochdruck beaufschlagten Wirkmediums und eines geometrisch bestimmten Schneidkeils. Als Verfahrensvarianten werden das Innenhochdrucklochen und das Innenhochdruckabschneiden erwähnt. Von *RIEGER /14/* werden die allgemeinen Bezeichnungen Lochen mit Wirkmedium bzw. Schneiden mit Wirkmedium verwendet, ohne dass weiterführende Darstellungen zur systematischen Einordnung dieser Verfahren angegeben werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass noch keine systematische Erfassung und sachspezifische Darstellung der Verfahren des Innenhochdrucktrennens bzw. Innenhochdruckschneidens vorliegen. Daraus resultierend existieren im Schrifttum zu diesen Verfahren auch noch keine einheitlichen Definitionen und Bezeichnungen. Für die vorliegende Arbeit ist es deshalb notwendig, eindeutige Begriffe für die behandelten Verfahrensvarianten festzulegen. Da in den nachfolgenden Ausführungen zum Stand der Technik sowie in der Zielstellung diese Begriffe bereits zur Anwendung kommen, wird an dieser Stelle auf den Abschnitt 4.1 verwiesen.

## **2.3 Grundlagen zum Schneiden**

### **2.3.1 Abgrenzung des Innenhochdruckschneidens**

Das wesentlichste Merkmal des Innenhochdruckschneidens gegenüber dem mechanischen Scherschneiden besteht darin, dass ein geometrisch bestimmter Schneidkeil durch ein Wirkmedium ersetzt wird. Der Schneidvorgang beim Scherschneiden wird durch die aus der Relativbewegung der Schneidkeile resul-

tierende Scherbeanspruchung bestimmt. Dieser Scherbeanspruchung können in Abhängigkeit von den vorliegenden Prozessbedingungen Zugspannungsanteile überlagert werden. Beim Innenhochdruckschneiden kommt es durch die Wirkung des flüssigen Mediums anstatt eines Schneidkeils je nach Verfahrensvariante und Prozessführung zu deutlich ausgeprägten Zugspannungsanteilen. Trotzdem bestimmen die durch das Wirkmedium und den Schneidkeil hervorgerufenen Schubspannungen den Schneidvorgang. An dieser Stelle ergibt sich die Abgrenzung zum Reißen, wo der Trennvorgang unter der dominierenden Wirkung von Zugspannungen entlang einer undefinierten Schnittlinie erfolgt. Aufgrund der dargestellten Zusammenhänge ist es sinnvoll, das Innenhochdruckschneiden als Scherschneidvorgang zu analysieren und damit den Stand der Technik zum Scherschneiden für die wissenschaftliche Erschließung dieses Verfahrens zu nutzen. Dabei kann auf jahrzehntelange und umfassende Forschungen zurückgegriffen werden /23/-/31/,/34/.

### 2.3.2 Analyse des Schneidvorganges

Der Schneidvorgang kann als ein bis zur Werkstofftrennung geführter Umformvorgang beschrieben werden /23/,/32/,/33/. Das bedeutet, dass ein Schneidvorgang prinzipiell in den in Bild 2-2 dargestellten Phasen elastische Verformung, plastische Verformung sowie Werkstofftrennung abläuft. Auftreten und Ausprägung der einzelnen Phasen hängen von den konkreten Schneidbedingungen ab und bestimmen maßgeblich das Schneidergebnis durch die Ausbildung charakteristischer Trennflächen. Die Übergänge der Phasen sind durch die Grenzbedingungen „Plastizitätsbedingung“ und „Trennbedingung“ gegeben. Dabei beschreibt die Plastizitätsbedingung den Beginn der plastischen Verformung und die Trennbedingung das Ende der plastischen Verformung bzw. das Einsetzen der Werkstofftrennung.

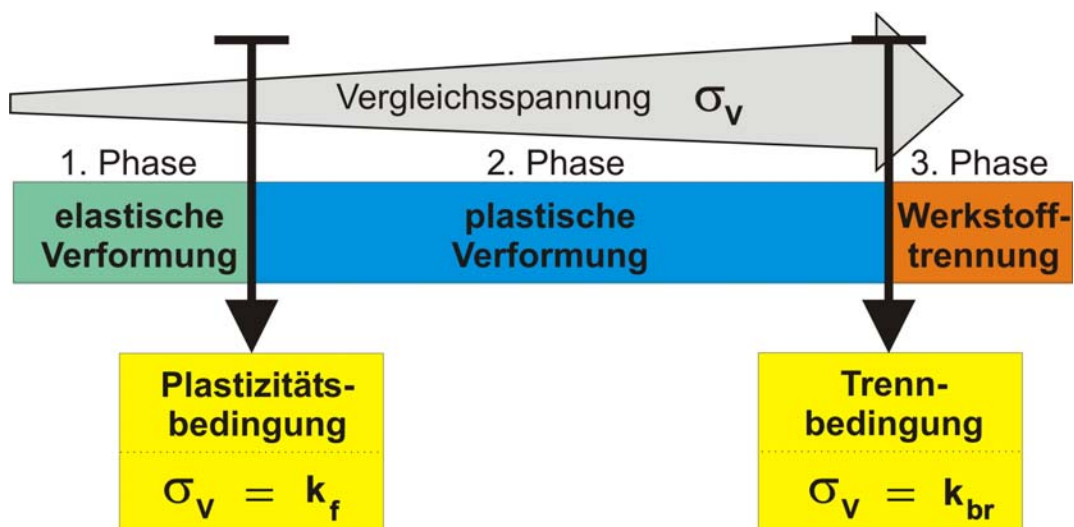


Bild 2-2: Phasen und Grenzbedingungen eines Schneidvorganges



Die Erfüllung der Plastizitätsbedingung, d.h. das Einsetzen des plastischen Fließens des Materials, lässt sich analytisch darstellen. Zur mathematischen Beschreibung dieses Vorganges werden Spannungshypothesen genutzt /33/,/34/. Nach diesen Modellen wird mit der Vergleichsspannung  $\sigma_V$  eine skalare Vergleichsgröße bestimmt und mit der Fließspannung  $k_f$  als Werkstoffkennwert verglichen. In der Plastizitätstheorie werden im Wesentlichen die folgenden Hypothesen genutzt /23/,/35/:

- Hypothese der größten Zug-Normalspannung,
- Gestaltänderungsenergiehypothese nach v. *MISES* und *HENCKY*,
- Schubspannungshypothese nach *TRESCA* und *MOHR*.

Die Hypothese der größten Zug-Normalspannung konnte nur für spezielle Voraussetzungen, wie ruhender Zugbeanspruchung spaltbruchempfindlicher Werkstoffe oder Verformungsbehinderung durch räumliche Zugbeanspruchung, nachgewiesen werden und entfällt somit zur Beschreibung der Vorgänge beim Scherschneiden /23/. Die Gestaltänderungsenergiehypothese berücksichtigt den gesamten Spannungszustand als Kombination von Normal- und Schubspannungen. Nach v. *MISES* lässt sich die Fließbedingung unter Verwendung der Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  folgendermaßen angeben /36/,/37/:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} = k_f \quad (1)$$

*HENCKY* interpretiert die v. *MISES*sche Fließbedingung derart, dass Fließen dann eintritt, wenn die Speicherfähigkeit des Materials für elastische Energie entsprechend der jeweiligen Beanspruchung erschöpft ist bzw. überschritten wird /35/,/37/.

Die Schubspannungshypothese besagt, dass Fließen dann eintritt, wenn die größte Schubspannung  $\tau_{\max}$  einen kritischen Wert überschreitet. Bei der Bestimmung von  $\tau_{\max}$  wird im Rahmen der Schubspannungshypothese nach *TRESCA* nicht der gesamte Spannungszustand berücksichtigt, sondern nur die größte und kleinste Hauptnormalspannung. Die größte Schubspannung  $\tau_{\max}$  berechnet sich bei einem räumlichen Spannungszustand mit den Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  unter der Annahme, dass  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  ist, nach:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_{FL} \quad (2)$$

wobei  $\sigma_2$  vernachlässigt wird /23/,/33/,/35/,/38/. Der Wert  $\tau_{FL}$  repräsentiert die werkstoffspezifische Schubfließgrenze und somit die Plastizitätsbedingung (vgl. Bild 2-2). Im Schrifttum wird für  $\tau_{FL}$  oft  $k$  verwendet.

Obwohl die Schubspannungshypothese nach *TRESCA* nicht den gesamten Spannungszustand berücksichtigt, stellt ihre Anwendung für die Darstellung des Fließbeginns mit dem Erfüllen der Plastizitätsbedingung sowie des plastischen Fließens

beim Scherschneiden eine zulässige Vereinfachung dar. Die nach der Schubspannungshypothese für das Fließen maßgebliche, größte Schubspannung kann anschaulich mit Hilfe Mohrscher Spannungskreise angegeben werden. Dem liegt zu Grunde, dass ein räumlicher Spannungszustand durch drei senkrecht aufeinander stehende Hauptspannungen beschrieben werden kann. Durch jeweils zwei Hauptspannungen wird eine Ebene gebildet, in die der durch diese Hauptspannungen gebildete Spannungskreis eingezeichnet werden kann (Bild 2-3a). Der Halbmesser des Spannungskreises entspricht der in dieser Hauptspannungsebene wirkenden, maximalen Schubspannung. Zur besseren Veranschaulichung werden die Spannungskreise der einzelnen Ebenen in eine gemeinsame Ebene umgeklappt und es ergibt sich die typische Darstellung nach Bild 2-3b.

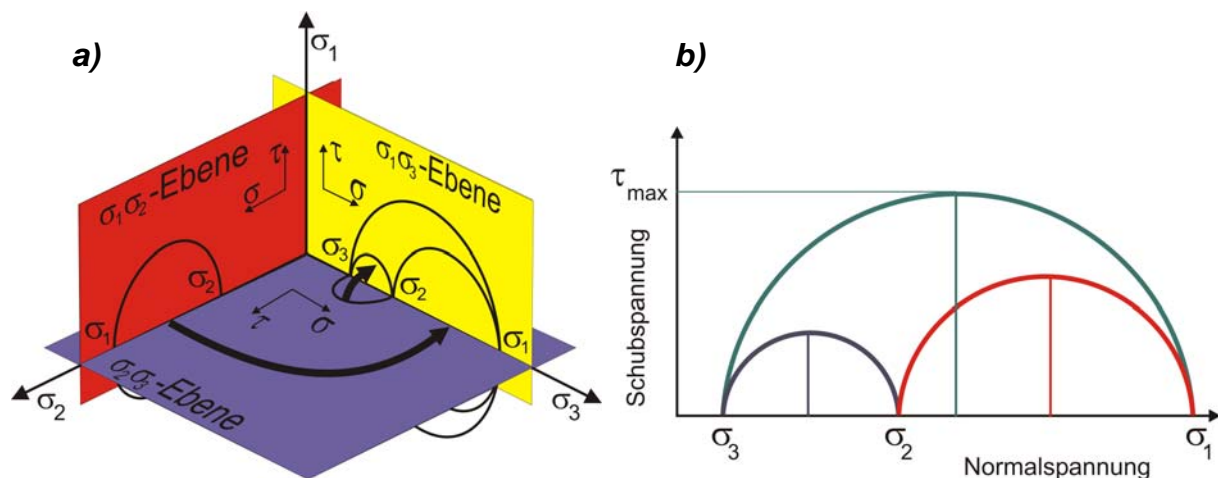


Bild 2-3: Mohrscher Spannungskreis – a) räumliche Herleitung, b) Darstellung in einer Ebene (nach /39/)

Das Mohrsche Spannungsdiagramm ermöglicht eine anschauliche, wenn auch nur qualitative Darstellung des prinzipiellen Ablaufs eines Schneidvorganges in Abhängigkeit vom vorliegenden Spannungszustand. Dazu werden in das Mohrsche Spannungsdiagramm zusätzlich die Schubfließgrenze als Plastizitätsbedingung und die Schubbruchgrenze als Trennbedingung eingetragen (Bild 2-4) /23/.

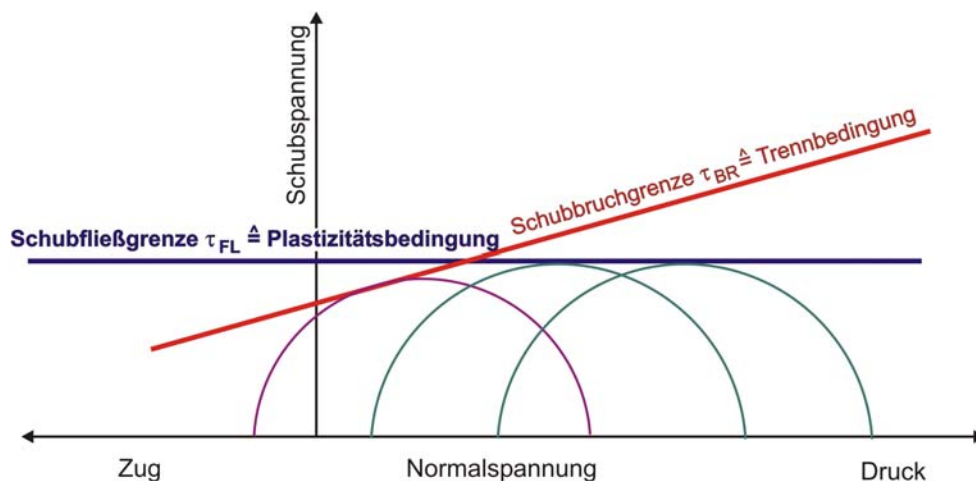


Bild 2-4: Plastizitäts- und Trennbedingung im Mohrschen Spannungsdiagramm (nach /23/)

Um einen Schneidvorgang bis zur Werkstofftrennung realisieren zu können, muss die Trennbedingung erfüllt werden. Die bis zum Erreichen der Trennbedingung ablaufenden Phasen des Schneidvorganges werden durch den Spannungszustand in enger Wechselwirkung mit den Werkstoffeigenschaften des Schnittteils bestimmt. Der Spannungszustand in der Schnittzone, der durch die Relativbewegung der Schneidkeile zueinander erzeugt wird, ist durch eine dominierende Schubbeanspruchung gekennzeichnet. In Abhängigkeit von den vorliegenden Prozessbedingungen (z.B. Versatz der Kraftwirkungslinien, Schneidspalt) und dem Umformvermögen des Schnittteilwerkstoffes können zusätzliche Zugspannungsanteile den Spannungszustand in der Schnittzone beeinflussen.

Ist der Spannungszustand, der in Bild 2-4 durch den Mohrschen Spannungskreis beschrieben wird, durch ausreichend große Druckspannungsanteile gekennzeichnet, verläuft der Schneidvorgang in den Phasen elastische Verformung, plastische Verformung und Werkstofftrennung. Dabei werden bei Erreichen der Schubfließgrenze die Plastizitätsbedingung und bei Erreichen der Schubbruchgrenze die Trennbedingung erfüllt. In der Phase der plastischen Verformung bildet sich am Schnittteil durch Wechselwirkung mit dem Schneidkeil eine Umformzone heraus. Auf der Schnittfläche stellt die Umformzone den Glattschnittbereich dar. Aufgrund des Umformvermögens des Werkstoffes kommt es in dieser Phase des Schneidvorganges zur Ausbildung unerwünschter Umformungen am Schnittteil (Einzug). Mit dem Erreichen der Schubbruchgrenze wird der Restquerschnitt getrennt, was auf der Schnittfläche den Bruchbereich ergibt /23/,/34/,/35/. Bei idealisierter Betrachtung kann der Bruchanteil nahezu vollständig unterdrückt werden, wenn die Zugspannungsanteile komplett vermieden werden und die Werkstofftrennung vollständig durch Umformung unter Schubbeanspruchung stattfindet. Beim Feinschneiden wird dieser Zustand angenähert. Das Ergebnis ist eine homogene Schnittfläche mit geringer Rauigkeit und geringen geometrischen Abweichungen /35/,/40/,/41/. Bei größeren Zugspannungsanteilen verschiebt sich der Mohrsche Spannungskreis in Richtung des Zugbereichs. Damit verbunden ist ein Absinken der Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$ . Bei genügend großen Zugspannungsanteilen kann die Schubbruchgrenze bei kleineren Schubspannungswerten liegen als die vom Spannungszustand unabhängige Schubfließgrenze. Das heißt, die Trennbedingung wird vor der Plastizitätsbedingung erreicht, und es kommt zur Werkstofftrennung ohne vorherige, plastische Umformung. Die Schnittfläche ist in diesem Fall dadurch gekennzeichnet, dass keine Glattschnittanteile vorliegen, weist jedoch kaum geometrische Abweichungen auf.

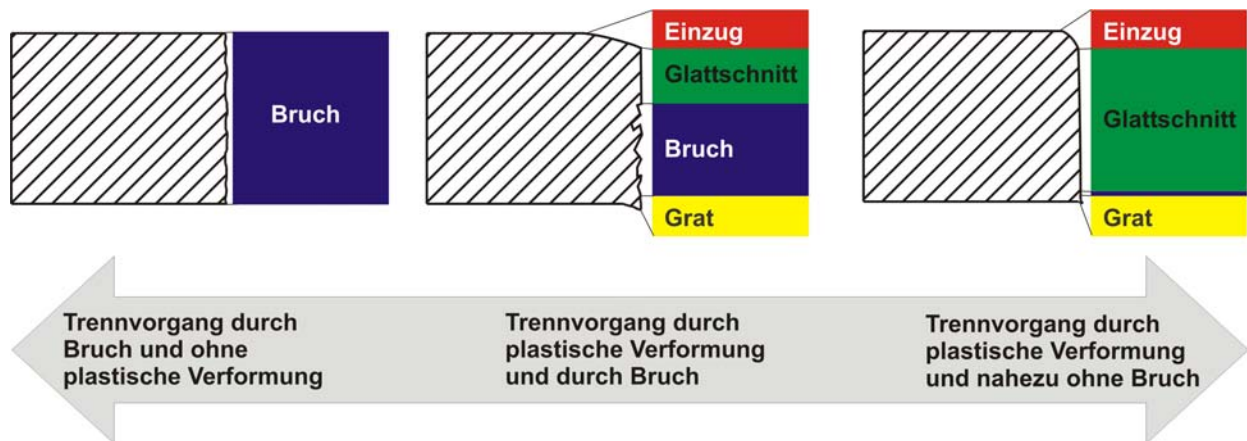


Bild 2-5: Idealisierte Geometrien von Trennbereichen beim Schneiden

Zur vollständigen Beschreibung des Schneidvorganges wäre es notwendig, neben der Plastizitätsbedingung auch die Trennbedingung als Grenzbedingung für das Einsetzen der Werkstofftrennung mathematisch zu modellieren. Im Schrifttum wird diese Grenzbedingung als Schubbruchgrenze bezeichnet [23],[33],[34]. Anders als die Schubfließgrenze  $\tau_{FL}$  ist die Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$  jedoch unmittelbar vom vorliegenden Spannungszustand abhängig [33],[43]. Das heißt, es ist nicht möglich, einen allgemeinen Werkstoffkennwert als Bezugsgröße für die Vergleichsspannung zu nutzen, um die Trennbedingung anzugeben.

Erste Ansätze zur Beschreibung von Versagenskriterien beim Lochschneiden mit Wirkmedien, d.h. zur Beschreibung der Schubbruchgrenze bzw. der Trennbedingung, werden durch KLEINER vorgestellt [11]. Dabei wird mit Hilfe der FEM-Simulation eine Schädigungsverteilung im Werkstück bestimmt, wobei die relevante Kenngröße dabei der so genannte Schädigungswert  $C$  ist. KLEINER setzt dieses Simulationstool vorwiegend als Unterstützung für die Auslegung der Werkzeuge bei komplizierten Lochgeometrien ein. Weiterführende Potentiale und Grenzen dieses rechnerisch bestimmten Versagenskriteriums werden nicht dargestellt.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass es gegenwärtig keine wissenschaftlich umfassend nachgewiesene Möglichkeit gibt, die Trennbedingung durch ein allgemeingültiges, quantitatives Versagenskriterium sicher zu beschreiben. Eine qualitative Beschreibung der Trennbedingung anhand Mohrscher Spannungskreise ist jedoch in vielen Fällen ausreichend.

### 2.3.3 Scherschneiden als Basis für das Innenhochdruckschneiden

Beim mechanischen Scherschneiden wirken zwei geometrisch bestimmte Schneidkeile auf das Schnittteil. Dabei wird zumeist über den Schneidkeil des Schneidstempels die Kraft  $F_{St}$  aktiv eingeleitet, während im Schneidkeil des Schneidringes dadurch eine entsprechende Gegenkraft  $F_{SR}$  induziert wird (① in Bild 2-6) [38],[41]. Im Bereich der Schneidkanten bildet sich durch die Wirkung dieser Kräfte eine

charakteristische Scherbeanspruchung aus, unter der das Material vom Schneidstempel mit zunehmendem Stempelweg in die Schneidringöffnung geschoben wird (② in Bild 2-6) /33/,/35/. Da die Kräfte  $F_{St}$  und  $F_{SR}$  nicht entlang einer Linie wirken, kommt es zur Ausbildung eines Biegemoments  $M_B$  im Werkstück. Hervorgerufen durch dieses Moment treten Zugspannungen auf, die den Schneidvorgang und das Schneidergebnis maßgeblich beeinflussen.

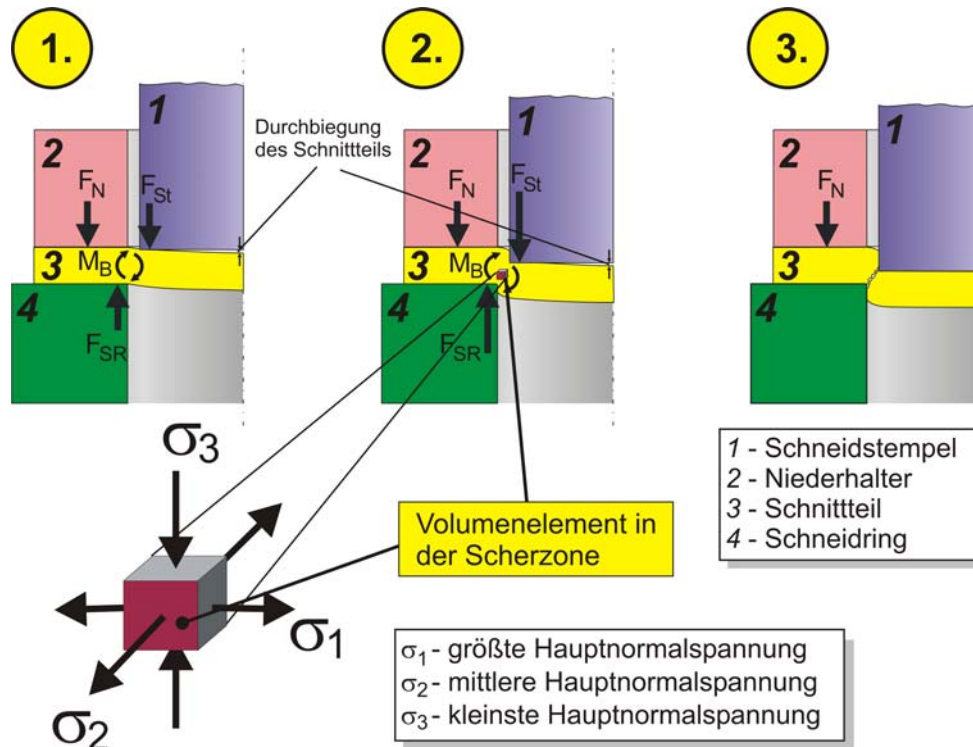


Bild 2-6: Teilvorgänge und Spannungszustand beim Scherschneiden

Die Beanspruchungen in der Scherzone sind beim Scherschneiden somit durch einen komplexen, mehrachsigen Spannungszustand gekennzeichnet. In Bild 2-6 ist der Spannungszustand für ein Volumenelement in der Scherzone schematisch dargestellt, wobei die konkrete Ausprägung des Spannungszustandes auch von der Lage des Volumenelementes innerhalb der Scherzone abhängt.

Der Spannungszustand wird maßgeblich durch die aus der Bewegung der Schneidkeile zueinander resultierenden Druckspannungen ( $\sigma_3$ ) bestimmt. Einen wichtigen Einfluss auf den Ablauf und das Ergebnis des Schneidvorganges haben die Spannungsanteile  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ , die zumeist als Zugspannungen wirksam werden, deren konkrete Ausprägung jedoch von den vorliegenden Schneidbedingungen und den Werkstoffeigenschaften abhängt. Infolge des mehrachsigen Spannungszustandes bilden sich in der Scherzone Schubspannungen aus, die zwischen den Schneidkanten der Schneidkeile ihr Maximum erreichen /24/. In dieser Richtung, d.h. in Richtung der größten auftretenden Schubspannungen kommt es schließlich zur Werkstofftrennung (③ in Bild 2-6) /23/,/25/.

Der Spannungszustand in der Scherzone verändert sich während des Schneidvorganges, da er zum einen Formänderungen hervorruft und zum anderen das Umformvermögen des Werkstoffes beeinflusst /33/.

Die wesentlichen Einflussgrößen auf den Spannungszustand in der Scherzone sind:

- die Fließspannung und das Umformvermögen des Werkstückwerkstoffes,
- die Form und Größe des Werkstückquerschnittes,
- die Schneidkeilgeometrie,
- die Größe des Schneidspaltes,
- die Schneidgeschwindigkeit und die Reibungsverhältnisse zwischen Werkstück und Werkzeug.

Bei den bisherigen Betrachtungen zum Scherschneiden wurde von homogenen Schneidbedingungen entlang der Schnittlinie ausgegangen. Bei geometrisch inhomogenen Schnittlinienverläufen (z.B. Rechtecklöcher) oder beim Scherschneiden von zuvor umgeformten Werkstückbereichen liegen dagegen entlang der Schnittlinie inhomogene Schneidbedingungen vor. Der Spannungsbedarf, der notwendig ist, um eine Werkstofftrennung hervorzurufen, hängt unmittelbar von den Schneidbedingungen ab und variiert in diesem Fall entlang der Schnittlinie. Aufgrund der stofflichen und geometrischen Geschlossenheit der Werkzeugaktivelemente beim Scherschneiden können auch Schneidoperationen mit örtlich unterschiedlichem Spannungsbedarf ohne Probleme erfolgreich ausgeführt werden. Das Scherschneiden stellt sich damit auch bei stark inhomogenen Schneidbedingungen als robuster Prozess dar /44/.

Bei der technischen Auslegung von Scherschneidvorgängen ist die Bestimmung der Schneidkraft  $F_{Smax}$  von besonderer Bedeutung. Die Schneidkraft  $F_{Smax}$  beim Scherschneiden hängt von der Größe der Schnittfläche  $A_S$  und vom Schneidwiderstand  $k_S$  ab und berechnet sich nach:

$$F_{Smax} = k_S \cdot A_S \quad (3)$$

Die Schnittfläche  $A_S$  ergibt sich als Produkt aus der Länge der Schneidkante  $l_S$  und der Blechdicke  $s$ :

$$A_S = l_S \cdot s \quad (4)$$

Der in Gleichung (3) eingeführte Schneidwiderstand  $k_S$  ist eine Größe, die die verschiedenen Einflüsse auf den Schneidvorgang integrativ erfasst. Als Hauptinfluss auf den Schneidwiderstand  $k_S$  wird im Schrifttum die Zugfestigkeit  $R_m$  angegeben /33/,/35/,/38/,/41/,/45/,/46/. Zudem wird der Schneidwiderstand  $k_S$  von den konkret vorliegenden Schneidbedingungen beeinflusst, so dass sich kein konstanter Wert ergibt. Die wichtigsten Einflüsse auf den Schneidwiderstand sind /27/,/47/:

- Schneidspalt,
- Schneidstempeldurchmesser,
- Blechdicke,
- Schneidkeilgeometrie,
- Schnittlinienform,
- Werkstoffeigenschaften,
- Schmierung.

Diese Einflüsse wirken sich über den Schneidwiderstand auch auf die Schneidkrafthöhe aus. Für eine vereinfachte Schneidkraftberechnung wird der Schneidwiderstand für Stahl mit  $0,8$  bis  $0,85 \cdot R_m$  angegeben /33/,/41/.

Ziel des Schneidvorganges ist es, Schnittteile mit einer definierten Makrogeometrie und einer dem Anwendungsfall entsprechenden Schnittqualität zu erzeugen. Die Schnittqualität wird maßgeblich durch die geometrischen Eigenschaften der Schnittteile an der Schnittkante bestimmt. Bei realen Scherschneidvorgängen weicht die erzeugte Schnittkantengeometrie von der Idealgeometrie ab. Die Ursachen für die unerwünschten Umformungen während des Schneidvorganges liegen im Umformvermögen des Werkstoffes in enger Wechselwirkung mit dem Spannungszustand in der Scherzone. Die wichtigsten geometrischen Abweichungen, bezogen auf die Ausbildung der Schnittkante, sind der Kanteneinzug und der Schnittgrat. Hinzu kommt die Ausprägung der Glattschnitt- und Bruchflächenbereiche auf der Schnittfläche. Für die Charakterisierung der Trennbereiche beim Scherschneiden werden so genannte Schnittflächenkenngrößen herangezogen (Bild 2-7), die in der VDI-Richtlinie 2906 /48/ systematisch beschrieben sind.

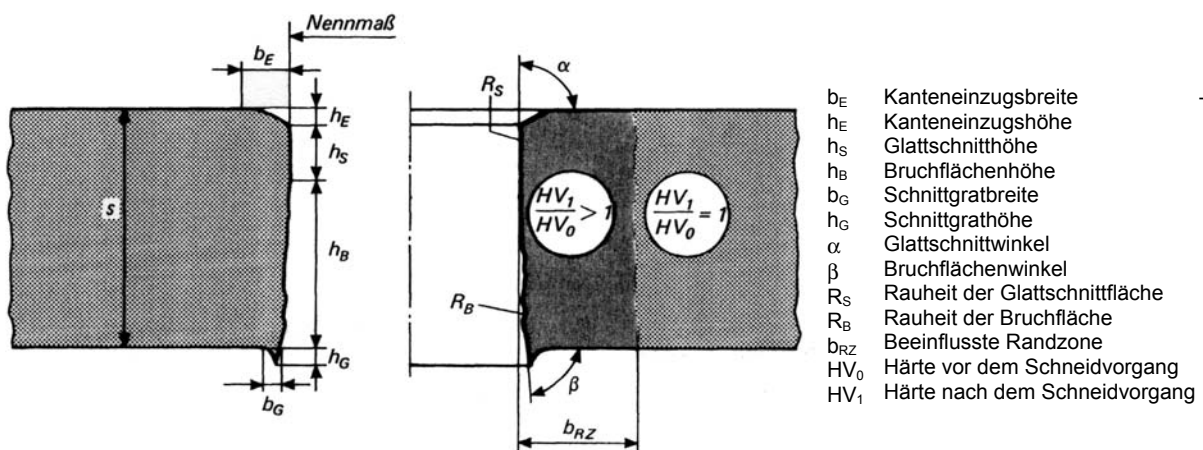


Bild 2-7: Ausgewählte Kenngrößen der Trennbereiche beim Scherschneiden nach VDI 2906, Blatt 2 /48/

Auf den Kanteneinzug und den Schnittgrat wirken in komplexer Weise Werkstück-, Werkzeug- sowie Prozessparameter. Hervorzuheben sind neben der Größe des Schneidspaltes der Werkstückwerkstoff sowie der Werkzeugverschleiß an der Schneidkante /26/,/28/,/29/,/34/,/35/,/49/. SCHMÜTSCH /26/ gibt gemessene Schnitt-

grathöhen für das herkömmliche Scherschneiden von Blechen in Abhängigkeit von der Art des Werkzeugverschleißes und dem Werkstückwerkstoff an. Diese liegen je nach Verschleißart für den Werkstoff ZStE 260 zwischen 60 und 100  $\mu\text{m}$ , für X5CrNi18-10 zwischen 70 und 110  $\mu\text{m}$  und für St 14 zwischen 80 und 135  $\mu\text{m}$ . *HOOGEN* /34/ ermittelt in Abhängigkeit von Matrizenschneidkantenradius für AlMg4,5Mn4 und AlMg3 Schnittgrathöhen zwischen 15 und 70  $\mu\text{m}$ .

## 2.4 Schneiden mit flüssigem Wirkmedium

### 2.4.1 Innenhochdrucklochen

Das Innenhochdrucklochen ist eine Verfahrensvariante des Innenhochdruckschneidens, bei der die Werkstofftrennung durch das gemeinsame Wirken eines geometrisch bestimmten Schneidkeils und eines Innendruckmediums unter dominierender Scherbeanspruchung entlang einer geschlossenen Schnittlinie zur Herstellung einer Innenform am Schnittteil erfolgt /22/,/50/,/51/. Das Innenhochdrucklochen hat inzwischen bei einer Vielzahl von industriellen Herstellungsprozessen Anwendung gefunden /9/,/52/-/54/.

Die erste Patentschrift, die sich mit der Thematik des Lochens mit Innenhochdruck beschäftigt /55/, stammt aus dem Jahre 1991, weitere folgten in den Jahren 1993 und 1995 /56/,/57/. Inzwischen war das Innenhochdrucklochen auch Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Umfangreiche Arbeiten zum Innenhochdrucklochen von Rohren in den Varianten „Lochen mit Lochring“ und „Lochen mit Lochstempel“ wurden von *EICHHORN et al.* durchgeführt und veröffentlicht /50/. Das Lochen von Doppelplatten unmittelbar nach dem Innenhochdruckumformen wird von *SCHMOECKEL et al.* /51/ dargestellt. Weitere Forschungen zum Innenhochdrucklochen in direkter Verknüpfung mit dem Innenhochdruckumformen dokumentiert *KLEINER et al.* /11/. Im Mittelpunkt dieser Arbeiten stehen der Einsatz verschiedener Schneidstempel, die zeitliche Steuerung des Lochprozesses sowie die Beeinflussung des Butzenabrisses. Auch *RIEGER* stellt umfangreiche Untersuchungen zum Lochen mit flüssigem Druckmedium vor, die in /14/ dokumentiert sind.

Das Innenhochdrucklochen kann in Abhängigkeit von den technologischen Erfordernissen in den Verfahrensvarianten

- Innenhochdrucklochen mit Lochstempel (von außen nach innen) und
- Innenhochdrucklochen mit Lochring (von innen nach außen)

durchgeführt werden (Bild 2-8), /9/,/11/,/14/,/50/,/51/,/55/-/58/.



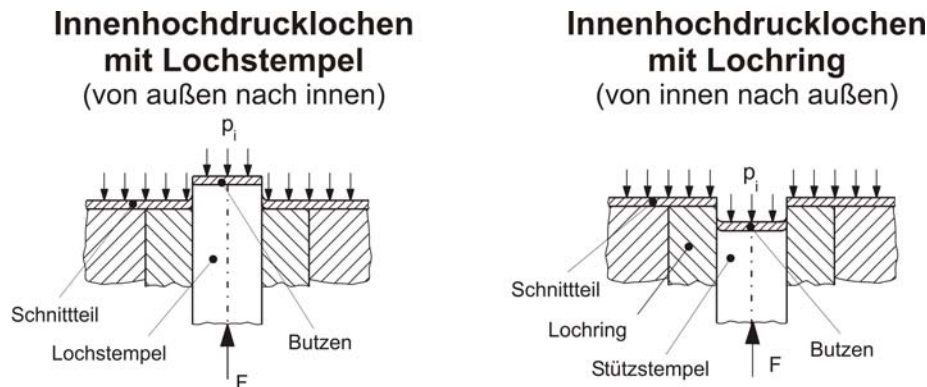


Bild 2-8: Varianten des Innendrucklochens (nach /50/)

Beim „*Innenhochdrucklochen mit Lochstempel*“ wirken der Lochstempel mit seinem geometrisch bestimmten Schneidkeil sowie als „Gegenkante“ und „Stützstempel“ das Innendruckmedium auf das Schnittteil. Die durch den Lochstempel aufgebrachte Kraft muss die Wirkung des Innendruckes kompensieren und darüber hinaus entlang der späteren Schnittlinie einen Spannungszustand hervorrufen, der zur Werkstofftrennung führt. Bei unzureichender Stützwirkung durch das Innendruckmedium kommt es vor der Werkstofftrennung zur Ausbildung einer elastischen und plastischen Deformationszone außerhalb der Trennzone /14/,/50/,/59/. Die Ausprägung dieser Deformationszone wird außer von der Höhe des Innendruckes auch von der Eigenstabilität des zu lochenden Werkstückes bestimmt. Der Lochvorgang beim Lochen mit Lochstempel wird durch Schubspannungen bestimmt, die in Abhängigkeit von den konkreten Schneidbedingungen von ausgeprägten Zugspannungen im Trennbereich überlagert werden /22/,/32/. Die Schnittfläche weist einen auf der Werkstückinnenseite liegenden Schnittgrat, einen aus Glattschnitt- und Bruchanteilen bestehenden Trennbereich und einen auf der Werkstückaußenseite befindlichen Einzugsbereich auf /11/,/22/.

Beim „*Innenhochdrucklochen mit Lochring*“ wirken auf das Schnittteil die geometrisch bestimmte Schneidkante des Lochringes und das Innendruckmedium. Zur gezielten Beeinflussung des Trennvorganges werden in der Phase des Innendruckaufbaus und ggf. auch während der Innendruckumformung die Bereiche des Schnittteiles, die sich innerhalb des Lochringes befinden (späterer Lochbutzen), durch einen Stützstempel abgestützt. Nach Erreichen des notwendigen Lochdruckes wird durch das gesteuerte Zurückziehen des Stützstempels ein Kräfteungleichgewicht geschaffen und dadurch der Trennvorgang ausgelöst /14/,/32/. Beim Lochen mit Lochring wirken im Trennbereich überwiegend Schubspannungen. Die Größe der Zugspannungsanteile hängt von der Abstützung durch den Stützstempel in Verbindung mit der Höhe des Innendruckes ab. Je stärker die Verformung des Lochbutzens beim Zurückziehen des Stützstempels ist, desto höhere Zugspannungsanteile werden in den Trennbereich eingebracht. Diese führen zu einer Verringerung

des Umformvermögens des Werkstoffes. Die Werkstofftrennung wird dann schon bei geringeren Innendrückerreicht /32/,/50/. Die Ausprägung der Trennzone des Schnittteiles wird durch den vorliegenden Spannungszustand sowie die Werkstoffbedingungen bestimmt. Sie ist gekennzeichnet durch einen Werkstoffeinzug auf der Werkstückinnenseite, den Trennbereich sowie einen auf der Außenseite liegenden Schneidgrat. Der Trennbereich am Schnittteil besteht ausschließlich aus Bruchanteilen. Glattschnittanteile treten beim Lochen mit Lochring nur am Lochbutzen auf /32/. Die geometrischen Abweichungen außerhalb der Trennzone sind beim Lochen mit Lochring wegen der günstigen Anlageverhältnisse des Schnittteiles in der Werkzeuggravur sehr klein /22/. Das Lochen mit Lochring liefert wegen der Ähnlichkeit des Verfahrensprinzips wichtige Ansätze für das Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut.

Inhomogene Schneidbedingungen entlang der Schnittlinie, wie sie bei nicht kreisrunden Lochgeometrien (z.B. Rechteck- oder Quadratlochungen) vorliegen, erschweren ein vollständiges Abtrennen des Werkstoffes entlang der Schnittlinie. Beim Innenhochdrucklochen mit rechteckigem Lochstempel werden die Eckbereiche trotz inhomogener Schneidbedingungen durch die Wirkung des geometrisch bestimmten Lochstempels unter der Wirkung von Schubspannungen abgetrennt (Bild 2-9) /32/,/50/. Beim Innenhochdrucklochen mit rechteckigem Lochring führen die inhomogenen Schneidbedingungen und der zur Erzielung der Werkstofftrennung erhöhte Spannungsbedarf in den Eckbereichen dazu, dass zuerst die Seitenbereiche getrennt werden. Das Abströmen des Innendruckmediums durch die getrennten Bereiche kann zum Druckausgleich führen bevor die Eckbereiche abgetrennt werden, d.h. es liegt ein unvollständiges Trennen entlang der Schnittlinie vor. Bei geeigneter Prozessführung kann der Butzen trotzdem noch abgetrennt werden, wobei es dann in den kritischen Eckbereichen nicht zum Abscheren, sondern zum Abreißen des Materials kommt (siehe Bild 2-9) /11/,/14/,/50/. In den Eckbereichen sind der Verlauf der Trennlinie und die Geometrie des Endteiles dann undefiniert.



Bild 2-9: Innenhochdrucklochen mit rechteckigen Lochgeometrien (nach /50/)

### 2.4.2 Innenhochdruckabschneiden

Das Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen ist eine Verfahrensvariante des Innenhochdruckschneidens, bei der die Werkstofftrennung durch das gemeinsame Wirken eines geometrisch bestimmten Schneidkeils und eines Innendruckmediums entlang einer geschlossenen Schnittlinie über dem gesamten Umfang des Schnittteiles erfolgt. Dabei wird das Hohlprofil über seinen Querschnitt komplett getrennt /22/,/44/.

Das Innenhochdruckabschneiden ist ein Fertigungsverfahren, welches erst in jüngster Zeit, in enger Verbindung mit der Weiterentwicklung des Innenhochdruckumformens, in den Mittelpunkt des Interesses gerückt ist. In Patentschriften aus den Jahren 1997 und 1999 werden Verfahren und Vorrichtungen zum Abschneiden von Werkstücken bzw. Werkstückelementen mittels Wirkmedium beschrieben /60/-/62/. Verfahren und Vorrichtungen zur Aktivierung der Schneidkante, z.B. durch Elastomere, Verschieberinge oder Federelemente werden in /60/ dargestellt. Kernverfahren ist das Trennen von Hohlprofilen nach dem Innenhochdruckumformen im Umformwerkzeug mit Wirkmedium und einer bedarfsweise aktivierbaren Schneidkante. In /61/ werden eine Vorrichtung und Verfahren zum Schneiden eines Hohlkörpers nach dem Innenhochdruckumformen durch kombinierte Anwendung des mechanischen Schneidens entlang einer ersten Schnittlinie und des Innenhochdruckschneidens entlang einer zweiten Schnittlinie (Hohlprofil mit Flansch) mittels eines beweglichen Stanzschiebers beschrieben. Dabei enthält der Stanzschieber sowohl die Schneidkante für das mechanische Flanschschneiden als auch eine zweite Schneidkante für das Innenhochdruckschneiden des Hohlprofils. Ein weiteres Patent /62/ beschreibt Vorrichtungen zum Innenhochdruckabschneiden von Rohren bzw. Rohrverzweigungsköpfen nach dem Innenhochdruckumformen. Speziell werden darin Verschieberinge bzw. Elastomere zum Aktivieren der Schneidkante für das Schneiden nach dem Innenhochdruckumformen dargestellt. Den o.g. Patentschriften liegt gemeinsam der Gedanke „Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen nach dem Innenhochdruckumformen“ zu Grunde. Als Schneidprinzip wird jeweils das Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut („von innen nach außen“) sowie konstanter Schneidkeil- und Schneidnutgeometrie entlang der Schnittlinie angegeben. In den Patentschriften werden Verfahren und Vorrichtungen lediglich prinzipiell beschrieben. Richtlinien bzw. weiterführende Hinweise zur Realisierung des Innenhochdruckabschneidens werden nicht gegeben.

Erste Untersuchungen zum Innenhochdruckabschneiden von Rohren sind von *RIEGER* bekannt /14/. Er beschreibt das Innenhochdruckabschneiden anhand von Trennversuchen mit einer und zwei Schneidnuten jedoch vorwiegend hinsichtlich seiner Machbarkeit für ausgewählte Versuchsrohre der Werkstoffmarken ZStE340

und AlMg4,5Mn. Systematische Untersuchungen zu diesen Schneidverfahren sowie zur Analyse des Schneidvorganges werden nicht dargestellt.

## 2.5 Zusammenfassung zum Stand der Technik

Für die Herstellung von Integralhohlformteilen hat sich das Innenhochdruckumformen als innovatives Fertigungsverfahren fest etabliert. Der Hauptgrund dafür ist die Möglichkeit, Bauteile komplizierter Geometrie mit hoher Genauigkeit und stufenarm herzustellen. Bei nahezu allen Anwendungen sind nach dem Innenhochdruckumformen zusätzliche Trennoperationen am Bauteil notwendig. Derzeit kommen dafür in einer gesonderten Prozessstufe meist thermische bzw. mechanische Trennverfahren zur Anwendung, die einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Mit dem Innenhochdruckschneiden existiert inzwischen prinzipiell eine alternative Schneidvariante, um Trennoperationen an IHU-Bauteilen in unmittelbarer Verknüpfung mit dem Innenhochdruckumformen durchzuführen. Das Innenhochdrucklochschneiden hat bisher als einzige Verfahrensvariante des Innenhochdruckschneidens einen fortgeschrittenen Stand wissenschaftlicher Durchdringung und praktischer Anwendung erreicht.

Die Ausführungen zum Stand der Technik des Innenhochdruckabschneidens haben gezeigt, dass es für dieses junge Fertigungsverfahren noch keine wissenschaftlich fundierte Basis gibt, die dem Anwender die gesicherte Verfahrensauslegung und -realisierung ermöglicht. Zum Innenhochdruckabschneiden von Rohren gibt es einige Verfahrens- und Vorrichtungsprinzipien, die hauptsächlich in Patentschriften dargestellt sind. Das Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren mit Schneidring und Schneidnut wurde bisher in Pilotversuchen in seiner Machbarkeit nachgewiesen. Zum Grundvorgang, dem Innenhochdruckabschneiden unter homogenen stofflichen und geometrischen Schneidbedingungen, fehlen wissenschaftliche Erkenntnisse zum Einfluss der Ausgangseigenschaften sowie zur geometrischen Gestaltung der Schneidnut im Hinblick auf die Machbarkeit, aber auch die sichere Verfahrensplanung und -realisierung. Außerdem sind der Schneidmechanismus sowie die Einflüsse auf den Schneidvorgang weitestgehend ungeklärt. Offen ist die Frage, inwieweit dynamische Vorgänge der Rissausbreitung beim Innenhochdruckabschneiden eine Rolle spielen oder ob der gesamte Vorgang als quasistatisch angesehen werden kann.

Das Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen unter stofflich und geometrisch inhomogenen Schneidbedingungen ist noch völlig unerforscht. Inhomogene Schneidbedingungen können ihre Ursache in der Querschnittsform des Hohlprofils und einem inhomogenen Schnittlinienverlauf haben. In diesem Fall liegt eine inhomogene Spannungsverteilung entlang der Schnittlinie vor. Ursache kann aber auch eine vor dem Schneidprozess ablaufende Umformung sein, die zu geometrisch und stofflich

inhomogenen Schneidbedingungen entlang der Schnittlinie führt. Bei den allermeisten technischen Schneidaufgaben in Verbindung mit dem Innenhochdruckumformen führt einer dieser Aspekte zu inhomogenen Schneidbedingungen entlang der Schnittlinie, so dass es zwingend notwendig ist, das Innenhochdruckabschneiden unter diesen Bedingungen wissenschaftlich zu untersuchen.

Der Forschungsbedarf zum Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen umfasst sowohl den Grundvorgang und den Schneidmechanismus unter homogenen Schneidbedingungen als auch verschiedenste, praxisrelevante Anwendungen dieses Verfahrens unter inhomogenen Schneidbedingungen. Die umfassenden wissenschaftlichen Erkenntnisse zum mechanischen Scherschneiden sowie die Ergebnisse der ersten wissenschaftlichen Arbeiten zum Innenhochdruckloch können als Basis für das Innenhochdruckabschneiden herangezogen werden.

Dem unzureichenden Erkenntnisstand zum Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen steht die Forderung der industriellen IHU-Anwender nach effektiveren Schneidvarianten in Verbindung mit dem Innenhochdruckumformen gegenüber. Dies erfordert neue Erkenntnisse zum Grundvorgang unter homogenen Schneidbedingungen sowie zur Anwendung des Innenhochdruckabschneidens unter inhomogenen Schneidbedingungen. Unter diesem Gesichtspunkt sollen mit der vorliegenden Arbeit Verfahrengrundlagen zum Innenhochdruckabschneiden unter homogenen Schneidbedingungen erarbeitet werden, um darauf aufbauend eine Variante des Innenhochdruckabschneidens unter inhomogenen Schneidbedingungen zu entwickeln und technologisch zu erschließen. Der Anspruch der Arbeit besteht darin, das Innenhochdruckabschneiden als Verfahren theoretisch und experimentell soweit zu erschließen, dass eine Anwendung dieser Technologie auf einer fundierten, wissenschaftlichen Basis möglich ist.

### 3 Zielstellung und Vorgehensweise

Das Innenhochdruckumformen hat sich in den letzten zehn Jahren als innovatives Verfahren bei der Herstellung von Integralhohlformteilen für Leichtbaulösungen etabliert. Die Anwendung eines modernen Fertigungsverfahrens wird jedoch neben technischen und ökologischen auch maßgeblich durch seine wirtschaftlichen Parameter bestimmt. Vor allem bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit ist es zwingend notwendig, nicht nur eine Fertigungsstufe, sondern die gesamte Prozesskette zu bewerten. Auch beim Innenhochdruckumformen haben nach anfänglicher Euphorie angesichts des herstellbaren Bauteilspektrums und der erreichbaren Endteileigenschaften der zunehmende Wettbewerb mit klassischen Verfahren und der damit verbundene Kostendruck dazu geführt, dass in jüngster Zeit verstärkt die wirtschaftlichen Aspekte diskutiert werden. Es zeigt sich, dass außerhalb des Kernverfahrens Innenhochdruckumformen realisierte Prozessschritte, wie beispielsweise notwendige Trennoperationen am Bauteil, einen erheblichen Kostenfaktor ausmachen. Daraus leitet sich die Motivation ab, Trennvorgänge an IHU-Bauteilen effektiver und kostengünstiger zu gestalten. Als Alternative zum Laserstrahlschneiden sowie zu mechanischen Schneidvarianten ist das Innenhochdruckabschneiden in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Durch die Integration der Trennoperationen in das IHU-Werkzeug und den IHU-Vorgang sollen separate, kostenintensive thermische und mechanische Trennoperationen eingespart werden. Der industriellen Anwendung des Innenhochdruckabschneidens steht jedoch der völlig unzureichende wissenschaftliche Kenntnisstand zu diesem Verfahren gegenüber. Wissenschaftlich fundierte Ergebnisse, auf deren Basis eine Verfahrensplanung und –realisierung möglich sind, fehlen bislang. Eine Übertragung der Erkenntnisse zu mechanischen Trennverfahren auf das Innenhochdruckabschneiden ist nicht möglich, so dass die Herausforderung besteht, das Innenhochdruckabschneiden als neuartige Verfahrensvariante wissenschaftlich zu erschließen. Die Analyse des Standes der Technik hat deutlich gemacht, dass umfangreicher Forschungsbedarf zur Klärung der Verfahrensgrundlagen beim Innenhochdruckabschneiden unter homogenen Schneidbedingungen ebenso besteht, wie die Forderung nach Umsetzung und Entwicklung des Innenhochdruckabschneidens unter verschiedensten inhomogenen Schneidbedingungen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die wissenschaftliche Erschließung des Verfahrens Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut von Rohren. Dazu soll eine wissenschaftliche und technische Basis für die fundierte und effektive Planung und Realisierung dieses neuartigen Trennverfahrens geschaffen werden. Der Kenntnisstand zum Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen soll sowohl bezüglich des Grundvorganges unter homogenen Schneidbedingungen als

auch hinsichtlich der praxisrelevanten Aufgabe des Innenhochdruckabschneidens unter inhomogenen Schneidbedingungen systematisch erweitert werden.

Die Arbeit behandelt dabei die folgenden Schwerpunkte:

- Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen zum Grundvorgang beim Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut (IHAS von unverformten Rohren; homogene Schneidbedingungen),
- Wissenschaftlich-technologische Erschließung und Determinierung des Grundvorganges beim Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut (IHAS von unverformten Rohren; homogene Schneidbedingungen),
- Anwendung und Erweiterung der wissenschaftlichen Ergebnisse zum Grundvorgang beim Innenhochdruckabschneiden durch Entwicklung einer Verfahrensvariante zum Innenhochdruckabschneiden von innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen mit Kreisringquerschnitt (IHAS von verformten Rohrbereichen; inhomogene Schneidbedingungen).

Die nachfolgend erläuterte Vorgehensweise zur Realisierung der Zielstellung orientiert sich an den dargestellten Teilzielen:

*Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen zum Grundvorgang beim Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut*

An ausgewählten unverformten Rohren soll das vollständige Abschneiden entlang des kompletten Rohrumfanges realisiert werden. Dabei werden als Ausgangsteilparameter die Wanddicke und der Werkstoff sowie als Werkzeugparameter die Schneidnutgeometrie bei konstanter Schneidkeilgeometrie variiert. Zentrale Schwerpunkte sind die Machbarkeit eines stabilen Schneidvorganges unter homogenen Schneidbedingungen und die Erarbeitung von wissenschaftlichen Erkenntnissen zum Grundvorgang beim Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut von unverformten Rohren.

*Wissenschaftlich-technologische Erschließung und Determinierung des Grundvorganges beim Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut*

Für eine erweiterte Auswahl an Ausgangsteilen verschiedener Werkstoffgruppen und Wanddicken sollen systematisch technologische Verfahrensparameter und –grenzen für das Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren mit Schneidring und Schneidnut unter homogenen Schneidbedingungen ermittelt werden. Die wissenschaftlich-technologische Erschließung dieses Verfahrens beinhaltet eine detaillierte

Analyse des Schneidvorganges, Ansätze zur Berechnung des Schneidinnendruckes sowie eine umfassende Bewertung der Schnittteileigenschaften in Korrelation zu den Prozessparametern. Darüber hinaus soll eine Verfahrensvariante des Innenhochdruckabschneidens von unverformten Rohren untersucht werden, bei der in einem Prozessschritt zwei, über den gesamten Rohrumfang verlaufende Schneidvorgänge realisiert werden.

*Anwendung und Erweiterung der wissenschaftlichen Ergebnisse zum Grundvorgang beim Innenhochdruckabschneiden durch Entwicklung einer Verfahrensvariante zum Innenhochdruckabschneiden von innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen mit Kreisringquerschnitt*

Auf Grundlage der Ergebnisse zum Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren unter homogenen Schneidbedingungen soll am Beispiel des Abtrennens der Kopfbereiche von T-Stücken das Innenhochdruckabschneiden von innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen mit Kreisringquerschnitt entwickelt werden. Mit der technologischen Verknüpfung der Verfahren Innenhochdruckumformen und Innenhochdruckabschneiden wird erstmals das Innenhochdruckabschneiden unter inhomogenen Schneidbedingungen erschlossen. Neben der Werkzeugauslegung und der Ermittlung geeigneter Prozessstrategien für die Machbarkeit werden wissenschaftliche Ergebnisse zum Ablauf des Schneidvorganges und zu den erreichbaren Schnittteilqualitäten unter Berücksichtigung der Inhomogenität der Schneidbedingungen erzielt.

Mit den Ergebnissen der dargestellten theoretischen und experimentellen Untersuchungen trägt die vorliegende Arbeit dazu bei, für das Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen eine wissenschaftlich-technologische Basis zu bilden. Mit einer wissenschaftlich basierten Planung und Realisierung von Innenhochdruckabschneidvorgängen wird die Voraussetzung dafür geschaffen, dass das Innenhochdruckabschneiden zu einer echten Alternative gegenüber den aufwändigen, etablierten Schneidvarianten in Verbindung mit dem Innenhochdruckumformen wird. Nicht zuletzt leistet die Arbeit einen Beitrag dazu, die Innenhochdruckfertigungstechnik insgesamt effektiver zu gestalten und erweitert somit ihr Anwendungsspektrum.



## **4 Grundlegende Betrachtungen zum Innenhochdruckabschneiden**

### **4.1 Erweiterte Einordnung der Verfahren des Innenhochdrucktrennens in die Systematik der Fertigungsverfahren**

Wie im Stand der Technik dargestellt, existieren bislang nur Ansätze bezüglich der Definition und systematischen Einordnung des Innenhochdruckschneidens. Die neueste Fassung der DIN 8588 (September 2003) /20/ definiert das Scherschneiden nach wie vor als ein Zerteilen von Werkstücken zwischen zwei sich aneinander vorbei bewegenden Schneiden, erweitert allerdings diese Definition des Scherschneidens derart, dass eine Schneide durch ein Wirkmedium ersetzt werden kann. Die VDI-Richtlinie 3146 /21/ benennt und beschreibt zwar Verfahren zum Trennen mit Innenhochdruck, ohne diese dabei systematisch zu gliedern. Auch bereits vorliegende Forschungsarbeiten, die sich vorrangig mit dem Innenhochdrucklochen beschäftigen, können das Defizit der fehlenden systematischen Erfassung und Definition nicht beseitigen.

Mit der zunehmenden Erschließung der Innenhochdruckverfahren und insbesondere der Innenhochdrucktrennverfahren wächst jedoch der Bedarf an einheitlichen Bezeichnungen und Systematisierung dieser Verfahren. Eine Grundlage dafür bildet die VDI-Richtlinie 3146. In Erweiterung der dort aufgeführten Systematik wird dem Innenhochdrucktrennen das Innenhochdruckzerteilen untergeordnet, welches sich in das Innenhochdruckschneiden und das Innenhochdruckreißen untergliedert. Diese Struktur entspricht der in der DIN 8580 /19/ dargestellten Gliederung der Fertigungsverfahren. Dadurch sind eventuell notwendige Erweiterungen innerhalb der bestehenden Hierarchieebenen bei zukünftigen Entwicklungen neuer Verfahren zum Innenhochdrucktrennen problemlos möglich. Ebenso ist eine Integration in die bestehende Systematik der Fertigungsverfahren leicht möglich. Die in Bild 4-1 zusammengestellte Einteilung der Innenhochdruckverfahren mit detaillierter Untergliederung des Innenhochdrucktrennens fasst die verschiedenen Ansätze einer Systematisierung zusammen und erweitert sie. Die Eingliederung des Innenhochdruckabschneidens in die Systematik der Innenhochdruckverfahren ist besonders hervorgehoben. Als technologisch wichtigste Verfahren zum Innenhochdruckschneiden sind das Innenhochdrucklochen und das Innenhochdruckabschneiden weiter untersetzt.

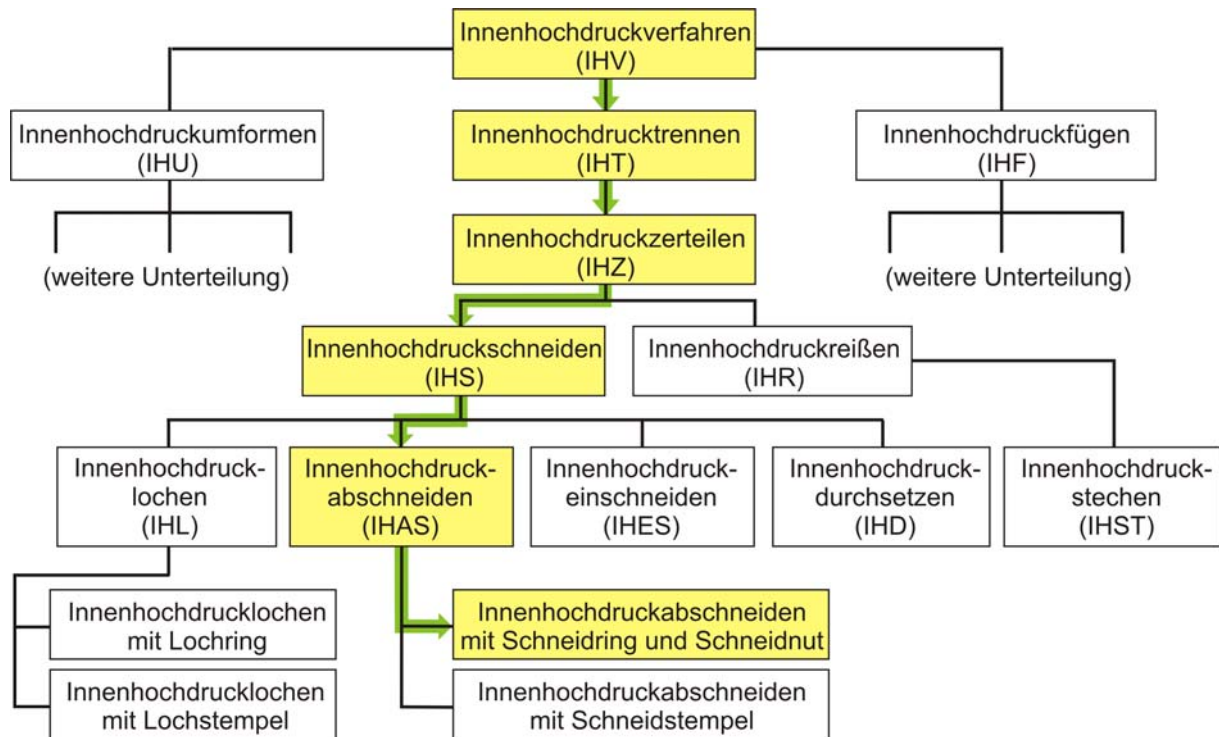


Bild 4-1: Einordnung des Innenhochdruckabschneidens in die Systematik der Innenhochdruckverfahren

Neben einer systematischen Gliederung ergibt sich die Notwendigkeit eindeutiger Definitionen für die Fertigungsverfahren. Das im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stehende Innenhochdruckabschneiden sowie die wichtigsten Verfahren zu seiner Abgrenzung und Einordnung lassen sich wie folgt definieren:

Das *Innenhochdruckschneiden* (IHS) wird als übergreifender Begriff für die derzeit bekannten Verfahren zum Trennen mit Wirkmedium und einem geometrisch bestimmten Schneidkeil verwendet. Der Werkstoffzusammenhalt wird dabei unter der Wirkung von Schubspannungen entlang einer durch den geometrisch bestimmten Schneidkeil definierten Schnittlinie aufgehoben. Die Verfahrensvarianten des Innenhochdruckschneidens sind in Bild 4-1 dargestellt, wobei das *Innenhochdrucklochen* und das *Innenhochdruckabschneiden* die technisch bedeutendsten darstellen.

Das *Innenhochdruckreißen* (IHR) umfasst Verfahren zum Trennen mit Wirkmedium und in der Regel einem weiteren Werkzeuelement ohne einen geometrisch bestimmten Schneidkeil. Der Werkstoffzusammenhalt wird dabei unter der Wirkung von Zugspannungen entlang einer undefinierten, sich erst während der Werkstofftrennung herausbildenden Trennlinie aufgehoben.

Das *Innenhochdrucklochen von Hohlprofilen* ist eine spezielle Verfahrensvariante des Innenhochdruckschneidens. Die durch den Schneidkeil definierte Schnittlinie ist

geschlossen, verläuft jedoch nicht über dem kompletten Umfang des Hohlprofils. Im Ergebnis des Trennvorganges entstehen eine Öffnung in der Wandung des Hohlprofils sowie ein Lochbutzen als Abfallteil. Verfahrensvarianten des Innenhochdrucklochens sind das „Lochen mit Lochring“ („von innen nach außen“) und das „Lochen mit Lochstempel“ („von außen nach innen“) /11/,/14/,/50/,/51/.

Das *Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen* ist eine spezielle Verfahrensvariante des Innenhochdruckschneidens. Die durch den Schneidkeil definierte Schnittlinie ist geschlossen und verläuft über dem gesamten Umfang des Hohlprofils. Im Ergebnis des Trennvorganges liegen zwei Hohlprofile vor, die in der Regel Schnitt- und Abfallteil darstellen. Die bisher einzige bekannte Variante ist das Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut, d.h. „von innen nach außen“.

Abschließend sollen den in Bild 4-1 aufgeführten Verfahren zum Trennen mit Wirkmedium die Ordnungsnummern entsprechend der Gliederung der Fertigungsverfahren (DIN 8588) zugeordnet werden. Dem Innenhochdruckstechen, der einzigen Verfahrensvariante des Innenhochdruckreißens, ist wie dem mechanischen Reißen die Ordnungsnummer 3.1.5.0.4 zuzuordnen. Das Innenhochdruckschneiden ist ein einhubiges Schneiden, da die Werkstofftrennung entlang der gesamten Schnittlinie in einem Hub erfolgt. Damit sind die ersten vier Stellen der Ordnungsnummer für die Varianten des Innenhochdruckschneidens mit 3.1.1.1 festgelegt. Mit der fünften Stelle der Ordnungsnummer erfolgt die Einteilung der Verfahren nach dem verfolgten Zweck bzw. der angestrebten Werkstückform. Auch das Innenhochdruckschneiden sollte nach dieser Klassifizierung weiter systematisiert werden, die DIN 8588 /20/ enthält diesbezüglich jedoch keinerlei Angaben. Eindeutig lässt sich die fünfte Stelle der Ordnungsnummer für das Innenhochdrucklochen, das Innenhochdruckeinschneiden und das Innenhochdruckdurchsetzen bestimmen, da es bei diesen Verfahrensvarianten sowohl sachlich als auch begrifflich Übereinstimmung mit den jeweiligen mechanischen Verfahren gibt. Auf das im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorrangig behandelte Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen sind die Begriffsdefinitionen der DIN 8588 nicht eindeutig anwendbar. Tabelle 4-1 enthält prinzipiell mögliche Spezifikationen für das Innenhochdruckabschneiden mit den Angaben zum Schnittlinienverlauf entsprechend DIN 8588.

Tabelle 4-1: Begriffsbestimmungen und Schnittlinienverläufe entsprechend DIN 8588 /20/ (Auswahl)

5. Stelle der ON	Begriffe	Schnittlinienverlauf
x = 1	Ausschneiden	geschlossen
x = 3	Beschneiden	offen / geschlossen
x = 6	Abschneiden	offen
x = 7	Zerschneiden	offen / geschlossen

Hier zeigt sich das im folgenden Abschnitt näher beschriebene Problem der Übertragbarkeit von Begriffen, die für ebene Werkstücke definiert und nun auf Hohlprofile übertragen werden sollen. Die Ziffer x = 1 (*Ausschneiden*) sollte trotz der für das Innenhochdruckabschneiden zutreffenden Definition einer geschlossenen Schnittlinie nicht verwendet werden. Im Sinne der angestrebten Werkstückform ist es sinnvoll, die Ziffer x = 6 (*Abschneiden*) zu gebrauchen, auch wenn laut DIN 8588 hier eine offene Schnittlinie vorliegen muss. Trotz der geschlossenen Schnittlinie wird ein „freies Bauteilende“ erzeugt, was an einem ebenen Werkstück eine offene Schnittlinie voraussetzen würde (vgl. auch Bild 4-3). Der Gebrauch der Begriffe *Be-* und *Zerschneiden* (x = 3 und x = 7) kann in Abhängigkeit von der speziellen Schneidaufgabe ebenfalls sinnvoll sein, wobei empfohlen wird, im Allgemeinen das Innenhochdruckabschneiden durch die Ordnungsnummer 3.1.1.1.6 zu kennzeichnen. In Bild 4-2 sind die Ordnungsnummern für die Verfahrensvarianten des Innenhochdruckschneidens in einer Übersicht zusammengefasst.

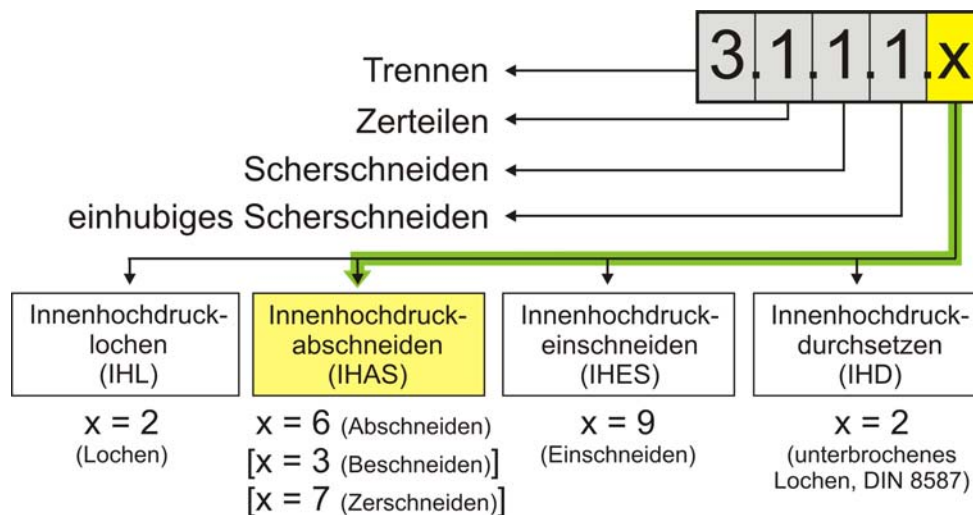


Bild 4-2: Ordnungsnummern für die Varianten des Innenhochdruckschneidens

#### 4.2 Erweiterung der Systematik des Trennens von Hohlprofilen

Das Innenhochdruckumformen ermöglicht die Herstellung von komplexen Hohlformbauteilen für vielfältige Anwendungsfälle vor allem im Automobilbau. Daraus resultiert eine Vielzahl von verschiedenartigen Trennaufgaben an Hohlprofilen. Eine wissenschaftliche Behandlung des Trennens von Hohlprofilen setzt eine Systematik der Trennaufgaben nach geeigneten Merkmalen voraus.

Das Innenhochdruckschneiden ist, bis auf den Sonderfall Innenhochdruckeinschneiden, dadurch gekennzeichnet, dass das Trennen entlang einer geschlossenen Schnittlinie erfolgt. Dabei sind grundsätzlich zwei Varianten von geschlossenen Schnittlinien an Hohlprofilen zu unterscheiden. Wird ein bestimmter Bereich aus der Wandung des Hohlteiles herausgetrennt, so verläuft die geschlossene Schnittlinie nicht über den gesamten Umfang des Hohlprofils. Dieser Variante ist das Innenhochdrucklochen zuzuordnen. Ebenfalls eine geschlossene Schnittlinie, jedoch über den kompletten Umfang des Hohlprofils verlaufend, tritt beim Innenhochdruckabschneiden auf. Bei dieser Variante wird das Hohlprofil über seinen Querschnitt komplett abgetrennt, so dass ein freies Werkstückende entsteht. Obwohl bei beiden Varianten die Schnittlinien geschlossen sind, liegen unterschiedliche Schneidergebnisse vor. Eine Einteilung in die Kategorien „Geschlossene Schnittlinie – Umlaufend über Umfang“ und „Geschlossene Schnittlinie – Nicht umlaufend über Umfang“ wird auch von RIEGER /14/ vorgeschlagen. Die unterschiedliche Qualität der beschriebenen Schnittlinienverläufe wird deutlich, wenn ein äquivalenter Trennvorgang an einem flächenhaften Werkstück herangezogen wird. Dies ist in Bild 4-3 dargestellt.

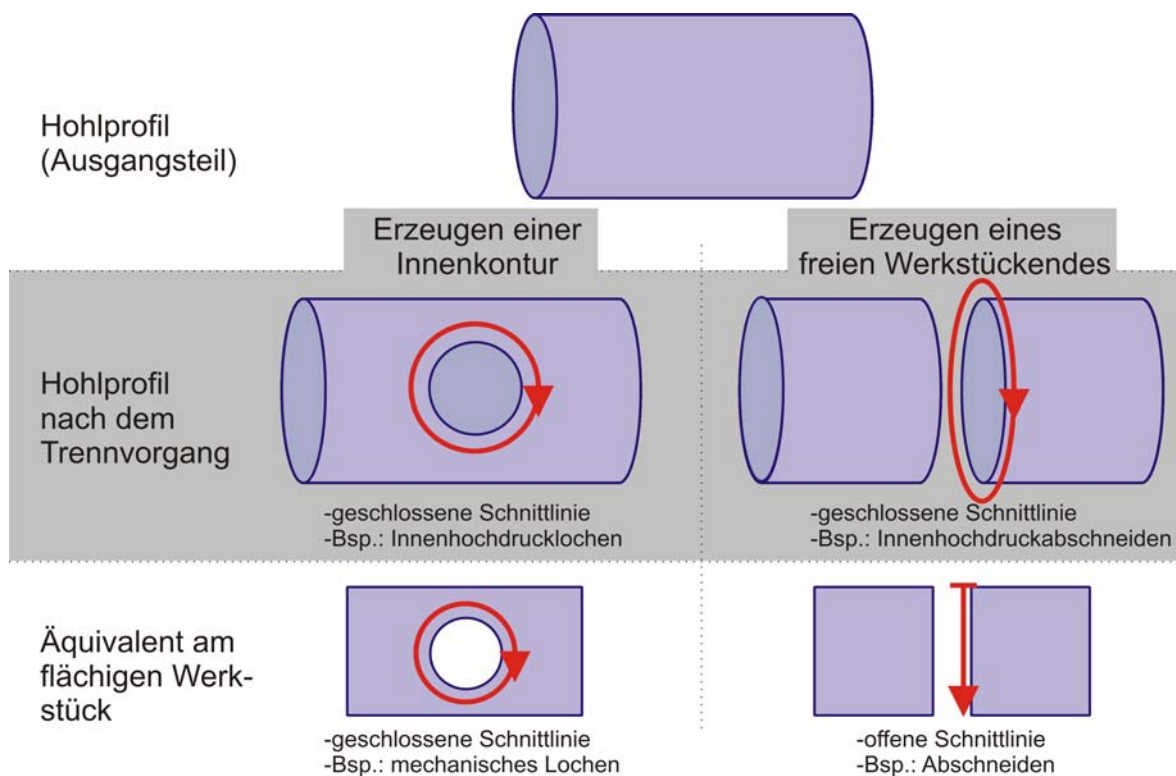


Bild 4-3: Geschlossene Schnittlinienverläufe an Hohlprofilen

Im Stand der Technik wurde dargelegt, dass beim Innenhochdruckschneiden die Homogenität der stofflichen und geometrischen Schneidbedingungen entlang der Schnittlinie einen wesentlichen Einfluss auf die Realisierung des Trennvorganges darstellt. Beim Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen können sich inhomogene geometrische Schneidbedingungen aus der Geometrie des Hohlprofilquer-

schnittes sowie der Lage der Schnittlinie ergeben. Die stofflichen Schneidbedingungen sollen an dieser Stelle nicht betrachtet werden.

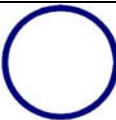


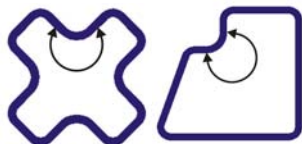
Aufgrund des weiten Spektrums möglicher Trennvorgänge an Hohlprofilen besteht die Notwendigkeit einer Systematisierung unter dem Gesichtspunkt der Homogenität der geometrischen Schneidbedingungen. Eine solche Systematisierung wird nachfolgend vorgestellt. Sie bietet die Möglichkeit, die in der vorliegenden Arbeit behandelten Schneidvarianten einzuordnen, stellt aber auch eine qualifizierte Systematik für weitere Entwicklungen zum Innenhochdruckabschneiden dar.

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich ausschließlich auf Varianten mit geschlossenen Schnittlinien über dem kompletten Umfang des Bauteils.




Die Einteilung der Trennvorgänge an Hohlprofilen hinsichtlich der Homogenität der geometrischen Schneidbedingungen erfolgt nach:

- der Querschnittsform des Hohlprofils (Tabelle 4-2),
- der Symmetrie des Hohlprofilquerschnittes (Tabelle 4-3),
- dem Verlauf der Schnittlinie (Tabelle 4-4).

**Tabelle 4-2: Einteilung der Trennvorgänge an Hohlprofilen nach der Form des Hohlprofilquerschnittes**

A) Einteilung nach der Form des Hohlprofilquerschnittes		
A1)	Kreisringquerschnitt	
A2)	Elliptischer Querschnitt	
A3)	Querschnitt mit allen Innenwinkeln unter 180°	
A4)	Querschnitt mit einzelnen Innenwinkeln über 180°	

**Tabelle 4-3: Einteilung der Trennvorgänge an Hohlprofilen nach der Symmetrie des Hohlprofilquerschnittes**

B) Einteilung nach der Symmetrie des Hohlprofilquerschnittes		
B1)	Querschnitt mit unendlich vielen Symmetrieachsen (Kreisringquerschnitt)	
B2)	Querschnitt mit mehr als 2 Symmetrieachsen	
B3)	Querschnitt mit genau 2 Symmetrieachsen	

Fortsetzung Tabelle 4-3



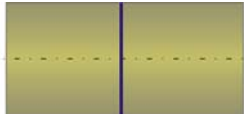
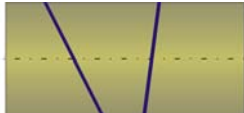

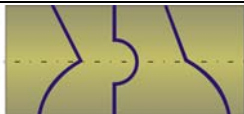
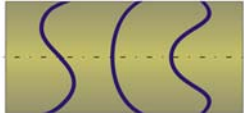
B4)	Querschnitt mit genau 1 Symmetrieachse	
B5)	Querschnitt ohne Symmetrieachsen	

Tabelle 4-4: Einteilung der Trennvorgänge an Hohlprofilen nach dem Schnittlinienverlauf

C)	Einteilung nach dem Schnittlinienverlauf	
C1)	Schnittlinie in einer Ebene verlaufend, Ebene = 90° zur Hohlprofilachse	
C2)	Schnittlinie in einer Ebene verlaufend, Ebene ≠ 90° zur Hohlprofilachse	
C3)	Schnittlinie in mehreren Ebenen verlaufend,	
C4)	Schnittlinie teilweise nicht in Ebenen verlaufend	
C5)	Schnittlinie nicht in Ebenen verlaufend	

Neben der Form des Hohlprofilquerschnittes (Tabelle 4-2) hat auch die konkrete Ausführung der Eckradien einen maßgeblichen Einfluss auf die Inhomogenität der geometrischen Schneidbedingungen. Sie vergrößert sich mit kleiner werdenden Eckradien, was für das Innenhochdruckschneiden von besonderer Bedeutung ist. Am Beispiel des Innenhochdruckrechtecklochs wurde dieser Zusammenhang im Stand der Technik bereits beschrieben (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Mit der vorgestellten Systematik können Trennvorgänge an Hohlprofilen mit über dem Umfang verlaufenden, geschlossenen Schnittlinien durch die Zuordnung in die Kategorien A, B und C hinsichtlich der Homogenität ihrer geometrischen Schneidbedingungen eingeteilt werden. Damit wird beispielsweise die Auswahl des zur Anwendung kommenden Trennverfahrens für eine konkrete Schneidaufgabe wesentlich erleichtert.

### 4.3 Verfahrensprinzip Innenhochdruckabschneiden

Das Verfahrensprinzip des Innenhochdruckabschneidens mit Schneidring und Schneidnut soll nachfolgend am Grundverfahren, dem Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren, d.h. unter homogenen Schneidbedingungen, dargestellt werden. Sämtliche Varianten des Innenhochdruckabschneidens unter inhomogenen

Schneidbedingungen leiten sich aus diesem Grundverfahren ab und sind auf das gleiche Verfahrensprinzip zurückzuführen. Für die Darstellung des Verfahrensprinzips soll zudem von einer Schnittlinie ausgegangen werden, die in einer Ebene senkrecht zur Rohrlängsachse verläuft. Damit kann das Grundverfahren des Innenhochdruckabschneidens entsprechend den Ausführungen in den Abschnitten 4.1 und 4.2 durch die Ordnungsnummer 3.1.1.1.6 sowie bezüglich der Trennvariante durch A1, B1 und C1 gekennzeichnet werden.

Das Werkzeug zum Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren ist durch einen Schneidring und eine Schneidnut gekennzeichnet. Die Schneidnut ist auf der einen Seite durch die Schneidkante und auf der anderen Seite durch eine Biegekante begrenzt ((a) in Bild 4-4). Die Biegekante ist grundsätzlich mit einem deutlich ausgeprägten Radius versehen. Die geometrische Lage der Schneidkante mit dem Schneidring entspricht einer geschlossenen Linie auf der Mantelfläche des zu schneidenden Rohres. Sowohl der geometrische Verlauf des Schneidringes als auch der Ablauf des Schneidvorganges werden durch die Schneidnutgeometrie bestimmt. In die Schneidnut hinein wird das Material des Werkstückes durch die Wirkung des Innendruckes geformt ((b) in Bild 4-4). Durch die Erhöhung des Innendruckes erreicht der Spannungszustand im Werkstück eine kritische Größe, bei der es zur Werkstofftrennung kommt. Es liegen dann das Schnittteil und ein Rest- bzw. Abfallteil vor, welches das in die Schneidnut geformte Material enthält ((c) in Bild 4-4).

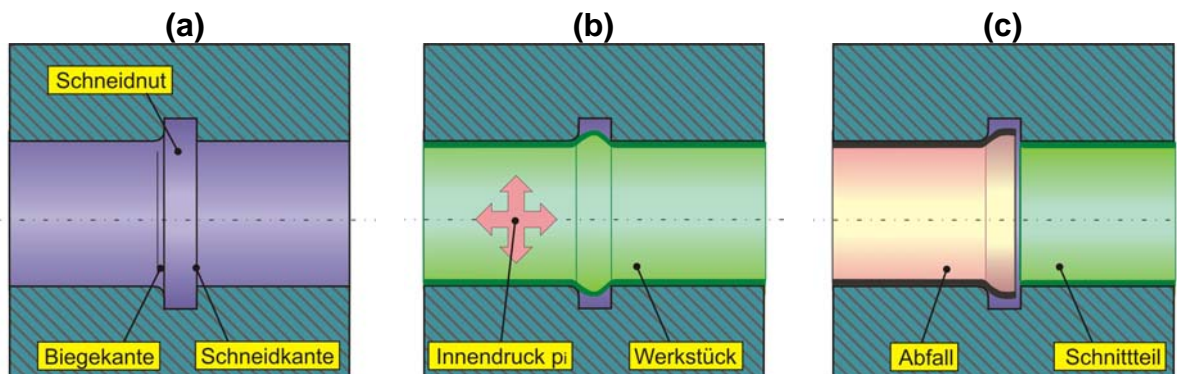


Bild 4-4: Verfahrensprinzip des Innenhochdruckabschneidens

#### 4.4 Innendruckwirkung und Spannungszustand

Beim Innenhochdruckabschneiden ist zum Erzeugen einer Werkstofftrennung im Hohlteil ein Spannungszustand erforderlich, der die Trennbedingung erfüllt. Der Spannungszustand wird im Werkstück durch die Wirkung des Innendruckes in Wechselwirkung mit dem Werkzeug erzeugt. Der auf die Innenseite des Hohlteiles wirkende Innendruck führt dazu, dass in den Werkstückbereichen, die sich frei über der Schneidnut befinden, nach elastischer Verformung zunächst die Plastizitätsbedingung erfüllt wird. Das Material beginnt zu fließen und formt sich unter weiterer Innendruckerhöhung in die Schneidnut hinein. Im Werkstück bilden sich mit der



Biege-, der Eiform- und der Schnittzone drei charakteristische Beanspruchungszonen aus (Bild 4-5).

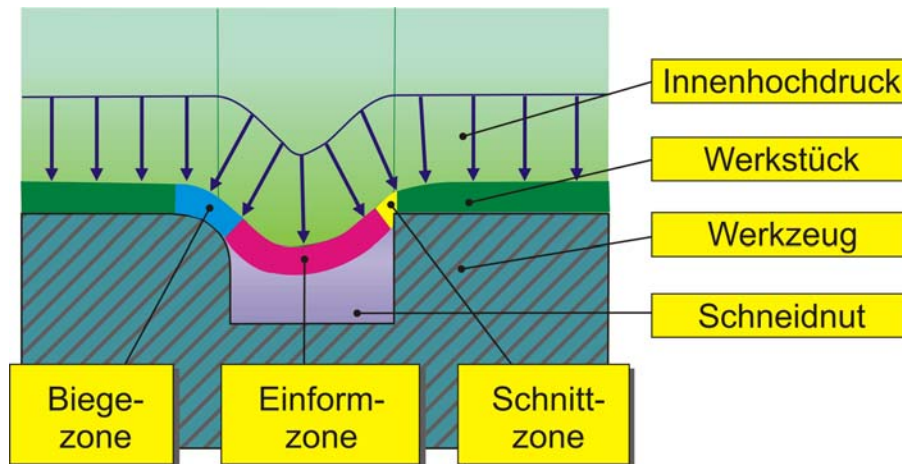


Bild 4-5: Ausbildung typischer Beanspruchungszonen unter Innendruckwirkung beim IHAS

Die frei in die Schneidnut geformten Materialbereiche bilden die Eiformzone. Ohne die Einbringung zusätzlicher, axialer Kraftkomponenten erfolgt die Umformung in der Eiformzone aufgrund der Reibungsverhältnisse zwischen Werkstück und Werkzeug in den angrenzenden Bereichen überwiegend unter Streckziehbeanspruchung. Wegen der Verfestigung des Materials in der Eiformzone muss der Innendruck ständig erhöht werden, um den Umformprozess fortlaufend aufrecht zu erhalten. Im Bereich der Biegekante wird das Material um eben diese Kante gebogen und es kommt zur Ausbildung einer Biegezone. Sie ist durch einen direkten Kontakt von Werkstück und Werkzeug gekennzeichnet.

Unmittelbar an der Schneidkante beginnt sich im Werkstück aufgrund der Wirkung des Innendruckes eine Scherbeanspruchung aufzubauen. Der durch die Scherbeanspruchung gekennzeichnete Werkstückbereich ist die Schnittzone (vgl. Bild 4-5). Die Verhältnisse in der Schnittzone sind in Bild 4-6 detailliert dargestellt. Darin sind auch die Druck- sowie die Freifläche der Schneidkante angegeben. Anders als beim mechanischen Scherschneiden kommt es beim Innenhochdruckabschneiden zu einer aktiven Krafteinleitung auf die Freifläche der Schneidkante. Zurückzuführen ist dies auf die Eiformung des Materials in die Schneidnut und die damit verbundene Verkippung der Wirkrichtung des Innendruckes auf die Innenseite des Werkstückes. Im Bereich der Druckfläche wirkt der Innendruck als Niederhalter mit Klemmfunktion. Es kann davon ausgegangen werden, dass es hier zu keiner Relativbewegung zwischen Werkstückwerkstoff und Werkzeug kommt.

Ebenfalls in Bild 4-6 sind für ein Volumenelement der Schnittzone schematisch die wirkenden Spannungen angegeben. Alle Spannungen beziehen sich dabei auf die Rohrwand des Ausgangsteiles. Die radiale Spannungskomponente  $\sigma_r$  wirkt demnach senkrecht zur Rohrlängsachse in Wanddickenrichtung. Die Richtung der Spannungs-

komponente  $\sigma_a$  entspricht der Rohrlängsachse, während die Spannungskomponente  $\sigma_t$  in Umfangsrichtung des Rohres wirksam wird.

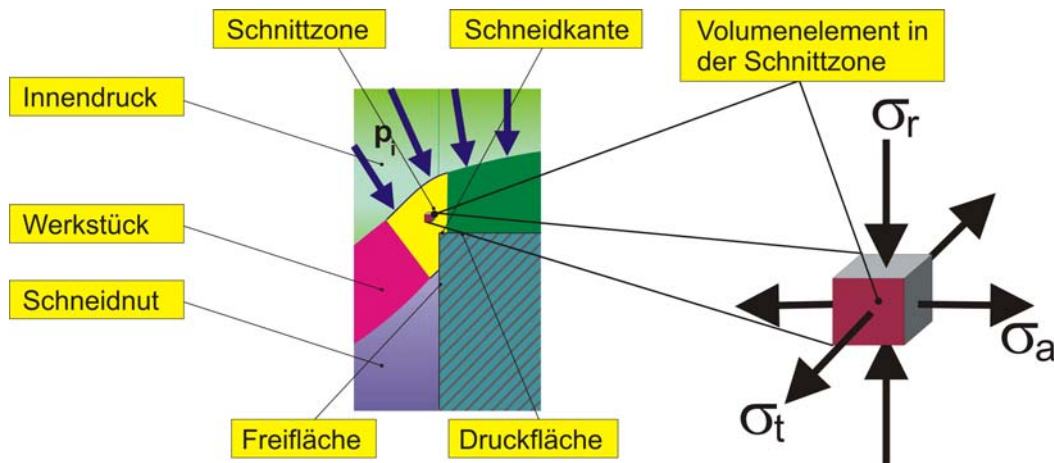


Bild 4-6: Schnittzone und Spannungszustand beim Innenhochdruckabschneiden

Der Spannungszustand beim Innenhochdruckabschneiden ist durch radiale Druckspannungen gekennzeichnet, die unmittelbar aus der Wirkung des Innendruckes resultieren. Diese Druckspannungen führen zu Schubspannungen, die den Schneidvorgang bestimmen. Aus der Einförmigkeit des Materials in die Schneidnut resultieren in der Schnittzone z.T. deutlich ausgeprägte, axiale Zugspannungsanteile. Die tangentialen Zugspannungsanteile in der Schnittzone sind begrenzt. Dagegen haben die tangentialen Zugspannungen in der Einförmigkeit, wie in Abschnitt 6.1.2 ausführlich beschrieben wird, einen entscheidenden Einfluss auf die Machbarkeit des Innenhochdruckabschneidens. Zusammenfassend kann der Spannungszustand in der Schnittzone durch dominierende Schubspannungen, überlagert von Zugspannungsanteilen beschrieben werden. Liegt ein genügend großes Umformvermögen des Werkstoffes vor, so dringt die Schneidkante während des Schneidvorganges in das Werkstück ein. Am Restteil bildet sich dabei auf der Schnittfläche ein entsprechender Glattschnittanteil, während die Schnittfläche am Endteil, wegen der fehlenden Wechselwirkung mit einer Schneidkante, ausschließlich aus Bruchflächenanteilen besteht.

#### 4.5 Modellierung des Schneidvorganges

Ein Modell ist eine vereinfachende, nur die wesentlichen Eigenschaften enthaltende Abbildung der Realität. Die Modellierung des Schneidvorganges soll stufenweise erfolgen, indem der in der Schnittzone wirksame Spannungszustand nacheinander durch die Spannungskomponenten aufgebaut wird.

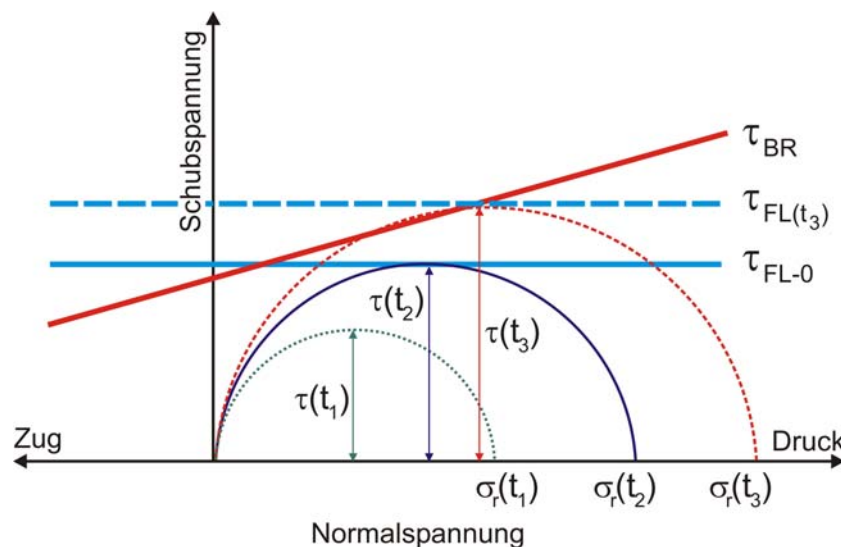
1. Modellstufe: *Ausschließliches Wirken der radialen Spannungskomponente  $\sigma_r$  (Spannungskomponenten  $\sigma_a$  und  $\sigma_t$  vernachlässigt)*

Ein ausschließliches Wirken der radialen Spannungskomponente  $\sigma_r$  bedeutet, dass ein reines Durchsetzen des Materials in der Schnittzone stattfindet. Das Durchsetzen resultiert direkt aus der Wirkung des Innendruckes und verläuft demnach in Richtung der Rohrwanddicke. Eine versuchstechnische Realisierung dieser Modellstufe würde ein vollständiges, mechanisches Abstützen des Materials im Schneidnutbereich erfordern, um eine Ausformung in diesem Bereich komplett zu verhindern. Die Vergrößerung des Rohrdurchmessers durch die Scherbeanspruchung und das damit verbundene Auftreten einer tangentialen Spannungskomponente werden in dieser Modellstufe vernachlässigt.

Entsprechend der Annahmen für diese Modellstufe verbleibt für die Bestimmung der maximalen Schubspannung  $\tau_{max}$  nach der Schubspannungshypothese nach *TRESCA* entsprechend Gleichung (2) nur  $\sigma_r$  zu berücksichtigen, so dass gilt:

$$\tau_{max}(t_i) = \frac{\sigma_r(t_i)}{2}. \tag{5}$$

Dieser Zusammenhang lässt sich, wie Bild 4-7 zeigt, durch den Mohrschen Spannungskreis veranschaulichen. Zunächst wird durch die Erhöhung des Innendruckes die radiale Spannungskomponente  $\sigma_r$  vergrößert. Liegt die daraus resultierende Schubspannung  $\tau(t_1)$  unterhalb der Schubfließgrenze  $\tau_{FL-0}$  setzt noch kein Fließen ein. Mit dem Erreichen der Schubfließgrenze  $\tau_{FL-0}$  setzt Fließen ein. In Bild 4-7 wird dies durch den Zeitpunkt  $t_2$  verdeutlicht.



**Bild 4-7: Mohrscher Spannungskreis für die Stufe 1 der Modellierung des Schneidvorganges**

Das Resultat weiterer Innendruckerhöhung hängt von den Werkstoffeigenschaften des Werkstückes, speziell vom Verfestigungsverhalten, ab. Die Materialverfestigung nach dem Fließbeginn führt dazu, dass die anfängliche Schubfließgrenze  $\tau_{FL-0}$  zu höheren Schubspannungen verschoben wird und sich jeweils eine Momentanschub-

fließgrenze  $\tau_{FL(ti)}$  ergibt. Um die Fließbedingung weiterhin zu erfüllen, muss der Spannungszustand im Material die jeweils vorliegende Momentanschubfließgrenze  $\tau_{FL(ti)}$  erreichen, d.h. die radiale Spannungskomponente  $\sigma_r$  muss durch Steigerung des Innendruckes erhöht werden.

Bei geringer Verfestigung des Materials kann ein komplettes Durchsetzen der gesamten Materialwanddicke erfolgen, ohne dass die Momentanschubfließgrenze  $\tau_{FL(ti)}$  die Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$  erreicht. In diesem Fall weist das Restteil eine vollständig aus Glattschnittanteilen bestehende Trennfläche ohne Bruchanteile auf. Das Endteil besitzt keine Trennfläche, sondern einen Einzugsbereich, der sich über die gesamte Wanddicke erstreckt. Dagegen führt eine stärkere Verfestigungsneigung des Materials dazu, dass die Momentanschubfließgrenze  $\tau_{FL(ti)}$  die Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$  erreicht, bevor das Durchsetzen des Materials komplett ist. Es kommt zum Gewaltbruch des Restquerschnittes. Dieser Fall wird in Bild 4-7 zum Zeitpunkt  $t_3$  erreicht. Das Schnittteil ist in diesem Fall durch eine aus Bruchanteilen bestehende Trennfläche gekennzeichnet, während die Trennfläche des Restteiles sowohl aus Bruch- als auch aus Glattschnittanteilen besteht.

## 2. Modellstufe: *Wirken der radialen Spannungskomponente $\sigma_r$ und der tangentialen Spannungskomponente $\sigma_t$ (Spannungskomp. $\sigma_a$ vernachlässigt)*

In dieser Modellstufe soll aufbauend auf der Modellstufe 1 das zusätzliche Wirken der tangentialen Spannungskomponente  $\sigma_t$  behandelt werden. Wie bereits beschrieben, führt die Materialverschiebung beim Durchsetzen zu einer Durchmesser- vergrößerung des Schnittteiles in den durchgesetzten Bereichen. Das Durchsetzen ist jedoch auf das Maß der Wanddicke beschränkt, so dass auch die hieraus resultierenden, tangentialen Zugspannungen begrenzt sind. Die theoretisch maximal auftretende Umfangsdehnung, die durch das Durchsetzen hervorgerufen werden kann, beträgt:

$$\varepsilon_{Umax} = \frac{2 \cdot s_0}{d_0}, \quad (6)$$

mit  $s_0$  als Ausgangswanddicke und  $d_0$  als dem äußeren Ausgangsdurchmesser des Rohres. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten, dünnwandigen Rohre mit einem Außendurchmesser von 70 mm sind die für die tangentialen Zugspannungen relevanten Umfangsdehnungen auf  $\varepsilon_{Umax} = 2,9\%$  bei 1,0 mm Wandstärke und  $\varepsilon_{Umax} = 8,6\%$  bei 3,0 mm Wandstärke begrenzt.

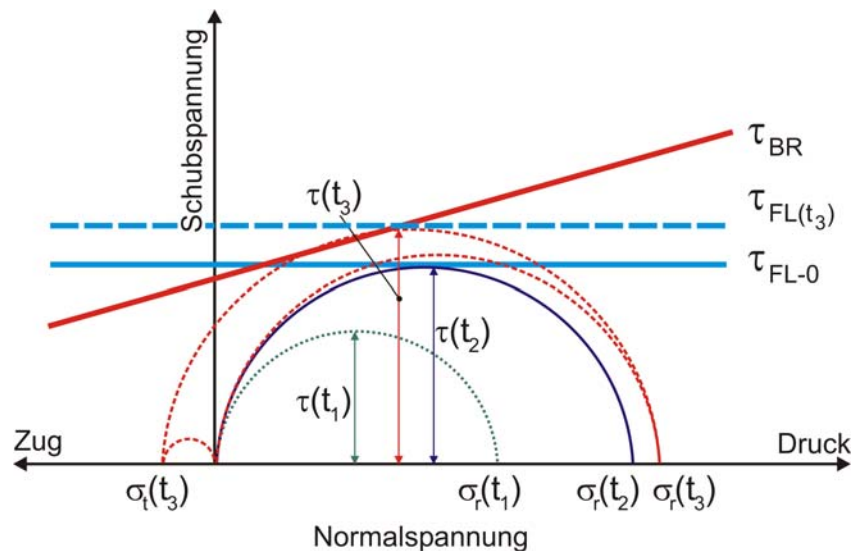


Bild 4-8: Mohrscher Spannungskreis für die Stufe 2 der Modellierung des Schneidvorganges

Die Darstellung im Mohrschen Spannungskreis (Bild 4-8) zeigt, dass bis zum Erreichen der Schubfließgrenze  $\tau_{FL-0}$  ausschließlich die radiale Spannungskomponente  $\sigma_r$  wirkt. Unter Vernachlässigung der elastischen Verformungen können erst ab dem Einsetzen des plastischen Fließens zum Zeitpunkt  $t_2$  tangentielle Zugspannungen auftreten. Entsprechend Gleichung (2) ergibt sich die maximale Schubspannung dann nach:

$$\tau_{\max}(t_i) = \frac{\sigma_t(t_i) - \sigma_r(t_i)}{2} \quad (7)$$

Aufgrund ihrer Wirkung als Zugspannung führt die durch die Durchmesserergrößerung induzierte tangentielle Spannungskomponente zu einer Erhöhung der maximalen Schubspannung nach *TRESCA* und unterstützt somit das Durchsetzen bzw. die durch Verfestigungsvorgänge hervorgerufene Erhöhung der Momentanschubfließgrenze  $\tau_{FL(t_i)}$ .

An dieser Stelle sei hervorgehoben, dass in das dargestellte Modell ausschließlich die direkt in der Schnittzone wirkenden, tangentialen Zugspannungen einbezogen werden. Wird eine Ausformung des Materials in den Schneidnutbereich zugelassen, können in den Bereichen außerhalb der Schnittzone, d.h. in der Einformzone (vgl. Bild 4-5) deutlich größere tangentielle Zugspannungen auftreten. Gleiches gilt für das im Abschnitt 6.1.2 beschriebene Aufstellen des Materials nach dem Einsetzen der Werkstofftrennung. Auch hier treten ausgeprägte, tangentielle Zugspannungen in den Materialbereichen auf, die sich im Schneidnutraum (Einformzone) befinden. Unmittelbar an der Schneidkante, in der Schnittzone, entsprechen die Verhältnisse hinsichtlich der tangentialen Zugspannungen jedoch wieder denen des Modells.

3. Modellstufe: Wirken der rad. Spannungskomponente  $\sigma_r$ , der tangentialen Spannungskomponente  $\sigma_t$  und der axialen Spannungskomponente  $\sigma_a$

Die Modellstufe 3 ist durch die Berücksichtigung der axialen Spannungskomponente  $\sigma_a$  gekennzeichnet. Unter ausschließlicher Innendruckwirkung kann eine axiale Spannungskomponente nur hervorgerufen werden, wenn eine Ausformung des Materials im Schneidnutbereich zugelassen wird. Das heißt, der Schneidvorgang muss entweder ohne oder nur mit begrenzter Abstützung erfolgen. Wie bereits beschrieben, unterliegt das Material innerhalb der Eiformzone in diesem Fall einer Streckziehbeanspruchung. Die axiale Komponente dieser Streckziehbeanspruchung wirkt direkt in die Schnittzone hinein. Die Darstellung der Verhältnisse in der Schnittzone durch den Mohrschen Spannungskreis verdeutlicht gegenüber den vorangegangenen Modellstufen die ausgeprägte Verschiebung des Trennvorganges in Richtung des Zugbereiches (Bild 4-9 und Bild 4-10). Gemäß der Schubspannungshypothese nach *TRESCA* werden die Spannungskomponenten  $\sigma_a$  und  $\sigma_r$  berücksichtigt, so dass sich die maximale Schubspannung angeben lässt als:

$$\tau_{\max}(t_i) = \frac{\sigma_a(t_i) - \sigma_r(t_i)}{2} \tag{8}$$

Unter Innendruckwirkung erhöhen sich, durch zunehmende Umformung des Materials in die Schneidnut, die axialen Zugspannungen in der Schnittzone ebenso, wie die radialen Druckspannungen. Beide Spannungskomponenten vergrößern die maximal auftretende Schubspannung.

In Abhängigkeit vom konkret vorliegenden Spannungszustand und den Werkstoffeigenschaften kann die maximale Schubspannung, wie in Bild 4-9 zum Zeitpunkt  $t_2$  dargestellt, zunächst die anfängliche Schubfließgrenze  $\tau_{FL-0}$  erreichen. Damit setzt das Fließen des Materials in der Schnittzone ein.

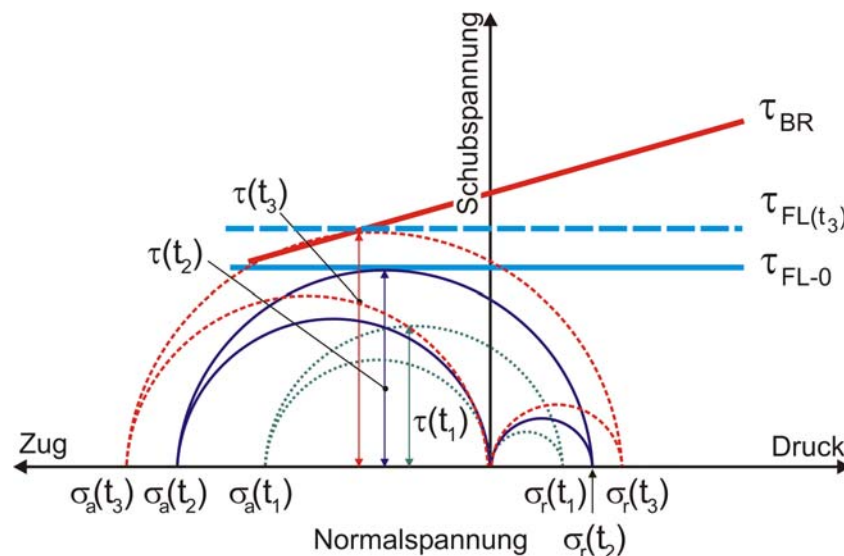


Bild 4-9: Mohrscher Spannungskreis für die Stufe 3 der Modellierung des Schneidvorganges (I)

Aufgrund von Verfestigungsvorgängen muss der Innendruck weiter erhöht werden, um das Fließen aufrecht zu erhalten. Dabei erhöhen sich die Spannungskomponenten  $\sigma_a$  und  $\sigma_r$ . Zum Zeitpunkt  $t_3$  erreicht die Momentanschubfließgrenze  $\tau_{FL(t_3)}$  die Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$  und es kommt zum Abtrennen des Restquerschnittes durch Gewaltbruch. Die Trennfläche des Restteiles besteht aus Glattschnitt- und Bruchanteilen, das Schnittteil weist eine aus Bruchanteilen bestehende Trennfläche sowie einen ausgeprägten Einzugsbereich auf.

Ein verringertes Umformvermögen des Werkstoffes und größere Zugspannungsanteile können jedoch auch dazu führen, dass die Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$  erreicht wird, bevor plastisches Fließen einsetzt. Bild 4-10 zeigt diesen Fall anhand des Mohrschen Spannungskreises. Voraussetzung ist, dass der Gesamtvorgang durch die auftretenden Spannungskomponenten soweit in den Zugbereich verschoben wird, dass die anfängliche Schubfließgrenze  $\tau_{FL-0}$  oberhalb der Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$  liegt. Sowohl Schnitt- als auch Restteil sind dann durch eine Trennfläche gekennzeichnet, die ausschließlich aus Bruchflächenanteilen besteht.

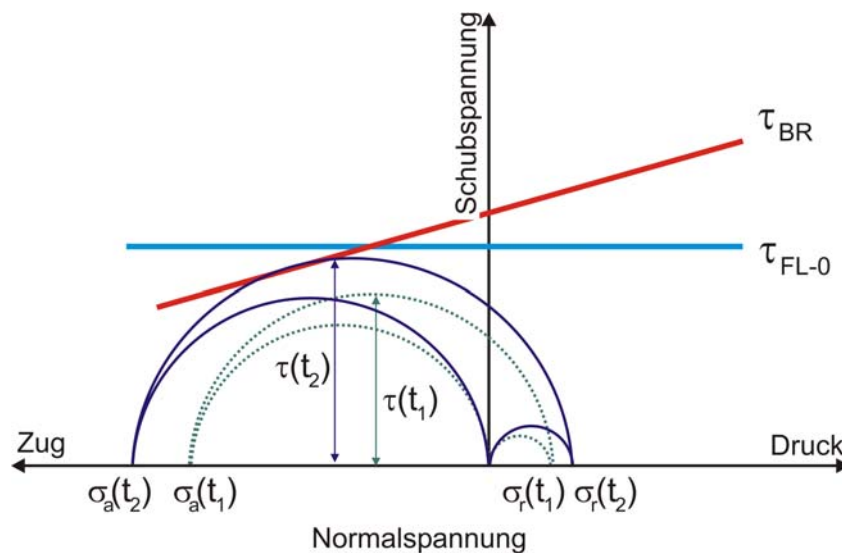


Bild 4-10: Mohrscher Spannungskreis für die Stufe 3 der Modellierung des Schneidvorganges (II)

Durch die Anwendung der Fließbedingung nach *TRESCA*, mit der Berücksichtigung der größten und kleinsten Normalspannungskomponente, reduziert sich die anfangs auf allen drei Spannungskomponenten basierende Modellstufe 3 auf das Wirken der axialen und radialen Spannungskomponenten  $\sigma_a$  und  $\sigma_r$ . Die tangentielle Zugspannungskomponente  $\sigma_t$  in der Schnittzone kann vernachlässigt werden. Dies gilt nicht bei der Betrachtung des Spannungszustandes in der Einformzone, wo deutlich größere tangentielle Zugspannungen auftreten, die für die Realisierung des Schneidvorganges begrenzt werden müssen.

Hervorzuheben ist bei der Modellstufe 3 insbesondere, dass die Plastizitäts- bzw. Trennbedingung im Vergleich zu den Modellstufen ohne Berücksichtigung der axialen Spannungskomponente bei deutlich kleineren radialen Spannungskompo-

nenen erreicht werden. Das bedeutet, sowohl das Durchsetzen des Materials durch plastisches Fließen in der Schnittzone als auch die Werkstofftrennung in der Schnittzone finden aufgrund der Umformung des Materials in den Schneidnutraum (Einformzone) bei signifikant geringeren Innendrückeren statt. Die geometrische Gestaltung der Schneidnut hat durch ihre direkte Beeinflussung der axialen Spannungen in der Schnittzone eine zentrale Bedeutung für den Ablauf und das Ergebnis des Schneidvorganges beim Innenhochdruckabschneiden. Dadurch, das zeigen auch die in den folgenden Abschnitten dargestellten Untersuchungsergebnisse, ist es möglich, für das Innenhochdruckabschneiden von Rohren ein Druckniveau einzustellen, welches seiner Größenordnung nach dem des Innenhochdruckumformens entspricht. Für die in der Zielstellung formulierte, technisch effiziente Verknüpfung des Innenhochdruckabschneidens mit dem Innenhochdruckumformen ist das eine grundlegende Voraussetzung.

In Bild 4-11 sind die wichtigsten Aspekte des Schneidvorganges beim Innenhochdruckabschneiden in einer Übersicht zusammengefasst.



<b>Elemente des Schneidvorganges</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schneidnut                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Schneidkante mit Schneidring</li> <li>- Biegekante</li> <li>- Schneidnutgeometrie</li> </ul> </li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Innendruck</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werkstück                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- geometrische Eigenschaften</li> <li>- stoffliche Eigenschaften</li> </ul> </li> </ul>		
<b>Innendruckwirkung</b>		
Ausbildung von <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnittzone</li> <li>• Einformzone</li> <li>• Biegezone</li> </ul>		
<b>Spannungszustand in der Schnittzone</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• radiale Druckspannungen <math>\sigma_r</math></li> <li>• axiale Zugspannungen <math>\sigma_a</math></li> <li>• tangentialer Zugspannungen <math>\sigma_t</math></li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vernachlässigung von <math>\sigma_t</math></li> <li>- Anwendung der Schubspannungshypothese nach <i>TRESCA</i> mit Berücksichtigung von <math>\sigma_r</math> und <math>\sigma_a</math></li> <li>- dominierende Schubspannungen mit ausgeprägten Zugspannungsanteilen</li> </ul>		
<b>Schneidnutgeometrie</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- bestimmt Einformung des Materials in die Schneidnut</li> <li>- beeinflusst über <math>\sigma_a</math> den Spannungszustand in der Schnittzone</li> <li>- ist in Wechselwirkung mit den Werkstoffeigenschaften</li> <li>- entscheidendes Kriterium für den Ablauf und das Ergebnis des Schneidvorganges</li> </ul>		
<b>Endteile</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnittteile                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- ausgeprägter Einzugsbereich</li> <li>- Trennfläche = Bruchfläche</li> </ul> </li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restteile                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Einzugsbereich</li> <li>- Trennfläche = Glattschnitt- und Bruchfläche</li> </ul> </li> </ul>		

Bild 4-11: Zusammenfassende Übersicht zum Schneidvorgang beim Innenhochdruckabschneiden

## 5 Untersuchungsprogramm

### 5.1 Versuchsplanung

Zur Erfüllung der Zielstellung der Arbeit werden umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Innenhochdruckabschneiden von Rohren ausgeführt. Grundsätzlich kommt dabei das Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut zur Anwendung. Ausgangsteil ist bei allen untersuchten Varianten ein Rohr mit kreisrundem Ausgangsquerschnitt. Die Arbeiten gliedern sich in die folgenden zwei Komplexe:

- Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring von unverformten Rohren,
- Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring von innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen.

Im Mittelpunkt des Innenhochdruckabschneidens mit Schneidring von unverformten Rohren steht das Innenhochdruck-Einfachabschneiden (IH-EAS). Nach erfolgtem Schneidvorgang liegen hier ein End- und ein Restteil vor. Die Untersuchungen zum IH-EAS dienen der wissenschaftlichen Durchdringung des Grundvorganges beim Innenhochdruckabschneiden sowie darauf aufbauend der wissenschaftlich-technologischen Erschließung und Determinierung dieses Verfahrens. Zusätzlich wird mit dem Innenhochdruck-Doppelabschneiden (IH-DAS) eine Variante zum Trennen eines Ausgangsrohres entlang zweier Schnittlinien in einem Arbeitsgang in die Untersuchungen einbezogen.

Das Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring von innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen wird in Form des Innenhochdruck-T-Stück-Abschneidens (IH-TAS) untersucht. Die Schnittlinie verläuft dabei komplett im Formelementbereich. Im Ergebnis des Umformvorganges und des nachfolgenden Trennvorganges liegt als Endteil ein Hohlteil mit einem nach oben offenen T-Stück als Formelement vor. Das Restteil ist der abgetrennte Kopfbereich des Formelementes. Mit der technologischen Verknüpfung von Innenhochdruckumformen und Innenhochdruckabschneiden stellt das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden die Anwendung und Erweiterung der Forschungsergebnisse zum Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren dar (vgl. Bild 5-1).

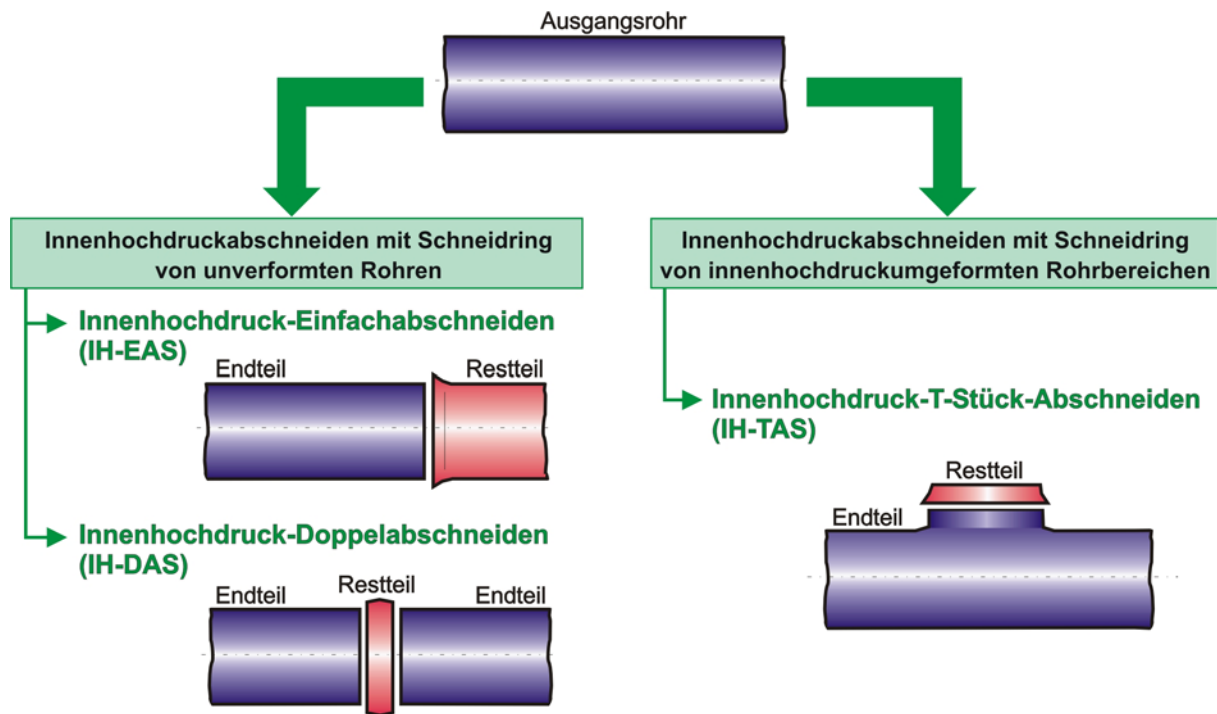


Bild 5-1: Untersuchte Varianten des Innenhochdruckabschneidens

Das Untersuchungsprogramm zum Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren wird an Ausgangsteilen verschiedener Stahlsorten sowie Aluminiumlegierungen durchgeführt. Die Ausgangsrohre haben einen Außendurchmesser von 70 mm und Wanddicken im Bereich von 1,0 bis 3,0 mm. Die Stahlrohre sind Präzisionsrohre, bei denen aus der Rohrerstellung resultierende Schweißnähte thermisch und mechanisch nachbehandelt sind. Eine Ausnahme bilden die Rohre der Werkstoffmarken DC04 und ZStE340, bei denen die Schweißnaht nicht thermisch nachbehandelt ist. Die Aluminiumrohre sind in Abhängigkeit von der Legierung entweder stranggepresst oder längsnahtgeschweißt und nachgezogen.

Mit der Zielrichtung einer breiten Datenbasis für die Ermittlung und Determinierung der grundlegenden Zusammenhänge beim Innenhochdruckabschneiden kommen für die Untersuchungen zum Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring von unverformten Rohren alle in Tabelle 5-1 aufgeführten Rohrarten zur Anwendung.

Die Untersuchungen zum Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring von innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen (Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden) erfolgen aufbauend auf den Erkenntnissen zum Innenhochdruckabschneiden an unverformten Rohren an ausgewählten Ausgangsteilen. In Tabelle 5-1 ist der Versuchsplan in einer Übersicht dargestellt, einschließlich der zu untersuchenden Ausgangsrohre in Abhängigkeit von der Schneidvariante.

Tabelle 5-1: Versuchsplan mit Ausgangsrohren und untersuchten Schneidvarianten

Werkstoff	Wanddicke	Herstellung	IH-EAS	IH-DAS	IH-TAS*
S235G2T	1,0 mm	walzprofiliert, geschweißt, mechanisch und thermisch nachbehandelt (nahtlos)	X	X	X
S235G2T	1,5 mm		X	X	–
S235G2T	2,0 mm		X	X	–
X5CrNi18-10	1,0 mm		X	X	–
X5CrNi18-10	1,5 mm		X	X	–
DC04	1,0 mm	walzprofiliert, geschweißt, mechanisch nachbehandelt	X	–	X
ZStE340	1,0 mm		X	–	–
AlMg0,7Si	1,3 mm	stranggepresst	X	X	–
AlMg0,7Si	2,0 mm		X	X	–
AlSi1MgMn	2,2 mm		X	X	–
AlMgSi0,5	2,2 mm		X	X	–
AlMg3Mn	3,0 mm	längsnahtgeschweißt, nachgezogen	X	X	X
AlMg3,5Mn	3,0 mm		X	X	–
AlMg4,5Mn0,7	3,0 mm		X	X	–

\* IH-TAS = Innenhochdruckumformen und Innenhochdruckabschneiden in technologischer Verknüpfung

## 5.2 Versuchsstand

Die Versuchsanlage zum Innenhochdruckabschneiden setzt sich aus mehreren, für eine IHU-Anlage typischen Elementen zusammen. Dazu zählen:

- Schließ- und Haltevorrichtung,
- Modulares Werkzeug,
- Hydraulik,
- Axialdichtsystem,
- Mess- und Steuerungstechnik.

Die Schließ- und Zuhaltfunktion wird über eine hydraulische Doppelständer-Tiefziehpresse mit einer Nennpresskraft von 6300 kN realisiert. Bei sämtlichen Versuchen wird die Zuhaltkraft auch in dieser Höhe aufgebracht.

Das modulare, längsgeteilte Werkzeug besteht aus einem Werkzeuggrundkörper (1 in Bild 5-2) mit Wechseleinsätzen. Die äußeren Wechseleinsätze (2) dienen der Rohrführung und weisen keine Aktivelemente auf. Der mittlere Wechseleinsatz (3) enthält die jeweiligen Werkzeugaktivelemente zum Umformen bzw. Schneiden. Da die Auslegung der Werkzeugaktivelemente selbst Forschungsgegenstand ist, wird auf die speziellen Werkzeuggeometrien bei der Darstellung der Untersuchungsergebnisse in den Abschnitten 6 und 7 eingegangen.

Die Axial- und Radialkräfte werden über Hochdruckzylinder aufgebracht, die von getrennten Hydraulikaggregaten angetrieben werden. Die beiden Axialzylinder besitzen eine maximale Kraft von 800 kN. Der für das axiale Nachschieben von Werkstoff nutzbare Weg beträgt je Zylinder maximal 40 mm. Die maximale Kraft des

Radialzylinders (4) liegt ebenfalls bei 800 kN, bei einem nutzbaren Radialweg von 28 mm. Der Radialzylinder ist mit einem verstellbaren Anschlagssystem zur Wegbegrenzung ausgestattet.

Die Versuchseinrichtung zum Innenhochdruckabschneiden ist für einen maximalen Innendruck von 2000 bar ausgelegt.

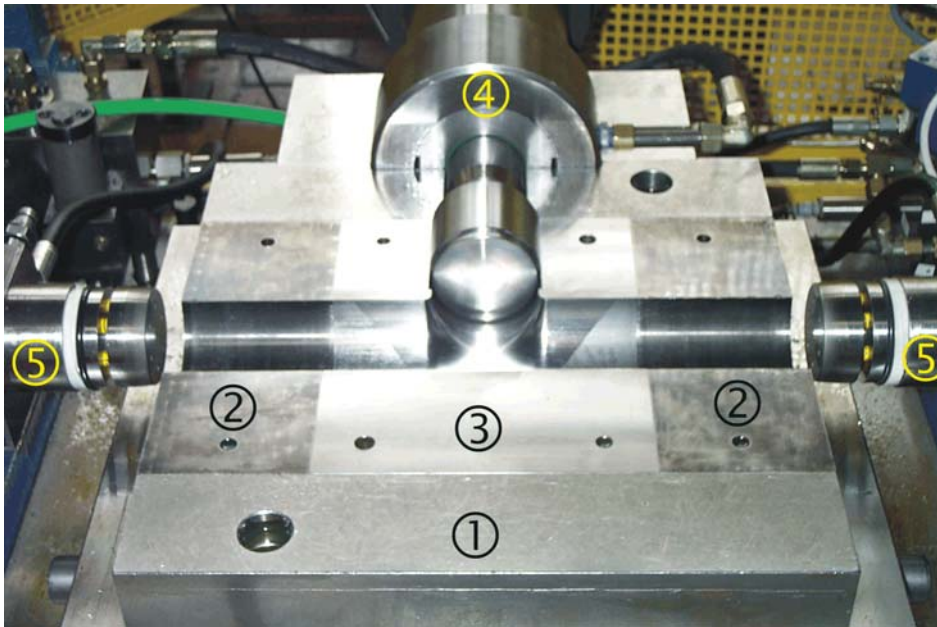


Bild 5-2: Werkzeugaufbau beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden (Erläuterungen im Text)

Die Abdichtung der Rohrenden wird über Axialdichtsysteme (5) gewährleistet, die auf dem Prinzip der Innenabdichtung über dem Rohrumfang beruhen. Das Einfahren der Dichtsysteme in die Rohrenden erfolgt bei entspannten Dichtsystemen, d.h. bei reduziertem Außendurchmesser. Nach Erreichen der Endposition im Rohr werden die Dichtsysteme gespannt und können somit ihre Dichtfunktion erfüllen. Der schematische Aufbau des verwendeten, axialen Dichtsystems ist in Bild 5-3 dargestellt. Über die Dichtkolben erfolgt gleichzeitig das Aufbringen der notwendigen Axialkräfte auf die Stirnseiten des Rohres.

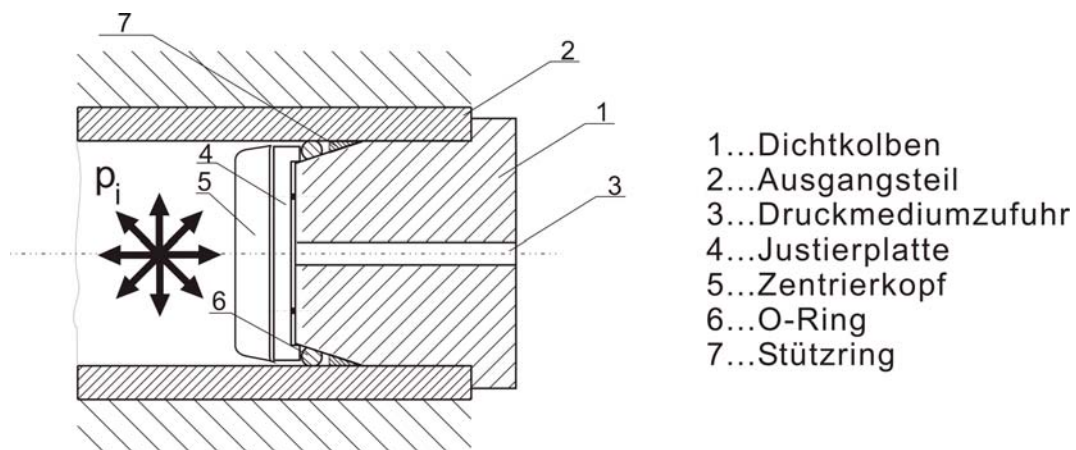


Bild 5-3: Schematische Darstellung des axialen Dichtsystems

Die IHU/IHS-Anlage verfügt über eine aufwändige Mess- und Steuerungstechnik zur Messwerterfassung und -verarbeitung sowie zur Anlagensteuerung. Eine Gesamtübersicht ist in Bild 5-4 dargestellt. Mit der Innendruck-, Radial- und Axialkrafteinheit links bzw. rechts existieren vier Hydraulikeinheiten die separat gesteuert werden. Somit verfügt die IHU/IHS-Anlage über vier steuerbare Achsen:

- Innendruck,
- Axialzylinder links,
- Axialzylinder rechts,
- Radialzylinder.

Über einen digitalen Messverstärker DMC plus (Fa. Spectris GmbH) werden die Messdaten einem Mess- und Steuerprogramm (BEAM 3.5; Fa. AMS GmbH Flöha) zur Verfügung gestellt. Dieses Programm speichert die Messdaten, führt die notwendigen Berechnungen durch und generiert die für die Steuerung der o.g. Achsen notwendigen Ausgangssignale.

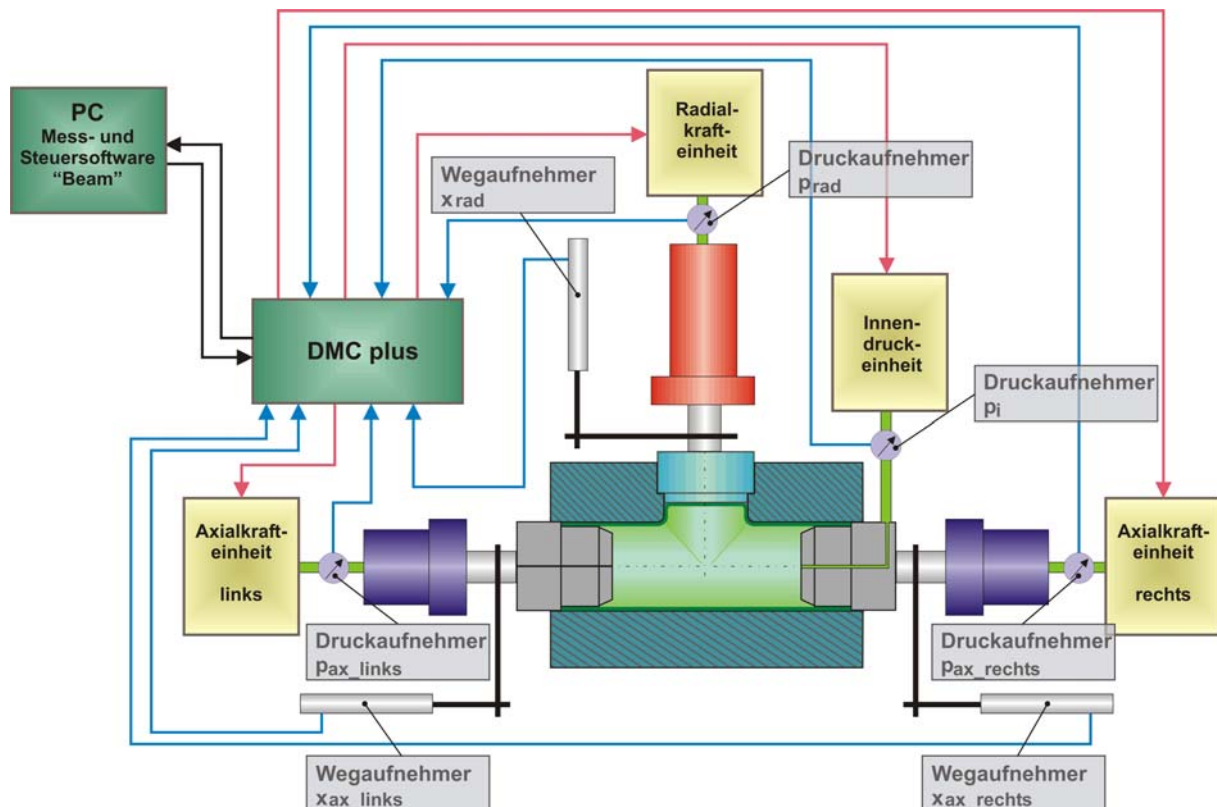


Bild 5-4: Mess- und Steuerprinzip der IHU/IHS-Anlage

### 5.3 Messgrößen und Messverfahren

Zur Realisierung der experimentellen Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es notwendig, Messgrößen zu folgenden Komplexen zu erfassen:

- Ausgangsteileigenschaften,
- Verfahrensparameter, Umformbedingungen,
- Endteileigenschaften.

### *Ausgangsteileigenschaften*

Die Ausgangsteileigenschaften beschreiben den Zustand der Ausgangsteile bezüglich Geometrie und Stoff vor dem Umform- bzw. Schneidprozess. Die Werkstoffkennwerte der Ausgangsmaterialien werden in Anlehnung an den Zugversuch nach DIN EN 10002 /63/ an einer Universalprüfmaschine ermittelt (Bild 5-5, links). Die Entnahme der Zugproben aus den Rohren erfolgt parallel (Längszugproben) sowie quer (Querzugproben) zur Rohrlängsachse. Die Prüfung der Querzugproben setzt einen Richtprozess voraus, die Längszugproben werden ungerichtet geprüft. Bezüglich der Besonderheiten dieser Proben im Vergleich zu Flachzugproben aus ebenen Blechen sowie spezieller Gesichtspunkte einer qualifizierten Rohrprüfung sei an dieser Stelle auf weiterführende, eigene Arbeiten auf diesem Gebiet verwiesen /64/,/65/. Für die im Rahmen der Zugversuche durchgeführte Kraftmessung liegt der prozentuale Messfehler unter 0,2 %, für die Wegmessung unter 0,5 %. Am Kleinlasthärtemessgerät (Bild 5-5, rechts) werden über Härtemessungen nach Vickers auf dem Rohrquerschnitt die stofflichen Eigenschaften der Ausgangsteile, vor allem hinsichtlich ihrer Homogenität über dem Rohrumfang, erfasst. Die Fehlergrenze bei der Härtemessung liegt für die Prüfkraftstufen unter 1 %, während die Fehlergrenze für die Messeinrichtung kleiner als 0,5 % ist. Bei der Härtemessung spielt somit der subjektive Messfehler beim Ausmessen der Härteeindrücke eine größere Rolle als die angegebenen Toleranzen des Messgerätes. Der subjektive Messfehler wird durch 3fach-Messungen minimiert.



**Bild 5-5: 100 kN Wolpert-Universalprüfmaschine (links) und Zwick-Härteprüfmaschine (rechts)**

Bei der Erfassung der geometrischen Eigenschaften der Ausgangsrohre liegt der Schwerpunkt auf der Wanddicke sowie ihrer Verteilung über dem Rohrumfang. Die Messung erfolgt mit einer Bügelmessschraube (Genauigkeit  $\pm 0,01$  mm).

### *Prozessbedingungen*

Zur Steuerung und Regelung des Umform- bzw. Schneidprozesses ist es notwendig, verfahrensbezogenen Drücke und Wege zu bestimmen. Für die Messung der Drücke

(Axialzylinder, Radialzylinder, Innendruck) kommen Druckmessumformer vom Typ P6 der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik (Genauigkeitsklasse 0,2 bei 2000 bar Maximaldruck) zum Einsatz. Die Bestimmung der Zylinderkräfte erfolgt indirekt aus den jeweiligen Drücken. Die Wege der Werkzeugaktivelemente werden direkt aus der Bewegung der zugehörigen Axial- bzw. Radialkolben über induktive Wegaufnehmer vom Typ SM407 der Fa. Schreiber Messtechnik (Messlänge 100 mm, Genauigkeit <0,5%) erfasst.

Bezüglich der tribologischen Bedingungen erfolgt keine messtechnische Erfassung des Zustandes. Eine Charakterisierung des Schmiermittels und seiner Anwendung wird in Abschnitt 5.5 vorgenommen.

### *Endteileigenschaften*

Für die nachträgliche Bewertung des Umform- bzw. Schneidprozesses sowie die qualifizierte Einschätzung des Gebrauchswertes eines Bauteiles ist es notwendig, an den hergestellten Endteilen die geometrischen und stofflichen Eigenschaften zu erfassen. Die Beurteilung der Werkstückgeometrie erfolgt zunächst makroskopisch, wobei der Verlauf der Werkstofftrennung entlang der Schnittlinie über dem Umfang bewertet wird. Für detaillierte Aussagen zum Einzug sowie zur Grathöhe wird die geometrische Ausprägung der Schnittkante mit einer 3-D-Koordinatenmessmaschine (CNC-Koordinatenmessmaschine PMM 866, Fa. Tesa-Leitz) aufgenommen.

Speziell beim Untersuchungsschwerpunkt „Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden“ kommen neben der automatisierten 3-D-Koordinatenmessung auch manuelle Längenmessungen mittels Messschieber (Genauigkeit  $\pm 0,1$  mm) bzw. Wanddickenvermessungen mittels Bügelmessschraube (Genauigkeit  $\pm 0,01$  mm) zur Anwendung. Für die Prozessbeschreibung und –bewertung wird die Härte entlang zweckmäßiger Verläufe durch das Endteil gemessen und in Abhängigkeit vom Messort dokumentiert. Für die Messgenauigkeit gelten die gleichen Angaben wie bei der Bewertung der Ausgangsteileigenschaften.

Zur Analyse der Schneidbedingungen beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden werden aus dem Umformvorgang resultierende Formänderungen erfasst. Dazu wird ein auf die Oberfläche der Ausgangsrohre elektrochemisch aufgebracht Messraster nach dem Umformvorgang vermessen. Aus der Deformation des Messrasters lassen sich die Formänderungen in der Blechebene bestimmen und für jeden Messort am Bauteil angeben. Die Formänderungsanalyse wird mit dem AutoGrid<sup>®</sup> System der Fa. ViALUX GmbH durchgeführt (Genauigkeit  $\Delta\varepsilon = 1,0$  %).

In Tabelle 5-2 sind die zur Beschreibung des Anfangs- und Endzustandes bzw. der Prozessbedingungen zu erfassenden Messgrößen sowie die Messverfahren in einer Übersicht zusammengestellt.



Tabelle 5-2: Übersicht zu den Messgrößen und Messverfahren

	Messgrößen	Messverfahren
<b>Ausgangsteileigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Streckgrenze <math>R_{p0,2}</math></li> <li>• Zugfestigkeit <math>R_m</math></li> <li>• Gleichmaßdehnung <math>A_{gl}</math></li> <li>• Gleichmaßdehnung <math>A_{50}</math></li> <li>• Anisotropiewert <math>r</math></li> <li>• Verfestigungsexponent <math>n</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zugversuch in Anlehnung an EN 10002 in Längs- und Querrichtung</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Härte HV 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Härtmessung nach Vickers</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rohrwanddicke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manuelle Längenmessung</li> </ul>
<b>Prozessbedingungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Innendruck <math>p_i</math></li> <li>• Axialkraft <math>F_{ax}</math> links/rechts</li> <li>• Radialkraft <math>F_{rad}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Druckmessumformer (Kräftemessung indirekt über Arbeitsdruck der Zylinder)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radialweg <math>x_{rad}</math></li> <li>• Axialweg <math>x_{ax}</math> links/rechts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Induktive Wegmessung</li> </ul>
<b>Endteileigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnittkantengeometrie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatisierte 3D-Koordinatenmessung</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wanddickenverlauf und Formelementhöhen im Nebenelement (NFE)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manuelle Längenmessung</li> <li>• Automatisierte 3D-Koordinatenmessung</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radien im NFE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manuelle Radienvermessung</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Härte HV2 im NFE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Härtmessung nach Vickers</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formänderungen im NFE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automat. Formänderungsanalyse</li> </ul>

### 5.4 Versuchsrohre

#### 5.4.1 Mechanische Kennwerte und Fließkurven

In Anlehnung an DIN EN 10002 /63/ werden die mechanischen Kennwerte und Fließkurven in Zugversuchen an nichtproportionalen Flachzugproben mit einer Ausgangsmesslänge von 50 mm und einer Probenbreite von 12,5 mm durchgeführt. Die Proben werden den Rohren wie in Bild 5-6 dargestellt entnommen. Die Querproben werden vor der Prüfung gerichtet, die Längszugproben werden mit Krümmung geprüft. Es liegen, bezogen auf die o.g. Norm, modifizierte Zugproben vor.

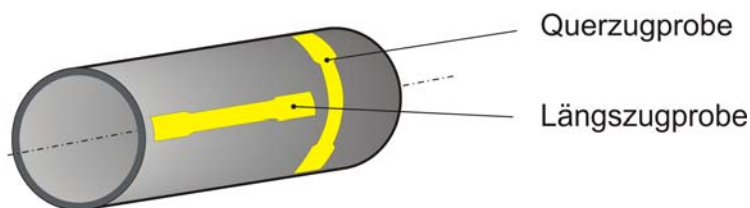


Bild 5-6: Probenlagen am Rohr

In Tabelle 5-3 sind die Festigkeitskennwerte Streckgrenze  $R_{p0,2}$  und Zugfestigkeit  $R_m$ , die Dehnungskennwerte Gleichmaßdehnung  $A_{gl}$  und Bruchdehnung  $A_{50}$  sowie der r- und n-Wert jeweils für die Längs- und Querzugproben der Versuchsmaterialien angegeben.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Zugversuche

Versuchsmaterial; Wandstärke	Proben- lage	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_{gl}$ [%]	$A_{50}$ [%]	r [-]	n [-]
S235G2T; 1,0 mm	längs	310	449	18,6	31,4	0,96	0,19
	quer	284	449	17,7	28,2	1,05	0,18
S235G2T; 1,5 mm	längs	453	470	0,9	12,8	-	-
	quer	459	511	0,9	6,5	-	-
S235G2T; 2,0 mm	längs	330	434	18,5	33,5	1,03	0,18
	quer	292	433	16,6	28,2	0,91	0,17
X5CrNi18-10; 1,0 mm	längs	332	681	46,2	51,9	0,78	0,36
	quer	312	645	51,4	55,7	0,73	0,34
X5CrNi18-10; 1,5 mm	längs	325	659	44,7	51,7	0,79	0,36
	quer	305	627	47,4	53,1	0,63	0,34
DC04; 1,0 mm	längs	246	338	23,5	45,1	1,32	0,19
	quer	241	336	24,3	43,8	1,35	0,21
ZStE340; 1,0 mm	längs	356	457	16,9	30,7	0,92	0,15
	quer	348	463	16,7	28,9	1,12	0,15
AlMg0,7Si; 1,3 mm	längs	107	191	14,2	21,9	0,64	0,23
	quer	118	191	16,8	22,2	1,69	0,22
AlMg0,7Si; 2,0 mm	längs	107	188	16,2	21,2	0,62	0,23
	quer	124	188	14,6	20,5	1,82	0,20
AlMgSi0,5; 2,2 mm	längs	80	158	17,2	25,8	0,56	0,25
	quer	99	157	20,6	28,1	2,12	0,20
AlSi1MgMn; 2,2 mm	längs	201	323	20,0	22,8	0,34	0,24
	quer	217	313	10,9	>12	0,66	0,18
AlMg3Mn; 3,0 mm	längs	101	242	17,2	21,4	1,39	0,26
	quer	147	239	15,0	18,3	0,84	0,19
AlMg3,5Mn; 3,0 mm	längs	129	270	15,1	19,1	1,11	0,24
	quer	168	265	13,4	17,8	0,59	0,18
AlMg4,5Mn0,7; 3,0 mm	längs	132	291	16,3	21,1	0,71	0,27
	quer	172	288	15,9	19,0	0,61	0,21

Die charakteristischen Werkstoffgruppen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht werden, können anschaulich in einem Bruchdehnungs-Zugfestigkeits-Diagramm verdeutlicht werden. Die Aluminiumlegierungen besitzen vergleichsweise geringe Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen. Sowohl höhere Zugfestigkeiten als auch höhere Bruchdehnungen weisen die härtesten Baustähle auf. Der Tiefziehstahl DC04 zeichnet sich durch eine sehr hohe Bruchdehnung aus. Typisch für den Edelstahl X5CrNi18-10 sind die sehr hohen Zugfestigkeiten bei gleichzeitig sehr hohen Bruchdehnungen. Die Rohrsorte S235G2T; 1,5 mm bildet, wie auch die

Darstellungen der Fließkurven zeigen, eine Ausnahme und ist als Fehlcharge einzustufen. Trotzdem verbleibt diese Rohrsorte im Versuchsprogramm.

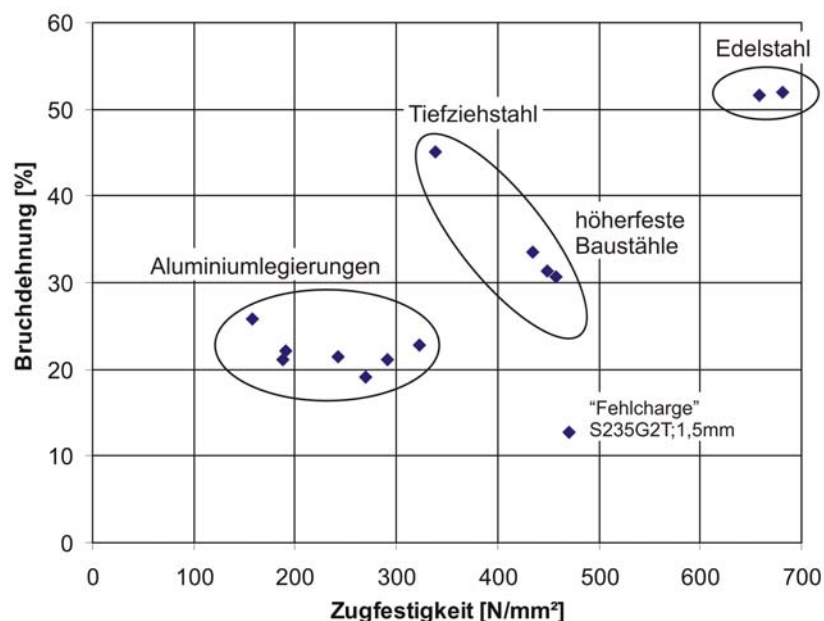


Bild 5-7: Bruchdehnungs-Zugfestigkeits-Schaubild der Versuchswerkstoffe

Die Fließkurven der Versuchsmaterialien sind in Bild 5-8 und Bild 5-9 dargestellt (Probenlage „längs“). In Bild 5-8 wird dabei vor allem das untypische Verformungsverhalten des S235G2T in der Wanddicke 1,5 mm deutlich. In Analogie zu den ermittelten Kennwerten ist die Anfangsfließspannung sehr hoch, eine weitere Verfestigung des Materials tritt kaum auf. Schon bei geringen Umformgraden ist das Umformvermögen des Materials erschöpft. Offenbar wurde bei diesen Rohren die Glühbehandlung nach dem Walzprofilieren nicht korrekt durchgeführt. Typische Fließkurven für diesen Werkstoff bei korrekter Wärmebehandlung zeigen die Kurven 1 und 3 in Bild 5-8. Die Fließkurven für den Edelstahl X5CrNi18-10 sind durch einen steileren Anstieg, d.h. ein höhere Verfestigung des Materials sowie hohe erreichbare Umformgrade gekennzeichnet. Die geringsten Fließspannungen weist der Tiefziehstahl DC04 auf.

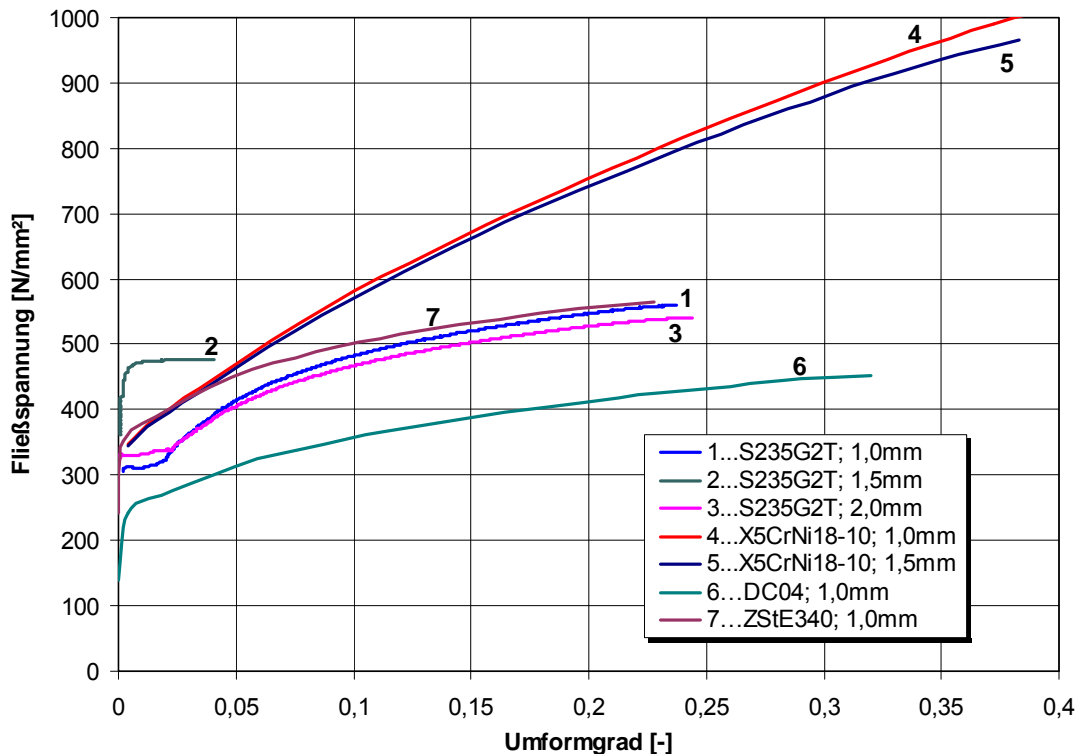


Bild 5-8: Fließkurven der Versuchswerkstoffe, längs zur Rohrlängsachse (Teil I: Stahlwerkstoffe)

Die in Bild 5-9 zusammengestellten Fließkurven der Aluminiumwerkstoffe verdeutlichen die für alle Legierungen etwa gleich ausgeprägte Verfestigung. Lediglich bei kleinen Umformgraden weisen die Werkstoffe der längsnahtgeschweißten Rohre eine etwas stärkere Verfestigung auf (Kurven 5 – 7). Die Fließkurven dieser nichtaushärtbaren Aluminiumlegierungen sind zudem durch einen unstetigen Verlauf gekennzeichnet, was auf die Bildung von Fließfiguren des Typs B zurückzuführen ist.

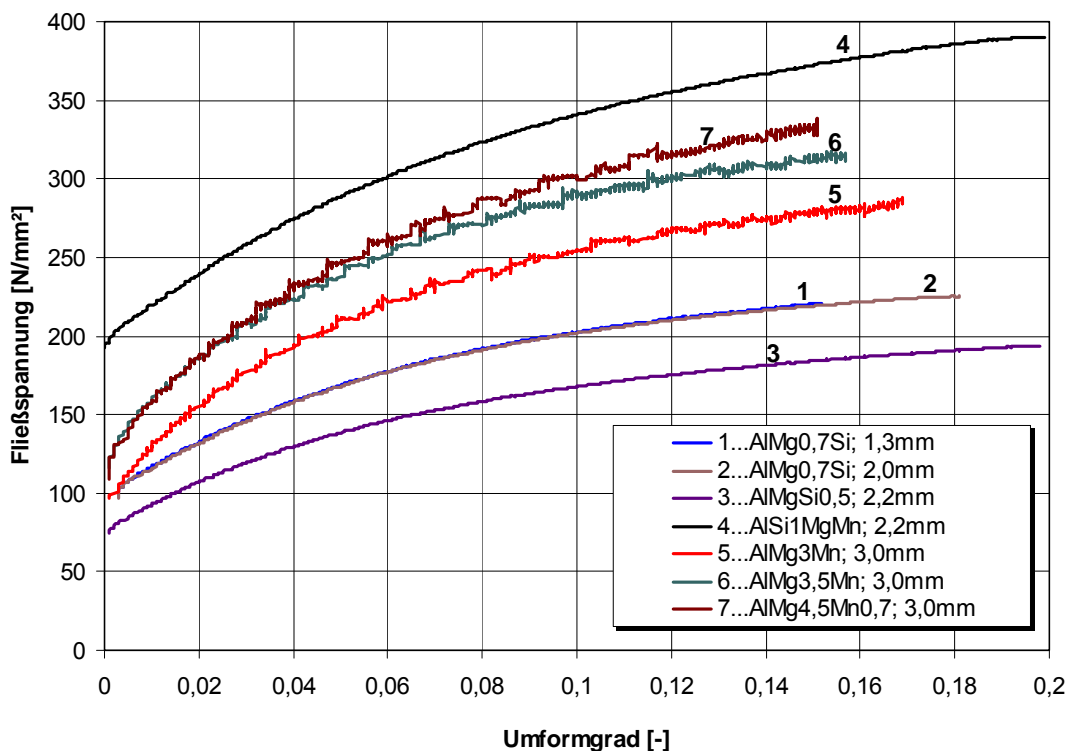


Bild 5-9: Fließkurven der Versuchswerkstoffe, längs zur Rohrlängsachse (Teil II: Aluminiumwerkstoffe)

### 5.4.2 Härte

Zur Bewertung der Homogenität der stofflichen Eigenschaften über dem Rohrumfang erfolgt an allen Versuchsrohren im Ausgangszustand die Ermittlung der Härte nach Vickers. Die Härte wird dabei im Kleinlasthärtebereich mit einem Prüfgewicht von 2 kg jeweils auf der Querschnittsfläche der Rohre bestimmt. Um die Härteverteilung darzustellen, wird an mindestens 20, über dem Rohrumfang gleichmäßig verteilten Punkten gemessen (vgl. Bild 5-10).

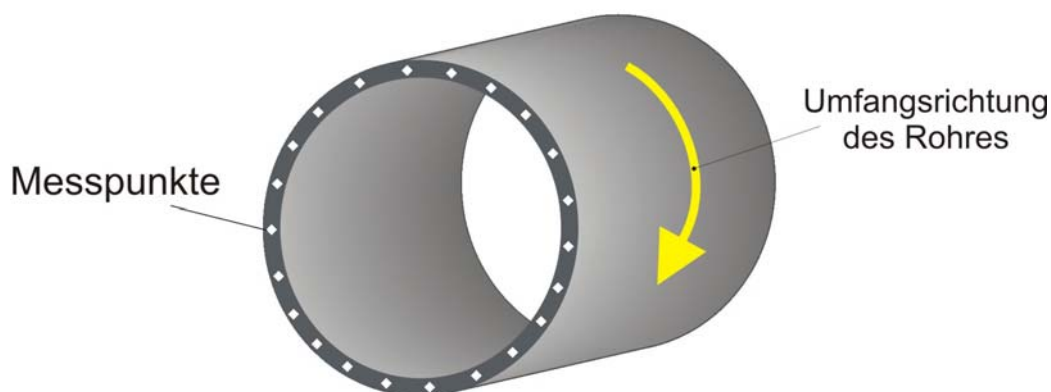


Bild 5-10: Lage der Messpunkte für die Härtemessungen

In Tabelle 5-4 sind die Ergebnisse der Härtemessungen an den Ausgangsrohren zusammengefasst.

Tabelle 5-4: Ausgangshärten der Versuchsmaterialien

Versuchsmaterial, Blechdicke		HV 2 [-]	Standard- abweichung
S235G2T	1,0 mm	139	13,7
S235G2T	1,5 mm	170	5,0
S235G2T	2,0 mm	132	3,0
X5CrNi18-10	1,0 mm	176	3,7
X5CrNi18-10	1,5 mm	173	6,3
DC04	1,0 mm	107	4,4
ZStE340	1,0 mm	143	3,7
AlMg0,7Si	1,3 mm	60	2,2
AlMg0,7Si	2,0 mm	60	1,6
AlMgSi0,5	2,2 mm	49	1,6
AlSi1MgMn	2,2 mm	87	1,5
AlMg3Mn	3,0 mm	65	1,1
AlMg3,5Mn	3,0 mm	71	0,7
AlMg4,5Mn0,7	3,0 mm	76	0,9

Die Härten der Versuchswerkstoffe entsprechen den für die jeweiligen Werkstoffgruppen typischen Werten. Die Edelstahlrohre X5CrNi18-10 erreichen die höchsten Härtewerte. Allerdings weist der Baustahl S235G2T; 1,5 mm nahezu die Härte der Edelstähle auf und liegt damit deutlich über den anderen Ausgangsrohren dieses

Werkstoffes mit anderen Wanddicken. Die Ergebnisse der Härtemessungen bestätigen damit die mechanischen Kennwerte dieses Materials.

Im Hinblick auf das Innenhochdruckabschneiden haben neben der mittleren Härte vor allem der Härteverlauf bzw. die auftretenden Härteschwankungen entlang des Rohrumfanges besondere Bedeutung. In Tabelle 5-4 sind deshalb jeweils die Standardabweichungen der Messwerte angegeben. Sämtliche Aluminiumlegierungen sind durch eine geringe Schwankungsbreite der Härte gekennzeichnet. Die maximalen Härteunterschiede der Stahlrohre sind deutlich größer, den Maximalwert weist der S235G2T; 1,0 mm auf. Zur Veranschaulichung dieser Ergebnisse sind in Bild 5-11 die Härteverläufe sämtlicher Werkstoffe dargestellt, mit Ausnahme der längsnahtgeschweißten und nicht thermisch nachbehandelten Rohrsorten DC04; 1,0 mm und ZStE340; 1,0 mm. Deren Härteverteilungen werden bei der Behandlung des Innenhochdruck-Einfachabschneidens von geschweißten Rohren im Abschnitt 6.7 gesondert dargestellt.

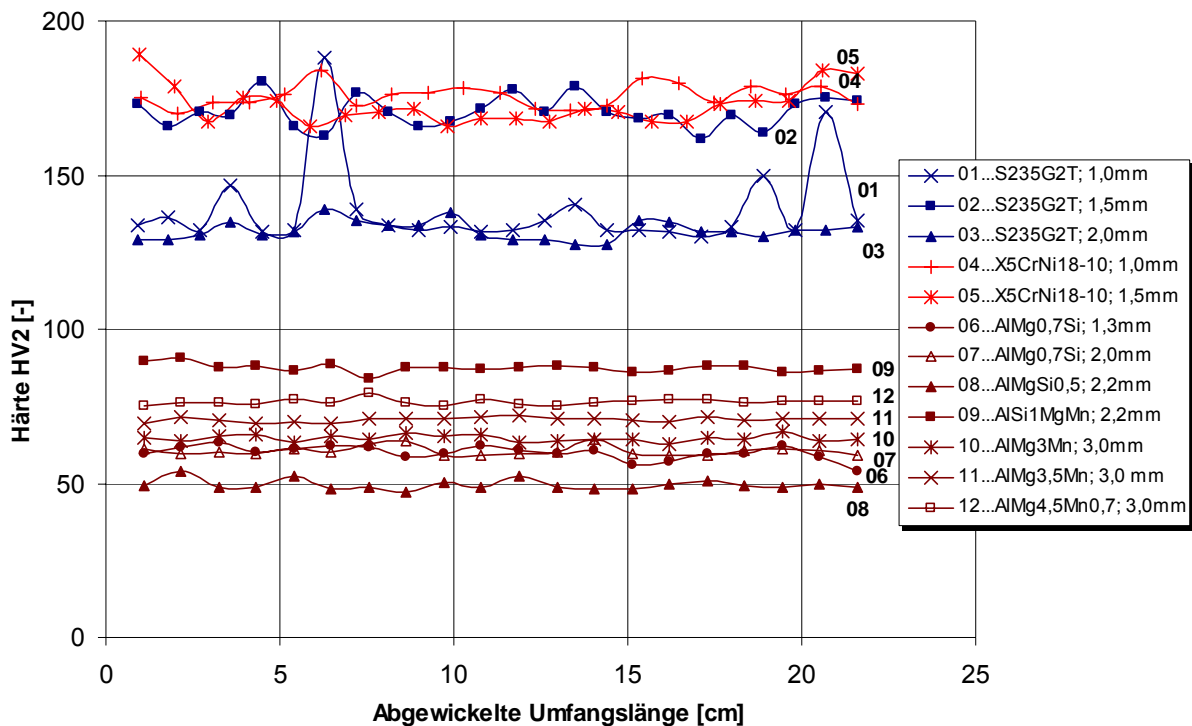


Bild 5-11: Härteverläufe, ermittelt über dem Rohrumfang (abgewickelt)

### 5.4.3 Wanddicke

Da bei der Rohrherstellung Abweichungen von der nominalen Wanddicke zulässig sind, ist es notwendig, als wichtigen geometrischen Einflussfaktor die Wanddicke der Ausgangsrohre zu erfassen. Dabei konnten in Längsrichtung der Rohre keine nennenswerten Wanddickenschwankungen ermittelt werden. Dagegen treten in Umfangsrichtung je nach Rohrsorte signifikant unterschiedliche Wanddicken auf. Die Wanddicken der Rohre in Umfangsrichtung werden systematisch jeweils an 8, um 45° zueinander versetzten Messpunkten bestimmt (Bild 5-12).

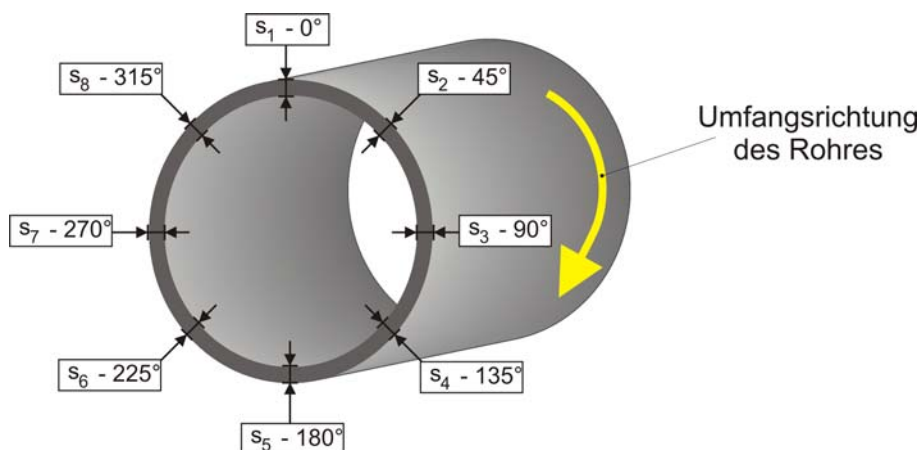


Bild 5-12: Lage der Messpunkte für die Wanddickenmessungen

Neben der Ermittlung der absoluten Wanddicke liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Bestimmung von Wanddickenschwankungen entlang des Rohrumfanges. Da die Schnittlinie beim Innenhochdruckabschneiden von Rohren komplett entlang des Rohrumfanges verläuft, werden Wanddickenschwankungen in dieser Richtung beim Trennvorgang voll wirksam. Bild 5-13 zeigt eine Übersicht der ermittelten, prozentualen Wanddickendifferenzen. Die absoluten Wanddickendifferenzen wurden dafür auf den jeweils kleinsten gemessenen Wert der Wanddicke bezogen. Mit etwa 9% waren die prozentualen Wanddickendifferenzen beim AlMg0,7Si; 2,0 mm verhältnismäßig hoch, während sämtliche andere Aluminiumrohre deutlich geringere Werte aufwiesen. Die geringsten Schwankungen traten bei den längsnahtgeschweißten und nachgezogenen Aluminiumrohren auf (etwa 1%). Die Stahlrohre lagen mit 2 bis 5 % dazwischen, wobei die Edelstahlrohre eine homogenere Wanddickenverteilung aufwiesen als die Rohre aus S235G2T.

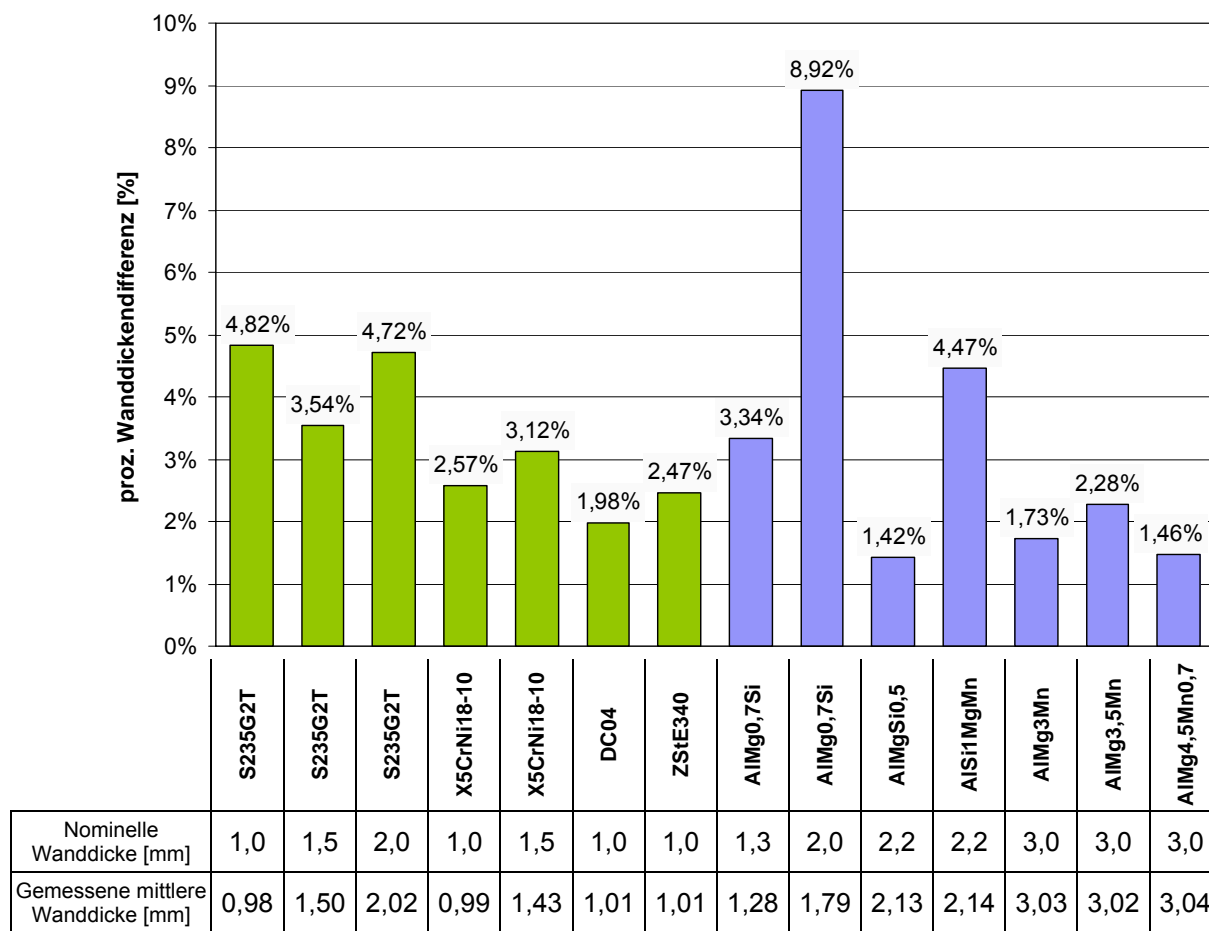


Bild 5-13: Prozentuale Wanddickendifferenzen in Rohrfangsrichtung

### 5.5 Schmierstoff

Für alle Versuche zum Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden wird ein handelsübliches Schmiermittel auf Wachsbasis der Firma Rhenus Lub GmbH & Co KG verwendet. Das Schmiermittel wird vor jedem Versuch mit einem Pinsel auf die gesamte Rohraußenseite aufgetragen. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten technischen Daten des verwendeten Schmiermittels aufgeführt. Für die Versuche zum Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren kommt kein Schmiermittel zur Anwendung.

Tabelle 5-5: Technische Daten des verwendeten Schmiermittels

Farbe	Dichte 20°C [g/cm³]	pH-Wert 20°C [-]	Trockenzeit 20°C [min]	Festschmierstoffe
weißlich	1,0	8,6	20 - 30	Synthetische Polymere



## 6 Untersuchungsergebnisse zum Innenhochdruckabschneiden unverformter Rohre – Innenhochdruck-Einfachabschneiden (IH-EAS)

### 6.1 Einfluss der Werkzeuggestaltung auf den Ablauf des Schneidvorganges

#### 6.1.1 Definition der geometrischen Werkzeugparameter

In den theoretischen Betrachtungen konnte gezeigt werden, dass die geometrische Gestaltung der Schneidnut einen wesentlichen Einfluss auf den Schneidvorgang beim Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring hat. Dementsprechend besteht die Notwendigkeit, das Werkzeug vor allem hinsichtlich der Geometrie des Werkzeugaktivelementes – der Schneidnut – auszulegen. Die Schneidnut lässt sich durch folgende Parameter beschreiben (Bild 6-1):

- Schneidnutbreite  $b_N$ ,
- Schneidnuttiefe  $t_N$ ,
- Radius der Biegekante  $r_B$ ,
- Radius der Schneidkante  $r_S$ .

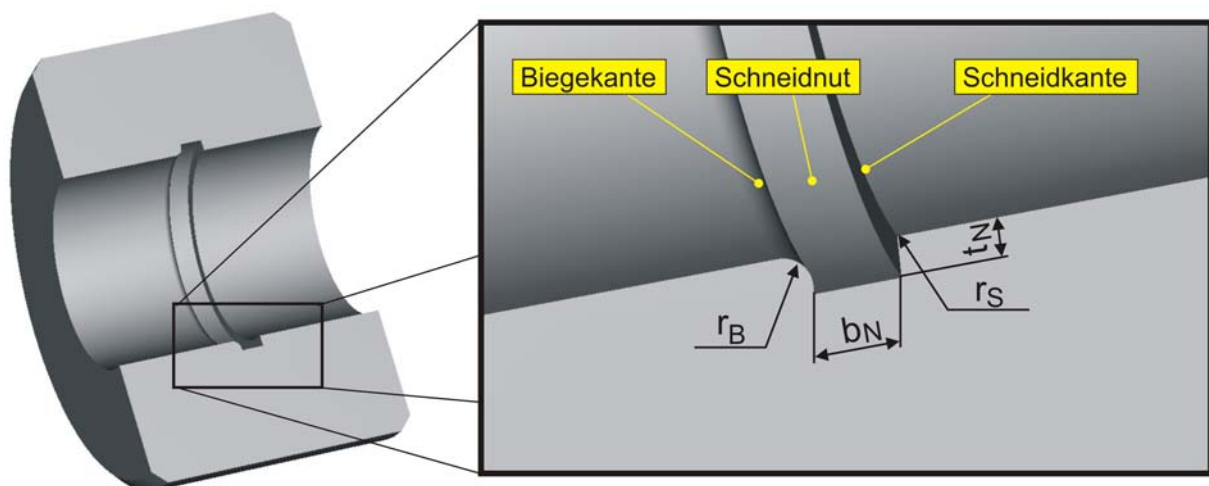


Bild 6-1: Geometrische Kenngrößen am Werkzeug für das Innenhochdruck-Einfachabschneiden

Sonstige Werkzeugparameter, wie beispielsweise Außenabmessungen, werden nach den einschlägigen technischen Regeln und den Erfahrungen für IHU-Werkzeuge festgelegt und sollen, da sie für den Schneidvorgang ohne Bedeutung sind, an dieser Stelle nicht betrachtet werden.

#### 6.1.2 Einfluss der Schneidnuttiefe auf den Ablauf des Schneidvorganges

Für die Untersuchungen zum Einfluss der Schneidnuttiefe auf den Schneidvorgang wird ein Versuchswerkzeug mit einer konstanten Schneidnutbreite von  $b_N = 5,0$  mm verwendet. Aus der Palette der Versuchsrohre werden folgende Rohre genutzt:

- S235G2T; 1,0 mm und 1,5 mm,
- AlMg0,7Si; 1,3 mm,
- AlMgSi0,5; 2,2 mm.

Die systematische Variation der Schneidnuttiefe erfolgt im Verhältnis zur konstanten Schneidnutbreite in den in Tabelle 6-1 angegebenen Stufen. Der Quotient aus Schneidnuttiefe und Schneidnutbreite wird als Schneidnutverhältnis definiert.

Tabelle 6-1: Übersicht der untersuchten Schneidnutparameter

<b>Schneidnuttiefe <math>t_N</math> [mm]</b>	10	5	3	2,5	2	1,65	1,25
<b>Schneidnutbreite <math>b_N</math> [mm]</b>	5	5	5	5	5	5	5
<b>Schneidnutverhältnis <math>t_N / b_N</math></b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,33</b>	<b>0,25</b>

Generell gilt, dass die Schneidnuttiefe dann einen Einfluss auf den Schneidvorgang hat, wenn es zum Kontakt des Werkstückes mit dem Schneidnutgrund kommt. Dabei muss zwischen Kontakt in der Umformphase, d.h. vor der Werkstofftrennung, und Kontakt nach einsetzender Werkstofftrennung unterschieden werden. Bild 6-2 zeigt eine Übersicht der Schneidergebnisse in Abhängigkeit vom Schneidnutverhältnis für die untersuchten Rohrsorten. Dabei sind jeweils der Anteil an getrenntem Rohrumfang als maßgebliche Größe sowie zusätzlich der Schneidinnendruck angegeben.

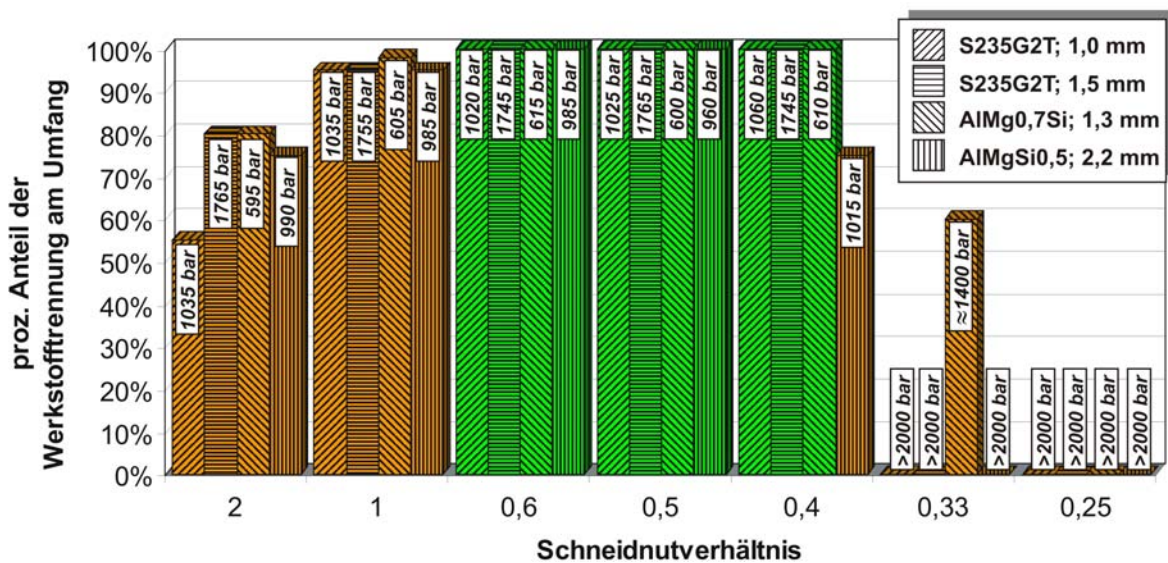


Bild 6-2: Übersicht der Schneidergebnisse in Abhängigkeit vom Schneidnutverhältnis

Bei einem Schneidnutverhältnis von 2 ist sowohl vor als auch nach der Werkstofftrennung ein Kontakt des Werkstückmaterials mit dem Schneidnutgrund ausgeschlossen. Unabhängig von der Rohrsorte sind alle Werkstofftrennungen unvollständig. Es werden maximal 80% des Rohrumfanges getrennt. Charakteristisch ist dabei das Aufstellen des Materials in der Schneidnut senkrecht zur Rohrlängsachse (Bild 6-3). Das Aufstellen des Materials in der Schneidnut unmittelbar nach der Werkstofftrennung führt dazu, dass in die noch zu schneidenden Bereiche zusätzliche tangentielle Zugspannungskomponenten eingebracht werden. Die Zugspannungen werden dadurch hervorgerufen, dass das Material entlang der Schnittlinie nicht in seiner ursprünglichen räumlichen Lage ( $d_a = 70$  mm) verbleibt,

sondern sich in die Schneidnut hinein bewegt. Bei einer Schneidnutbreite von 5 mm bedeutet das eine Verschiebung zu einem Durchmesser von 80 mm und damit eine zusätzliche Dehnung des Materials von etwa 14 %.

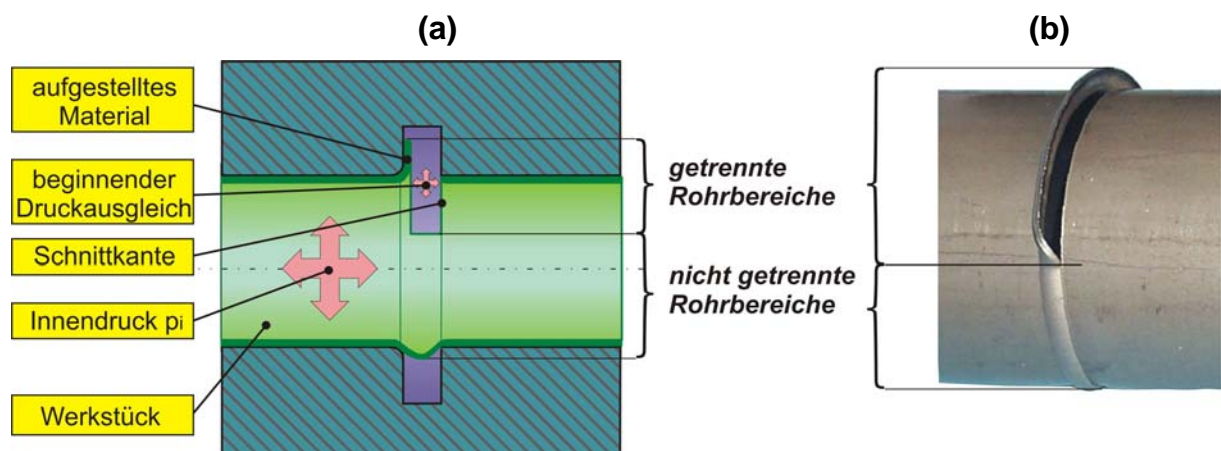


Bild 6-3: Unvollständiges IH-EAS bei einem Schneidnutverhältnis von 2: a) schematisch; b) Realteil

Bei einem Schneidnutverhältnis von 1 ist die Schneidnuttiefe so groß, dass das sich nach der Werkstofftrennung aufstellende Material gerade den Schneidnutgrund berührt. Diese geringe Abstützwirkung reicht aus, den Anteil an getrenntem Rohrumfang auf 95 bis 98 % zu erhöhen. Vollständige Werkstofftrennungen werden jedoch nicht erreicht. Eine weitere Verringerung der Schneidnuttiefe verbessert die Effektivität der Materialabstützung nach einsetzender Werkstofftrennung und führt zu vollständig getrennten Werkstücken. Unabhängig vom Schneidergebnis sind die Schneidinnendrucke bei Schneidnutverhältnissen von 2 bis zu 0,4 für eine Rohrsorte etwa konstant. Das heißt, ein Kontakt des Werkstückes mit dem Schneidnutgrund vor der Werkstofftrennung kann ausgeschlossen werden, da dieser eine signifikante Erhöhung des Schneidinnendruckes nach sich ziehen würde. Bei weiterer Verringerung der Schneidnuttiefe werden in Abhängigkeit von der Rohrsorte verschiedene Effekte hervorgerufen. Der AlMgSi0,5; 2,2 mm kann unter den gegebenen Bedingungen bei einem Schneidnutverhältnis von 0,4, bei dem die Schneidnuttiefe etwa der Ausgangswanddicke entspricht, nur noch zu 75 % des Umfangs abgetrennt werden. Geringere Schneidnuttiefen sind für diese Rohrsorte nicht sinnvoll. Bei den dünnwandigeren Rohren führt die weitere Verringerung der Schneidnuttiefe dazu, dass schon vor dem Einsetzen der Werkstofftrennung eine Abstützung am Schneidnutgrund auftritt. Der daraus resultierende, starke Anstieg der Schneidinnendrucke lässt bei einer Innendruckkapazität der IH-Anlage von 2000 bar keine Werkstofftrennungen mehr zu, stattdessen werden Minisicken ausgeformt. Eine Ausnahme bildet der AlMg0,7Si; 1,3 mm. Bei dieser Rohrsorte kann bei einem Schneidnutverhältnis von 0,33 mit einem deutlich erhöhten Innendruck ( $\approx 1400$  bar gegenüber sonst  $\approx 600$  bar) eine Werkstofftrennung erreicht werden, die jedoch

unvollständig bleibt. Eine Absenkung des Schneidnutverhältnisses auf 0,25 führt jedoch auch bei dieser Rohrsorte zur Ausbildung von Minisicken.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Schneidnuttiefe so gewählt werden muss, dass sich das Material nach dem Einsetzen der Werkstofftrennung im Schneidnutgrund abstützen kann. Für die gegebenen Bedingungen liegen effektive Abstützwirkungen für Schneidnutverhältnisse im Bereich von 0,4 bis 0,6 vor.

Bei größeren Schneidnuttiefen und damit größeren Schneidnutverhältnissen tritt der Versagensfall „Unvollständige Werkstofftrennung“ auf, der durch das ungehinderte Aufstellen von Material hervorgerufen wird. Die Ausprägung der tangentialen Zugspannungen hat dabei den entscheidenden Einfluss. Die Werkstofftrennung setzt bei Erreichen eines kritischen Spannungszustandes, repräsentiert durch die Vergleichsspannung in der Schnittzone  $\sigma_{VSZ}$ , an einer beliebigen Stelle entlang des Rohrumfanges unmittelbar an der Schneidkante ein. Die Spannungskonzentration vor der entstandenen Rissspitze und der hohe Grad an Vorschädigung des Materials im Schneidkantenbereich führen dazu, dass die Werkstofftrennung zunächst weiter entlang der Schneidkante verläuft, da hier  $\sigma_{VSZ}$  die Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$  erreicht und somit die Trennbedingung erfüllt (siehe Abschnitt 2.4.1). Für einen beliebigen Zeitpunkt  $t_1$  bedeutet das:

$$\sigma_{VSZ}(t_1) = \tau_{BR} \quad (9)$$

Mit zunehmender Länge der Werkstofftrennung und dem dargestellten Aufstellen des Materials in der Schneidnut, wird in den umgeformten Materialbereichen, die sich innerhalb der Schneidnut befinden (Einformzone), ein durch steigende tangential Zugspannungsanteile gekennzeichneter Spannungszustand aufgebaut. Dominiert durch diese tangentialen Zugspannungen erfüllt der Spannungszustand  $\sigma_{VEZ}$  in der Einformzone die Trennbedingung, während der Spannungszustand  $\sigma_{VSZ}$  in der Schnittzone an der Schneidkante noch unterhalb der Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$  liegt. Zum Zeitpunkt  $t_2$  gilt somit:

$$\sigma_{VEZ}(t_2) = \tau_{BR} > \sigma_{VSZ}(t_2) \quad (10)$$

und es kommt zu einer Werkstofftrennung außerhalb des Schneidkantenbereiches, die aufgrund der tangentialen Wirkrichtung der Zugspannungen stets unter einem Winkel  $\gamma > 0^\circ$  zur Schneidkante erfolgt. Die Schnittlinie verläuft nicht mehr an der Schneidkante, sondern in dem in die Schneidnut geformten Material (Bild 6-4).

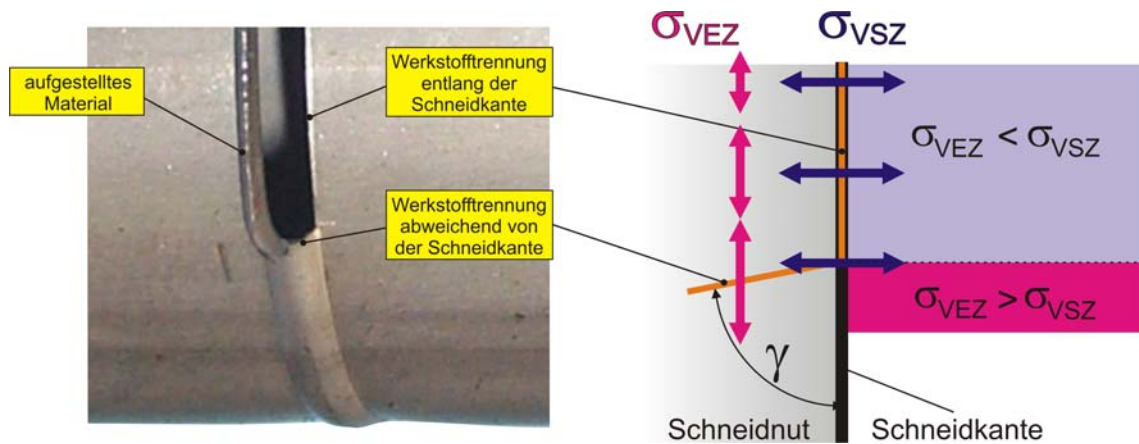


Bild 6-4: Schnittlinienverlauf und Spannungsverhältnisse beim IH-EAS mit großer Schneidnuttiefe

In den noch nicht getrennten Werkstückbereichen an der Schneidkante fehlt nunmehr die Spannungskonzentration vor der Rissspitze. Hinzu kommt eine Reduzierung der Spannungen, da durch die bereits getrennten Werkstückbereiche Innendruckmedium austreten kann. Das bedeutet, dass die Trennbedingung, noch bevor die Werkstofftrennung komplett über dem Umfang erfolgt ist, an keiner Stelle des Werkstücks mehr erfüllt wird. Das Rohr wird nicht vollständig getrennt.

Auch zu kleinen Schneidnutstiefen hin ist der Arbeitsbereich des Innenhochdruck-Einfachabschneidens begrenzt. Dies ist dann der Fall, wenn sich das Material bereits vor der Werkstofftrennung im Schneidnutgrund abstützen kann. Dadurch wird die Breite der freien Materialbereiche auf die der Innendruck wirkt, drastisch reduziert. Um unter diesen Bedingungen eine weitere Ausformung von Material in die noch freien Bereiche der Schneidnut zu erreichen, ist aufgrund des verkürzten „Biegebalkens“ ein deutlich höherer Innendruck notwendig. Durch die Abstützung des Materials im Schneidnutgrund verringern sich die Zugspannungsanteile am Spannungszustand in der Schnittzone. Die Schubbruchgrenze  $\tau_{BR}$  kann nur noch durch eine Erhöhung der radialen Druckspannungen erreicht werden. Im Mohrschen Spannungsdiagramm wird der Schneidvorgang in den Druckbereich und damit die Schubbruchgrenze zu höheren Werten verschoben. Setzt die Werkstofftrennung unter diesen Bedingungen ein, so erfolgt sie wegen der Abstützung im Schneidnutgrund unter reduzierten Zugspannungsanteilen. Die Folge sind über dem Umfang unvollständige Werkstofftrennungen.

Weitere Gründe, die bei geringer Schneidnuttiefe die Werkstofftrennung verhindern, sind das Überschreiten der Innendruckkapazität der IHU-Anlage aufgrund der stark angestiegenen Schneidinnendrucke, das vollständige Ausfüllen des Schneidnutraumes mit Material sowie das Unterschreiten der Ausgangswanddicke durch die Schneidnuttiefe. In allen diesen Fällen wird keine Werkstofftrennung erreicht.

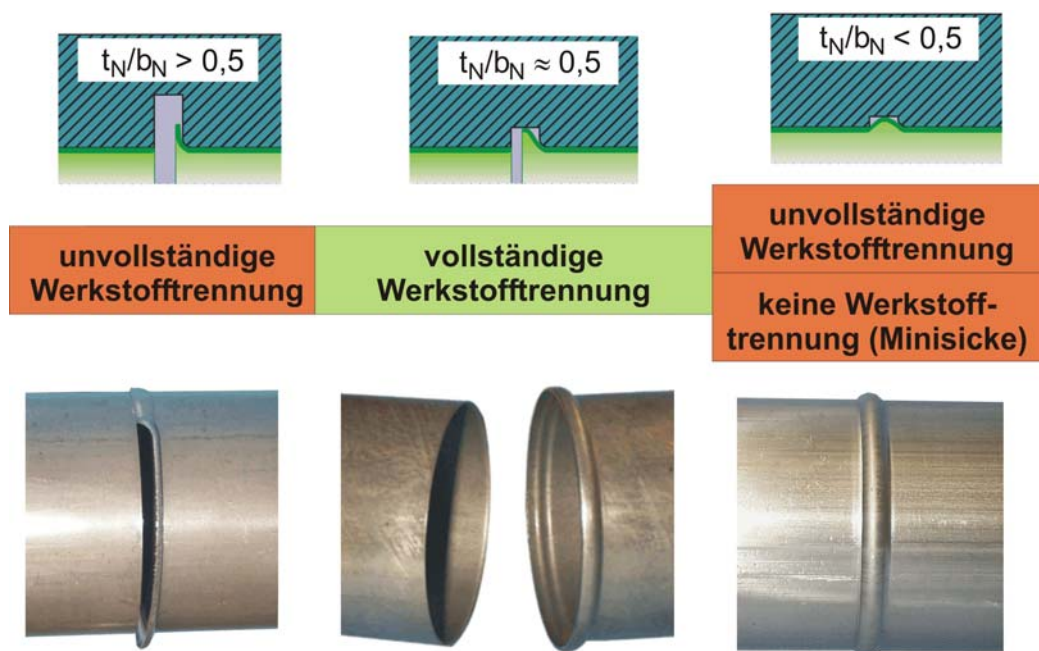


Bild 6-5: Zusammenfassende Übersicht zum Einfluss der Schneidnuttiefe

Abschließend ist der Einfluss der Schneidnuttiefe in Bild 6-5 nochmals schematisch mit den jeweils zugehörigen Werkstücken zusammengefasst. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass diese Untersuchungen der Bestimmung der Machbarkeit des Innenhochdruckabschneidens für die konkreten Versuchsrohre dienen und ihnen eine konstante Schneidnutbreite von  $b_N = 5 \text{ mm}$  sowie ein Biegekanteradius von  $r_B = 2,5 \text{ mm}$  zugrunde liegen.

### 6.1.3 Einfluss der Schneidnutbreite auf den Ablauf des Schneidvorganges

Die Untersuchungen zum Einfluss der Schneidnutbreite zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Ausformung des Materials im Schneidnutbereich und insbesondere des erforderlichen Schneidinnendruckes von der Schneidnutbreite. Grundsätzlich gilt, dass der Schneidinnendruck mit zunehmender Schneidnutbreite abnimmt und umgekehrt bei kleinen Schneidnutbreiten stark ansteigt. Im Rahmen der Untersuchungen konnte jedoch kein Einfluss der Schneidnutbreite auf die grundsätzliche Machbarkeit des Trennvorganges nachgewiesen werden. Extrem kleine bzw. große Schneidnutbreiten wurden dabei jedoch nicht untersucht, um diesbezüglich Verfahrensgrenzen herauszuarbeiten. Speziell bei extrem kleinen Schneidnutbreiten ergeben sich die Verfahrensgrenzen vielmehr aus der Anlagenkapazität hinsichtlich des Innendruckes als aus dem Verfahren selbst. Im Hinblick auf die Zielstellung der Arbeit ist aus diesem Grund für die Werkzeugauslegung hinsichtlich der Schneidnutbreite der Nachweis der Machbarkeit des Innenhochdruckabschneidens von Rohren mit vollständiger Werkstofftrennung als hinreichendes Kriterium heranzuziehen. Für die Schneidnutbreiten von  $b_N = 5,0 \text{ mm}$  und  $b_N = 8,0 \text{ mm}$  kann dieser Nachweis erbracht werden, so dass diese ausgewählten Schneidnutbreiten in das

Untersuchungsprogramm aufgenommen werden. Weitere Erkenntnisse zum Einfluss der Schneidnutbreite auf den Schneidvorgang und die Schnittteileigenschaften werden anhand der beiden ausgewählten Schneidnutbreiten in den nachfolgenden Abschnitten herausgearbeitet.

#### **6.1.4 Zusammenfassung und Festlegung der Geometrie des Versuchswerkzeuges**

Die Untersuchungen zum Einfluss der geometrischen Auslegung der Schneidnut auf den Schneidvorgang zeigen, dass die Schneidnuttiefe einen grundsätzlichen Einfluss auf die Machbarkeit hat, während sich die Schneidnutbreite vor allem auf die Höhe des Schneidinnendruckes auswirkt. Folgende Erkenntnisse lassen sich zusammenfassend darstellen:

- Die Schneidnuttiefe so wählen, dass vor der Werkstofftrennung kein Kontakt zwischen dem Werkstück und dem Schneidnutgrund auftritt.
  - dominierende Schubspannungen, ausgeprägte axiale Zugspannungen.
- Ein Kontakt zwischen dem Werkstück und dem Schneidnutgrund vor der Werkstofftrennung beeinflusst den Spannungszustand in der Schnittzone deutlich.
  - dominierende Schubspannungen, geringe axiale Zugspannungen,
  - markanter Anstieg des Schneidinnendruckes,
  - unvollständige Werkstofftrennungen über dem Umfang.
- Die Schneidnuttiefe so wählen, dass sich die getrennten Materialbereiche nach dem Einsetzen der Werkstofftrennung im Schneidnutgrund abstützen können.
  - Begrenzung der tangentialen Zugspannungen in der Einformzone,
  - Voraussetzung für vollständige Werkstofftrennung über dem Umfang.
- Die Ausgangswanddicke stellt das Minimum für die Schneidnuttiefe dar. Empfehlenswert ist, für  $t_N/b_N$  etwa 0,4 bis 0,6 einzuhalten.
- Die Schneidnutbreite ist nach dem Schneidinnendruck auszulegen, ohne dabei extrem kleine bzw. große Schneidnutbreiten zu verwenden.
- Der Einfluss der Schneidnutbreite auf die Schnittteilqualität ist zu berücksichtigen und wird in den folgenden Abschnitten noch detaillierter dargestellt.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Schneidnutgeometrie auf den Schneidvorgang dienen hauptsächlich der Auslegung des IH-EAS hinsichtlich der Machbarkeit sowie der technologischen Erarbeitung der Grundvorgänge beim Innenhochdruckabschneiden unter homogenen Schneidbedingungen als Voraussetzung für die Anwendung beim Innenhochdruckabschneiden unter inhomogenen Schneidbedingungen (vgl. Zielstellung, Abschnitt 3). Eine umfassendere Darstellung der Grundlagen zum Innenhochdruckabschneiden unter Berücksichtigung weiterer Einflussparameter (z.B.

Rohrdurchmesser) setzt weiterführende, systematische Untersuchungen voraus, die über die Zielstellung der vorliegenden Arbeit weit hinausgehen.

Auf der Basis der dargestellten Erkenntnisse zur geometrischen Schneidnutgestaltung ist es möglich, die geometrischen Parameter der Werkzeuge zum Innenhochdruck-Einfachabschneiden von unverformten Rohren festzulegen. Das Schneidnutverhältnis ist dabei so gewählt, dass einerseits vor der Werkstofftrennung kein Kontakt des Materials mit dem Schneidnutgrund auftritt und andererseits nach dem Einsetzen der Werkstofftrennung eine effektive Abstützung gesichert ist. Die auf die anlagenspezifischen Innendrucke und rohrspezifischen Vorgaben aufbauende Werkzeugauslegung ist in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Die Begriffe „IH-EAS 5“ und „IH-EAS 8“ beinhalten die gewählte Schneidnutbreite und kommen nachfolgend als feststehende Begriffe für das jeweilige Werkzeug zur Anwendung.

Tabelle 6-2: Geometrische Auslegung der Werkzeuge zum Innenhochdruck-Einfachabschneiden

<div style="text-align: center;">Werkzeug- bezeichnung</div> <div style="text-align: center;">Geometrische Werkzeugparameter</div>	IH-EAS 5	IH-EAS 8
	<b>Schneidnutbreite <math>b_N</math></b>	5,0 mm
<b>Schneidnuttiefe <math>t_N</math></b>	2,5 mm	4,0 mm
<b>Radius der Biegekante <math>r_B</math></b>	2,5 mm	3,0 mm
<b>Radius der Schneidkante <math>r_S</math></b>	$\approx 0$ mm	$\approx 0$ mm

Die Schneidkante der IH-EAS-Werkzeuge ist jeweils scharfkantig ausgeführt, aber nicht gesondert nachbehandelt. Der Radius der Schneidkante kann demnach mit  $r_S \approx 0$  mm angegeben werden. Der Radius der Biegekante beträgt beim IH-EAS 5  $r_B = 2,5$  mm und beim IH-EAS 8  $r_B = 3,0$  mm.

Neben der Geometrie der Werkzeugaktivelemente spielt auch der Werkzeugwerkstoff eine nicht unwesentliche Rolle bei der Auslegung der Werkzeuge. Beim mechanischen Schneiden mit Schneidstempel haben sich hochfeste Werkstoffe, wie hochlegierte Werkzeugstähle oder Hartmetalle, für die Werkzeugaktivelemente bewährt. Grundvoraussetzung beim Einsatz solcher Werkzeuge ist, dass überwiegend Druck- und nur äußerst geringe Zug- bzw. Biegebeanspruchungen auftreten. Bei entsprechender Führung der Werkzeuge kann das beim mechanischen Schneiden gewährleistet werden.



Beim Innenhochdruckabschneiden treten gegenüber dem mechanischen Schneiden andere Werkzeugbelastungen auf. Der Innendruck wirkt auf das gesamte Bauteil. Somit muss auch die Schneidkante als Werkzeugaktivelement die gesamte Innendruckbelastung aufnehmen. IHU-Werkzeuge werden in der Regel so ausgelegt, dass sie unter Innendruckbeanspruchung eine elastische Aufweitung (Zugbeanspruchung) ertragen können. Die Zugfestigkeiten der Werkzeugwerkstoffe sind dementsprechend geringer als bei den typischen klassischen Werkzeugwerkstoffen. Eine Verbesserung der Werkzeugeigenschaften wird über geeignete Beschichtungen erreicht. Für das Innenhochdruckabschneiden bedeutet das, dass die in das IHU-Werkzeug integrierte Schneidkante ebenfalls elastische Verformungen aufnehmen muss, ohne dass es zum Werkzeugbruch kommt. Für das Versuchswerkzeug wird deshalb der Werkstoff 40CrMnMoS8-6 (1.2312) verwendet, ein typischer Werkstoff für IHU-Werkzeuge. Die Werkzeugeinsätze mit den Werkzeugaktivelementen (siehe Tabelle 6-2) sind komplett auf eine Festigkeit von  $R_m = 1100 \text{ N/mm}^2$  gehärtet (35 HRC). Eine gesonderte Behandlung der Schneidkante erfolgt nicht. Die Versuchswerkzeuge kommen ohne eine zusätzliche Beschichtung zum Einsatz.

## 6.2 Schneidparameter

### 6.2.1 Schneidinnendrucke, Berechnung von Schneidinnendrucken

Wie im Abschnitt 4.4 dargestellt, kommt es durch die Wirkung des Innendruckes im Bereich der Schnittzone zur Ausbildung eines Spannungszustandes, der bei Erfüllung der Trennbedingung zur Werkstofftrennung, d.h. zum Schneiden, führt. Die quantitative Größe des Spannungszustandes hängt, bei gegebenen Werkstück- und Werkzeugparametern, unmittelbar vom wirkenden Innendruck ab. Tabelle 6-3 zeigt eine Übersicht der Schneidinnendrucke  $p_s$  für die untersuchten Rohrmaterialien bzw. Wanddicken.

Es wird deutlich, dass eine größere Schneidnutbreite zu kleineren Schneidinnendrucken führt. Dieser Zusammenhang gilt unter der Voraussetzung, dass vor der Werkstofftrennung keine Abstützung des Werkstückes in der Schneidnut auftritt. Die Schneidnutbreite  $b_N$  ist somit die wesentliche, werkzeugseitige Einflussgröße auf den Schneidinnendruck. Tabelle 6-3 zeigt ebenfalls, dass bei gleichen Werkstoffen die Schneidinnendrucke mit der Wanddicke der Ausgangsrohre  $s_0$  ansteigen. Neben dieser geometrischen Ausgangsteileigenschaft beeinflussen auch die stofflichen Eigenschaften der Schnittteile den Schneidinnendruck. Für das mechanische Schneiden wird im Schrifttum zumeist die Zugfestigkeit  $R_m$  als wesentliche stoffliche Einflussgröße angegeben [26]/[33]/[35]/[38].

Tabelle 6-3: Übersicht der Schneidinnendrucke beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden

Versuchsmaterial, Wanddicke		Schneidinnendruck $p_{is}$	
		IH-EAS 5	IH-EAS 8
S235G2T	1,0 mm	1045 bar	785 bar
S235G2T	1,5 mm	1650 bar	1040 bar
S235G2T	2,0 mm	> 2000 bar*	1590 bar
X5CrNi18-10	1,0 mm	> 2000 bar*	1395 bar
X5CrNi18-10	1,5 mm	> 2000 bar*	2000 bar
DC04	1,0 mm	> 2000 bar*	675 bar
ZStE340	1,0 mm	1210 bar	750 bar
AlMg0,7Si	1,3 mm	590 bar	390 bar
AlMg0,7Si	2,0 mm	855 bar	540 bar
AlMgSi0,5	2,2 mm	905 bar	540 bar
AlSi1MgMn	2,2 mm	1445 bar	880 bar
AlMg3Mn	3,0 mm	-**	1180 bar
AlMg3,5Mn	3,0 mm	-**	1265 bar
AlMg4,5Mn0,7	3,0 mm	-**	1375 bar

\* Schneidinnendruck lag über der Innendruckkapazität der IH-Anlage von 2000 bar

\*\* Wanddicke der Ausgangsteile war größer als die Schneidnuttiefe, deshalb nicht im Versuchsprogramm

Eine Besonderheit gegenüber den anderen Rohren weist der DC04; 1,0 mm beim IH-EAS 5 auf. Vor dem Einsetzen der Werkstofftrennung kommt es zum Kontakt des Werkstückes im Schneidnutgrund. Wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben, ändern sich damit plötzlich die Bedingungen, unter denen sich das Material in den Schneidnutraum formt. Die Innendruckkapazität der IHU/IHS-Anlage von 2000 bar ist nicht ausreichend, um unter diesen Bedingungen eine Werkstofftrennung zu erreichen.

Nachfolgend werden ein empirischer, auf der Schneidkraftberechnung beim mechanischen Scherschneiden beruhender Ansatz sowie ein auf der in Abschnitt 4.5 beschriebenen 3. Modellstufe basierender Ansatz zur Schneidinnendruckberechnung herausgearbeitet.

Beim mechanischen Scherschneiden wird gewöhnlich der Schneidwiderstand  $k_S$  angegeben als die auf die Schnittfläche bezogene Schneidkraft (vgl. Abschnitt 2.3). Übertragen auf die Verhältnisse beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden, kann hier ebenfalls ein Schneidwiderstand  $k_{sp}$  definiert werden:

$$k_{sp} = \frac{p_{is} \cdot A_N}{A_S} \quad (11)$$

Dabei gibt  $A_N$  die anfängliche, freie Fläche des Werkstückes über der Schneidnut an, d.h. die Fläche, in der der Innendruck wirksam werden kann.  $A_S$  bezeichnet die Schnittfläche und ergibt sich aus dem äußeren Rohrdurchmesser  $d_a$  und der Ausgangswanddicke  $s_0$  bzw. dem inneren Rohrdurchmesser  $d_i$ . Beide Größen lassen sich demnach weiter auflösen:

$$A_N = b_N \cdot l_{NU} = b_N \cdot \pi \cdot d_a \quad (12)$$

$$A_S = \frac{\pi}{4} \cdot (d_a^2 - d_i^2) \quad (13)$$

Die Gleichungen (12) und (13) können in Gleichung (11) eingesetzt werden. Nach entsprechender Vereinfachung lässt sich der Schneidwiderstand  $k_{sp}$  berechnen nach:

$$k_{sp} = \frac{4 \cdot p_{is} \cdot b_N \cdot d_a}{d_a^2 - d_i^2}, \quad (14)$$

mit  $p_{is}$  als Schneidinnendruck,  $b_N$  als Schneidnutbreite,  $d_a$  als Rohraußendurchmesser und  $d_i$  als Rohrrinnendurchmesser. Die Ausgangswanddicke  $s_0$  fließt über die Rohrdurchmesser  $d_a$  und  $d_i$  in die Berechnung des Schneidwiderstandes nach Gleichung (14) ein. In Tabelle 6-4 sind die nach dieser Gleichung ermittelten Schneidwiderstände zusammengestellt.

Tabelle 6-4: Übersicht der Schneidwiderstände  $k_{sp}$  beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden

Versuchsmaterial, Wanddicke		Schneidwiderstand $k_{sp}$	
		IH-EAS 5	IH-EAS 8
S235G2T	1,0 mm	541 N/mm <sup>2</sup>	649 N/mm <sup>2</sup>
S235G2T	1,5 mm	569 N/mm <sup>2</sup>	574 N/mm <sup>2</sup>
S235G2T	2,0 mm	-*	648 N/mm <sup>2</sup>
X5CrNi18-10	1,0 mm	-*	1143 N/mm <sup>2</sup>
X5CrNi18-10	1,5 mm	-*	1142 N/mm <sup>2</sup>
DC04	1,0 mm	-*	542 N/mm <sup>2</sup>
ZStE340	1,0 mm	608 N/mm <sup>2</sup>	603 N/mm <sup>2</sup>
AlMg0,7Si	1,3 mm	235 N/mm <sup>2</sup>	248 N/mm <sup>2</sup>
AlMg0,7Si	2,0 mm	245 N/mm <sup>2</sup>	248 N/mm <sup>2</sup>
AlMgSi0,5	2,2 mm	219 N/mm <sup>2</sup>	209 N/mm <sup>2</sup>
AlSi1MgMn	2,2 mm	348 N/mm <sup>2</sup>	339 N/mm <sup>2</sup>
AlMg3Mn	3,0 mm	-**	326 N/mm <sup>2</sup>
AlMg3,5Mn	3,0 mm	-**	350 N/mm <sup>2</sup>
AlMg4,5Mn0,7	3,0 mm	-**	378 N/mm <sup>2</sup>

\* Schneidinnendruck lag über der Innendruckkapazität der IH-Anlage von 2000 bar

\*\* Wanddicke der Ausgangsteile war größer als die Schneidnuttiefe, deshalb nicht im Versuchsprogramm

Beim mechanischen Schneiden wurde nachgewiesen, dass der Schneidwiderstand  $k_s$  keine konstante Größe ist, sondern von einer Reihe von Randbedingungen beeinflusst wird. Als wichtigste Randbedingungen werden der Schneidspalt, der Schneidstempeldurchmesser, die Schneidkeilgeometrie, aber auch die Blechdicke selbst angegeben /35/,/41/. Beim IH-EAS von Rohren entfällt der Schneidspalt als mögliche Einflussgröße. Schneidkeilgeometrie und Wanddicke wirken wie beim mechanischen Schneiden. Hinzu kommt, dass beim Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring zunächst eine Verformung des Materials in die Schneidnut hinein stattfindet. Die Größe der Umformung sowie die davon abhängige Beeinflussung des Spannungs-

zustandes in der Schnittzone (Abschnitt 4.5) wirken sich ebenfalls auf den Schneidwiderstand  $k_{sp}$  aus.

Es ist zweckmäßig, auf die Vorgehensweise beim mechanischen Scherschneiden zurückzugreifen und den Schneidwiderstand  $k_{sp}$  beim Innenhochdruckabschneiden ebenfalls auf die Zugfestigkeit  $R_m$  zu beziehen.

In Bild 6-6 ist der Schneidwiderstand in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit für alle untersuchten Werkstoffe und Wanddicken dargestellt. Es wird deutlich, dass kein linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen besteht. Vielmehr müssen, wie auch beim mechanischen Schneiden, für die Ermittlung des Schneidwiderstandes aus der Zugfestigkeit für verschiedene Werkstoffgruppen unterschiedliche Faktoren angegeben werden, d.h.:

- Aluminium  $k_{sp} = 1,2 \dots 1,3 R_m$ ,
- höherfester Baustahl  $k_{sp} = 1,2 \dots 1,5 R_m$ ,
- Edelstahl, Tiefziehstahl  $k_{sp} = 1,6 \dots 1,7 R_m$ .

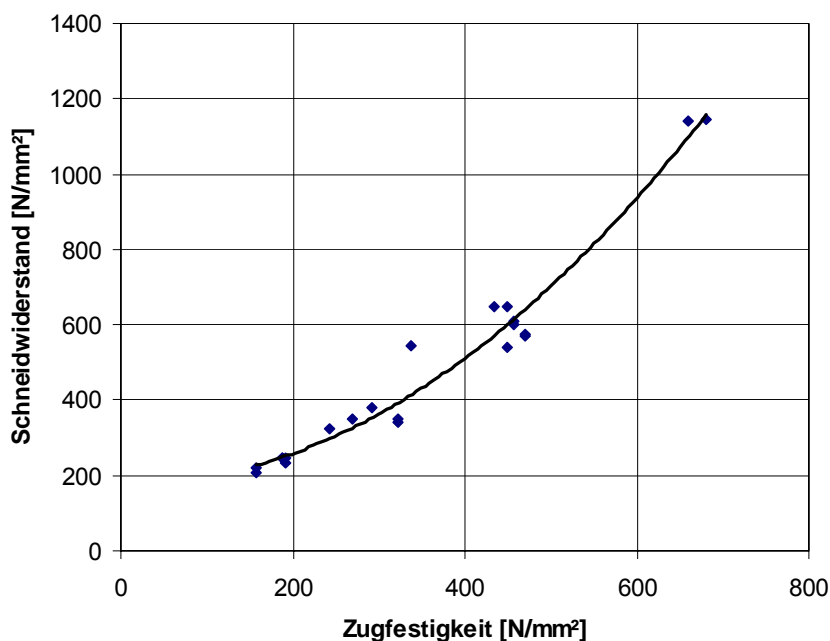


Bild 6-6: Ermittelter Zusammenhang zwischen dem Schneidwiderstand  $k_{sp}$  und der Zugfestigkeit  $R_m$

Basierend auf den dargestellten Zusammenhängen und Untersuchungsergebnissen kann eine Formel zur Berechnung des Schneidinnendruckes in Abhängigkeit von der Werkzeuggestaltung und den Ausgangsteileigenschaften abgeleitet werden. Nach Umstellen von Gleichung (14) berechnet sich der Schneidinnendruck beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden von unverformten Rohren nach:

$$p_{is} = \frac{k_{sp} \cdot (d_a^2 - d_i^2)}{4 \cdot b_N \cdot d_a} \quad (15)$$

Alternativ zum empirischen Ansatz zur Bestimmung des Schneidinnendruckes wird im Folgenden ein modellbasierter Berechnungsansatz vorgestellt.

Der Berechnungsansatz basiert auf der Modellstufe 3 gemäß Abschnitt 4.5. Darin wird die Werkstofftrennung durch das dominierende Wirken von axialen Zugspannungen dargestellt. Die Werkstofftrennung findet statt, wenn das Umformvermögen des Materials erschöpft ist. Dieser Zustand soll durch den Umformgrad  $\varphi_{BR}$  beschrieben werden. Um  $\varphi_{BR}$  zu erreichen, ist eine Fließspannung  $k_f(\varphi_{BR})$  notwendig, die sich, übertragen auf das Innenhochdruckabschneiden unter dominierenden axialen Zugspannungen, berechnen lässt nach:

$$k_f(\varphi_{BR}) = \frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot (d_a^2 - d_i^2)} \quad (16)$$

Dabei sind  $d_a$  und  $d_i$  der Außen- und Innendurchmesser des Rohres, so dass über diese Größen auch die Rohrwanddicke  $s_0$  berücksichtigt wird. Obwohl in die Berechnung der Fließspannung immer die aktuelle Querschnittsfläche eingeht, wird in Gleichung (16) aus Vereinfachungsgründen die Ausgangsquerschnittsfläche verwendet. Die in Gleichung (16) angegebene Kraft muss durch den Innendruck aufgebracht werden, der zum Zeitpunkt der Werkstofftrennung geschrieben werden kann als:

$$p_{is} = \frac{F}{l_{NU} \cdot b_N} = \frac{F}{\pi \cdot d_a \cdot b_N} \quad (17)$$

Die Gleichungen (16) und (17) können nach  $F$  umgestellt, gleich gesetzt und vereinfacht werden, so dass sich für den Schneidinnendruck  $p_{is}$  ergibt:

$$p_{is} = \frac{k_f(\varphi_{BR}) \cdot (d_a^2 - d_i^2)}{4 \cdot d_a \cdot b_N} \quad (18)$$

$k_f(\varphi_{BR})$  kann experimentell aus der Fließkurve ermittelt werden. Eine andere Möglichkeit bietet die auf der LUDWIK-Gleichung basierende Fließkurvengleichung nach REIHLE, die Gültigkeit für den einachsigen Zugversuch un- und niedriglegierter Stähle hat [66]:

$$k_f(\varphi) = R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot \varphi^n, \quad (19)$$

mit  $n$  als Verfestigungsexponent und  $e$  als Basis des natürlichen Logarithmus. Versteht man nun die Werkstofftrennung als das Ende des Fließens, so muss zur Beschreibung dieses Punktes der Umformgrad  $\varphi_{BR}$  in Gleichung (19) eingesetzt werden, womit sich diese ergibt zu:

$$k_f(\varphi_{BR}) = R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot \varphi_{BR}^n \quad (20)$$

Schließlich kann Gleichung (18) mit Gleichung (20) erweitert werden zu:

$$p_{is} = \frac{R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot [\ln(1 + A_{50})]^n \cdot (d_a^2 - d_i^2)}{4 \cdot d_a \cdot b_N} \quad (21)$$

Der Umformgrad  $\varphi_{BR}$  ist dabei wegen

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (22)$$

durch die Bruchdehnung  $A_{50}$  ersetzt worden.

Wie bereits dargestellt, sind für die Herleitung der Gleichung (21) mit der Verwendung der Ausgangswanddicke der Rohre  $s_0$  sowie der Benutzung der Fließkurvengleichung nach *REIHLE* für verschiedene Werkstoffe Annahmen notwendig, die z.T. nicht den Ausführungen im Schrifttum entsprechen. Trotzdem wird diese Berechnungsvorschrift für den Schneidinnendruck hier als Alternative zum empirischen Ansatz dargestellt, da sie die Möglichkeit bietet, aus standardisierten Werkstoffkenngrößen den Schneidinnendruck zu ermitteln. Die gute Übereinstimmung der nach Gleichung (21) berechneten mit den im Experiment gemessenen Schneidinnendrücken (Tabelle 6-5) zeigt, dass die Vereinfachungen durchaus gerechtfertigt sind. Die Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Werten bewegen sich in einem Rahmen, der eine Abschätzung und erste Auslegung des Innenhochdruck-Einfachabschneidens ermöglicht.

Tabelle 6-5: Übersicht der nach Gleichung (21) berechneten Schneidinnendrücke

Versuchsmaterial, Wanddicke		Schneidinnendruck $p_{is}$			
		IH-EAS 5		IH-EAS 8	
		Berechnung	Experiment	Berechnung	Experiment
<b>S235G2T</b>	<b>1,0 mm</b>	1146 bar	1045 bar	716 bar	785 bar
<b>S235G2T</b>	<b>1,5 mm</b>	1530 bar	1650 bar	956 bar	1040 bar
<b>S235G2T</b>	<b>2,0 mm</b>	2198 bar	-*	1374 bar	1590 bar
<b>X5CrNi18-10</b>	<b>1,0 mm</b>	2030 bar	-*	1269 bar	1395 bar
<b>X5CrNi18-10</b>	<b>1,5 mm</b>	2923 bar	-*	1827 bar	2000 bar
<b>DC04</b>	<b>1,0 mm</b>	916 bar	-*	572 bar	675 bar
<b>ZStE340</b>	<b>1,0 mm</b>	1153 bar	1210 bar	721 bar	750 bar
<b>AlMg0,7Si</b>	<b>1,3 mm</b>	593 bar	590 bar	370 bar	390 bar
<b>AlMg0,7Si</b>	<b>2,0 mm</b>	882 bar	855 bar	551 bar	540 bar
<b>AlMgSi0,5</b>	<b>2,2 mm</b>	846 bar	905 bar	529 bar	540 bar
<b>AlSi1MgMn</b>	<b>2,2 mm</b>	1686 bar	1445 bar	1054 bar	880 bar
<b>AlMg3Mn</b>	<b>3,0 mm</b>	1670 bar	-**	1044 bar	1180 bar
<b>AlMg3,5Mn</b>	<b>3,0 mm</b>	1827 bar	-**	1142 bar	1265 bar
<b>AlMg4,5Mn0,7</b>	<b>3,0 mm</b>	1995 bar	-**	1247 bar	1375 bar

\* Schneidinnendruck lag über der Innendruckkapazität der IH-Anlage von 2000 bar

\*\* Wanddicke der Ausgangsteile war größer als die Schneidnuttiefe, deshalb nicht im Versuchsprogramm

## 6.2.2 Prozessfenster und Arbeitsbereich

Das Innenhochdruck-Einfachabschneiden von unverformten Rohren lässt sich unter Einhaltung der beschriebenen Voraussetzungen und Parameter erfolgreich durchführen. Wie gezeigt wurde, haben für einen vorliegenden Werkstückwerkstoff vor allem der Innendruck, die Schneidnutbreite sowie die Wanddicke Einfluss auf den Arbeitsbereich. Zur Darstellung eines solchen Arbeitsbereiches ist es am zweckmäßigsten, die Schneidnutbreite und den Innendruck als die werkzeug- bzw. maschinentechnischen Einflussgrößen heranzuziehen. Ein erfolgreiches Abschneiden des kompletten Rohres stellt sich als Punkt in dem durch die beiden o.g. Größen gebildeten Arbeitsdiagramm dar (Bild 6-7).

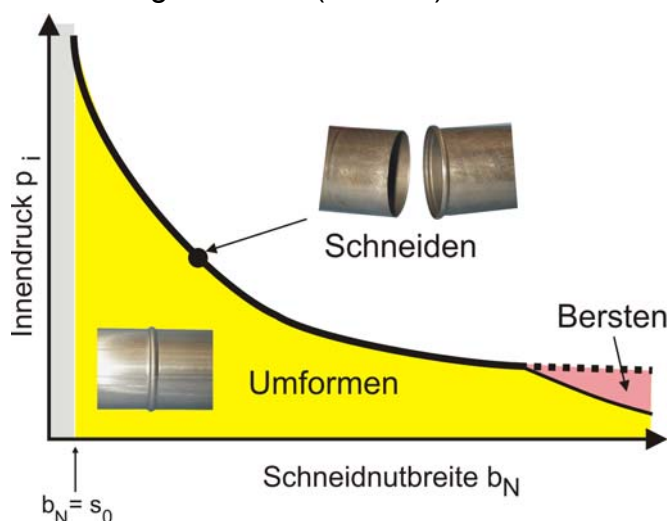


Bild 6-7: Schematische Darstellung des Arbeitsdiagrammes beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden

Mit größeren Schneidnutbreiten verringert sich der Schneidinnendruck. Gleichzeitig verlagern sich die Verhältnisse im Bereich der Schneidnut in Richtung einer freien Aufweitung unter Innendruck mit geringer werdenden Biegeanteilen. Die Verfahrensgrenze in Richtung größer werdender Schneidnutbreiten stellt das Bersten des Materials in der Einformzone vor der Werkstofftrennung an der Schneidkante dar, ohne dass dies hier experimentell nachgewiesen wird. Wenn die Biegeanteile mit steigenden Schneidnutbreiten vernachlässigbar klein werden, kann der Innendruck näherungsweise nach der aus der Kesselformel abgeleiteten Berstformel berechnet werden. In der Literatur wird dafür als Grenzwert für die Aufweitungslänge der dreifache Rohraußendurchmesser angegeben [1],[67], wobei dieser Wert beim Innenhochdruckabschneiden nicht erreicht wird. Für kleinere Aufweitungslängen erhöhen sich wegen der aufzubringenden Biegeanteile die Berstdrücke. In [67] wurde dies experimentell und durch FEM-Berechnungen deutlich nachgewiesen.

Schwierig gestaltet sich die Abgrenzung des Arbeitsfeldes in Richtung kleiner werdender Schneidnutbreiten. Die Schneidinnendrucke steigen exponentiell an. Erreichen die Schneidnutbreiten die Ausgangswanddicke des Rohrmaterials werden die zum Schneiden erforderlichen Innendrucke so hoch, dass ein experimenteller Nach-

weis nahezu unmöglich wird und auch nicht sinnvoll erscheint. Ebenso wenig sinnvoll ist die technische Anwendung des Innenhochdruckabschneidens mit extrem kleinen Schneidnutbreiten, da das Verfahren wegen des sehr hohen Innendruckbedarfs dann nicht mehr wirtschaftlich rentabel ist. Deshalb wird aus praktischer Sicht als untere Grenze für die Schneidnutbreite die Ausgangswanddicke festgelegt, auch wenn theoretisch bei sehr hohen Innendrücken durchaus mit Schneidnutbreiten unterhalb der Ausgangswanddicke geschnitten werden könnte.

Bild 6-8 zeigt die Arbeitsbereiche für das IH-EAS der untersuchten Rohre. Die Darstellungen zeigen jeweils auf der linken Seite die in Abhängigkeit der Schneidnutbreite nach Gleichung (15) empirisch berechneten Schneidinnendrucke sowie auf der rechten Seite die nach Gleichung (21) auf Modellbasis berechneten Schneidinnendrucke. Die gemessenen Schneidinnendrucke sind jeweils gesondert gekennzeichnet.



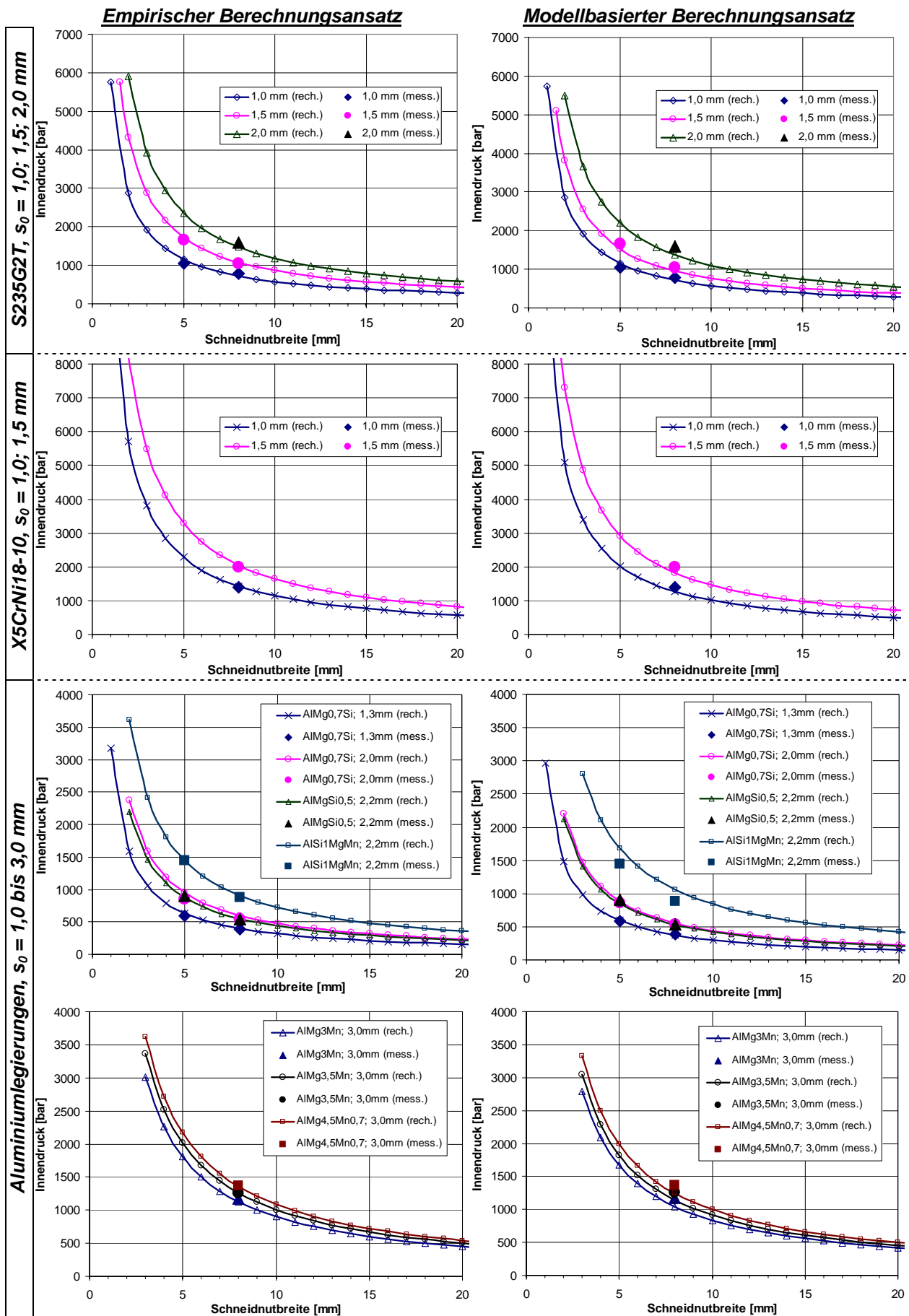


Bild 6-8: Arbeitsbereiche für das IH-EAS von unverformten Rohren  
(links: Empirischer Berechnungsansatz / rechts: Modellbasierter Berechnungsansatz)

## 6.3 Schnittteileigenschaften

### 6.3.1 Schnittkantengeometrie

Im Ergebnis des Schneidvorganges stellt sich am Schnittteil (Endteil) eine typische Schnittkantengeometrie ein, die maßgeblich von den auftretenden Spannungen im Trennbereich bestimmt wird. Von den in der Literatur für das mechanische Scherschneiden angegebenen Haupteinflüssen auf die Schnittkantengeometrie (vgl. Abschnitt 2.3) sind für das Innenhochdruckabschneiden vor allem der Werkstoff und die Blechdicke relevant. Andere Einflüsse wie Schneidspalt, Werkzeugführung und Schneidgeschwindigkeit entfallen hier wegen der spezifischen Bedingungen beim Innenhochdruckabschneiden. In Anlehnung an das mechanische Scherschneiden können Kenngrößen angegeben werden, mit denen die Schnittkantengeometrie beschrieben werden kann.

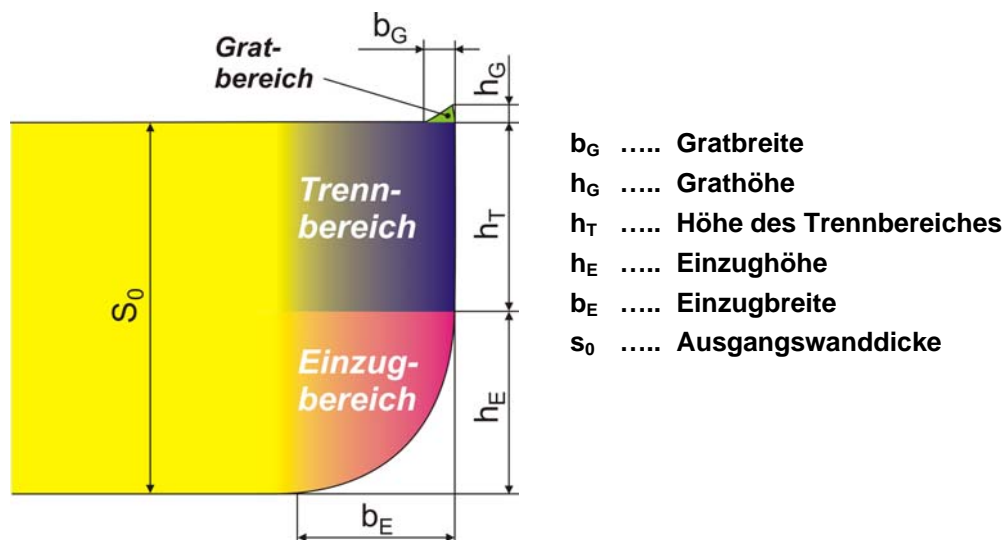


Bild 6-9: Kenngrößen zur Beschreibung der Schnittkantengeometrie

Bild 6-9 zeigt die beim Innenhochdruckabschneiden typischen Schnittkantenkenngrößen. Die Schnittkante kann in einen Einzug-, Trenn- und Gratbereich unterteilt werden. Beim Innenhochdruckabschneiden muss zudem zwischen der Schnittkante des Schnittteiles und der des Restteiles unterschieden werden. Die Schnittkante des Schnittteiles bildet sich ohne die direkte Einwirkung einer geometrisch bestimmten Schneidkante heraus. Deshalb besteht der Trennbereich unabhängig vom Ablauf des Schneidvorganges ausschließlich aus Bruchfläche. Wenn während des Schneidvorganges zunächst die Plastizitätsbedingung erfüllt wird, kommt es dagegen am Restteil zur Ausbildung einer Trennfläche mit Glattschnitt- und Bruchanteilen. Im Folgenden sollen jedoch ausschließlich die Schnittkanten der Schnittteile bewertet werden.

Außer durch die Größe der typischen Bereiche am Schnittteil kann die Schnittkantengeometrie durch Winkelabweichungen der Trennfläche sowie des gesamten Schnitt-

bereiches gekennzeichnet sein. Diese Winkelabweichungen sind in Bild 6-9 nicht angegeben und müssen im Einzelfall gesondert betrachtet werden.

Nachfolgend sind exemplarisch charakteristische Schnittkantengeometrien von Schnittteilen verschiedener Werkstoffe aus dem Untersuchungsprogramm in Abhängigkeit von der Schneidnutbreite dargestellt. Anhand der Konturdaten der Schnittkanten können Einzugbreite und -höhe sowie die Höhe des Trennbereiches bestimmt werden. Der jeweils dargestellte Vergleichsbalken kennzeichnet die Ausgangswanddicke.

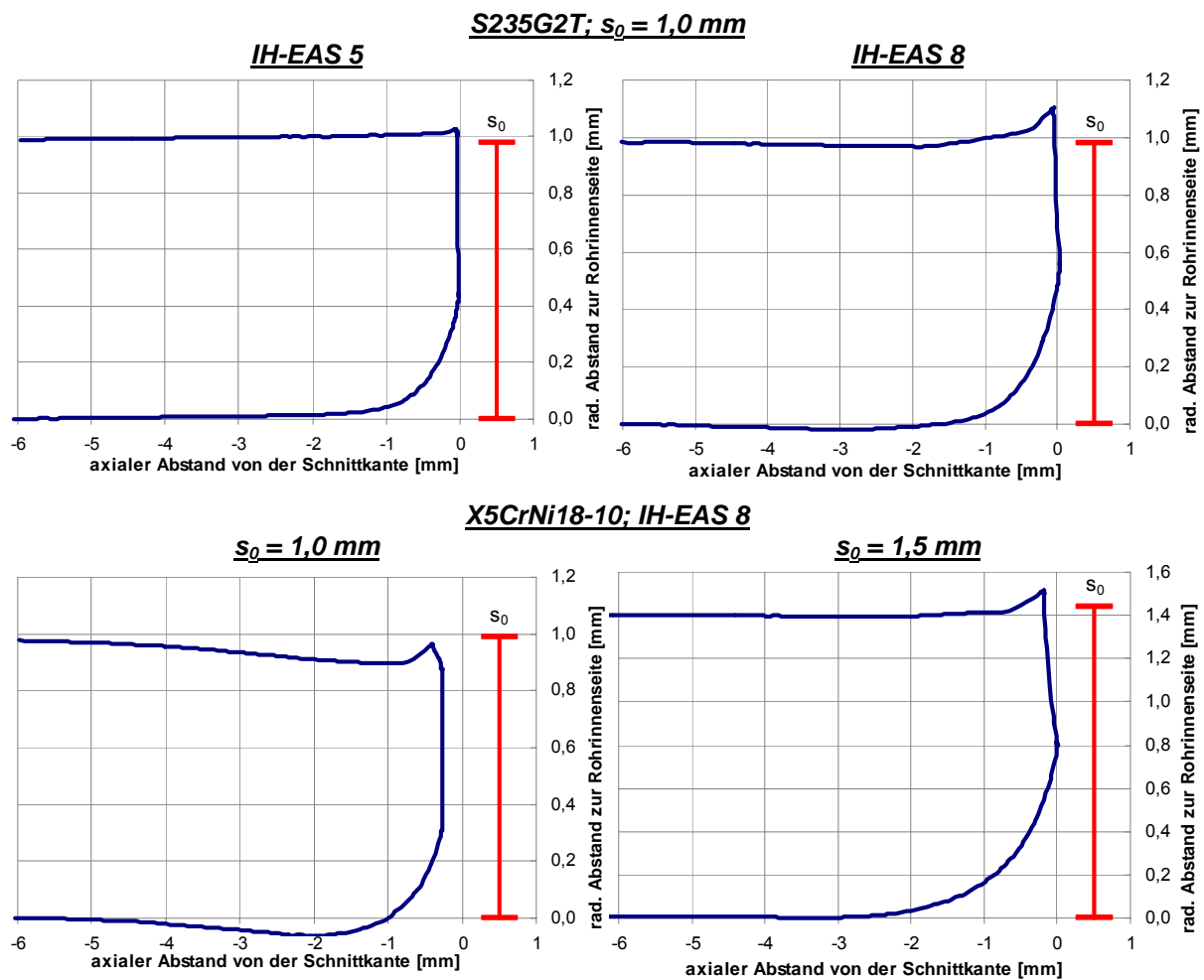
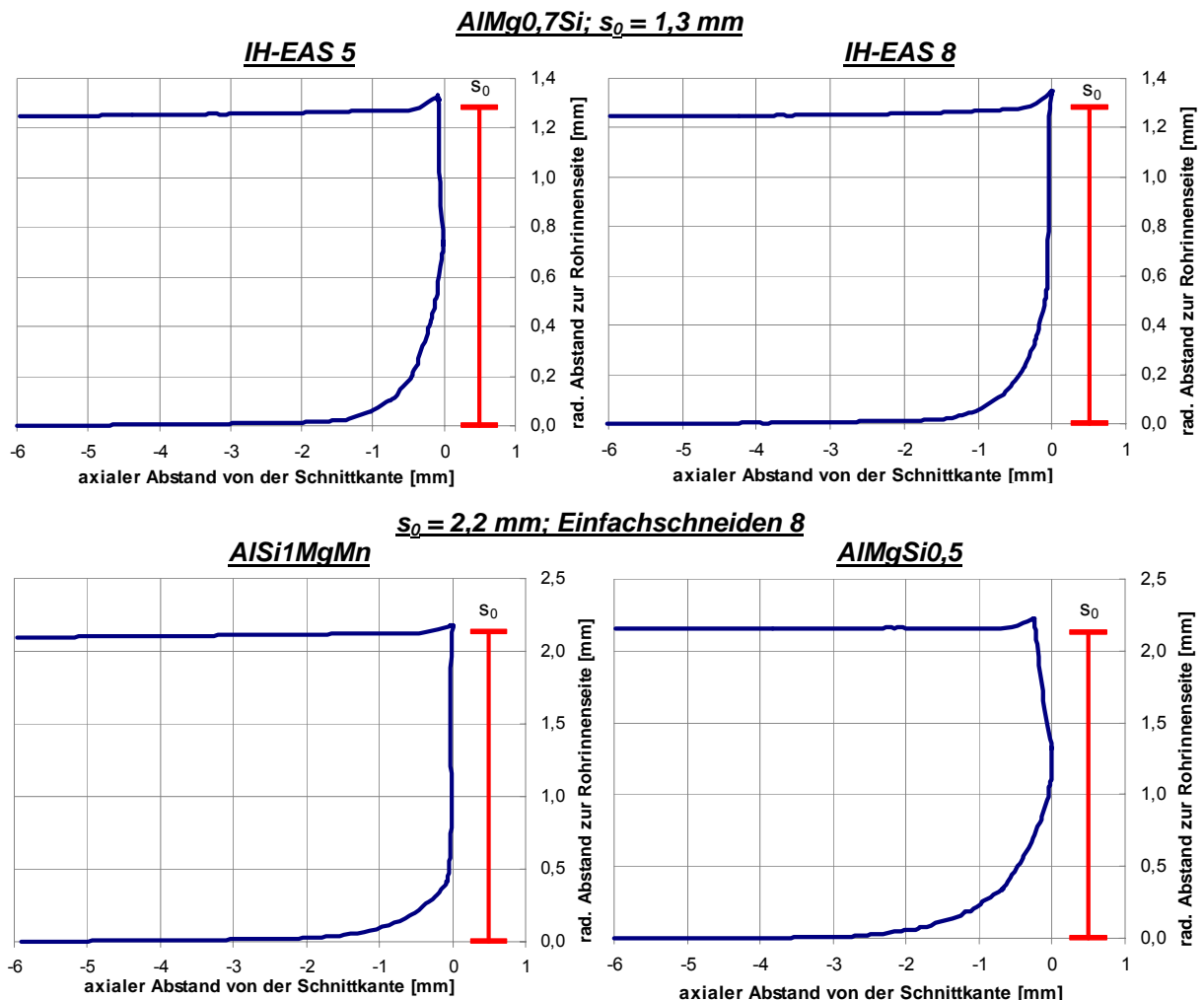


Bild 6-10: Ausgewählte Schnittkantengeometrien (Stahlwerkstoffe)



**Bild 6-11: Ausgewählte Schnittkantengeometrien (Aluminiumwerkstoffe)**

Die in Bild 6-10 und Bild 6-11 dargestellte Auswahl typischer Schnittkantengeometrien zeigt deutlich die relativ großen Einzugsbereiche sowie die sich daran anschließenden Trennbereiche. Bei einigen Schnittteilen kommt es zu einer Winkelstellung der Trennfläche. Ursache dafür sind die besonderen Schneidbedingungen in der Schnittzone. Aufgrund der Sickenbildung beim Innenhochdruckabschneiden wirkt der Innendruck unmittelbar vor der Werkstofftrennung nicht mehr ausschließlich radial (d.h. normal zur Blechebene), sondern weist auch eine axiale Komponente auf. Die unter dieser Beanspruchung entstehende Trennfläche ist gegenüber der Rohrachse gekippt (z.B. AlMgSi0,5 in Bild 6-11). Beim X5CrNi18-10; 1,0 mm (Bild 6-10) tritt eine Verschiebung des gesamten Schnittbereiches hin zur Rohrachse auf. Ursache für diese Deformation ist offenbar der Impuls bei der Werkstofftrennung des Edelstahl, verbunden mit der starken Rückfederung dieses Materials.

Es wurde bereits beschrieben, dass sich beim Innenhochdruckabschneiden von Rohren mit Schneidring ein Spannungszustand einstellt, der durch die kombinierte Wirkung sich bedingender Scher- und Zugspannungen gekennzeichnet ist. Die

ausgeprägten Zugspannungsanteile sind für den deutlichen Einzug an den Endteilen verantwortlich. In Tabelle 6-6 sind die den Einzugsbereich kennzeichnenden Größen Einzugbreite  $b_E$  und Einzughöhe  $h_E$  für die untersuchten Rohre zusammengestellt.

Tabelle 6-6: Einzuggrößen an Schnittteilen beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden

Versuchsmaterial, Wanddicke		IH-EAS 5		IH-EAS 8	
		Einzugbreite $b_E$	Einzughöhe $h_E$	Einzugbreite $b_E$	Einzughöhe $h_E$
S235G2T	1,0 mm	1,45 mm	0,42 mm	1,69 mm	0,51 mm
S235G2T	1,5 mm	1,22 mm	0,66 mm	1,39 mm	0,54 mm
S235G2T	2,0 mm	-*	-*	3,02 mm	1,13 mm
X5CrNi18-10	1,0 mm	-*	-*	1,64 mm	0,37 mm
X5CrNi18-10	1,5 mm	-*	-*	n.e.	n.e.
DC04	1,0 mm	-*	-*	1,75 mm	0,58 mm
ZStE340	1,0 mm	-*	-*	1,51 mm	0,56 mm
AlMg0,7Si	1,3 mm	1,50 mm	0,71 mm	1,54 mm	0,51 mm
AlMg0,7Si	2,0 mm	1,71 mm	0,78 mm	2,41 mm	0,91 mm
AlMgSi0,5	2,2 mm	2,79 mm	1,12 mm	2,81 mm	1,22 mm
AlSi1MgMn	2,2 mm	1,99 mm	0,38 mm	2,42 mm	0,86 mm
AlMg3Mn	3,0 mm	-**	-**	3,61 mm	1,50 mm
AlMg3,5Mn	3,0 mm	-**	-**	3,55 mm	1,35 mm
AlMg4,5Mn0,7	3,0 mm	-**	-**	3,59 mm	1,29 mm

\* Schneidinnendruck lag über der Innendruckkapazität der IH-Anlage von 2000 bar

\*\* Wanddicke der Ausgangsteile war größer als die Schneidnuttiefe, deshalb nicht im Versuchsprogramm

Bei der Bewertung der Einzuggrößen ist ein komplexer Zusammenhang zwischen den stofflichen und geometrischen Werkstückeigenschaften sowie der Werkzeuggeometrie zu beachten. Trotz geringerer Schneidinnendrucke ist die Einzugbreite bei größerer Schneidnutbreite ( $b_N = 8$  mm) größer als bei kleinerer Schneidnutbreite ( $b_N = 5$  mm). Die stärkere Einförmigkeit in die Schneidnut bei größerer Schneidnutbreite und die damit verbundenen größeren Zugspannungsanteile führen zu größeren Einzugsbereichen. Allerdings ist diese Tendenz nicht bei allen Versuchsröhren gleich stark ausgeprägt, so dass beispielsweise beim AlMg0,7Si; 1,3 mm sowie AlMgSi0,5; 2,2 mm trotz größerer Schneidnutbreite etwa gleiche Einzugbreiten vorliegen.

Bezieht man die Einzuggrößen auf die Ausgangswanddicke, so ergeben sich für die verschiedenen Rohrarten vergleichbare Größen. In Bild 6-12 sind die bezogenen Einzuggrößen für das Innenhochdruck-Einfachabschneiden bei einer Schneidnutbreite  $b_N = 8$  mm grafisch dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die bezogenen Einzughöhen unabhängig von der Rohrart im Bereich zwischen 0,4 und 0,6 einstellen. Die bezogenen Einzugbreiten liegen bei den Aluminiumlegierungen um 1,2, bei den Stahlwerkstoffen zwischen 1,5 und 1,7. Der geringere Wert für den

S235G2T; 1,5mm ist auf das untypische Dehnungsverhalten dieser Rohrsorte zurückzuführen (vgl. Tabelle 5-3) und soll an dieser Stelle nicht bewertet werden.

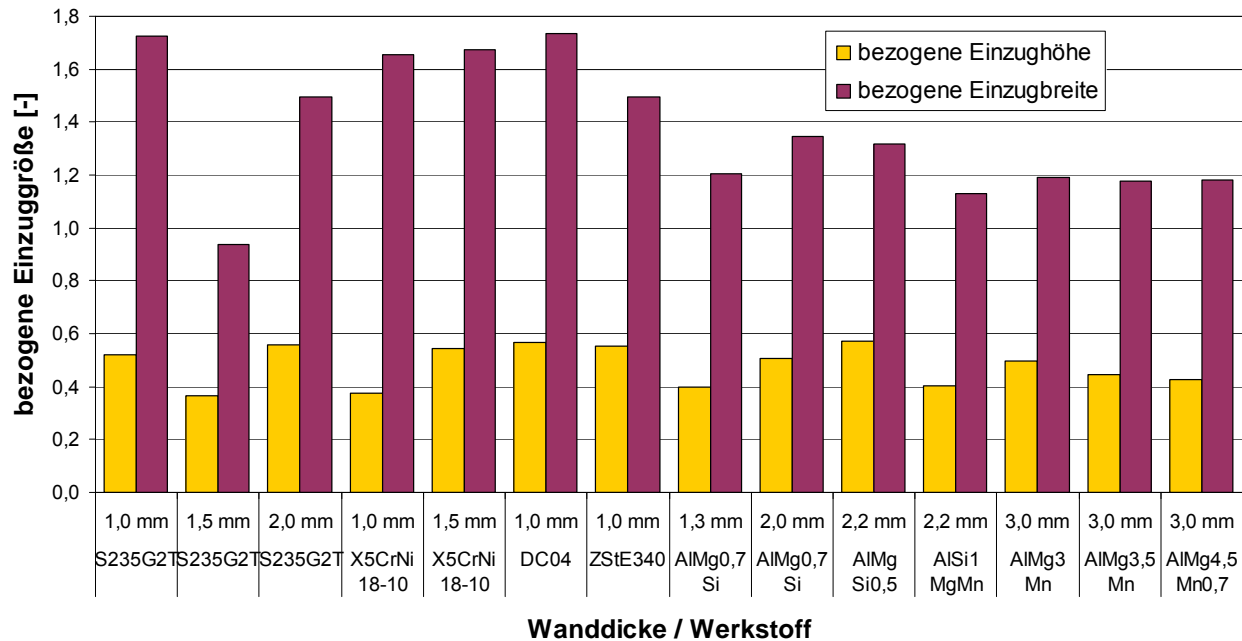


Bild 6-12: Auf die Ausgangswanddicke bezogene Einzuggrößen beim IH-EAS;  $b_N=8\text{mm}$

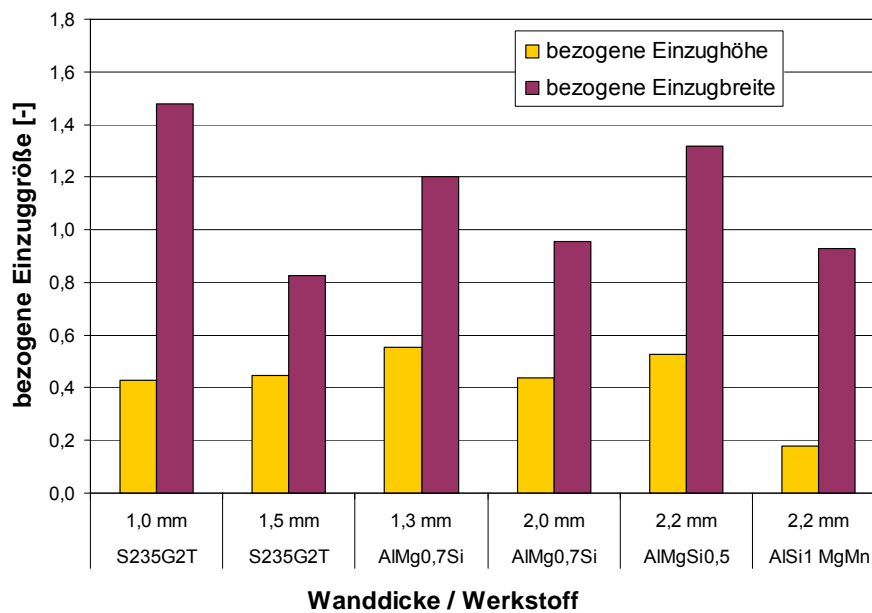


Bild 6-13: Auf die Ausgangswanddicke bezogene Einzuggrößen beim IH-EAS;  $b_N=5\text{mm}$

Die verringerte Schneidnutbreite beim IH-EAS 5 ( $b_N = 5\text{ mm}$ ) wirkt sich auf die bezogenen Einzuggrößen je nach Rohrsorte unterschiedlich deutlich aus. In Abschnitt 6.2.2 wurde gezeigt, dass bei geringer werdenden Schneidnutbreiten die Schneidinnendrucke exponentiell ansteigen. In Abhängigkeit vom Rohrwerkstoff und der Rohrwanddicke hat die Verringerung der Schneidnutbreite eine unterschiedlich starke Wirkung auf den Schneidinnendruck, was zur Folge hat, dass auch ihr Einfluss auf die bezogenen Einzuggrößen unterschiedlich ist.

Aufgrund des Zusammenwirkens der Einflussfaktoren auf die Einzuggrößen und der gegenseitigen Abhängigkeit untereinander, ist es auf Basis der vorliegenden Daten kaum möglich, einfache Zusammenhänge abzuleiten. Eine Ausnahme bildet die Abhängigkeit der bezogenen Einzugbreite von der Bruchdehnung. In Bild 6-14 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Dazu sind die jeweiligen linearen Trendlinien angegeben. Eine signifikante Abhängigkeit der bezogenen Einzughöhe von der Bruchdehnung kann dagegen nicht festgestellt werden.

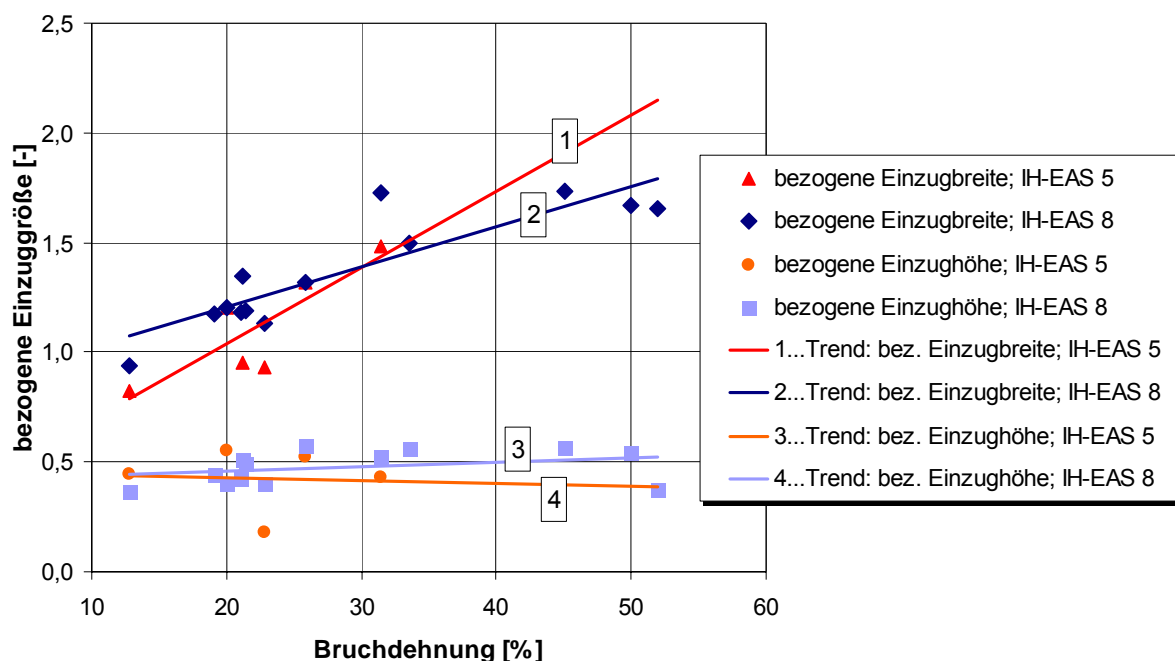


Bild 6-14: Bezogene Einzuggrößen in Abhängigkeit der Bruchdehnung

Die Schnittkantengeometrie ist außer durch den Einzugbereich auch durch den Trennbereich charakterisiert. Entsprechend Bild 6-9 ergibt sich die Höhe des Trennbereiches an der Schnittkante  $h_T$  direkt aus der Einzughöhe  $h_E$  und der Ausgangswanddicke  $s_0$  nach:

$$h_T = s_0 - h_E. \quad (23)$$

Auf die Höhe des Trennbereiches wird im Zusammenhang mit den Ausführungen zur Schnittfläche (Abschnitt 6.3.3) näher eingegangen.

### 6.3.2 Schnittgrat

Die Höhe des Schnittgrates ist eine wichtige Kenngröße bei der Beschreibung der Endteileigenschaften und ist in vielen Fällen besonders relevant für den Gebrauchswert des Schnittteiles. Gemäß Bild 6-9 wird die Außenseite des Rohres als Bezug für die Bestimmung der Höhe des Schnittgrates  $h_G$  herangezogen. Tabelle 6-7 zeigt die Schnittgrathöhen in Abhängigkeit von der Schneidnutbreite.

Tabelle 6-7: Übersicht der Schnittgrathöhen  $h_G$  beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden

Versuchsmaterial, Wanddicke		Schnittgrathöhen $h_G$	
		IH-EAS 5	IH-EAS 8
S235G2T	1,0 mm	14 $\mu\text{m}$	88 $\mu\text{m}$
S235G2T	1,5 mm	23 $\mu\text{m}$	77 $\mu\text{m}$
S235G2T	2,0 mm	-*	54 $\mu\text{m}$
X5CrNi18-10	1,0 mm	-*	119 $\mu\text{m}$
X5CrNi18-10	1,5 mm	-*	129 $\mu\text{m}$
DC04	1,0 mm	-*	70 $\mu\text{m}$
ZStE340	1,0 mm	n.e.	102 $\mu\text{m}$
AlMg0,7Si	1,3 mm	54 $\mu\text{m}$	63 $\mu\text{m}$
AlMg0,7Si	2,0 mm	52 $\mu\text{m}$	53 $\mu\text{m}$
AlMgSi0,5	2,2 mm	54 $\mu\text{m}$	87 $\mu\text{m}$
AlSi1MgMn	2,2 mm	44 $\mu\text{m}$	60 $\mu\text{m}$
AlMg3Mn	3,0 mm	-**	84 $\mu\text{m}$
AlMg3,5Mn	3,0 mm	-**	44 $\mu\text{m}$
AlMg4,5Mn0,7	3,0 mm	-**	66 $\mu\text{m}$

\* Schneidinnendruck lag über der Innendruckkapazität der IH-Anlage von 2000 bar

\*\* Wanddicke der Ausgangsteile war größer als die Schneidnuttiefe, deshalb nicht im Versuchsprogramm

Die größere Schneidnutbreite führt aufgrund der stärkeren Einförmung des Materials in die Schneidnut zu größeren Grathöhen. Allerdings erfolgt die Zunahme der Grathöhe nicht bei allen Rohren in gleichem Maße. Dieser schon bei den Einzugsgrößen zu beobachtende Effekt unterstreicht die Komplexität der Einflüsse auf den Umform- und Trennvorgang. Während beim S235G2T bei einer Schneidnutbreite von 5 mm sehr geringe Grathöhen auftreten, die auch deutlich geringer sind als die der geschnittenen Aluminiumrohre, führt die Schneidnutbreite von 8 mm zu einer deutlichen Zunahme der Schnittgrathöhe. Bei dieser Schneidnutbreite sind die Grathöhen der Aluminiumlegierungen geringer als die der Rohre aus S235G2T.

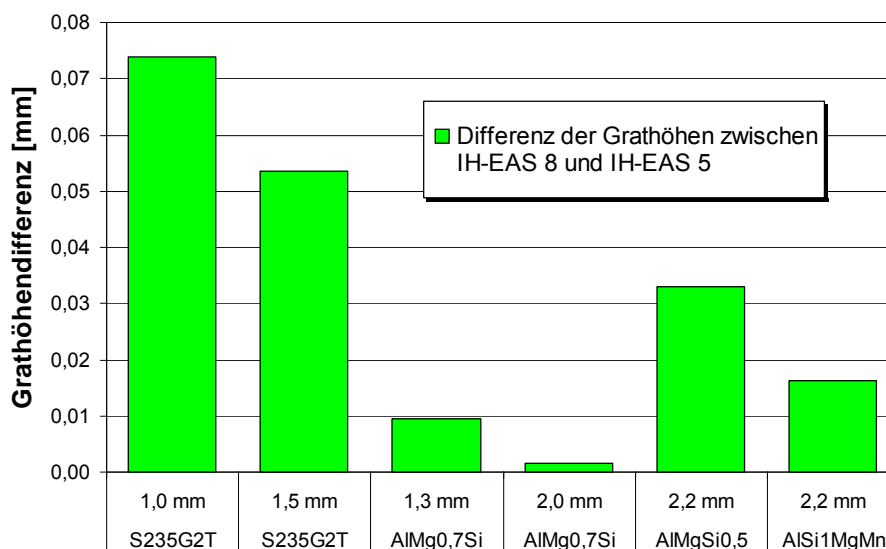


Bild 6-15: Differenz der Grathöhen beim IH-EAS mit  $b_N=8\text{mm}$  und  $b_N=5\text{mm}$



In Bild 6-15 sind die Grathöhendifferenzen für die Ausgangsrohre grafisch dargestellt, für die das Innenhochdruck-Einfachabschneiden unter den gegebenen Bedingungen sowohl mit der Schneidnutbreite  $b_N = 8 \text{ mm}$  als auch mit  $b_N = 5 \text{ mm}$  möglich ist.

### 6.3.3 Schnittfläche

Die Schnittfläche beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden ist gekennzeichnet durch den Trennbereich und einen Übergangsbereich zur Rohrinneenseite, den Einzugsbereich. Wie in Abschnitt 6.3.1 gezeigt, beträgt die Einzughöhe zwischen 40 und 60% der Ausgangswanddicke. Der verbleibende Anteil entfällt auf den Trennbereich. Beim klassischen Scherschneiden bilden sich in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften und Prozessparametern zumeist klar trennbare Glattschnitt- und Bruchflächenanteile aus. Der Glattschnittflächenanteil wird unmittelbar durch die Wirkung der Schneidkante des Schneidstempels ausgebildet und schließt sich an den Einzugsbereich an. An die Glattschnittfläche schließt sich zur Gratseite hin die Bruchfläche mit einer typischen, sehr rauen Oberflächenstruktur an. Beim Innenhochdruckabschneiden übernimmt das Wirkmedium die Funktion des Schneidstempels. Der dadurch gegenüber dem mechanischen Scherschneiden veränderte und durch ausgeprägte Zugspannungsanteile gekennzeichnete Spannungszustand führt dazu, dass am Endteil keine Glattschnittfläche entsteht. Vielmehr wird der Einzugsbereich solange vergrößert, bis es zur Werkstofftrennung kommt. Der Trennbereich besteht dann ausschließlich aus Bruchanteilen. Bild 6-16 zeigt typische Schnittflächen für zwei durch Innenhochdruckabschneiden hergestellte Endteile.

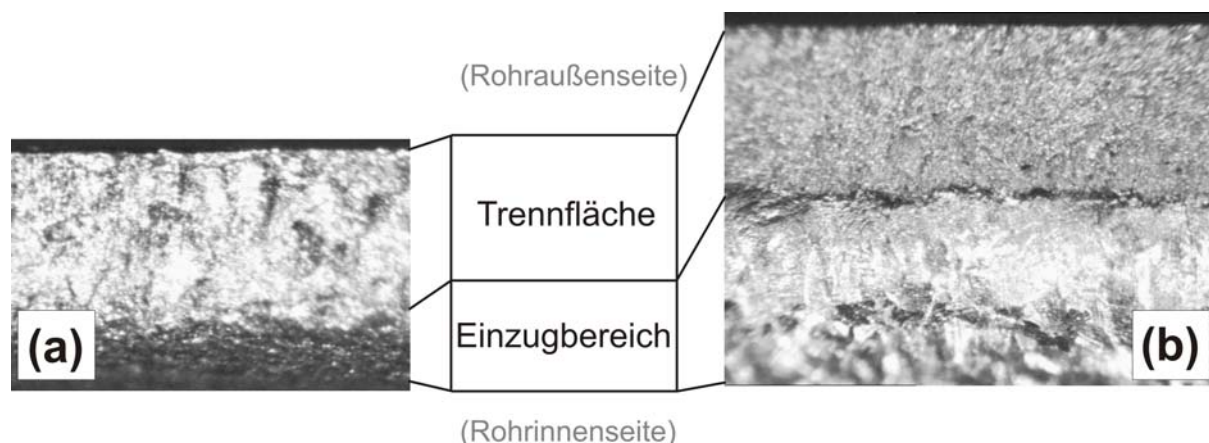
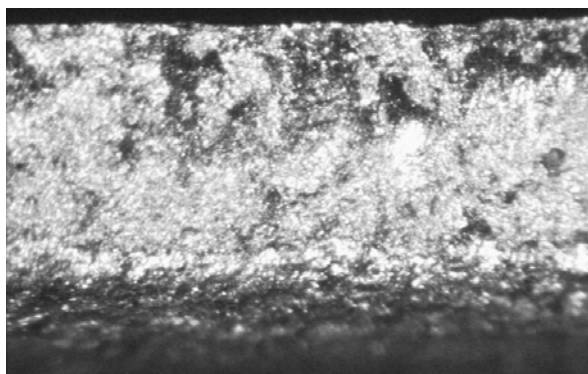


Bild 6-16: Typische Schnittflächen: (a) S235G2T; 1,0mm / (b) AlMgSi0,5 2,2mm (nicht maßstäblich)



**S235G2T; 1,0 mm**

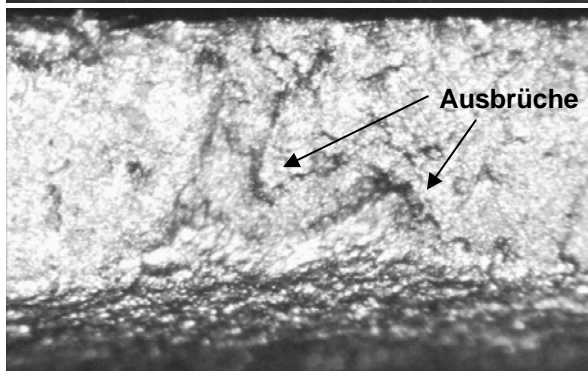
IH-EAS 5

Schneidinnendruck  $p_{is} = 1045$  bar

Höhe des Trennbereiches  $h_T = 0,56$  mm

Einzughöhe  $h_E = 0,42$  mm

⇒ Trennfläche stark zerklüftet



**S235G2T; 1,0 mm**

IH-EAS 8

Schneidinnendruck  $p_{is} = 785$  bar

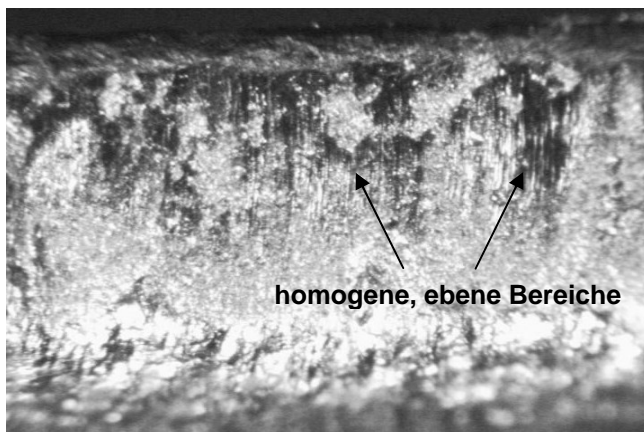
Höhe des Trennbereiches  $h_T = 0,47$  mm

Einzughöhe  $h_E = 0,51$  mm

⇒ Trennfläche sehr stark zerklüftet, z. T.  
Ausbrüche

Bild 6-17: Schnittflächen S235G2T; 1,0 mm

In Bild 6-17 sind die Schnittflächen für den Werkstoff S235G2T; 1,0 mm für beide Schneidnutbreiten charakterisiert. Die Oberflächenrauigkeit beider Trennflächen ist verhältnismäßig groß. Während sich die Trennfläche beim IH-EAS mit einer Schneidnutbreite von 5 mm trotzdem noch homogen darstellt, treten bei einer Schneidnutbreite von 8 mm Ausbrüche senkrecht zur Schnittkante auf. Die stärkere Umformung des Materials bei dieser Schneidnutbreite sowie die damit in der Schnittzone auftretenden, größeren Zugspannungsanteile führen somit zu einer inhomogeneren Trennfläche. Die in Bild 6-18 dargestellte Schnittfläche des Werkstoffes S235G2T; 1,5 mm weist einen Trennbereich auf, der zur Rohraußenseite hin (Gratseite) vergleichsweise eben und homogen ist. Zum Einzugsbereich hin ist die Trennfläche dagegen durch eine hohe Oberflächenrauigkeit gekennzeichnet. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die homogenen Bereiche zur Rohraußenseite hin durch eine Wechselwirkung mit dem Restteil im Moment der Werkstofftrennung entstehen.



**S235G2T; 1,5 mm**

IH-EAS 5

Schneidinnendruck  $p_{is} = 1650$  bar

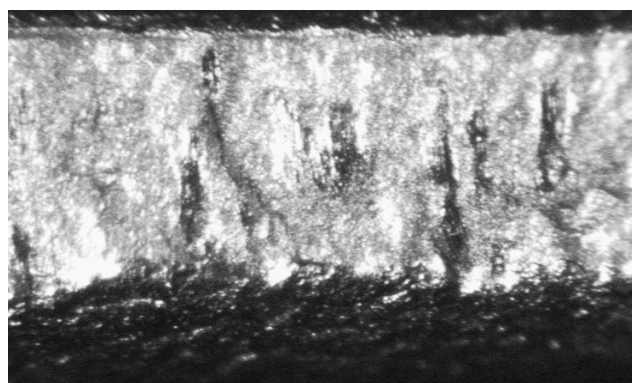
Höhe des Trennbereiches  $h_T = 0,82$  mm

Einzughöhe  $h_E = 0,66$  mm

⇒ Trennfläche teilweise mit hoher  
Oberflächenrauigkeit (Einzugseite),  
teilweise aber auch mit ebenen  
Bereichen (Gratseite)

Bild 6-18: Schnittfläche S235G2T; 1,5 mm

Aufgrund der hohen Festigkeiten sind für das Innenhochdruckabschneiden von Rohren aus X5CrNi18-10 vergleichsweise hohe Schneidinnendrucke notwendig. Im einachsigen Zugversuch ist das Bruchverhalten dieses Material dadurch gekennzeichnet, dass die Werkstofftrennung zwar bei hohen Dehnungen, jedoch bereits kurz nach dem Erreichen der Zugfestigkeit auftritt. Es kommt nur zu einer leichten Einschnürung bevor der Gewaltbruch schlagartig eintritt. Übertragen auf die Verhältnisse beim Innenhochdruckabschneiden bedeutet das, dass es zu einer starken Einformung des Materials in die Schneidnut kommt. Beim Erreichen des Schneidinnendruckes reißt der Restquerschnitt ab, was zu unebenen, z.T. zerklüfteten Trennflächen, stellenweise mit Ausbildung von Ausbrüchen bzw. Ecken auf der Trennfläche, führt. Die Darstellung der Schnittflächen für den Werkstoff X5CrNi18-10 in Bild 6-19 zeigt die Ausbrüche auf der Trennfläche besonders deutlich ausgeprägt bei der Wanddicke von 1,5 mm.



**X5CrNi18-10; 1,0 mm**

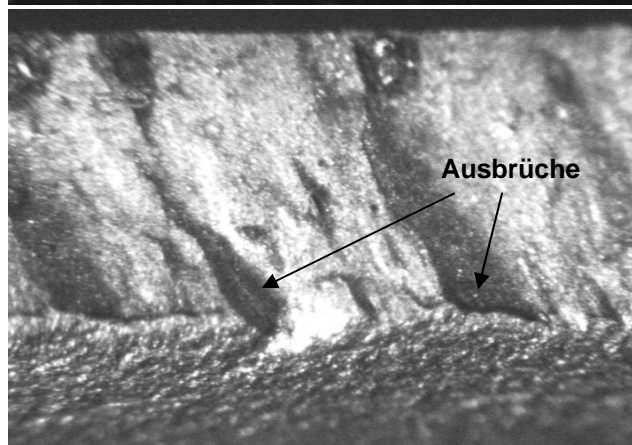
IH-EAS 8

Schneidinnendruck  $p_{is} = 1395$  bar

Höhe des Trennbereiches  $h_T = 0,62$  mm

Einzughöhe  $h_E = 0,37$  mm

⇒ Trennfläche uneben, z.T. „verschmierte“  
Bereiche (im Bild dunkel)



**X5CrNi18-10; 1,5 mm**

IH-EAS 8

Schneidinnendruck  $p_{is} = 2000$  bar

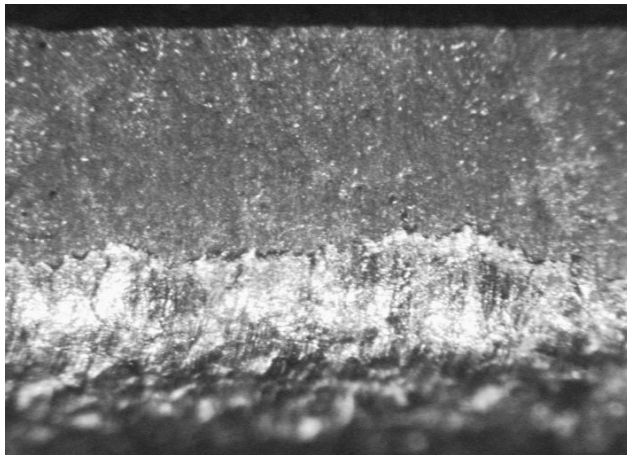
Höhe des Trennbereiches  $h_T = 0,65$  mm

Einzughöhe  $h_E = 0,78$  mm

⇒ Trennfläche sehr stark zerklüftet,  
keine ebene Bruchfläche,  
Ausbrüche auf der Einzugsseite

Bild 6-19: Schnittflächen X5CrNi18-10; 1,0 mm und 1,5 mm

Auch bei den Aluminiumlegierungen sind die Schnittflächen der mit geringer Schneidnutbreite (IH-EAS 5) getrennten Rohre insgesamt homogener. Bild 6-20 zeigt die typischen Schnittflächen des Rohres AlMg0,7Si; 2,0 mm. Die Trennfläche beim IH-EAS 5 stellt sich zwar als typische Bruchfläche dar, ist jedoch sehr gleichmäßig ausgeprägt. Der Übergang vom Trenn- zum Einzugsbereich ist unregelmäßig. Bei größerer Schneidnutbreite (IH-EAS 8) nehmen die Rauigkeit der Trennfläche und die Unregelmäßigkeit des Überganges vom Trenn- zum Einzugsbereich zu.



**AIMg0,7Si; 2,0 mm**

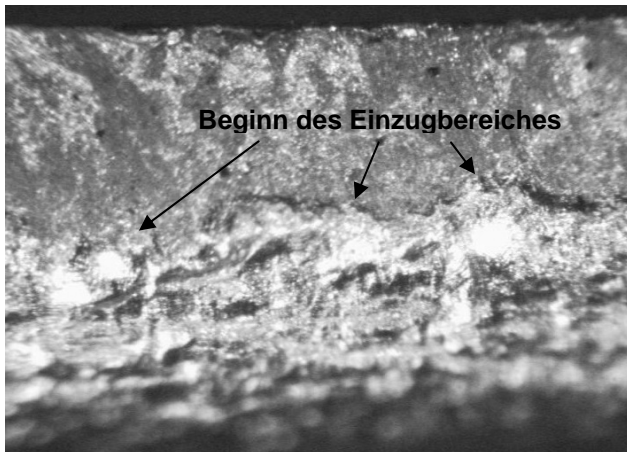
IH-EAS 5

Schneidinnendruck  $p_{is} = 855$  bar

Höhe des Trennbereiches  $h_T = 1,01$  mm

Einzughöhe  $h_E = 0,78$  mm

⇒ ebene, homogene Trennfläche,  
unregelmäßiger Übergang von  
Trenn- zu Einzugsbereich



**AIMg0,7Si; 2,0 mm**

IH-EAS 8

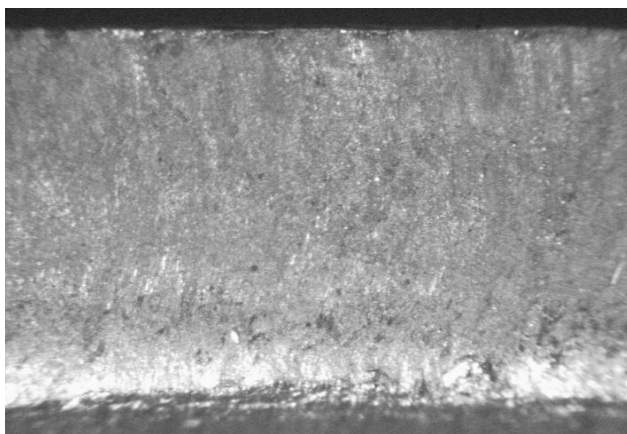
Schneidinnendruck  $p_{is} = 540$  bar

Höhe des Trennbereiches  $h_T = 0,88$  mm

Einzughöhe  $h_E = 0,91$  mm

⇒ inhomogene Trennfläche,  
sehr unregelmäßiger Übergang von  
Trenn- zu Einzugsbereich

Bild 6-20: Schnittflächen AIMg0,7Si; 2,0 mm



**AISi1MgMn; 2,2 mm**

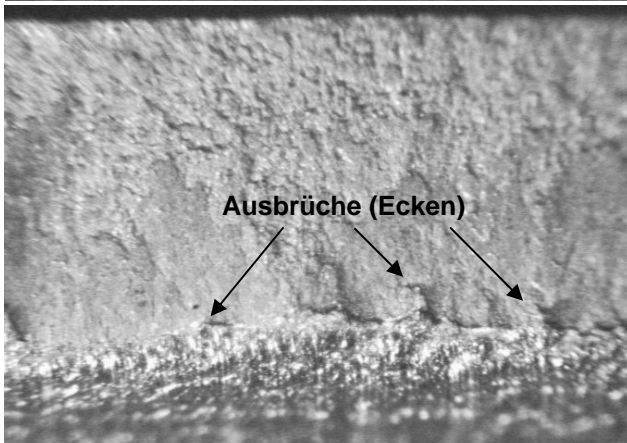
IH-EAS 5

Schneidinnendruck  $p_{is} = 1445$  bar

Höhe des Trennbereiches  $h_T = 1,76$  mm

Einzughöhe  $h_E = 0,38$  mm

⇒ sehr homogene, ebene Trennfläche,  
leicht unregelmäßiger Übergang von  
Trenn- zu Einzugsbereich



**AISi1MgMn; 2,2 mm**

IH-EAS 8

Schneidinnendruck  $p_{is} = 880$  bar

Höhe des Trennbereiches  $h_T = 1,28$  mm

Einzughöhe  $h_E = 0,86$  mm

⇒ homogene Trennfläche mit erhöhter  
Rauigkeit,  
unregelmäßiger Übergang von Trenn- zu  
Einzugsbereich mit Ausbrüchen am  
Übergang zum Einzugsbereich

Bild 6-21: Schnittflächen AISi1MgMn; 2,2 mm

Ähnliche Aussagen wie für die Legierung AlMg0,7Si gelten auch für die Schnittflächenausprägung des Werkstoffes AlSi1MgMn. Bei einer Schneidnutbreite von 5 mm wird eine sehr homogene und ebene Trennfläche erreicht, die 80% der Ausgangswanddicke einnimmt. Der Spannungszustand, der zu dieser Schnittflächenausprägung führt, ist durch vergleichsweise geringe Zugspannungsanteile gekennzeichnet. Bei größerer Schneidnutbreite (IH-EAS 8) und damit größeren Zugspannungsanteilen ist die Trennfläche zwar auch verhältnismäßig homogen, weist jedoch eine deutlich erhöhte Rauigkeit auf. Am Übergang zum Einzugbereich sind Materialausbrüche erkennbar. Bild 6-22 zeigt eine Gegenüberstellung der Bruchflächen der Werkstoffe AlMg3,5Mn und AlMg3Mn, deren mechanische Kennwerte ähnlich sind und die auch bezüglich der Schneidinnendrucke keine deutlichen Unterschiede aufweisen. Trotzdem ist die Trennfläche des AlMg3Mn etwas gleichmäßiger als die des AlMg3,5Mn und weist eine geringere Rauigkeit auf.

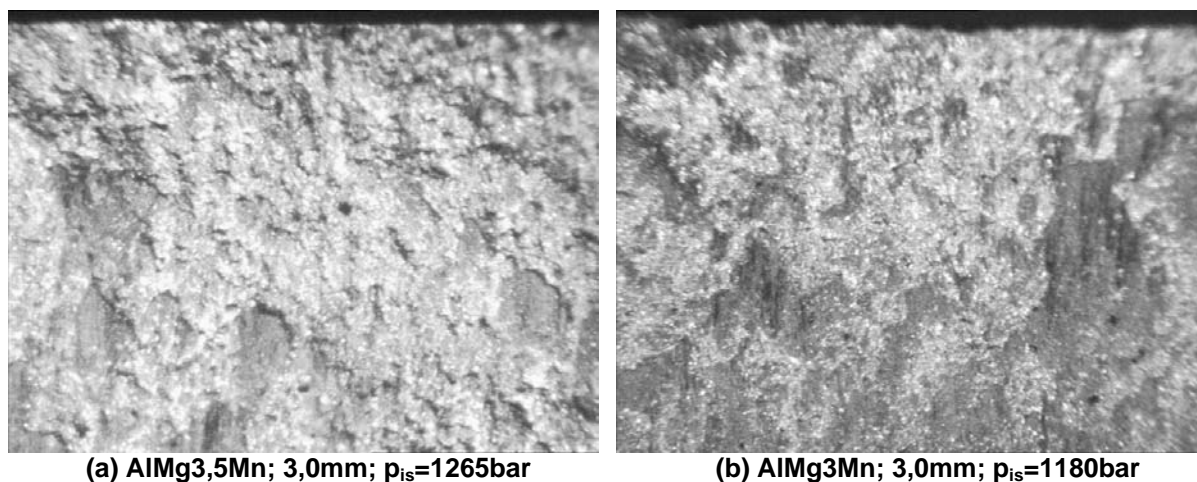


Bild 6-22: Schnittflächen AlMg3,5Mn und AlMg3Mn; 3,0 mm

Die Ausführungen zu den Schnittflächenausprägungen beim IHAS von unverformten Rohren zeigen deutlich den unmittelbaren Einfluss der Schneidbedingungen auf das Schneidergebnis. Neben dem Werkstoff selbst wirkt sich die Schneidnutbreite maßgeblich auf die Schnittflächenqualität und insbesondere auf die Homogenität der Trennfläche aus. Das Innenhochdruckabschneiden unter größeren Zugspannungsanteilen, d.h. bei größerer Schneidnutbreite, führt zu unregelmäßigeren Trennflächen sowie teilweise Ausbrüchen auf der Trennfläche. Somit besteht die Möglichkeit, die Schnittflächenqualität über die Schneidbedingungen, vorzugsweise über die Schneidnutbreite zu beeinflussen. Da jedoch, wie bereits gezeigt wurde, der Trennvorgang beim Innenhochdruckabschneiden auch maßgeblich durch die Zugspannungsanteile bestimmt wird, kann die Schnittflächenqualität nur begrenzt verbessert werden.

## 6.4 Prozesssimulation

Aufgrund der immer kürzeren Produktzyklen besteht die Forderung nach schneller und effektiver Umsetzung von Produktideen in die industrielle Praxis. Dazu müssen bestehende Verfahrensprinzipien technologisch determiniert und Verfahrensgrenzen ermittelt werden. Dies ist auf der Basis von experimentellen Untersuchungen möglich, erfordert jedoch in der Regel einen hohen technischen und zeitlichen Aufwand. Zudem kann mit experimentellen Untersuchungen meist nur ein begrenztes Parameterfeld abgedeckt werden.

Inzwischen hat sich in der Blechumformung die Methode der Finiten Elemente als ein wesentliches Werkzeug bei der Auslegung von Umformprozessen und der Ermittlung von Verfahrensgrenzen etabliert. Mit FEM-Programmen, speziell für die Simulation von Umformprozessen, wie beispielsweise PAM-STAMP™ und AutoForm® können Aussagen zur Machbarkeit und den Verfahrensgrenzen, zum Verfahrensablauf sowie den Endteileigenschaften getroffen und anschaulich visualisiert werden /68/-/71/.

Hauptziel der FE-Simulation im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung des Umformvorganges beim Innenhochdruckabschneiden und des daraus resultierenden Spannungs- und Formänderungszustandes als Voraussetzung für die Werkstofftrennung. Daraus können wichtige Erkenntnisse zum Ablauf des Innenhochdruckabschneidens abgeleitet und die Ausführungen zur Modellierung des Schneidvorganges ergänzt werden. Das Einsetzen und der Verlauf der Werkstofftrennung sollen nicht betrachtet werden. Trotzdem wird im Folgenden die Bezeichnung FE-Simulation des Innenhochdruck-Einfachabschneidens verwendet. Für die FE-Simulation des Umformvorganges beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden wird bewusst ein 3D-Schalenmodell herangezogen. Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass das Innenhochdruckabschneiden immer in enger Verbindung mit einem Umformvorgang steht, der weitestgehend außerhalb der eigentlichen Schnittzone abläuft. Beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden von unverformten Rohren ist es die Einformung des Materials in den Schneidnutraum. Dieser Umformvorgang, mit dem die Voraussetzungen für die nachfolgende Werkstofftrennung geschaffen werden, lässt sich mit einem in der Blechumformung bewährten 3D-Schalenmodell erfassen. Beim Innenhochdruckabschneiden von innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen (z.B. Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden) kommt zusätzlich ein Umformvorgang zur Herstellung der Werkstückform hinzu, der in der Regel ebenfalls durch eine FE-Simulation unter Verwendung von 3D-Schalenmodellen beschrieben wird. Zur Darstellung der vor dem Trennvorgang ablaufenden Umformvorgänge und damit der vorliegenden Schneidbedingungen ist es sinnvoll auf ein 3D-Schalenmodell zurückzugreifen. Für die Analyse des Trennvorganges beim mechanischen Schneiden existieren Ansätze, denen ein 2D-Volumenmodell zugrunde liegt /72/-/75/. Auf eine Analyse des Trennvorganges beim Innenhochdruckabschneiden unter

Verwendung eines 2D-Volumenmodells soll jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet werden. Um den Trennvorgang beim Innenhochdruckabschneiden zu simulieren, sind umfangreiche zusätzliche Untersuchungen zum Trennmechanismus, zur Generierung eines geeigneten Versagenskriteriums (Erfüllung der Trennbedingung) sowie zum Einfluss dynamischer Effekte beim Trennvorgang sowie ihre Berücksichtigung in der FE-Simulation notwendig. Unter Berücksichtigung dieser Ausführungen wird für die FE-Simulation des Umformvorganges beim Innenhochdruckabschneiden das Programmpaket PAM-STAMP<sup>TM</sup>, ein speziell für die Blechumformung entwickeltes FEM-Programm, benutzt. Für die Rechnungen wird das Schalenelement vom Typ 107 verwendet, welches das Fließkriterium nach HILL /76/ berücksichtigt.

Zur Sicherung der Qualität einer Simulation ist es erforderlich, das Werkstoffverhalten, den Prozessablauf sowie die Reibungsverhältnisse praxisnah zu erfassen. Für die Beschreibung des Werkstoffverhaltens werden die ermittelten Ausgangseigenschaften in Form ausgewählter mechanischer Kennwerte und Fließkurven herangezogen (Abschnitt 5.4.1). Das Werkzeug wird als starr angenommen. Die Beschreibung der tribologischen Bedingungen ist bei der FE-Simulation des Innenhochdruck-Einfachabschneidens von geringer Bedeutung, da zwischen Werkstück und Werkzeug nahezu keine Relativbewegung auftritt. Es wird Coulomb'sche Reibung mit einem Reibwert von 0,05 angenommen.

Das FE-Modell für die Simulation des Umformprozesses beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden ist ausgehend von den Versuchswerkzeugen (IH-EAS 5, IH-EAS 8) für verschiedene Schneidnutgeometrien sowie die Werkstoffe DC04; 1,0 mm, S235G2T; 1,0 mm und X5CrNi18-10; 1,0 mm als Schalenmodell erzeugt worden (Bild 6-23). In Tabelle 6-8 sind die maßgeblichen geometrischen Parameter für die Werkzeugmodellierung angegeben.

Tabelle 6-8: Maßgebliche Parameter der Werkzeugmodelle für die Prozesssimulation des IH-EAS

	<b>IH-EAS 5</b>	<b>IH-EAS 8</b>	<b>IH-EAS 12</b>
<b>Schneidnutbreite <math>b_N</math></b>	5,0 mm	8,0 mm	12,0 mm
<b>Schneidnuttiefe <math>t_N</math></b>	2,5 mm	4,0 mm	6,0 mm
<b>Radius der Biegekante <math>r_B</math></b>	2,5 mm	3,0 mm	3,0 mm
<b>Radius der Schneidkante <math>r_S</math></b>	0 mm	0 mm	0 mm
<b>Anwendung in</b>	Simulation und Experiment	Simulation und Experiment	Simulation

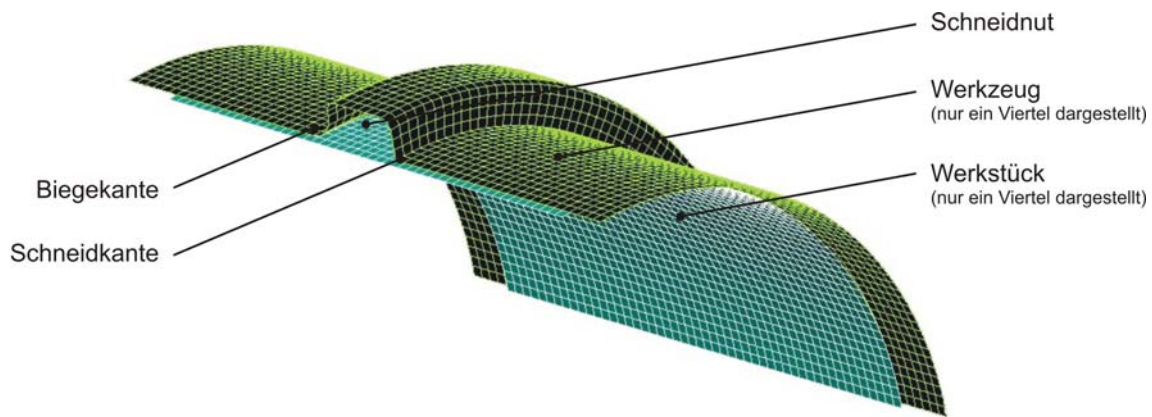
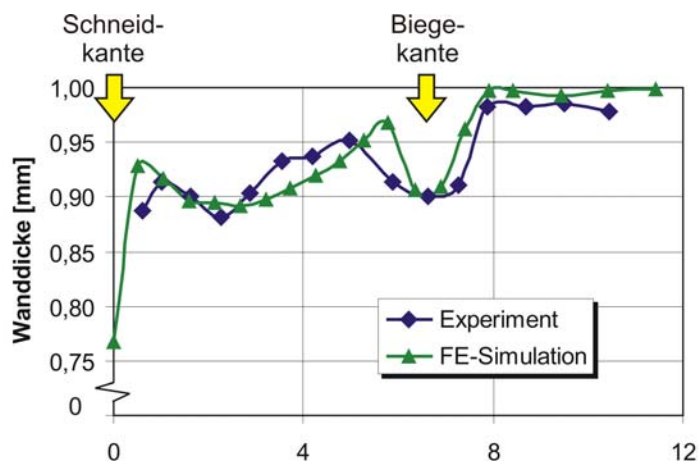


Bild 6-23: FE-Modell für das Innenhochdruck-Einfachabschneiden

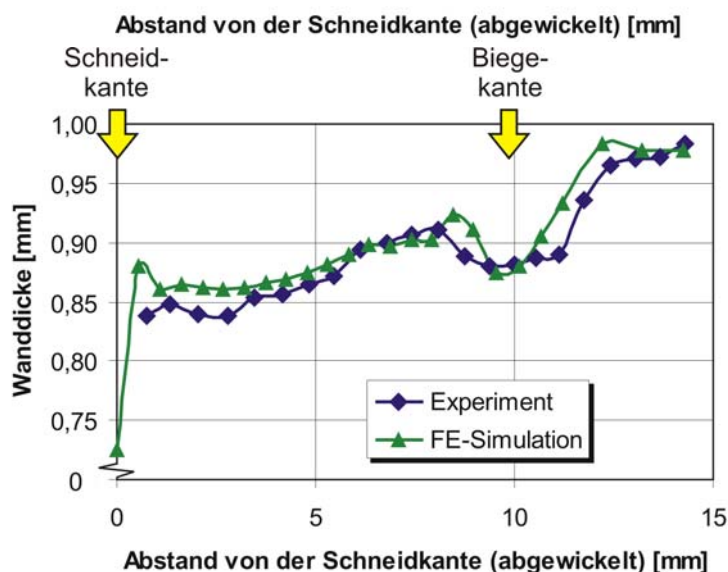
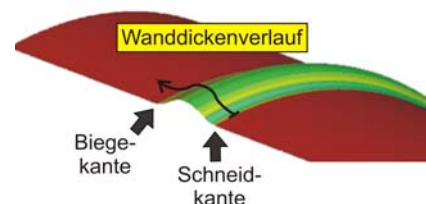
Zunächst werden die beiden Werkzeuggeometrien IH-EAS 5 und IH-EAS 8 betrachtet, die auch für die experimentellen Untersuchungen zur Anwendung kommen. Für diese Modelle kann der experimentell ermittelte Schneidinnendruck als Abbruchkriterium herangezogen werden. Unter Ausnutzung der Symmetrie des Werkstückes und des Werkzeuges wird nur ein Viertel des gesamten Werkstückes berechnet, so dass sowohl Rechenzeit als auch Speicherplatz reduziert werden können. Um die Strategie der Speicherplatz- und Rechenzeitminimierung konsequent durchzusetzen, wird die automatische Netzverfeinerung des Programmpaketes PAM-STAMP<sup>TM</sup> mit einem Verfeinerungsschritt verwendet.

Zur Verifizierung des FE-Modells wird der Wanddickenverlauf über die in den Schneidnutraum geformten Werkstückbereiche herangezogen. In Bild 6-24 sind experimentell und numerisch ermittelte Wanddickenverläufe im Bereich der Schneidnut für den Werkstoff S235G2T; 1,0 mm bei Verwendung der Schneidnutbreiten von  $b_N = 5$  mm bzw.  $b_N = 8$  mm dargestellt. Dabei wird eine gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation deutlich. Unmittelbar an der Schneidkante konnte die Wanddicke experimentell nicht bestimmt werden. Daran schließt sich der Einzugsbereich mit verringerten Wanddicken an.





Werkstoff: S235G2T  
Wanddicke: 1,0 mm  
Schneidnutbreite: 5 mm  
Innendruck: 1045 bar



Werkstoff: S235G2T  
Wanddicke: 1,0 mm  
Schneidnutbreite: 8 mm  
Innendruck: 785 bar

Bild 6-24: Vergleich experimentell und numerisch ermittelter Wanddickenverläufe (S235G2T; 1,0 mm)

Bild 6-25 zeigt die numerisch ermittelte Verteilung der Vergleichsspannung beim Erreichen des Schneidinnendruckes für den Werkstoff S235G2T; 1,0 mm bei einer Schneidnutbreite von 8 mm. Das Maximum der Vergleichsspannung wird in der Schnittzone erreicht, während in der Einformzone deutlich geringere Vergleichsspannungen vorliegen. Die minimale Wanddicke in der Schnittzone beträgt 0,725 mm. Aufgrund der Verwendung eines Schalenmodells resultiert die Verringerung der Wanddicke nur aus dem Umformvorgang, ein Eindringen der Schneidkante in das Material wird nicht berücksichtigt.

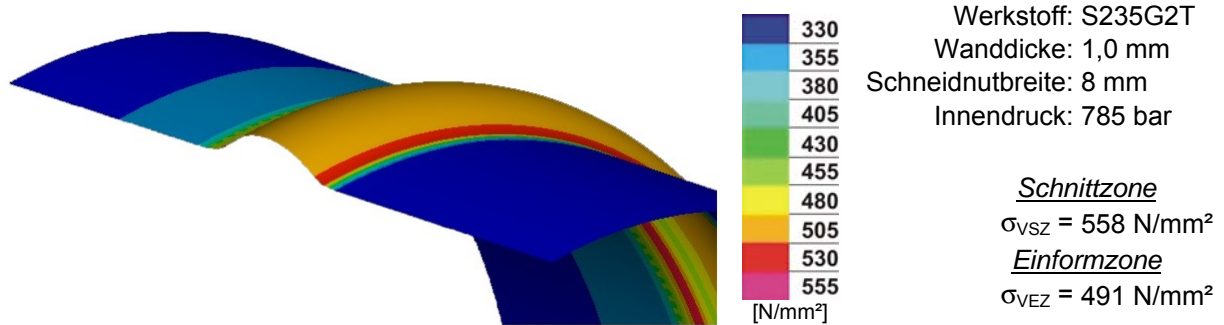


Bild 6-25: Numerisch ermittelte Verteilung der Vergleichsspannung beim IH-EAS  
(S235G2T; 1,0 mm;  $p_{is} = 785 \text{ bar}$ ;  $b_N = 8 \text{ mm}$ )

Auch das Maximum der größten Hauptnormalspannung wird beim S235G2T; 1,0 mm und einer Schneidnutbreite von 8 mm in der Schnittzone erreicht. In Bild 6-26 ist die numerisch ermittelte Verteilung der jeweils größten Hauptnormalspannung dargestellt. Angegeben ist dabei nur der Wert der Spannung ohne Berücksichtigung der Wirkrichtung. In der Schnittzone wirkt die größte Hauptnormalspannung als axiale Zugspannung. In der Mitte der Einformzone (Schneidnut) dagegen ist die größte Hauptnormalspannung eine tangentielle Zugspannung.

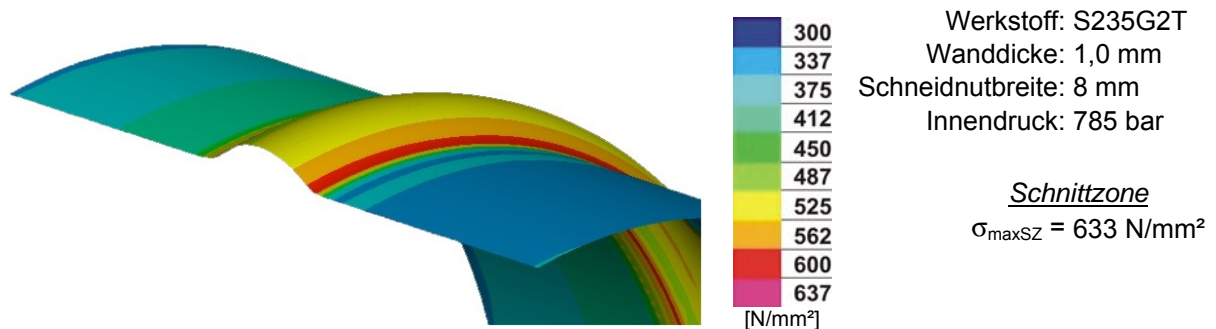


Bild 6-26: Numerisch ermittelte Verteilung der größten Hauptnormalspannung beim IH-EAS  
(S235G2T; 1,0 mm;  $p_{is} = 785 \text{ bar}$ ;  $b_N = 8 \text{ mm}$ )

Die numerisch ermittelte Verteilung des Vergleichsumformgrades für den S235G2T; 1,0 mm bei Verwendung einer Schneidnutbreite von 8 mm ist in Bild 6-27 angegeben. Das Maximum befindet sich analog zu den Darstellungen in Bild 6-25 und Bild 6-26 im Bereich der Schnittzone. In der Einformzone liegen deutlich geringere Vergleichsumformgrade vor.

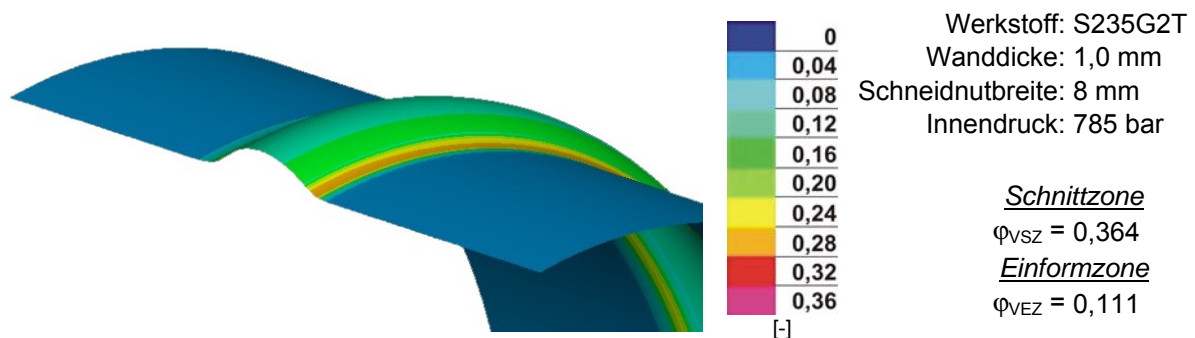


Bild 6-27: Numerisch ermittelte Verteilung des Vergleichsumformgrades beim IH-EAS  
(S235G2T; 1,0 mm;  $p_{is} = 785 \text{ bar}$ ;  $b_N = 8 \text{ mm}$ )

Eine entscheidende Wirkung auf den Trennvorgang beim Innenhochdruckabschneiden hat die axiale Zugspannung in der Schnittzone. Da in diesem Bereich nahezu keine Aufweitung des Rohres möglich ist, dominiert diese Komponente den Spannungszustand und bestimmt somit auch das Einsetzen der Werkstofftrennung. Bild 6-28 zeigt für den DC04; 1,0 mm die Verteilung der größten Hauptnormalspannung. Gegenüber dem S235G2T; 1,0 mm (633 N/mm<sup>2</sup>) liegt bei Erreichen des Schneidinnendruckes in der Schnittzone mit 550 N/mm<sup>2</sup> eine geringere axiale Zugspannung vor. Die äquivalente Darstellung für den X5CrNi18-10; 1,0 mm in Bild 6-29 zeigt die mit 1105 N/mm<sup>2</sup> deutlich größeren, axialen Zugspannungen in der Schnittzone.

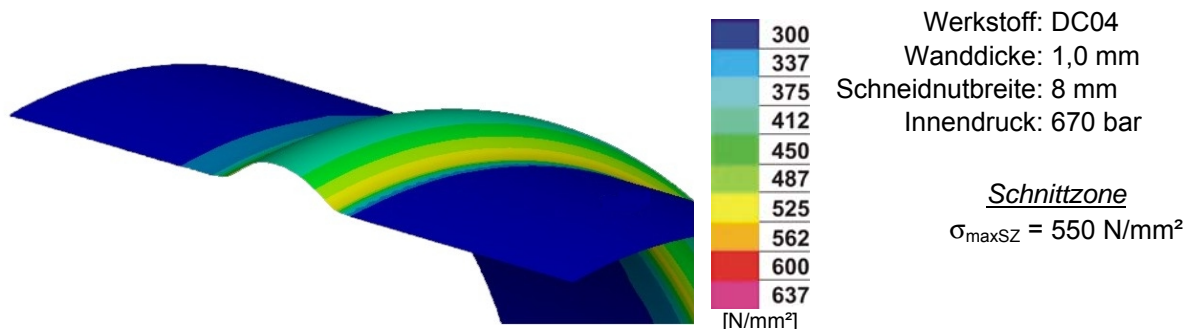


Bild 6-28: Numerisch ermittelte Verteilung der größten Hauptnormalspannung beim IH-EAS (DC04; 1,0 mm;  $p_{is} = 670 \text{ bar}$ ;  $b_N = 8 \text{ mm}$ )

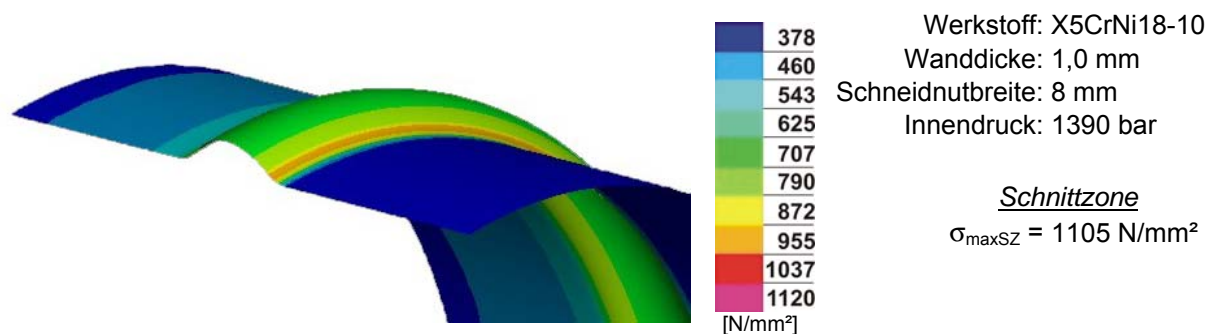


Bild 6-29: Numerisch ermittelte Verteilung der größten Hauptnormalspannung beim IH-EAS (X5CrNi18-10; 1,0 mm;  $p_{is} = 1390 \text{ bar}$ ;  $b_N = 8 \text{ mm}$ )

Qualitativ ähnliche Simulationsergebnisse ergeben sich bei der Anwendung der Schneidnutbreiten von 5 und 12 mm. Dabei wird deutlich, dass in der Schnittzone bei Erreichen des Schneidinnendruckes für einen Werkstoff unabhängig von der Schneidnutbreite nahezu gleiche Werte für die Vergleichsspannung sowie die größte Hauptnormalspannung erreicht werden. Markante Unterschiede ergeben sich jedoch im Vergleichsumformgrad, der sich im Bereich der Schnittzone einstellt. Dieser nimmt mit zunehmender Schneidnutbreite deutlich zu (Bild 6-30). In Tabelle 6-9 sind für die Schnittzone die Simulationsergebnisse Vergleichsspannung, größte Hauptnormalspannung, Vergleichsumformgrad sowie Blechdicke tabellarisch zusammengefasst.

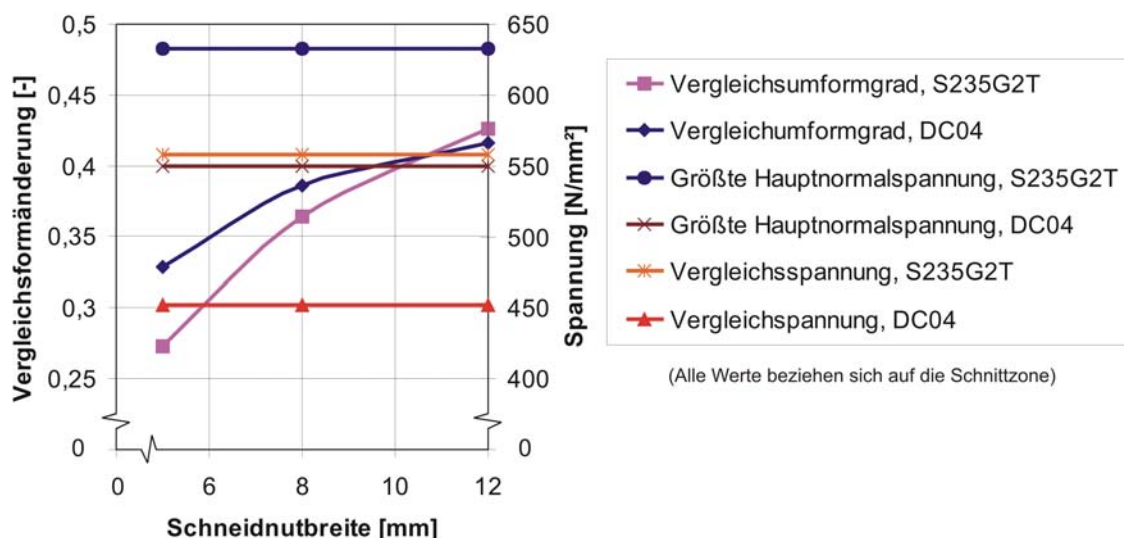


Bild 6-30: Simulationsergebnisse in der Schnittzone in Abhängigkeit von der Schneidnutbreite

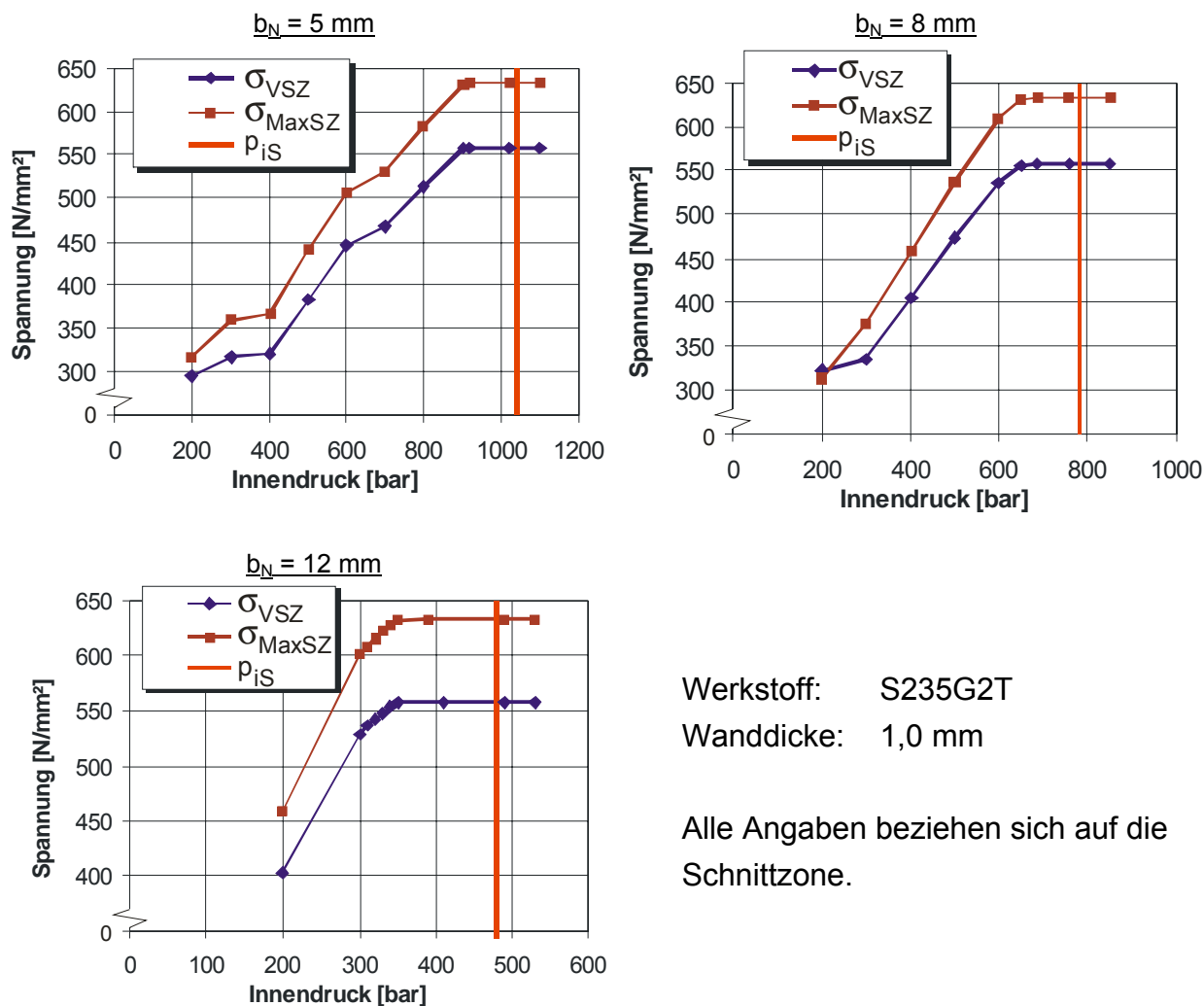
Tabelle 6-9: Übersicht der Simulationsergebnisse beim IH-EAS in der Schnittzone

Material, Wanddicke		Schneidnut	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\phi_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	s [mm]
S235G2T	1,0 mm	IH-EAS 5	558	0,273	633	0,785
		IH-EAS 8	558	0,364	633	0,725
		IH-EAS 12	558	0,426	633	0,687
DC04	1,0 mm	IH-EAS 5	452	0,329	550	0,748
		IH-EAS 8	452	0,386	550	0,711
		IH-EAS 12	452	0,416	550	0,692
X5CrNi18-10	1,0 mm	IH-EAS 5	1006	0,409	1119	0,694
		IH-EAS 8	993	0,376	1105	0,713
		IH-EAS 12	1006	1,113	1119	0,375

Die dargestellten Ergebnisse der Prozesssimulation des Innenhochdruck-Einfachabschneidens beziehen sich ausschließlich auf den Umformvorgang vor der Werkstofftrennung. Damit kann der sich einstellende Spannungs- und Formänderungszustand beschrieben werden. Im Stand der Technik wurde gezeigt, dass es die umfassende Simulation von Trennvorgängen erforderlich macht, die Erfüllung der Trennbedingung und damit das Einsetzen der Werkstofftrennung zu beschreiben. Da die Schubbruchgrenze, bei der die Trennbedingung erfüllt wird, vom vorliegenden Spannungszustand abhängt und somit veränderlich ist, lässt sich dafür kein allgemeiner Werkstoffkennwert angeben.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Vergleichsspannung und die größte Hauptnormalspannung in der Schnittzone zunächst mit dem Innendruck ansteigen. Bei Überschreiten eines bestimmten Innendruckes bleiben beide Werte konstant, wobei der dafür notwendige Innendruck bei allen betrachteten Modellen 100 – 150 bar unter dem experimentell bzw. rechnerisch ermittelten Schneidinnendruck liegt (vgl. Bild 6-31). Prinzipiell wäre damit eine näherungsweise Abschätzung eines Versagenskriteriums möglich. Gesicherte Prozesssimulationen zum Innenhochdruck-

Einfachabschneiden, einschließlich des Trennvorganges, lassen sich auf dieser Basis nicht realisieren.



Werkstoff: S235G2T

Wanddicke: 1,0 mm

Alle Angaben beziehen sich auf die Schnittzone.

Bild 6-31: Numerisch ermittelte Vergleichsspannung und größte Hauptnormalspannung in der Schnittzone in Abhängigkeit vom Innendruck (S235G2T; 1,0 mm)

Die Ausführungen zur Prozesssimulation zeigen, dass der Umformvorgang beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden durch die FE-Simulation unter Nutzung eines Schalenmodells gut abgebildet werden kann. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Effekte, die in radialer Richtung auf das Werkstück wirken, wie das Eindringen der Schneidkante in das Werkstück nicht berücksichtigt werden. Die durch diesen Vorgang hervorgerufene Kerbwirkung in der Schnittzone (Vorschädigung) beeinflusst das Einsetzen der Werkstofftrennung sowie ihren Verlauf entlang der Schnittlinie. Um dies in die Simulation einzubeziehen, sind weiterführende Arbeiten unter Nutzung eines Volumenmodells notwendig. Ebenso muss in diese Arbeiten die Bestimmung eines gesicherten Kriteriums für die Erfüllung der Trennbedingung einbezogen werden. Speziell beim Innenhochdruckabschneiden kommen zusätzlich dynamische Effekte der Rissausbreitung nach dem Einsetzen der Werkstofftrennung hinzu, deren Einbeziehung in die FE-Simulation mit den gegenwärtig verfügbaren Programmpaketen für Umformsimulationen nicht möglich ist.

## 6.5 Innenhochdruck-Einfachabschneiden unter axialen Nachschiebekräften

Die bisherigen Betrachtungen zum Innenhochdruckabschneiden haben den maßgeblichen Einfluss der axialen Zugspannungsanteile auf den Ablauf und das Ergebnis des Trennvorganges gezeigt. Die Größe der axialen Zugspannungsanteile ergibt sich bei gegebenen Ausgangsteileigenschaften aus dem wirkenden Innendruck  $p_i$  und der Schneidnutbreite  $b_N$  bzw. aus der von diesen Größen abhängigen Einformung des Materials in die Schneidnut. Dabei wird vorausgesetzt, dass keine über die zur Erfüllung der Dichtfunktion an den Rohrenden hinausgehenden, axialen Kräfte aufgebracht werden und damit der Spannungszustand in der Schnittzone nicht beeinflusst wird.

An dieser Stelle soll exemplarisch die Wirkung der Einbringung von zusätzlichen axialen Kraftkomponenten zur gezielten Beeinflussung des Spannungszustandes im Schnittbereich dargestellt werden. Die Beanspruchungsverhältnisse entsprechen denen des Innenhochdruckweitstauchens /77/. Hier werden die Verfahrensgrenzen gegenüber dem Innenhochdruckweiten dadurch erweitert, dass sich durch gezieltes axiales Nachschieben von Werkstoff in die Umformzone die Streckziehbeanspruchung in Richtung Tiefziehbeanspruchung verschiebt /1/,/58/,/77/,/78/. Dadurch werden die Wanddickenverringeringung reduziert und der Versagensfall „Bersten“ zu größeren Umformgraden verschoben.

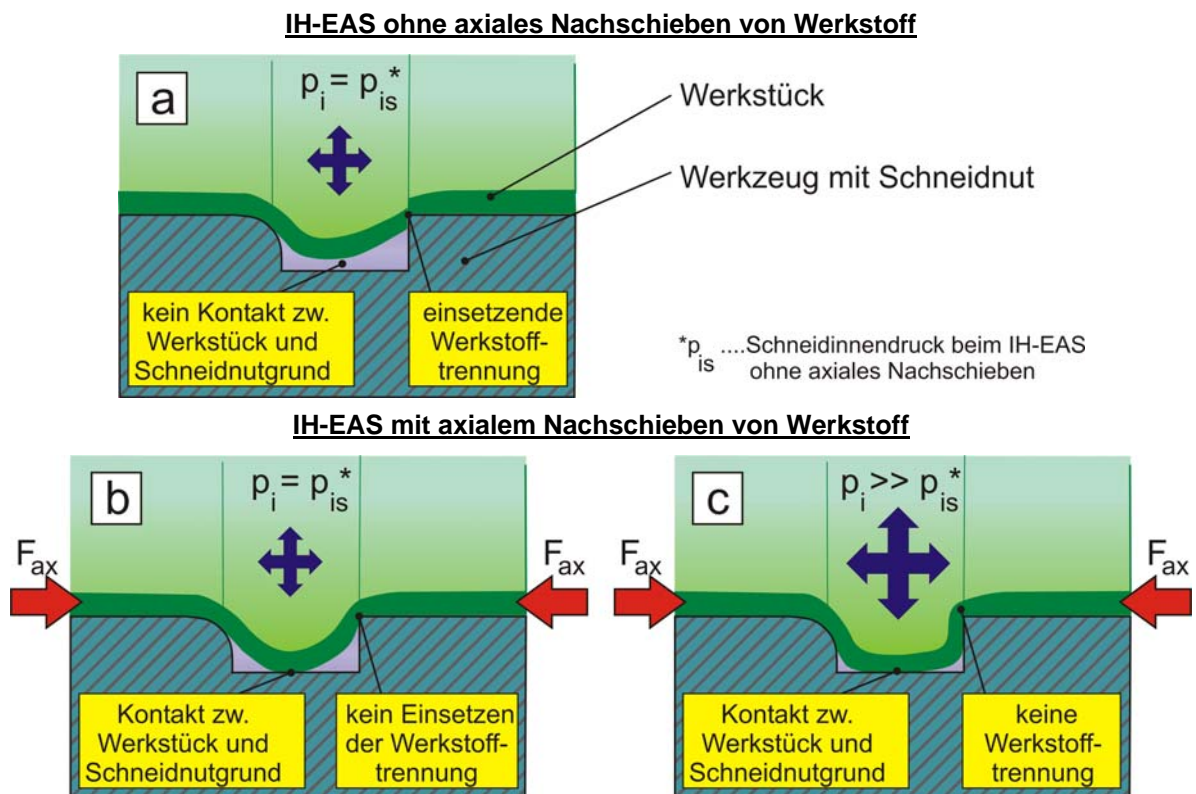
Der Trennvorgang beim Innenhochdruckabschneiden wird durch das Wirken von radialen Schubspannungen und stark ausgeprägten axialen Zugspannungen hervorgerufen (vgl. Abschnitt 4.5). Die durch das Nachschieben von Werkstoff eingebrachten axialen Druckspannungen wirken den axialen Zugspannungen entgegen. Der Einfluss des axialen Nachschiebens auf den Trennvorgang beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden wird an folgenden Rohrarten untersucht:

- S235G2T; 1,0 mm,
- AlMg0,7Si; 1,3 mm,
- AlMgSi0,5; 2,2 mm,
- AlMg3Mn; 3,0 mm.

Grundsätzlich ist es auch unter der Wirkung von zusätzlichen, axialen Nachschiebekräften möglich, das IH-EAS über dem kompletten Rohrumfang zu realisieren. Gegenüber dem IH-EAS ohne axiales Nachschieben kommt es dabei tendenziell zu einem leichten Anstieg der Schneidinnendrucke. Der Anstieg des Schneidinnendruckes kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen kommt es durch Materialeinbringung in die Umform- bzw. Schnittzone zu einer verringerten Wanddickenreduzierung, wie es für das Innenhochdruckweitstauchen typisch ist /77/. Dadurch vergrößert sich gegenüber dem IH-EAS ohne axiales Nachschieben die zu trennende Wanddicke in der Schnittzone. Zum anderen werden

durch das Einbringen der Druckspannungen in die Schnittzone die für das Innenhochdruckabschneiden typischen Zugspannungsanteile des Spannungszustandes reduziert, so dass sich gegenüber dem IH-EAS ohne axiales Nachschieben eine Scherbeanspruchung mit verringerten Zugspannungsanteilen ergibt.

Aufgrund der relativ geringen Volumina der Schneidnuten ist die Möglichkeit des axialen Nachschiebens von Werkstoff beim IH-EAS begrenzt. Bereits bei vergleichsweise geringen axialen Nachschiebewegen kommt es dazu, dass vor der Werkstofftrennung ein Kontakt zwischen Schneidnutgrund und Werkstück auftritt. Der Innendruck  $p_{is}^*$ , bei dem ohne axiales Nachschieben die Werkstofftrennung einsetzt (Bild 6-32 a), reicht dann nicht aus, um unter den gegebenen Bedingungen eine Werkstofftrennung herbeizuführen (Bild 6-32 b). Eine weitere deutliche Innendruckerhöhung führt in der Regel zur kompletten Ausformung der Schneidnutgeometrie, ohne dass eine Werkstofftrennung einsetzt (Bild 6-32 c). Unter bestimmten Bedingungen können unvollständige Werkstofftrennungen auftreten, worauf am Ende dieses Abschnittes detailliert eingegangen wird.



**Bild 6-32: Innenhochdruck-Einfachabschneiden ohne und mit axialem Nachschieben von Werkstoff**

Bild 6-33 zeigt die Entwicklung der Schneidinnendrucke bei zunehmenden axialen Nachschiebewegen. Angegeben sind jeweils die Werte, bei denen ein Abschneiden über dem kompletten Rohrumfang realisiert werden kann. Dabei wird zunächst der leichte Anstieg der Schneidinnendrucke mit dem axialen Gesamtnachschiebeweg deutlich. In Abhängigkeit von den Ausgangsteileigenschaften und der Schneidnut-

breite führt eine weitere Erhöhung des axialen Nachschiebeweges dazu, dass unter Berücksichtigung der maximalen Innendruckkapazität der IH-Anlage von 2000 bar keine Werkstofftrennung mehr hervorgerufen werden kann. In Bild 6-33 sind diese Messpunkte für jede Kurve mit Angabe des axialen Nachschiebeweges gesondert hervorgehoben, sie lassen sich jedoch aufgrund des nicht ermittelbaren bzw. nicht existierenden Schneidinnendruckes nicht konkret in das Diagramm eintragen. Vielmehr stellen die entsprechenden axialen Nachschiebewege unter den vorliegenden Bedingungen die Verfahrensgrenze dar ( $x_{ax-Grenz}$ ), bei denen das Innenhochdruck-Einfachabschneiden mit axialem Nachschieben nicht mehr realisierbar ist.

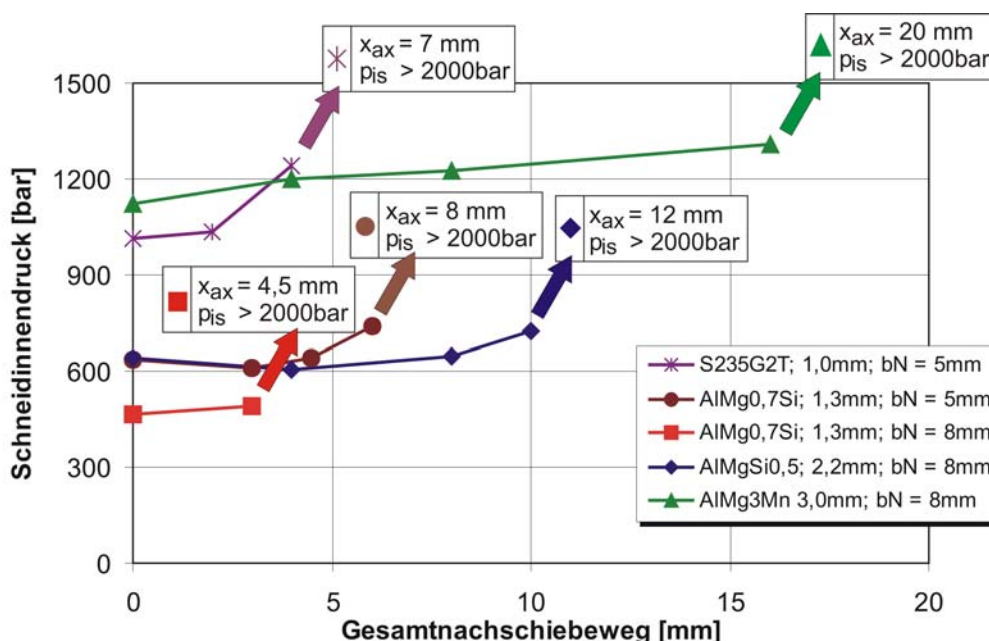


Bild 6-33: Anstieg des Schneidinnendruckes beim IH-EAS unter axialen Nachschiebekräften

In Tabelle 6-10 sind zur Verdeutlichung der Verfahrensgrenze für die jeweiligen Ausgangsteile und Schneidnutbreiten die maximal noch realisierbaren und die nicht mehr zur kompletten Werkstofftrennung führenden Axialwege angegeben. Zum Vergleich sind außerdem die Schneidinnendrucke für das IH-EAS ohne axiales Nachschieben eingefügt ( $x_{ax} = 0$  mm).

Tabelle 6-10: Übersicht der Ergebnisse zum IH-EAS mit Nachschieben, einschließlich Verfahrensgrenzen

Ausgangsteil	$b_N$ [mm]	$p_{is}$ bei $x_{ax} = 0$ mm [bar]	$x_{ax}$ [mm]	$p_{is}$ [bar]	$x_{ax-Grenz}$ [mm]
S235G2T; 1,0 mm	5,0	1015	4 mm	1240	6 mm
AlMg0,7Si; 1,3 mm	5,0	635	6 mm	740	8 mm
S235G2T; 1,0 mm	8,0	715	2 mm	>1000	4 mm
AlMg0,7Si; 1,3 mm	8,0	465	3 mm	490	5 mm
AlMgSi0,5; 2,2 mm	8,0	640	10 mm	725	12 mm
AlMg3Mn; 3,0 mm	8,0	1125	16 mm	1310	20 mm



Dass die Verfahrensgrenze nicht immer klar zwischen den Zuständen „vollständiges Abschneiden“ und „keine Werkstofftrennung“ liegen muss, zeigt das Beispiel des S235G2T; 1,0 mm bei einer Schneidnutbreite von 8 mm. Bei diesem Ausgangsteil und einem axialen Nachschiebeweg von 4 mm tritt eine unvollständige Werkstofftrennung über etwa 75% des Rohrumfanges auf (Bild 6-34). Der Schneidinnendruck liegt bei über 1000 bar gegenüber 715 bar beim IH-EAS ohne axiales Nachschieben. Das heißt, während der Ausformung des Materials in die Schneidnut kommt es zum Kontakt des Werkstückes mit dem Schneidnutgrund. Durch weitere Innendruck-erhöhung kann für diesen konkreten Fall noch bei einem Innendruck unterhalb von 2000 bar die Werkstofftrennung initiiert werden. Aufgrund der durch das axiale Nachschieben von Werkstoff reduzierten, axialen Zugspannungen bleibt die Werkstofftrennung jedoch unvollständig. Dieses Beispiel unterstreicht die Notwendigkeit von genügend großen axialen Zugspannungsanteilen beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden.

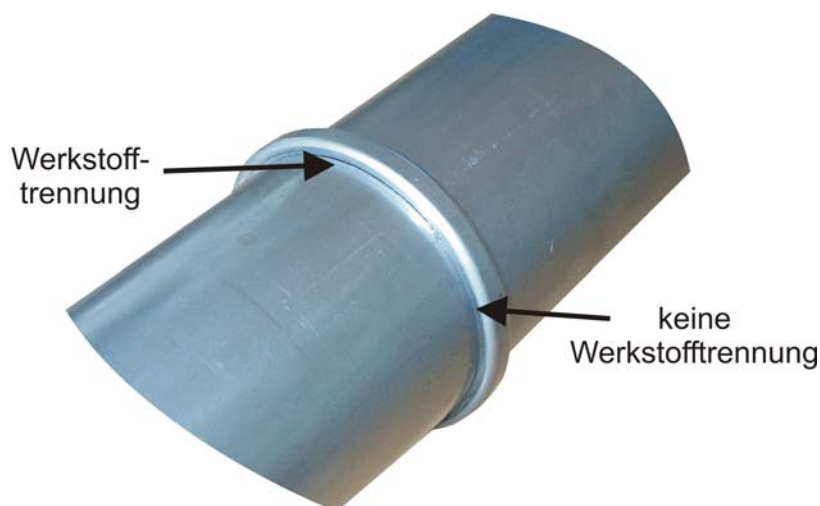


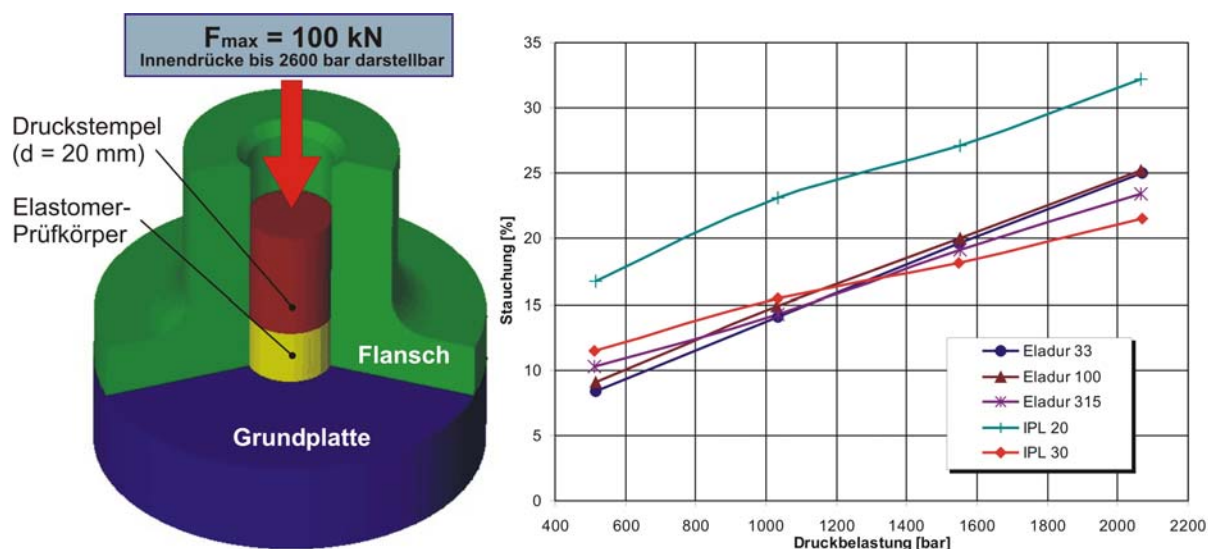
Bild 6-34: Unvollständige Werkstofftrennung beim IH-EAS mit axialem Nachschieben von Werkstoff

## 6.6 Innenhochdruck-Einfachabschneiden mit Elastomerabstützung

Das Innenhochdruck-Einfachabschneiden mit Elastomerabstützung ist eine Variation des Innenhochdruckabschneidens mit Schneidring. Dabei wird die Schneidnut ganz oder teilweise mit einem Elastomer ausgefüllt. Ziel ist es, die Bedingungen des Schneidvorganges bei konstanter Schneidnutgeometrie zu beeinflussen. Außerdem soll, im Hinblick auf die Kombination mit dem Innenhochdruckumformen, die Möglichkeit untersucht werden, die Schneidkante zumindest teilweise zu neutralisieren.

Das Verhalten von handelsüblichen Elastomeren unter Druckbelastung wird in der Regel durch Kennwerte beschrieben, die für die Anwendung des Elastomers als Abstützmaterial beim Innenhochdruckumformen bzw. Innenhochdruckschneiden nicht geeignet sind. Diese Kennwerte beschreiben das Druckverhalten unter der Voraussetzung, dass das Elastomer in Querrichtung frei fließen kann. Diese Bedingung ist bei der Anwendung als Abstützung beim Innenhochdruckabschneiden

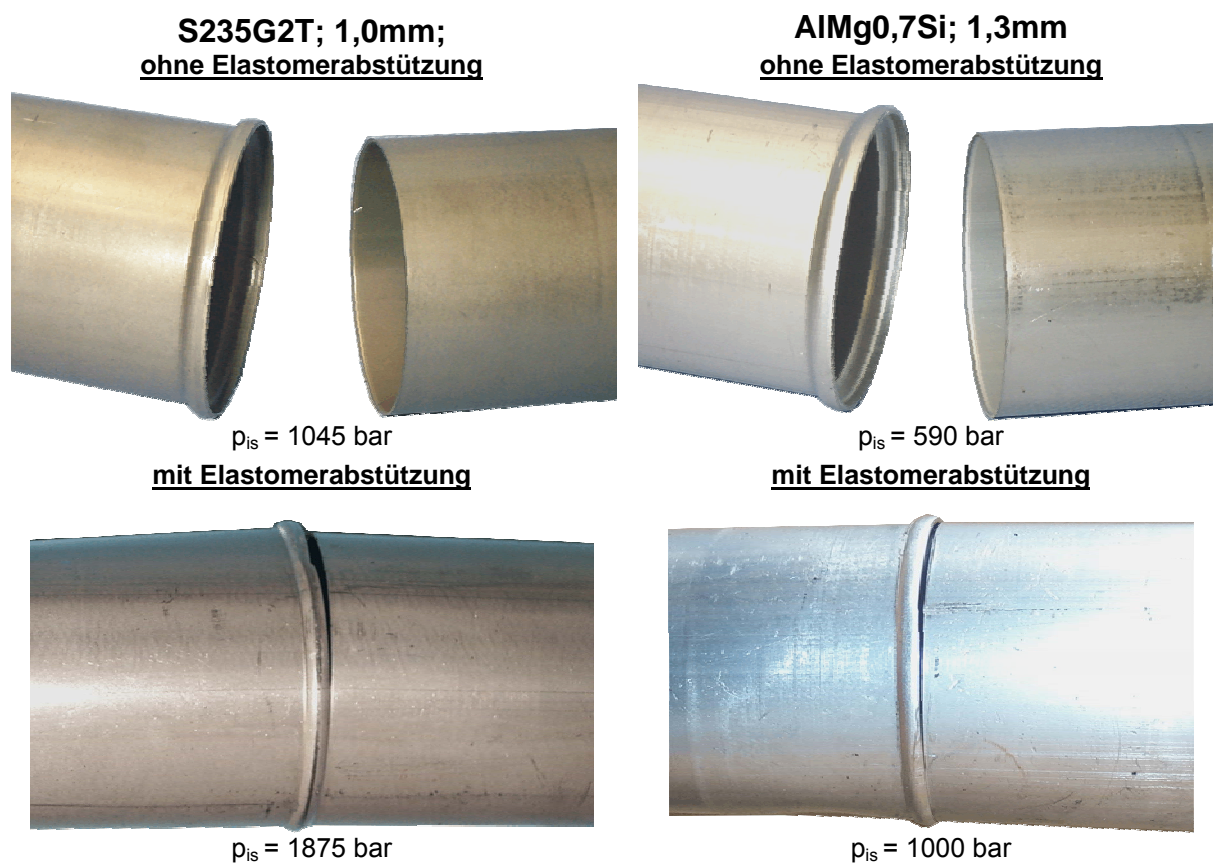
mit Schneidring und Schneidnut nicht gegeben, da das Elastomer hier unter Druckbelastung allseits umschlossen ist und nicht fließen kann. Eine speziell entwickelte Prüfapparatur, die in Bild 6-35 dargestellt ist, ermöglicht die Prüfung von Elastomer-materialien für den Gebrauch unter den beim Innenhochdruckabschneiden herrschenden Bedingungen. Besonders relevant ist dabei die Stauchung des Elastomer-materials in Abhängigkeit von der Belastung. Das ebenfalls in Bild 6-35 angegebene Diagramm verdeutlicht diese Abhängigkeit grafisch. Die Stauchungen steigen bei allen untersuchten Elastomeren linear mit der Druckbelastung an und liegen bei 2000 bar im Bereich von 20 bis 32%. Die Untersuchungen zeigen, dass handelsübliche Elastomere im für das Innenhochdruckumformen relevanten Druckbereich durchaus praktisch nutzbare Stauchungen aufweisen, wenn eine allseitige Kapselung des Elastomer-materials vorliegt. Für die Untersuchungen zum Innenhochdruckabschneiden mit Elastomerabstützung kommt das Elastomer-material Eladur 100 zur Anwendung.



**Bild 6-35: Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Elastomereigenschaften sowie Darstellung der Stauchung in Abhängigkeit der Druckbelastung**

Die Schneidnut des Werkzeuges zum Innenhochdruck-Einfachabschneiden (Bild 6-1) wird ringförmig mit Elastomer ausgefüllt, so dass bereits bei der Ausformung des Materials in die Schneidnut eine Abstützwirkung auftritt. Durch die Abstützung werden der vor der Werkstofftrennung ablaufende Umformvorgang und damit die Schneidbedingungen maßgeblich beeinflusst. Dies zeigt sich am deutlichsten in der Verlagerung der Werkstofftrennung zu deutlich höheren Schneidinnendrücken. Beim S235G2T; 1,0 mm kommt es mit Elastomerabstützung bei einem Innendruck von 1875 bar zur Werkstofftrennung, gegenüber 1045 bar ohne Elastomerabstützung. Ähnlich sind die Verhältnisse beim AlMg0,7Si; 1,3 mm. Hier beträgt der Schneidinnendruck 1000 bar gegenüber 590 bar ohne Elastomerabstützung. Der Spannungszustand in der Schnittzone ist durch verringerte axiale Zugspannungsanteile

gekennzeichnet, da durch das Elastomermaterial die Ausformung in die Schneidnut behindert wird. Gegenüber dem IH-EAS ohne Abstützung steigen deshalb die Schneidinnendrucke an. Trotz der höheren Schneidinnendrucke kann mit Elastomerabstützung aber kein komplettes Abtrennen des gesamten Rohrumfanges erzielt werden. Nachdem zwischen 50 und 75% des Rohrumfanges getrennt sind, kommt es zu keinem weiteren Fortschritt der Werkstofftrennung. Der Spannungszustand erfüllt zwar die Trennbedingung, so dass die Werkstofftrennung beginnt, eine dynamische Fortsetzung des Trennvorganges über den ganzen Umfang tritt jedoch nicht ein. Die Verhältnisse sind damit ähnlich wie beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden mit zu geringer Schneidnuttiefe (vgl. Abschnitt 6.1.2), wo teilweise auch unvollständige Werkstofftrennungen bei erhöhten Schneidinnendrucken auftraten.



**Bild 6-36: Einfachschneiden ohne und mit Elastomerabstützung**

Ein weiterer Aspekt beim IH-EAS mit Elastomerabstützung ist die komplette Ausfüllung der Schneidnut mit Elastomermaterial, die dazu führt, dass es unmittelbar mit dem Einsetzen der Werkstofftrennung zum Druckausgleich zwischen der Innen- und Außenseite des Werkstückes kommt. Der Druckausgleich kann nicht verzögert werden, da ein Abströmen des Innendruckmediums durch das Elastomermaterial verhindert wird. Die fehlende Druckdifferenz führt dazu, dass sich die Werkstofftrennung nicht fortsetzt und es kommt demzufolge nicht zu einem Abschneiden des gesamten Rohrumfanges (Bild 6-36). Die dargestellten Untersuchungsergeb-

nisse verdeutlichen, dass unter den vorliegenden Bedingungen der Einsatz einer Elastomerabstützung beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden nicht sinnvoll ist. Die bestehende Möglichkeit, den Schneidinnendruck bei gegebener Werkzeuggeometrie zu beeinflussen, kann aufgrund der Reduzierung der Zugspannungsanteile sowie der fehlenden Dynamik der Werkstofftrennung, die zum unvollständigen Abschneiden führen, nicht ausgenutzt werden.

### 6.7 Innenhochdruck-Einfachabschneiden von geschweißten Rohren

Bei den bisherigen Betrachtungen zum Innenhochdruck-Einfachabschneiden von unverformten Rohren wurden die Rohre als homogen angenommen, d.h. bis auf die Schwankungen der Wanddicke sowie der Werkstoffeigenschaften (Härte), die ausführlich in den Abschnitten 5.4.2 und 5.4.3 diskutiert wurden, liegen an allen Stellen entlang des Rohrumfanges identische Schneidbedingungen vor. Nunmehr werden längsnahtgeschweißte Rohre einbezogen, deren Schweißnaht nicht nachbehandelt wurde und die somit eine stoffliche und geometrische Inhomogenität im Rohrumfang darstellt. Als Werkstoffe kommen ZStE340 und DC04, jeweils in einer Wandstärke von 1,0 mm zur Anwendung.

Um die stoffliche Inhomogenität zu bewerten, wird die Härte nach Vickers als Maß herangezogen. Bild 6-37 zeigt die Härteverläufe für die beiden Rohrarten über dem Rohrumfang. Der Schweißnahtbereich des DC04 ist durch Schwankungen der Härtewerte gekennzeichnet, ohne dass ein deutlich ausgeprägtes Maximum auftritt. Beim ZStE340 dagegen ist die Härte im Schweißnahtbereich deutlich höher als im Grundwerkstoff und es kommt zur Ausbildung eines klar abgegrenzten Maximums.

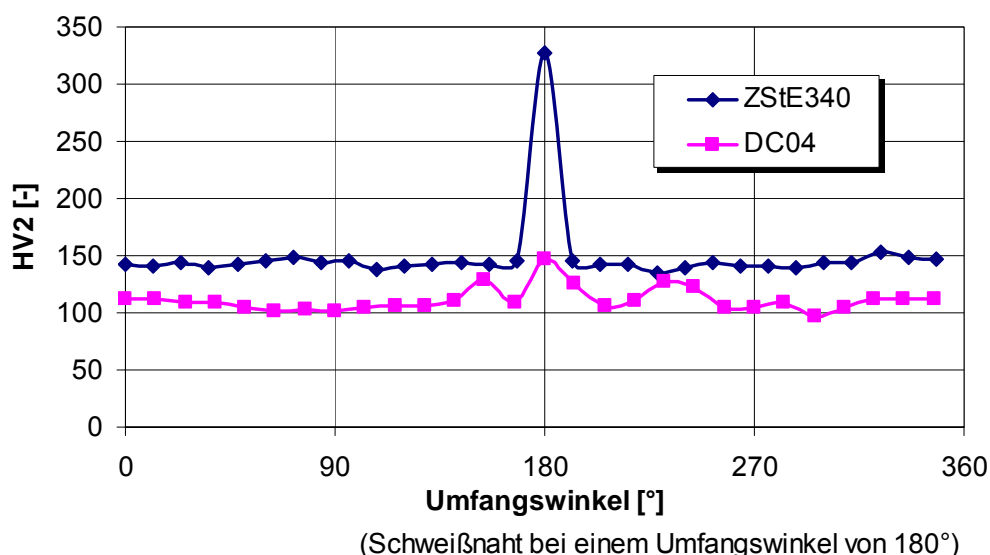


Bild 6-37: Verlauf der Härte nach Vickers über dem Rohrumfang

Die geometrische Inhomogenität, die die Schweißnaht über dem Rohrumfang darstellt, hängt sehr stark davon ab, ob und wie eine mechanische Nachbearbeitung erfolgt. Beim ZStE340 wurde die Wanddicke der Schweißnaht vollständig der des

Grundwerkstoffes angeglichen (Bild 6-38). Dagegen weist die Schweißnaht des DC04 in der Schweißnahtmitte Abweichungen von etwa 8% zur Wanddicke des Grundmaterials auf.

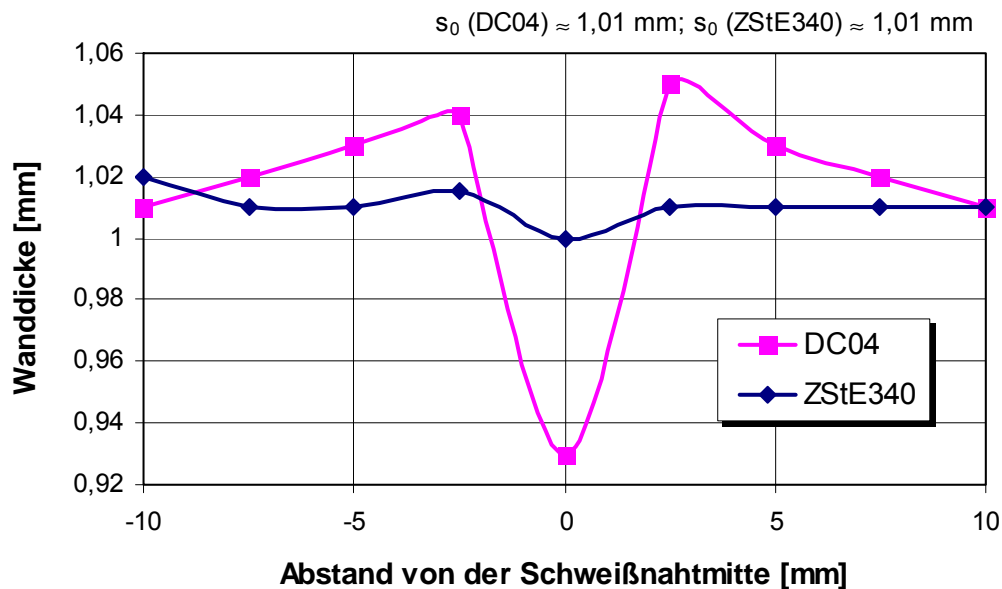


Bild 6-38: Wanddickenverläufe im Schweißnahtbereich

Das Innenhochdruck-Einfachabschneiden ist bei beiden untersuchten, längsnahtgeschweißten Rohrarten genauso wie bei homogenen Rohren realisierbar. Bild 6-39 zeigt die entsprechenden, getrennten Werkstücke. Die durch die Schweißnaht eingebrachten Inhomogenitäten beeinträchtigen die Werkstofftrennung nicht. Sie beeinflussen zwar die geometrischen und stofflichen Schneidbedingungen, die Dynamik des Trennvorganges reicht jedoch aus, um trotzdem ein komplettes IH-EAS zu realisieren.

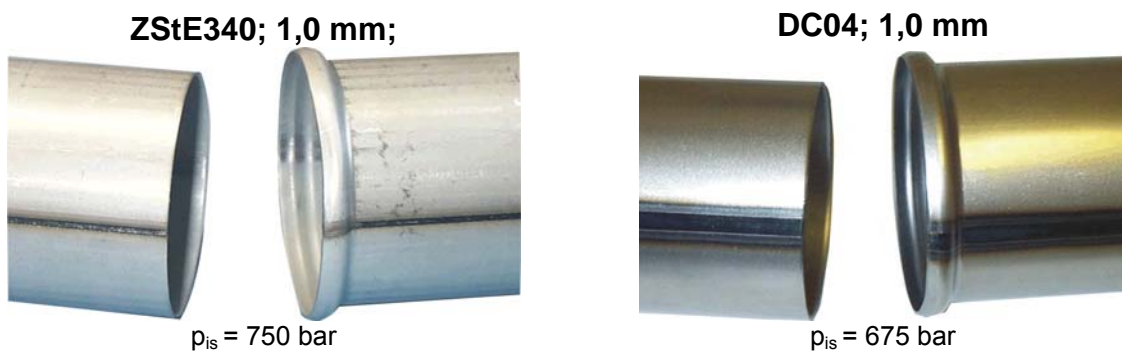


Bild 6-39: Durch Innenhochdruck-Einfachabschneiden getrennte, längsnahtgeschweißte Rohre

Die Schnittkantenqualität im Schweißnahtbereich ist makroskopisch nicht schlechter als die im Grundwerkstoff, d.h. es gibt keine Einschränkungen bezüglich der Gebrauchseigenschaften der Endteile. Die detaillierte Darstellung der Schnittkanten in Bild 6-40 zeigt bei beiden Rohrarten im Schweißnahtbereich einen verringerten Einzug- sowie einen erhöhten Trenflächenanteil gegenüber dem Grundwerkstoff. Beim ZStE340 ist dieser Effekt besonders ausgeprägt. Die Ursache ist die im

Schweißnahtbereich vorliegende, erhöhte Festigkeit, die über den in Bild 6-37 dargestellten Anstieg der Härte nachweisbar ist. Diese führt zu einem spröderen Werkstoffverhalten mit geringeren Verformungsanteilen, welches jedoch den Trennvorgang über dem Rohrumfang nicht behindert.

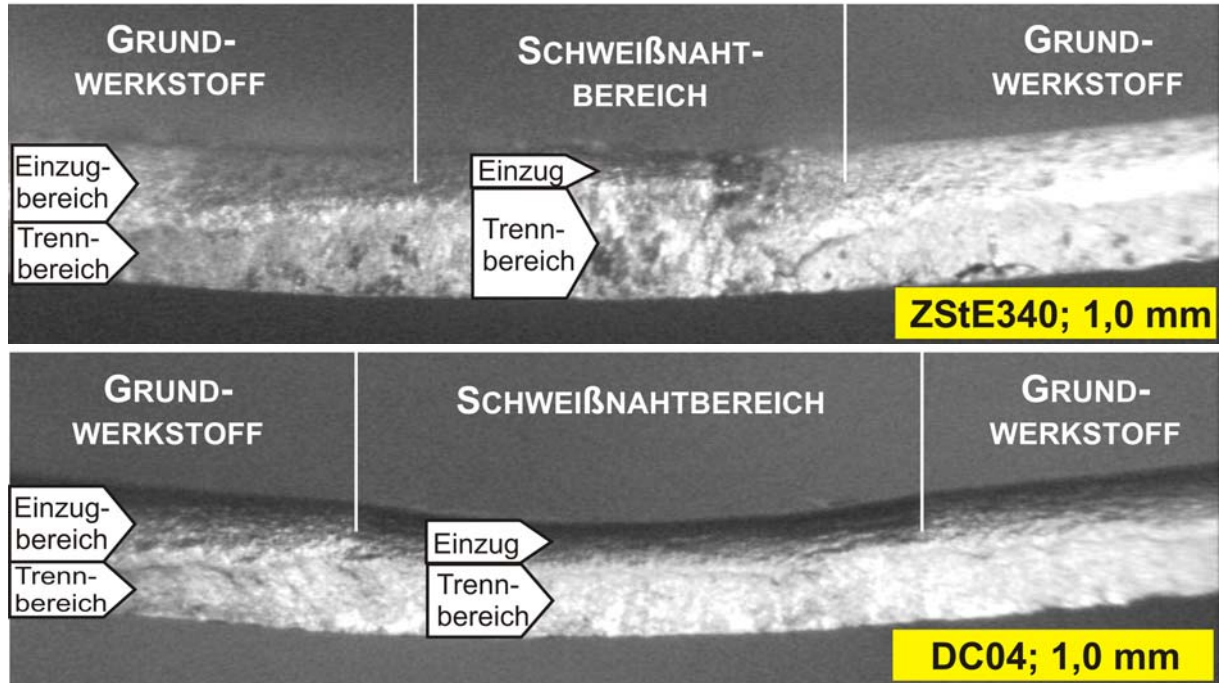


Bild 6-40: Schnittkanten von längsnahtgeschweißten Rohren im Schweißnahtbereich

## 6.8 Innenhochdruck-Doppelabschneiden von unverformten Rohren

Um die Effektivität der Fertigung zu erhöhen, werden bei einer Reihe von IHU-Anwendungen Doppelteile hergestellt, die anschließend getrennt werden müssen. Bezogen auf das Innenhochdruckabschneiden besteht somit die Forderung, das Bauteil so zu trennen, dass zwei verwertbare Endteile ohne den für das Restteil beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden (IH-EAS) typischen Umformrand entstehen. Das Verfahrensprinzip des Innenhochdruck-Doppelabschneidens (IH-DAS) von unverformten Rohren basiert auf dem in Abschnitt 4.3 dargestellten Verfahrensprinzip des IH-EAS von unverformten Rohren.

In der nach Ordnungsnummern strukturierten Systematik der Fertigungsverfahren kann das Innenhochdruck-Doppelabschneiden ebenso wie das Innenhochdruck-Einfachabschneiden mit der Ordnungsnummer 3.1.1.1.6 gekennzeichnet werden. Sinnvoll erscheint es auch, das IH-DAS gemäß DIN 8588 /20/ als Zerschneiden (3.1.1.1.7) einzuordnen, allerdings mit der Besonderheit, dass ein Abfallteil entsteht. Ebenso entspricht es der Definition des Trennschneidens mit Abfall nach DIN 9870, Blatt 2 /79/.

Grundsätzlich ist es für die Realisierung von zwei vollständigen Werkstofftrennungen am Bauteil notwendig, auch zwei über dem Umfang des Bauteiles verlaufende Schneidkanten zu nutzen. Versuche, diese zwei Schneidkanten mit einer gemeinsamen Schneidnut auszuführen, führten nicht zu zwei kompletten Werkstofftrennungen am Bauteil. Wie bereits gezeigt wurde, kommt es beim Innenhochdruckabschneiden nur zur Werkstofftrennung, wenn das Innendruckmedium so auf die Innenseite des Rohres wirkt, dass im Bereich der Schneidkante im Werkstück die Trennbedingung erfüllt wird. Für das IH-DAS bedeutet das, dass die Wirkung des Innendruckmediums so lange aufrecht erhalten werden muss, bis die Werkstofftrennung an beiden Schneidkanten komplett abgelaufen ist. Werden zwei Schneidkanten mit einer gemeinsamen Schneidnut verwendet, kann genau diese Bedingung nicht eingehalten werden. Es kommt entweder nur zum Innenhochdruck-Einfachabschneiden an einer Schneidkante (Bild 6-41 (a)) oder zu einem unvollständigen Innenhochdruck-Doppelabschneiden (Bild 6-41 (b)). In beiden Fällen kommt es zum Druckausgleich bevor die Werkstofftrennung komplett abgeschlossen ist. Das heißt, die Wirkung des Innendruckmediums als aktive Komponente beim Innenhochdruckabschneiden geht vor Beendigung des Trennvorganges verloren.

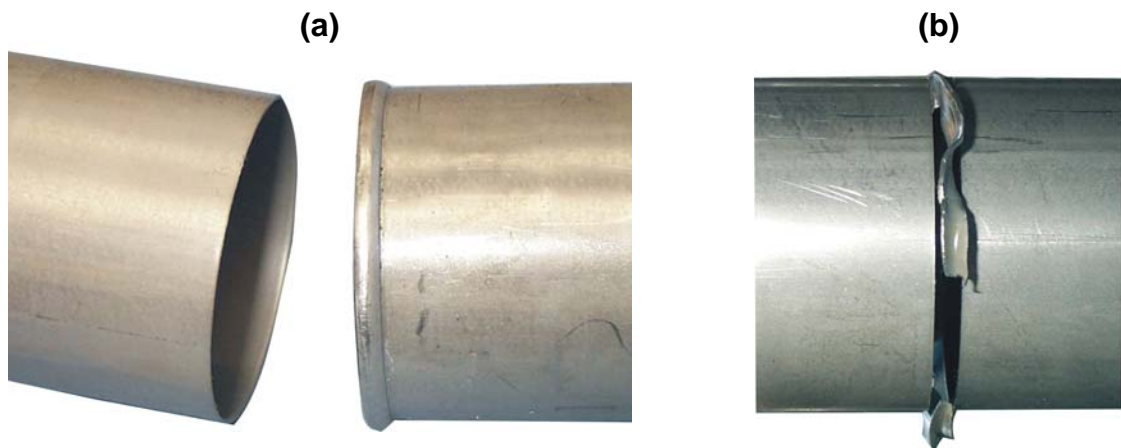


Bild 6-41: Versagensfälle beim IH-DAS mit einer Schneidnut und zwei Schneidkanten

Weiterführende Untersuchungen zur Werkzeuggestaltung beim IH-DAS haben gezeigt, dass sich die Verhältnisse entscheidend verbessern, wenn jeder Schneidkante eine Schneidnut zugeordnet wird, die voneinander räumlich getrennt sind. Ein zwischen den Schneidnuten liegender Steg führt dazu, dass die beiden Werkstofftrennungen getrennt voneinander ablaufen können. Damit ergibt sich die in Bild 6-42 dargestellte, geometrische Gestaltung des Werkzeuges für das Innenhochdruck-Doppelabschneiden.

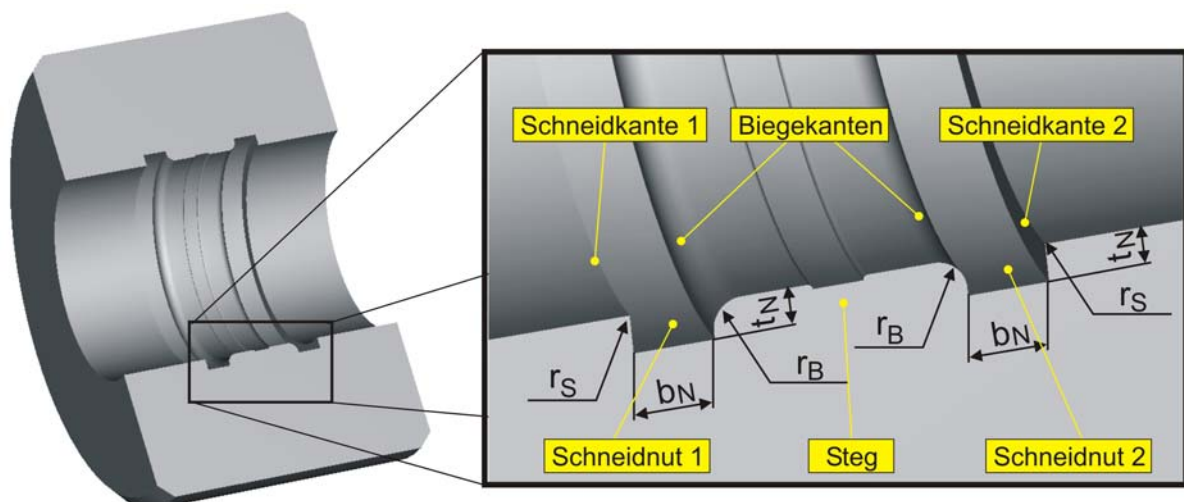


Bild 6-42: Geometrische Kenngrößen am Werkzeug für das Innenhochdruck-Doppelabschneiden

Die Breite des Steges ist frei gewählt und wird nicht variiert. Zudem verfügt der Steg über eine Dichtnut mit einer sehr geringen Tiefe, in die sich während der Umformung Material einformt, um eine zusätzliche Abdichtung zu erreichen. Diese Dichtnut ist nicht Untersuchungsgegenstand, wird nicht variiert, ist jedoch immer wirksam. Die geometrischen Parameter der beiden Schneidnuten sind mit den geometrischen Werkzeugparametern beim IH-EAS identisch. In einem Werkzeug werden stets identische Schneidnuten verwendet, so dass keine zusätzliche Indizierung notwendig ist. In Anlehnung an die Werkzeuge zum IH-EAS ergibt sich die in Tabelle 6-11 zusammengefasste Werkzeugauslegung für das IH-DAS. Die Werkzeugwerkstoffe



sowie deren Wärmebehandlung entsprechen ebenfalls den für das IH-EAS verwendeten Werkzeugen (vgl. Abschnitt 6.1.4).

Tabelle 6-11: Geometrische Auslegung der Werkzeuge zum Innenhochdruck-Doppelabschneiden

<div style="text-align: center;">Werkzeug- bezeichnung</div> <div style="text-align: center;">Geometrische Werkzeugparameter</div>	IH-DAS 5	IH-DAS 8
	<b>Nutbreiten <math>b_N</math></b>	5,0 mm
<b>Nuttiefen <math>t_N</math></b>	2,5 mm	4,0 mm
<b>Radien der Biegekanten <math>r_B</math></b>	2,5 mm	3,0 mm
<b>Radien der Schneidkanten <math>r_S</math></b>	$\approx 0$ mm	$\approx 0$ mm

Die Untersuchungen zum Innenhochdruck-Doppelabschneiden zeigen, dass bei räumlicher Trennung der beiden Schneidkanten keine signifikante gegenseitige Beeinflussung der jeweiligen Umform- bzw. Schneidprozesse stattfindet. Eine Kopplung der Vorgänge an den Schneidkanten erfolgt nur indirekt über den wirkenden Innendruck. Somit kann das Innenhochdruck-Doppelabschneiden als ein mehrfaches Innenhochdruck-Einfachabschneiden angesehen werden. Das bedeutet andererseits, dass die Ausführungen zum Innenhochdruck-Doppelabschneiden verallgemeinert auch auf das Innenhochdruck-Mehrfachabschneiden (IH-MAS) übertragbar sind, d.h. bei entsprechenden Versuchsbedingungen können prinzipiell ebenso drei oder mehr Schnitte realisiert werden. Auf einen experimentellen Nachweis des Innenhochdruck-Mehrfachabschneidens wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet.

Da die beiden Schneidnuten beim IH-DAS geometrisch identisch ausgelegt sind und zu jedem Zeitpunkt der gleiche Innendruck wirkt, laufen auch die der Werkstofftrennung vorausgehenden Umformvorgänge gleich ab. In Abhängigkeit von minimalen Differenzen der stofflichen bzw. geometrischen Eigenschaften des Werkstückes sowie der geometrischen Gestaltung des Werkzeuges (z.B. des Schneidkeilradius  $r_S$ ) setzt an einer Schneidkante zuerst die Werkstofftrennung ein. Da das Abtrennen des gesamten Rohrumfanges nach der Initiierung der Werkstofftrennung schlagartig geschieht, liegt danach ein Zustand vor, der dadurch gekennzeichnet ist, dass das Werkstück entlang einer Schnittlinie bereits abgetrennt ist, während im Bereich der anderen Schneidkante noch keine Werkstofftrennung erfolgt ist. Um das Werkstück ein zweites Mal zu trennen, muss der Innendruck einen Wert erreichen, der etwas oberhalb des Schneidinnendruckes des ersten Trennvorganges liegt. Nur so kann in

der Schnittzone ein Spannungszustand erreicht werden, der die Trennbedingung erfüllt. Aufgrund der ersten Werkstofftrennung kann das Innendruckmedium in die zugehörige Schneidnut strömen. In Abhängigkeit von der abgeströmten Menge an Medium bis zur Füllung des Schneidnutraumes kann sich das Innendruckmedium im Werkstück teilweise entspannen. Damit ist ein leichter Abfall des Innendruckes verbunden (Bild 6-43(a)). Durch Nachfördern von Medium muss diesem Druckabfall entgegengewirkt werden. Das heißt, die erste Schneidnut wird nach der Werkstofftrennung zunächst komplett mit Innendruckmedium gefüllt, so dass anschließend, trotz des bereits einmal getrennten Rohres, der Innendruck soweit erhöht werden kann, dass auch der zweite Trennvorgang ermöglicht wird.

Der zwischen dem ersten und zweiten Trennvorgang ablaufende Prozess kann nur wie beschrieben ablaufen, wenn zwei Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Es gibt keine Leckverluste über die Teilungsebene des Werkzeuges. Alternativ muss die Förderleistung der IHU-Anlage ausreichen, um mögliche Leckverluste in der Teilungsebene des Werkzeuges auszugleichen.
2. Das Innendruckmedium darf nicht über den Stützsteg in die zweite Schneidnut gelangen, da sonst die für das Schneiden notwendige Druckdifferenz zwischen der Innen- und Außenseite des Rohres nicht mehr gegeben ist.

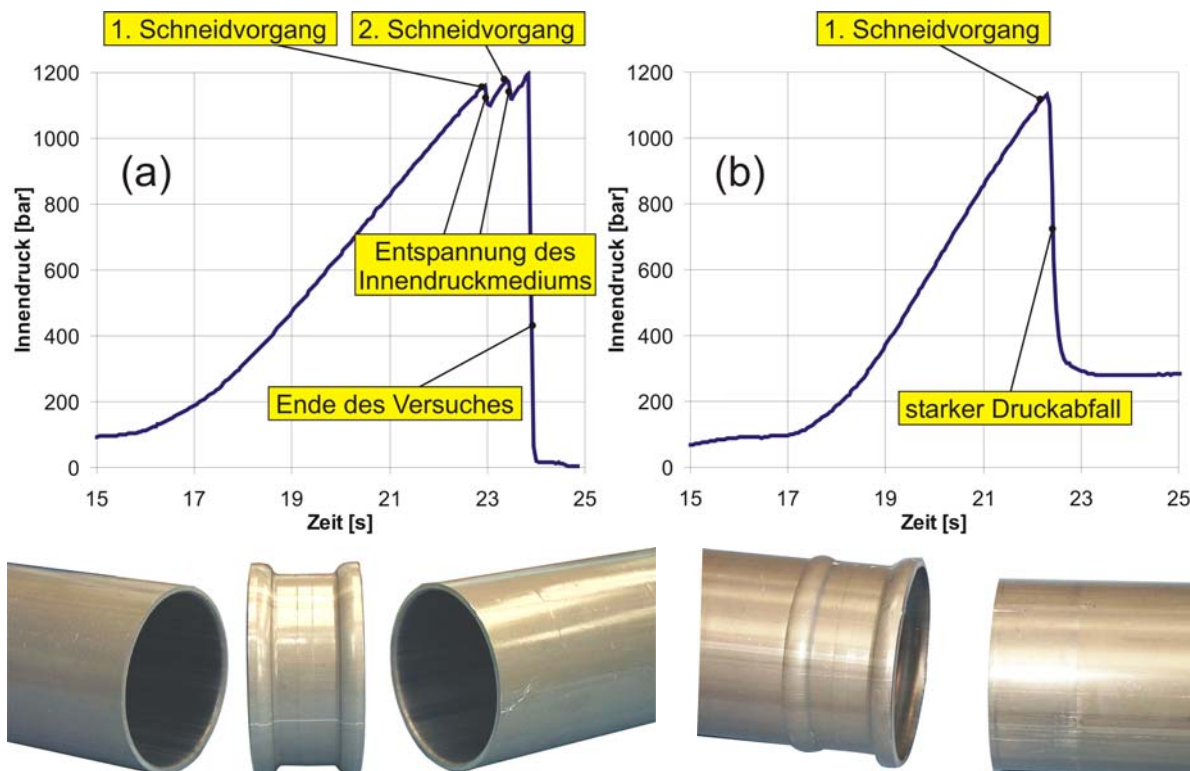


Bild 6-43: Vollständiges IH-DAS (a) und unvollständiges IH-DAS (b); (AlMg3Mn; 3,0 mm;  $b_N = 8$  mm)

Bild 6-43(b) zeigt den Druckverlauf sowie das zugehörige Schneidergebnis beim unvollständigen IH-DAS, das in diesem Fall durch Leckverluste über die Teilungsebene des Werkzeuges nach der ersten Werkstofftrennung und einen daraus resultierenden Druckabfall hervorgerufen wurde.

In Tabelle 6-12 sind die Schneidinnendrucke für das Innenhochdruck-Doppelabschneiden zusammengestellt. Der erste Wert bezeichnet das 1. Schneiden, der zweite das 2. Schneiden in ihrem chronologischen Ablauf, d.h. ohne Zuordnung zu einer bestimmten Schneidnut. Die ermittelten Schneidinnendrucke entsprechen denen des Innenhochdruck-Einfachabschneidens. Ebenso können die Berechnungsansätze zur Ermittlung des Schneidinnendruckes beim IH-EAS aus Abschnitt 6.2.1 übernommen werden.

Tabelle 6-12: Übersicht der Schneidinnendrucke beim IH-DAS

Versuchsmaterial, Wanddicke		Schneidinnendruck $p_{is}$	
		IH-DAS 5	IH-DAS 8
S235G2T	1,0 mm	1035 / 1085 bar	720 / 725 bar
S235G2T	1,5 mm	1560 / 1565 bar	1065 / 1085 bar
S235G2T	2,0 mm	> 2000 bar*	1605 / 1610 bar
X5CrNi18-10	1,0 mm	> 2000 bar*	1335 / 1355 bar
X5CrNi18-10	1,5 mm	> 2000 bar*	1955 / 1990 bar
AlMg0,7Si	1,3 mm	545 / 560 bar	380 / 385 bar
AlMg0,7Si	2,0 mm	810 / 830 bar	545 / 555 bar
AlMgSi0,5	2,2 mm	850 / 865 bar	565 / 575 bar
AlSi1MgMn	2,2 mm	1385 / 1430 bar	895 / 910 bar
AlMg3Mn	3,0 mm	-**	1160 / 1180 bar
AlMg3,5Mn	3,0 mm	-**	1245 / 1260 bar
AlMg4,5Mn0,7	3,0 mm	-**	1350 / 1365 bar

\* Schneidinnendruck lag über der Innendruckkapazität der IH-Anlage von 2000 bar

\*\* Wanddicke der Ausgangsteile war größer als die Schneidnuttiefe, deshalb nicht im Versuchsprogramm

## 6.9 Zusammenfassung und Anwenderrichtlinie zum Innenhochdruck-Einfachabschneiden von unverformten Rohren

Durch Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut kann ein unverformtes Rohr über seinem kompletten Umfang abgeschnitten werden. Während des gesamten Prozesses ist das Werkstück mit der Schneidkante in Kontakt. Im Rohr bildet sich entlang der späteren Schnittlinie unter der gemeinsamen Wirkung von Innendruck und Schneidkante eine Schnittzone heraus, die durch eine kombinierte Wirkung von radialen Schub- und axialen Zugspannungen gekennzeichnet ist. Erreicht der Spannungszustand eine kritische Größe, so kommt es zur Werkstofftrennung. Um das Innenhochdruckabschneiden entlang der gesamten Schnittlinie zu sichern, muss die Schneidnuttiefe so ausgelegt werden, dass eine Materialabstützung nach einsetzender Werkstofftrennung erfolgt. Als Richtwert für die Schneidnuttiefe ist die halbe Schneidnutbreite zu verwenden, wobei als Mindestmaß die Ausgangswanddicke des Werkstückes heranzuziehen ist. Der Schneidinnendruck kann in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit des Rohrmaterials, der Rohrwanddicke und der Schneidnutbreite empirisch und modellbasiert berechnet

werden. Die Schnittkante am Endteil weist einen Einzug-, einen Trenn- und einen Gratbereich auf. Der auf der Rohrinneenseite liegende Einzugbereich ist gegenüber anderen Schneidverfahren verhältnismäßig groß. In Richtung der Rohrlängsachse beträgt der Einzug je nach der untersuchten Rohrsorte etwa das 1,2 bis 1,6 fache der Wanddicke, in Dickenrichtung etwa das 0,4 bis 0,6 fache der Wanddicke. Die Trennbereiche der Endteile bestehen vollständig aus Bruchfläche, Glattschnittanteile treten nicht auf. Die Schnittkantenqualität wird maßgeblich durch den Ablauf des Schneidvorganges bestimmt. Wichtigste Einflussfaktoren sind die stofflichen und geometrischen Ausgangseigenschaften sowie die geometrische Gestaltung der Schneidnut. Die Größe des auf der Rohraußenseite liegenden Grates hängt vom Einformverhalten des Rohres in die Schneidnut ab. Bei den vorliegenden Untersuchungen lagen die Grathöhen zwischen 0,015 und 0,130 mm.

Wirken beim Innenhochdruckabschneiden zusätzlich axiale Nachschiebekräfte, werden die axialen Zugspannungskomponenten reduziert und gleichzeitig die Ausformung des Materials in den Schneidnutraum unterstützt. In Abhängigkeit von den konkret vorliegenden Umformbedingungen kann das IH-EAS auch unter axialen Nachschiebekräften realisiert werden, wobei schon bei geringen Nachschiebewegen die Verfahrensgrenzen erreicht werden. Es kommt dann zu unvollständigen Werkstofftrennungen über dem Rohrumfang oder es tritt bei kompletter Einformung des Materials in die Schneidnut keine Werkstofftrennung auf.

Untersuchungen mit einer Elastomerabstützung des Werkstückes im Schneidnutbereich haben gezeigt, dass sich zwar der Schneidinnendruck erhöhen lässt, die Werkstofftrennungen jedoch unvollständig bleiben. Ursache sind auch hier die verringerten axialen Zugspannungsanteile.

An laserstrahlgeschweißten Rohren konnte der Nachweis erbracht werden, dass das Innenhochdruck-Einfachabschneiden auch bei geschweißten Rohren, d.h. unter inhomogenen stofflichen bzw. geometrischen Schneidbedingungen möglich ist.

Das Innenhochdruckabschneiden lässt sich an einem Werkstück in einem Prozessschritt auch mehrfach ausführen. Am Beispiel des Innenhochdruck-Doppelabschneidens konnte nachgewiesen werden, dass dazu für jede Werkstofftrennung eine separate Schneidnut verwendet werden muss. Maschinen- und werkzeugseitig muss dafür gesorgt werden, dass der Innendruck nach der ersten Werkstofftrennung weiter erhöht werden kann, so dass es zur zweiten Werkstofftrennung kommt. Bezüglich der Qualität der Schnittteile kann auf das Innenhochdruck-Einfachabschneiden verwiesen werden.

In Kurzform lassen sich die folgenden Anwenderrichtlinien zusammenstellen:

- Das IHAS-Werkzeug muss eine Schneidnut mit einer Schneid- und einer Biegekante aufweisen. Als Werkzeugwerkstoff sind die üblichen Werkstoffe für IHU-Werkzeuge zu verwenden.

- Die Schneidnuttiefe sollte etwa die halbe Schneidnutbreite betragen, so dass der Schneidnutgrund nach dem Einsetzen der Werkstofftrennung als Abstützung für die Rohraufweitung wirken kann.
- Grundvoraussetzung für eine komplette Werkstofftrennung sind ausreichend große axiale Zugspannungskomponenten in der Schnittzone. Eine Reduzierung der axialen Zugspannungen durch zusätzlich eingebrachte axiale Druckspannungen (axiales Nachschieben) oder durch eine Abstützung des Materials vor der Werkstofftrennung (Elastomereinsatz, geringe Schneidnuttiefe) ist zu vermeiden.
- Das IH-EAS unter axialen Nachschiebekräften ist zwar in engen Grenzen möglich, da es jedoch die Schnittkantenqualität nicht positiv beeinflusst, sollte es möglichst vermieden werden.

- Die Schnittkanten an den durch Innenhochdruckabschneiden getrennten Endteilen weisen einen ausgeprägten Einzug auf der Rohrinseite, einen Trennbereich sowie einen Grat auf der Rohraußenseite auf.

- Der Schneidinnendruck kann empirisch nach folgender Formel berechnet werden:

$$p_{is} = \frac{k_{sp} \cdot (d_a^2 - d_i^2)}{4 \cdot b_N \cdot d_a}, \text{ mit } \begin{array}{l} k_{sp} = 1,2 \dots 1,3 \cdot R_m \text{ für Aluminium,} \\ k_{sp} = 1,2 \dots 1,5 \cdot R_m \text{ für höherfeste Baustähle,} \\ k_{sp} = 1,6 \dots 1,7 \cdot R_m \text{ für Edelstahl, Tiefziehstahl.} \end{array}$$

- Der Schneidinnendruck kann außerdem auf Basis der mechanischen Kennwerte des Rohrmaterials sowie der Schneidnutbreite und der Rohrwanddicke nach folgender Formel berechnet werden:

$$p_{is} = \frac{R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n \cdot [\ln(1 + A_{50})]^n \cdot (d_a^2 - d_i^2)}{4 \cdot d_a \cdot b_N}.$$

- Rohre mit umfänglichen Wanddickenschwankungen bis 10% bzw. Härteschwankungen bis 40% können ebenso wie längsnahtgeschweißte Rohre erfolgreich durch IH-EAS abgetrennt werden.
- Eine Elastomerabstützung des Rohrmaterials in der Schneidnut führt dazu, dass die Werkstofftrennung in der Schnittzone bei höheren Innendrücken einsetzt, jedoch aufgrund des veränderten Spannungszustandes und der fehlenden Prozessdynamik unvollständig bleibt.
- Sollen in einem Prozessschritt parallel mehrere Werkstofftrennungen erzielt werden (Innenhochdruck-Doppelabschneiden), muss sichergestellt werden, dass auch nach der ersten Werkstofftrennung noch ein Innendruck erreicht werden kann, bei dem die nachfolgende Werkstofftrennung abläuft.
- Das Schneidwerkzeug zum IH-DAS muss zwei Schneidnuten mit je einer Schneid- und einer Biegekante aufweisen. Bei einer Werkzeugauslegung mit einer Schneidnut und zwei Schneidkanten ist kein prozesssicheres Innenhochdruck-Doppelabschneiden möglich.

## **7 Untersuchungsergebnisse zum Innenhochdruckabschneiden von innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen – Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden (IH-TAS)**

### **7.1 Vorbemerkungen zum Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden**

Das Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen ist, das wurde in den bisherigen Ausführungen deutlich, ein komplexes und in vielen Bereichen noch unerschlossenes Forschungsgebiet. Es konnte gezeigt werden, dass beim Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen insbesondere die stofflichen und geometrischen Schneidbedingungen entlang der Schnittlinie den Schneidvorgang und das Schneidergebnis bestimmen. Im Mittelpunkt der bisherigen Darstellungen stand das Innenhochdruck-Einfachabschneiden von unverformten Rohren, d.h. das Innenhochdruckabschneiden unter homogenen stofflichen und geometrischen Schneidbedingungen. Diese Ergebnisse sind die Basis für weitere Forschungsarbeiten und Entwicklungen zum Innenhochdruckabschneiden. Eine der Weiterentwicklungen ist das Innenhochdruckabschneiden von zuvor innenhochdruckumgeformten Rohrbereichen mit Kreisringquerschnitt in Form des Innenhochdruck-T-Stück-Abschneidens (IH-TAS). Die Untersuchungen zum IH-TAS stellen eine Anwendung und Erweiterung der wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Innenhochdruckabschneiden unter homogenen Schneidbedingungen dar. Durch den vor dem Trennvorgang ablaufenden Umformvorgang liegen entlang der Schnittlinie inhomogene stoffliche und geometrische Schneidbedingungen vor. Der Schnittlinienverlauf ist wie beim Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren kreisringförmig (Kategorien A1 und B1, vgl. Abschnitt 4.2).

Beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden wird der obere Bereich des zuvor innenhochdruckumgeformten Formelementes abgetrennt, so dass ein offenes T-Stück entsteht. Das Werkzeug entspricht einem konventionellen Werkzeug zum Ausformen eines T-Stückes, bestehend aus einer längsgeteilten Gravur, in deren Teilungsebene das Formelement mittig angeordnet ist. Das Werkzeug besitzt zusätzlich in Umfangsrichtung des Formelementes eine Schneidkante. Ein in radialer Richtung beweglicher Stützstempel dient zum Abstützen des Formelementes während der Umformung sowie zur Begrenzung der Formelementhöhe. Das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden stellt eine technologische Kombination der Verfahren Innenhochdruckumformen und Innenhochdruckabschneiden dar, d.h. beide Verfahren werden in einem Fertigungsschritt realisiert.

Das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden sollte trotz der geschlossenen Schnittlinie durch die Ordnungsnummer 3.1.1.1.6 (Abschneiden) gekennzeichnet werden. Daneben ist auch eine Einordnung unter der Ordnungsnummer 3.1.1.1.3 (Beschneiden) möglich.

## 7.2 Geometrische Werkzeugparameter

Das Werkzeug für das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden basiert auf einem IHU-Werkzeug zur Herstellung eines T-Stückes, dessen Formelementachse senkrecht zur Rohrlängsachse verläuft. Bild 7-1 zeigt den prinzipiellen Werkzeugaufbau für das IH-TAS, einschließlich der wichtigsten geometrischen Werkzeugparameter.

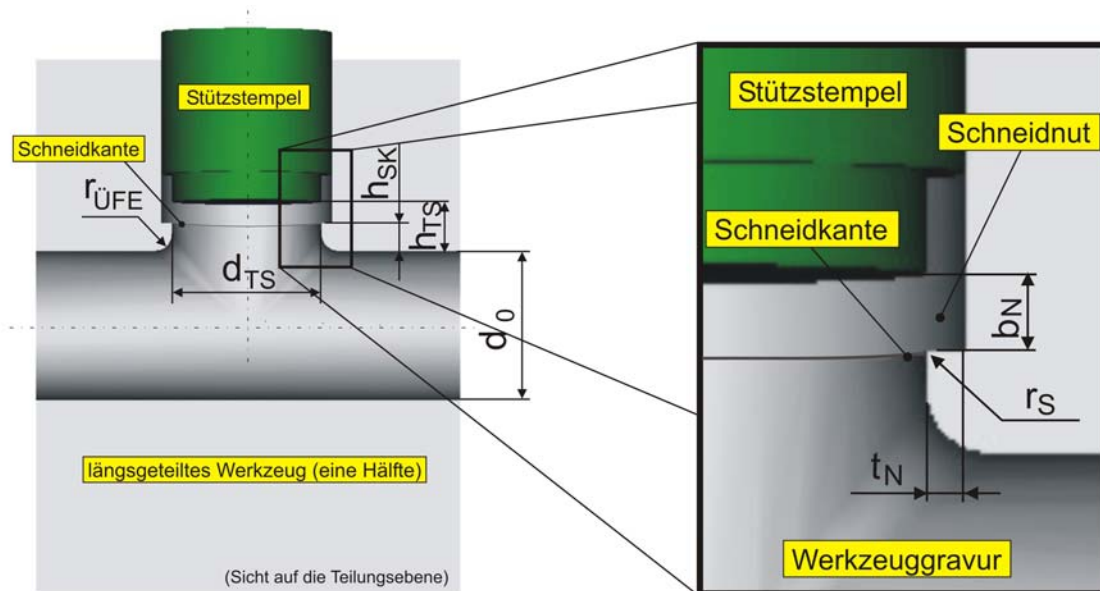


Bild 7-1: Geometrische Kenngrößen am Werkzeug für das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden

Der Durchmesser des Formelementes beträgt, ebenso wie der Ausgangsdurchmesser des Rohres,  $d_{TS} = 70$  mm. Durch den in radialer Richtung beweglichen Stützstempel kann die Ausformung des Formelementes während des Umformvorganges beeinflusst werden. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, durch den radialen Stützstempel gezielt Einfluss auf den Kontakt zwischen Werkstück und Schneidkante zu nehmen. Mit der Endposition des Stempels wird die Höhe des Formelementes  $h_{TS}$  festgelegt. In der Teilungsebene des Werkzeuges lässt sich der kleinste Abstand der Schneidkante vom Außendurchmesser des Ausgangsrohres mit  $h_{SK}$  angeben. Dieser Wert repräsentiert zugleich die verbleibende Kragenhöhe des getrennten T-Stückes. Der Übergangsradius vom Basisrohr in das Formelement ist in der Teilungsebene mit  $r_{ÜFE}$  gegeben. Die Schneidnutbreite  $b_N$  ist beim IH-TAS eine von der Stempelposition abhängige, variable Größe. Sie ergibt sich aus

$$b_N = h_{TS} - h_{SK} \quad (24)$$

mit  $h_{TS}$  als Formelementhöhe und  $h_{SK}$  als Schneidkantenposition.

Für  $h_{TS} < h_{SK}$  ergeben sich negative Schneidnutbreiten, was bedeutet, dass die Schneidkante noch nicht aktiviert ist und kein Abschneiden möglich ist. Die Schneidnuttiefe  $t_N$  ist beim IH-TAS eine konstante Größe.

Für die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die in Tabelle 7-1 angegebenen, geometrischen Werkzeugparameter festgelegt.

Tabelle 7-1: Geometrische Auslegung des Werkzeuges zum Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden

Geometrische Werkzeugparameter	
Bezeichnung	Wert
Formelementdurchmesser $d_{TS}$	70 mm
Basisrohrdurchmesser $d_0$	70 mm
Schneidnutbreite $b_N$	variabel
Schneidnuttiefe $t_N$	2,5 mm
Kleinster Abstand Schneidkante - Rohraußenseite $h_{SK}$	10 mm
Übergangsradius Basisrohr - Formelement $r_{ÜFE}$	5 mm
Winkel zwischen Formelement- und Rohrlängsachse	90°
Radius der Schneidkante $r_S$	≈ 0 mm

### 7.3 Prozessführung und Prozessstrategien

Die Untersuchungen zum Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren haben gezeigt, dass es für einen erfolgreichen Schneidvorgang zwingend notwendig ist, eine Druckdifferenz zwischen der Innen- und Außenseite des Hohlprofils aufrecht zu erhalten, bis entlang der gesamten Schnittlinie die Werkstofftrennung erfolgt ist. Durch diese Druckdifferenz und die daraus resultierende Einformung des Materials in die Schneidnut kann sich in der Schnittzone ein Spannungszustand herausbilden, der die Trennbedingung erfüllt. Unterstützt wird die Werkstofftrennung entlang der Schnittlinie nach ihrer Initiierung durch die Dynamik der Rissausbreitung.

Beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden müssen prinzipiell die gleichen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Realisierung des Schneidvorganges vorliegen. Anders als beim IHAS von unverformten Rohren befindet sich das Werkstück am Beginn des Vorganges nicht in Kontakt mit der Schneidkante. Durch den Innenhochdruckumformprozess muss das Werkstück mit der Schneidkante in Kontakt gebracht werden. Dazu ist ein bestimmter Innendruck  $p_{iK}$  notwendig, der von den konkret vorliegenden Umformbedingungen, wie Formelementhöhe, Axialwege, Axialkräfte, Innendruckführung, Tribologie usw. sowie den stofflichen und geometrischen Werkstückeigenschaften abhängig ist. Es ist zu beachten, dass beim Innendruck  $p_{iK}$  der Kontakt zwischen Schneidkante und Werkstück zwar einsetzt, allerdings aufgrund der geometrischen Verhältnisse nicht entlang der gesamten Schnittlinie. Zur Ausbildung einer definierten Schnittzone im Werkstück entlang der kompletten Schnittlinie muss der Innendruck  $p_i$  über  $p_{iK}$  hinaus weiter erhöht werden. Beim Innendruck  $p_{iS}$  wird in der Schnittzone ein kritischer Spannungszustand erreicht, der die Trennbedingung erfüllt und zum Einsetzen der Werkstofftrennung führt. Grundvoraussetzung für diesen Ablauf und damit für die Realisierung des IH-TAS ist, dass dieser gesamte Prozess bei Innendrücken unterhalb des Berstdruckes der T-Stück-Ausformung  $p_{iB}$  abläuft, d.h. es muss gelten:

$$p_{iK} < p_{iS} < p_{iB} \quad (25)$$



Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Berstdruck  $p_{IB}$  ebenso wie die Innendrucke  $p_{IK}$  und  $p_{IS}$  von den konkret vorliegenden Umformparametern und Schnittteileigenschaften abhängen. Das bedeutet, dass sich eine Beeinflussung des Schneidinnendruckes gleichzeitig auch auf den Berstdruck auswirkt.

Die mit Gleichung (25) beschriebene Grundbedingung muss eingehalten werden, auch wenn die Schnittlinie nicht in den Werkstückbereichen mit den größten Wanddickenreduzierungen liegt. Wie Bild 7-2 zeigt, treten die größten Wanddickenreduzierungen im Kopfbereich des T-Stückes auf, während in den Werkstückbereichen an der Schneidkante (Schnittzone) geringere Wanddickenreduzierungen vorliegen. Diese Verhältnisse widersprechen der Gleichung (25).

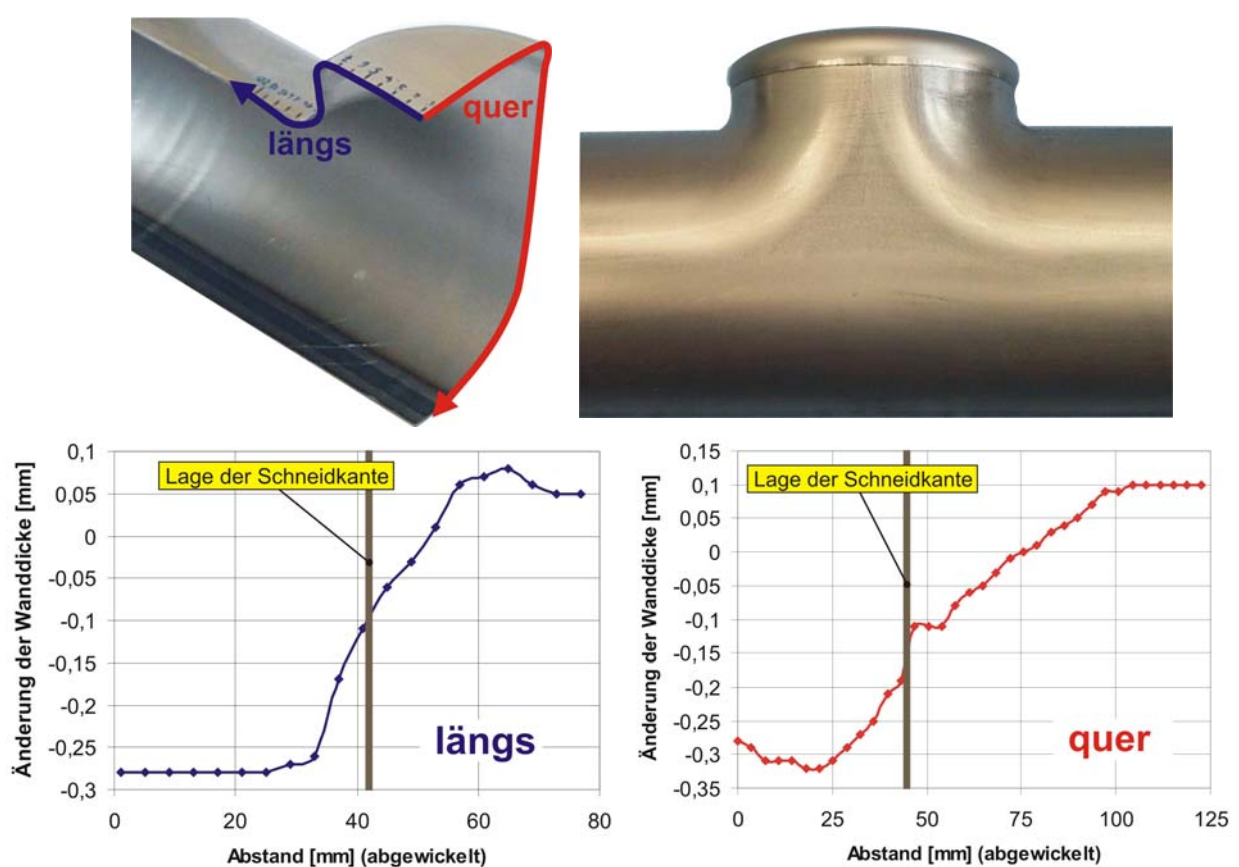


Bild 7-2: Wanddickenverlauf am T-Stück unmittelbar vor dem Schneiden (DC04; 1,0 mm;  $h_{TS} = 19,5$  mm)

Die Darstellung der Formänderungen unmittelbar vor und nach dem Schneidvorgang des Innenhochdruck-T-Stück-Abschneidens bestätigen die aus den Wanddickenverläufen abgeleiteten Verhältnisse. Bild 7-3 und Bild 7-4 zeigen Bereiche maximaler Vergleichsformänderungen im Kopfbereich sowie in den Seitenbereichen des Formelementes. Aufgrund der ausgeprägten Streckziehbeanspruchung sind dabei die Bereiche im Formelementkopf als kritisch hinsichtlich Bersten einzustufen. Entlang der Schnittlinie sind die Formänderungen, die sich aus der Ausformung des Formelementes ergeben, unkritisch und deutlich geringer als die maximal auftretenden Formänderungen.

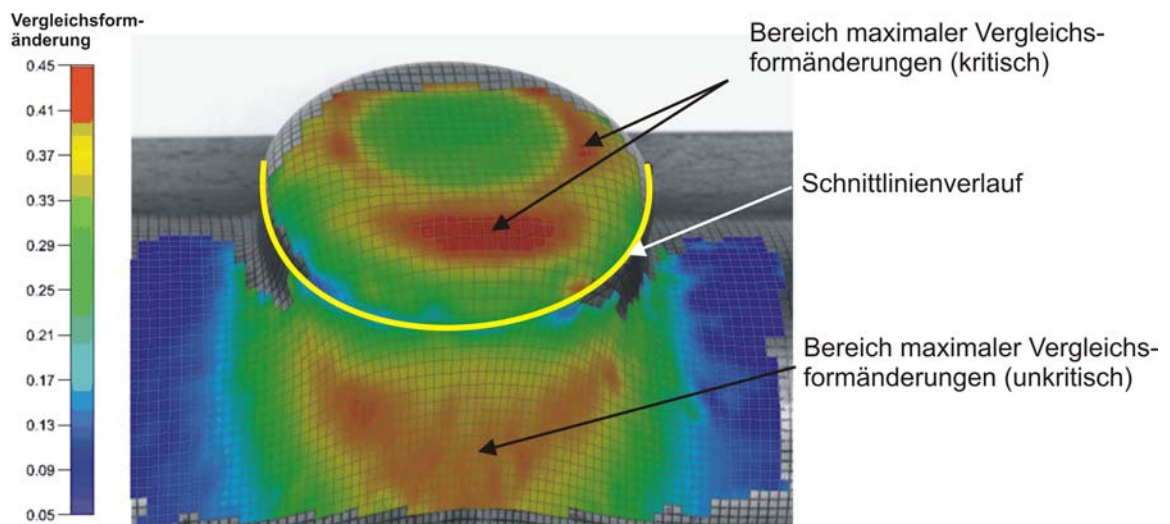


Bild 7-3: Verteilung der Vergleichsformänderungen vor dem IH-TAS (S235G2T; 1,0 mm;  $h_{TS} = 24$  mm)

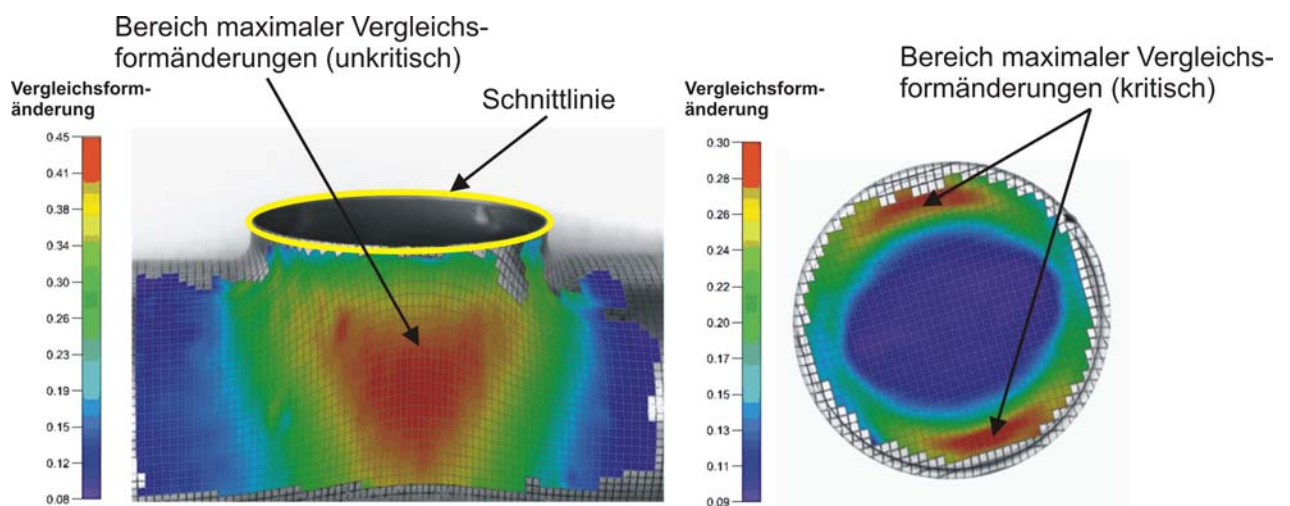


Bild 7-4: Verteilung der Vergleichsformänderungen nach dem IH-TAS (DC04; 1,0 mm;  $h_{TS} = 17,5$  mm)

Unter Berücksichtigung der dargestellten Verhältnisse kann das IH-TAS nur realisiert werden, wenn die beim Umformprozess am stärksten beanspruchten Werkstückbereiche im Kopf des Formelementes effektiv abgestützt werden. Dies geschieht durch den radialen Stützstempel. Die Wirkung des radialen Stützstempels wird durch seine Positionierung und Bewegung in Abhängigkeit von Innendruckverlauf und Axialkräften (Prozessstrategie) sowie durch seine Geometrie bestimmt. Unabhängig von der konkreten Prozessstrategie findet in der ersten Phase der Verfahrenskombination „Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden“ stets ein reines Innenhochdruckumformen zumeist in Form des Innenhochdruckweitstauchens statt. Unter der Wirkung des Innendruckes und von aktiven axialen Nachschiebekräften wird eine Grundform des einseitigen Formelementes ausgeformt. Die Schneidkante ist in dieser Phase noch nicht aktiv. In Abhängigkeit von der Prozessstrategie wird der IHU-Vorgang dann mit dem Innenhochdruckabschneiden verknüpft. Der

Gesamtvorgang des IH-TAS kann prinzipiell in die im Bild 7-5 dargestellten Prozessschritte untergliedert werden.

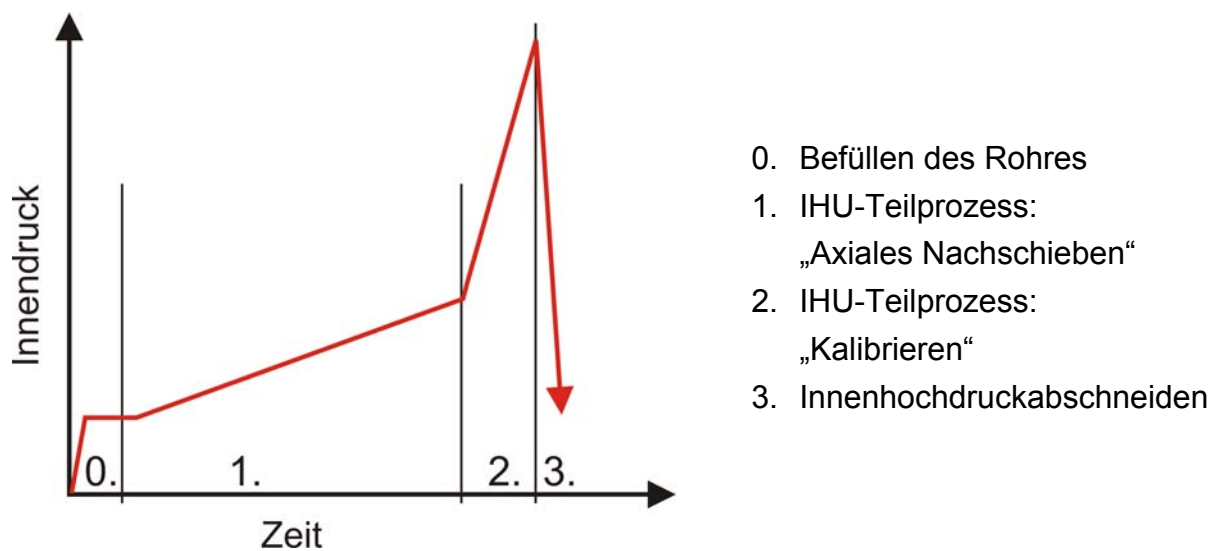


Bild 7-5: Prozessschritte beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden

Grundsätzlich können drei Prozessstrategien unterschieden werden. Diese werden nachfolgend aufgeführt, eine Bewertung erfolgt im Abschnitt 7.5.

*Fester Stützstempel, Schneidkante frei*

Der radiale Stützstempel ist während des gesamten Vorganges (0. bis 3.) fest in seiner hinteren Endposition. Während des axialen Nachschiebens wird das Werkstück im Formelement nicht aktiv abgestützt, sondern legt sich bei genügender Ausformung an den Stützstempel an. Die Schneidkante ist während des gesamten Vorganges frei, ebenso liegt stets die vorgegebene, konstante Schneidnutbreite vor.

*Beweglicher Stützstempel, Schneidkante wird beim axialen Nachschieben frei*

Der radiale Stützstempel befindet sich am Beginn des Vorganges (0.) in einer vorderen Startposition unterhalb der Schneidkante. Beim axialen Nachschieben beginnt das Zurückziehen des Stempels bis zu seiner Endposition. Dabei wird das Werkstück im Formelement aktiv abgestützt. Spätestens mit der Beendigung des axialen Nachschiebens (1.) wird die Endposition des Stempels erreicht. Die zunächst verdeckte Schneidkante wird somit während des Nachschiebens freigegeben. Die Schneidnutbreite erhöht sich bis zur vorgegebenen Schneidnutbreite bei Erreichen der Endposition des Stempels. Es schließen sich der IHU-Teilvorgang Kalibrieren und das Innenhochdruckabschneiden an.

*Beweglicher Stützstempel, Schneidkante wird beim Kalibrieren frei*

Der radiale Stützstempel befindet sich am Beginn des Vorganges (0.) in einer vorderen Startposition unterhalb der Schneidkante. Beim axialen Nachschieben

beginnt das Zurückziehen des Stempels, der dabei das Werkstück im Formelement aktiv abstützt. Am Ende des axialen Nachschiebens (1.) hat der Stützstempel seine Endposition jedoch noch nicht erreicht, sondern befindet sich in einer Zwischenposition. Die Schneidkante ist in dieser Position noch verdeckt. Es erfolgt eine deutliche Innendruckerhöhung, so dass das Werkstück teilweise oder vollständig kalibriert wird. Erst danach wird der Stempel in seine Endposition verfahren, dabei wird die Schneidkante für das Innenhochdruckabschneiden frei.

Neben der Steuerung der Stempelbewegung (Prozessstrategie) ist für die erfolgreiche Realisierung des IH-TAS auch die Stempelgeometrie von Bedeutung. Bild 7-6 zeigt die verwendeten Stempelformen in prinzipieller Darstellung, die konkreten Maße sind den Skizzen im Anhang zu entnehmen. Je nach Stempelform kommt es zu unterschiedlichen Anlageverhältnissen zwischen dem Kopfbereich des Formelementes und dem Stützstempel. Von diesen Anlageverhältnissen hängt die Abstützwirkung, d.h. die Beeinflussung der Formänderungen in den kritischen Bereichen des Formelementes ab. Die Stempelform III unterscheidet sich von Stempelform I und II vor allem dadurch, dass sie keine abgesetzte Mantelfläche aufweist. Dieser Stempel kann nicht in eine Position unterhalb der Schneidkante bewegt werden. Die Abstützwirkung setzt erst ab einer Formelementhöhe oberhalb der Schneidkantenposition  $h_{SK}$  ein. Im konkret vorliegenden Fall beginnt die Abstützwirkung bei einer Formelementhöhe von  $h_{TS} = 18 \text{ mm}$  ( $h_{SK} = 10 \text{ mm}$ ). Mit den Stempeln der Formen I und II kann aufgrund der abgesetzten Mantelfläche schon bei geringen Formelementhöhen bzw. ab  $h_{TS} = 0 \text{ mm}$  abgestützt und auf die Formänderungen Einfluss genommen werden.

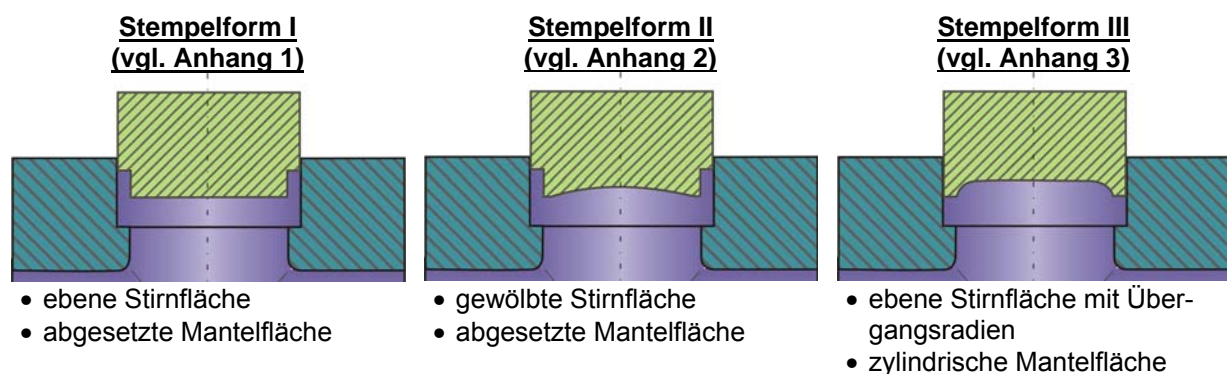


Bild 7-6: Formen der radialen Stützstempel

## 7.4 Schneidbedingungen beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden

### 7.4.1 Entstehung inhomogener Schneidbedingungen

Beim Innenhochdruckabschneiden hat die Homogenität der Schneidbedingungen einen maßgeblichen Einfluss auf den Ablauf des Schneidvorganges, insbesondere auf die Realisierung einer Werkstofftrennung entlang der kompletten Schnittlinie. Beim Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren besteht von Beginn an

Kontakt zwischen dem unverformten Rohr und der Schneidkante. Auf die Homogenität der Schneidbedingungen wirken sich in diesem Fall nur Schwankungen der stofflichen und geometrischen Ausgangseigenschaften aus. Für die Versuchsröhre sind diese Schwankungen in den Abschnitten 5.4.2 und 5.4.3 dokumentiert. In der Regel liegen die Schwankungen unter 5%, in Ausnahmen darüber. Auswirkungen auf die Machbarkeit des Innenhochdruck-Einfachabschneidens von unverformten Rohren wurden nicht festgestellt.

Beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden muss das Werkstück zunächst entsprechend der Fertigungsaufgabe umgeformt werden, bevor es zum Kontakt des Werkstückes mit der Schneidkante kommt. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse des Formelementes „T-Stück“ sowie des rohrförmigen Ausgangsteiles sind über den Umfang des Formelementes dafür unterschiedliche Formänderungen erforderlich. Da sowohl die Wanddicke als geometrische Eigenschaft als auch die Härte als stoffliche Eigenschaft durch die Formänderungen bestimmt werden, stellen sich in Abhängigkeit von den konkreten Umformbedingungen entlang der Schnittlinie typische Verläufe der geometrischen und stofflichen Eigenschaften ein. Für den Schneidvorgang liegen somit inhomogene Schneidbedingungen vor.

Außer durch einen Umformvorgang kann die Homogenität der Schneidbedingungen auch durch den Hohlprofilquerschnitt sowie den Schnittlinienverlauf beeinflusst werden. In Abschnitt 4.2 sind diesbezüglich Kategorien eingeteilt worden. Alle von den Kategorien A1, B1 und C1 abweichenden Verhältnisse führen zu inhomogenen Schneidbedingungen. Versteht man die Formelementachse im Sinne des Schneidvorganges als Hohlprofilachse, trifft dies für das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden jedoch nicht zu.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass beim IH-TAS ebenso wie beim IH-EAS ein kreisringförmiger Querschnitt und eine senkrecht zur Formelementlängsachse verlaufende Schnittlinie vorliegen, so dass hierdurch die Schneidbedingungen nicht beeinflusst werden. Den entscheidenden Einfluss auf die Inhomogenität der Schneidbedingungen hat der IHU-Vorgang zur Ausformung des Formelementes. Hinzu kommen, wie beim IH-EAS, bereits im Ausgangszustand vorhandene Schwankungen der stofflichen und geometrischen Eigenschaften.

#### **7.4.2 Geometrische Schneidbedingungen beim IH-TAS**

Nachfolgend sollen die geometrischen Schneidbedingungen beim IH-TAS entlang der Schnittlinie, d.h. in der Schnittzone, untersucht und dokumentiert werden. Um nicht die Wanddicke im Einzugsbereich zu erfassen, werden stets die geometrischen Schneidbedingungen 2 mm unterhalb der Schnittlinie bewertet. Trotzdem wird vereinfachend die Bezeichnung „Wanddickenverlauf entlang der Schnittlinie“ verwendet.

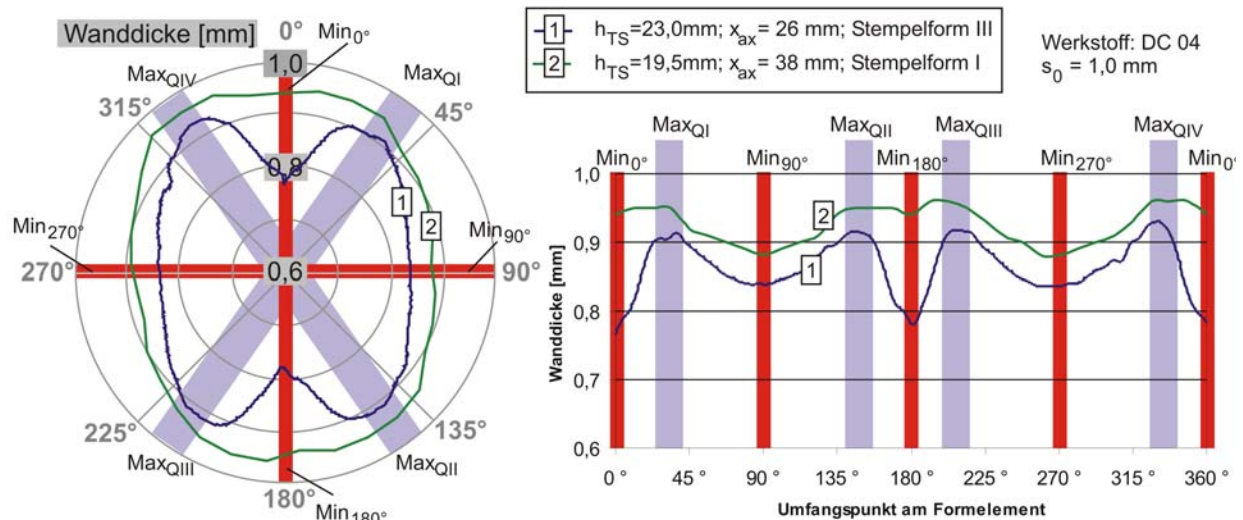


Bild 7-7: Wanddickenverläufe unmittelbar vor der Werkstofftrennung entlang der Schnittlinie

Bild 7-7 zeigt beispielhaft für den Werkstoff DC04 zwei typische Wanddickenverläufe unmittelbar vor der Werkstofftrennung entlang der Schnittlinie in Abhängigkeit von den vorliegenden Umformbedingungen. Der Wanddickenverlauf kann sich im Kreisdiagramm als eine regelmäßige Ellipse, aber auch rosettenartig darstellen. Die orthogonale Darstellung der Wanddickenverläufe als Abwicklung zeigt den prinzipiell identischen Verlauf der beiden Kurven. Minima und Maxima treten, wenn auch in unterschiedlich starker Ausprägung, an den gleichen Punkten des Formelementumfanges auf. In Richtung der Rohrlängsachse (bei 0° und 180°) sowie um 90° dazu versetzt, gibt es lokale Wanddickenminima. Zwischen diesen Minima liegt jeweils ein lokales Maximum, d.h. in jedem Quadranten des Formelementumfanges ist ein Wanddickenmaximum zu finden. Die Lage der Wanddickenminima und –maxima ist in Bild 7-7 grafisch hervorgehoben. In Tabelle 7-2 sind die Wanddickenminima und –maxima bezeichnet und ihre Lage entlang des Formelementumfanges angegeben.

Tabelle 7-2: Bezeichnung und Lage typischer Wanddickenminima und -maxima entlang der Schnittlinie

Wanddickenminima			Wanddickenmaxima		
Bezeichnung	Kurzform	Lage	Bezeichnung	Kurzform	Lage
0° - Minimum	Min <sub>0°</sub>	0° bzw. 360°	Quadrant I - Maximum	Max <sub>QI</sub>	0° < $\alpha$ < 90°
90° - Minimum	Min <sub>90°</sub>	90°	Quadrant II - Maximum	Max <sub>QII</sub>	90° < $\alpha$ < 180°
180° - Minimum	Min <sub>180°</sub>	180°	Quadrant III - Maximum	Max <sub>QIII</sub>	180° < $\alpha$ < 270°
270° - Minimum	Min <sub>270°</sub>	270°	Quadrant IV - Maximum	Max <sub>QIV</sub>	270° < $\alpha$ < 360°

Neben den Werkstoffeigenschaften sind es vor allem die Formelementhöhe und der axiale Nachschiebeweg, die als Umformparameter maßgeblich die Ausprägung des Wanddickenverlaufes entlang der Schnittlinie bestimmen.

In Bild 7-8 sind die Wanddickenverläufe entlang der Schnittlinie für den Werkstoff DC04; 1,0 mm dargestellt. Der verwendete Stützstempel weist eine ebene Stirnfläche auf (Form I). Die Variation der Formelementhöhen von 17,5 bis 21,5 mm

wirkt sich nicht signifikant auf den Wanddickenverlauf entlang der Schnittlinie aus. Allerdings kann die Formelementhöhe als Einflussgröße nicht separat betrachtet werden, da ihre Veränderung zumeist eine Anpassung der axialen Nachschiebewege nach sich zieht, um starke Faltenbildung oder das Bersten im Formelement zu vermeiden. In dem relativ eng begrenzten Parameterfeld hinsichtlich Formelementhöhe und axialem Nachschiebeweg liegen unter den beschriebenen Bedingungen gleiche Wanddickenverläufe und somit identische geometrische Schneidbedingungen vor. Dies ist bei der Anwendung eines Stützstempels der Form III nicht mehr gegeben. Wie Bild 7-9 zeigt, können hier entlang der Schnittlinie ausgeprägtere Wanddickenunterschiede auftreten. Der Grund dafür ist die höhere Effektivität der Abstützung im Kopfbereich des Formelementes. Dadurch können die Umformparameter in weiteren Bereichen variiert werden. Im dargestellten Fall führt beispielsweise der verringerte Nachschiebeweg von  $x_{ax} = 26 \text{ mm}$  dazu, dass die Wanddickenminima  $Min_{0^\circ}$  und  $Min_{180^\circ}$  besonders ausgeprägt auftreten.

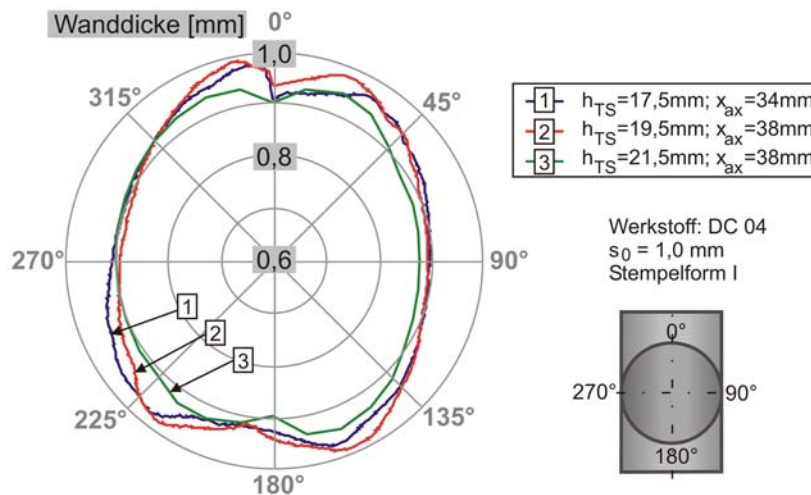


Bild 7-8: Wanddickenverläufe an der Schnittlinie vor der Werkstofftrennung (DC04; 1,0 mm, SF I)

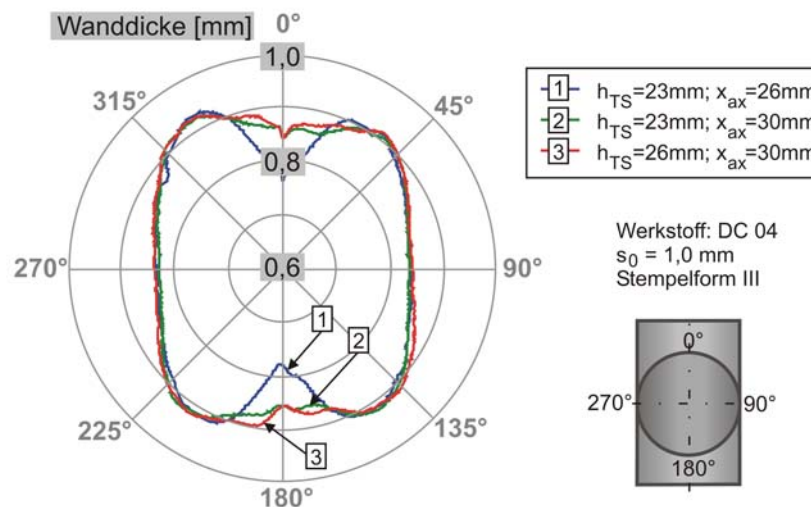


Bild 7-9: Wanddickenverläufe an der Schnittlinie vor der Werkstofftrennung (DC04; 1,0 mm, SF III)

Bild 7-10 zeigt den Einfluss des axialen Nachschiebens bei unterschiedlichen Formelementhöhen auf die Wanddickenverteilung entlang der Schnittlinie für den Werkstoff AlMg3Mn; 3,0 mm. Gegenüber dünnwandigen Rohren ermöglicht die Eigenstabilität dieser Rohre wesentlich größere axiale Nachschiebewege.

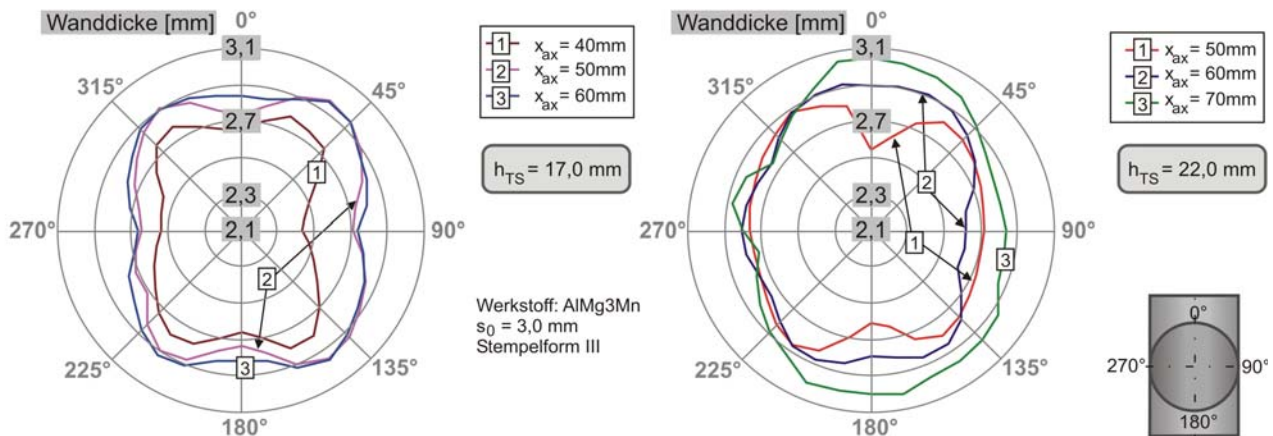


Bild 7-10: Wanddickenverläufe an der Schnittlinie vor der Werkstofftrennung (AlMg3Mn; 3,0 mm)

Die größten Wanddickendifferenzen entlang der Schnittlinie treten bei beiden Formelementhöhen an den Werkstücken auf, bei denen die geringsten Nachschiebewege realisiert werden. Allerdings führt der geringe Nachschiebeweg bei der Formelementhöhe von 22 mm dazu, dass sich die minimalen Wanddicken parallel zur Rohrlängsachse ausbilden ( $Min_{0^\circ}$  und  $Min_{180^\circ}$ ), während bei der reduzierten Formelementhöhe von 17 mm die Wanddickenminima senkrecht zur Rohrlängsachse auftreten ( $Min_{90^\circ}$  und  $Min_{270^\circ}$ ). Die maximalen Wanddicken sind dagegen je Formelementhöhe relativ gleichmäßig. Mit steigenden Nachschiebewegen verringern sich die Wanddickendifferenzen, wobei unabhängig von der Formelementhöhe nicht weniger als etwa 10 % der Ausgangswanddicke erreicht werden. Bei der Formelementhöhe von 22 mm führt die Erhöhung des axialen Nachschiebeweges dazu, dass es in den Formelementbereichen, in denen typischerweise die Wanddickenminima  $Min_{0^\circ}$  und  $Min_{180^\circ}$  auftreten, zu Aufstauchungen von Material kommt. Das hat zur Folge, dass an diesen Stellen bei einem Nachschiebeweg von 60 mm nur noch sehr schwach ausgeprägte Wanddickenminima zu verzeichnen sind, die sich bei einem Nachschiebeweg von 70 mm mit den angrenzenden Wanddickenmaxima zu jeweils einem Wanddickenmaximum verbinden. Bei der Formelementhöhe von 17 mm tritt dieser Effekt nicht auf.

Wanddickenverläufe entlang der Schnittlinie für den Werkstoff S235G2T; 1,0 mm sind in Bild 7-11 dargestellt. Das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden ist unter den gegebenen Bedingungen nur in einem eng begrenzten Prozessfenster möglich (vgl. Abschnitt 7.5). Die sich entlang der Schnittlinie einstellenden Wanddickenverläufe liegen dementsprechend eng beieinander. Bezieht man in diese Betrachtungen die ermittelten Wanddickenschwankungen der Ausgangsrohre von etwa 5 % (siehe Bild 5-13) ein, so sind die Differenzen zwischen den dargestellten Kurven nicht



signifikant. Die Wanddickendifferenzen entlang der Schnittlinie vor der Werkstofftrennung liegen etwas oberhalb von 10 %.

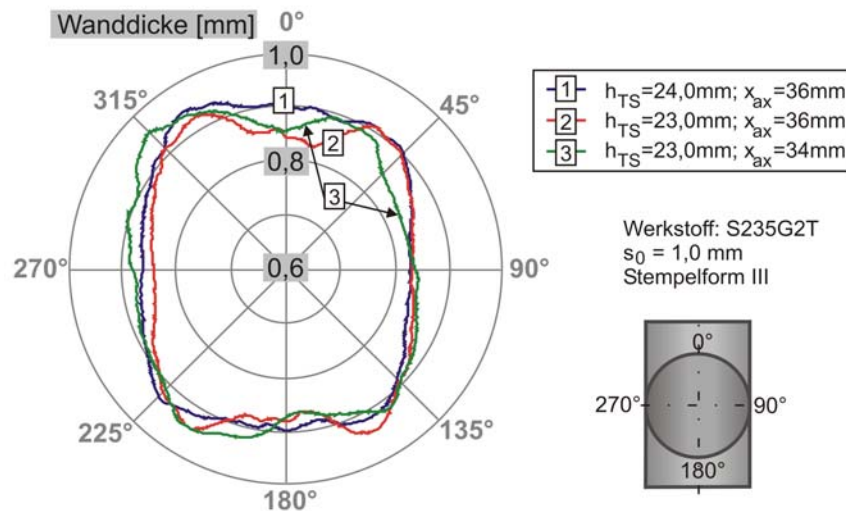


Bild 7-11: Wanddickenverläufe an der Schnittlinie vor der Werkstofftrennung (S235G2T; 1,0 mm)

### 7.4.3 Stoffliche Schneidbedingungen beim IH-TAS

Beim IH-TAS steigt die Härte im Werkstück während der vor dem Schneidvorgang ablaufenden Umformung aufgrund von Verfestigungsvorgängen an. Härtemessungen bieten somit die Möglichkeit, die örtliche Verteilung der stofflichen Eigenschaften sowie ihre Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand zu beschreiben und damit die Inhomogenität der stofflichen Schneidbedingungen zu bewerten. Rückschlüsse auf die Art der Beanspruchung können aus der Härteverteilung nicht gezogen werden.

Ebenso wie bei den Betrachtungen zu den geometrischen Schneidbedingungen (Wanddicken) beim IH-TAS in Abschnitt 7.4.2 werden die stofflichen Schneidbedingungen in Form von Härteverläufen 2 mm unterhalb der Schnittlinie bestimmt. Analog wird auch hier vereinfachend die Bezeichnung „Härteverlauf entlang der Schnittlinie“ verwendet.

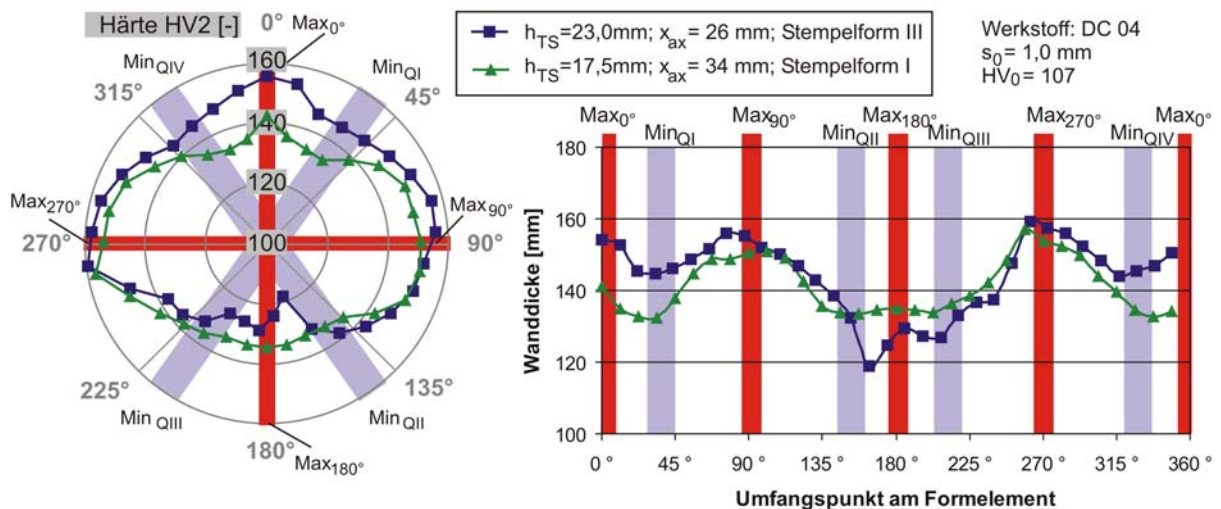


Bild 7-12: Härteverläufe unmittelbar vor der Werkstofftrennung entlang der Schnittlinie

Wie in Bild 7-12 dargestellt, sind die Härteverläufe entlang der Schnittlinie und damit die stofflichen Schneidbedingungen über dem Formelementumfang inhomogen verteilt. Die Härtemaxima und –minima sind prinzipiell den typischen Maxima und Minima der Wanddickenverläufe entgegengesetzt ausgebildet. Das heißt, entlang der Rohrlängsachse sowie 90° dazu versetzt, treten örtliche Härtemaxima auf, während in den jeweils dazwischen liegenden Quadranten lokale Härteminima zu finden sind. Bild 7-12 zeigt jedoch auch, dass vor allem die Härtemaxima in 0°- und 180°-Richtung teilweise sehr schwach ausgeprägt sind. In Tabelle 7-3 sind die Bezeichnungen der typischen Härteminima und –maxima und ihre Lage zusammengestellt.

Tabelle 7-3: Bezeichnung und Lage typischer Härtemaxima und -minima entlang der Schnittlinie

Härtemaxima			Härteminima		
Bezeichnung	Kurzform	Lage	Bezeichnung	Kurzform	Lage
0° - Maximum	Max <sub>0°</sub>	0° bzw. 360°	Quadrant I - Minimum	Min <sub>QI</sub>	0° < α < 90°
90° - Maximum	Max <sub>90°</sub>	90°	Quadrant II - Minimum	Min <sub>QII</sub>	90° < α < 180°
180° - Maximum	Max <sub>180°</sub>	180°	Quadrant III - Minimum	Min <sub>QIII</sub>	180° < α < 270°
270° - Maximum	Max <sub>270°</sub>	270°	Quadrant IV - Minimum	Min <sub>QIV</sub>	270° < α < 360°

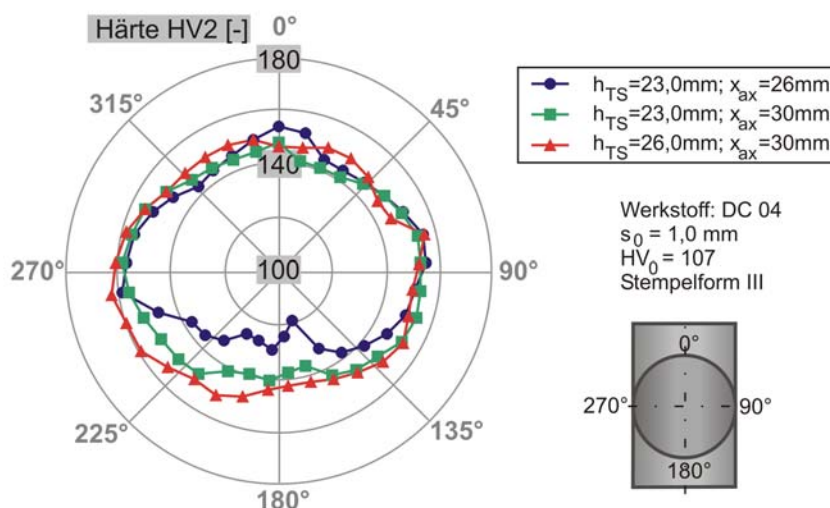


Bild 7-13: Härteverläufe an der Schnittlinie vor der Werkstofftrennung (DC04; 1,0 mm, SF III)

Die Härteverläufe für den Werkstoff DC04, 1,0 mm (Bild 7-13) verdeutlichen, dass eine eindeutige Zuordnung zu den Parametern Formelementhöhe und axialer Nachschiebeweg nicht in jedem Fall möglich ist. Typisch sind die maximalen Härtewerte senkrecht zur Rohrlängsachse (90° und 270°). Die Härtemaxima in Rohrlängsrichtung sind entweder nur gering ausgeprägt oder sie sind, vor allem bei größeren Formelementhöhen, überhaupt nicht vorhanden.

Zum Teil tritt der Effekt auf, dass in der Polardarstellung die Härteverläufe in Richtung der Rohrlängsachse verschoben sind. Das heißt, der Formelementsymmetrie nach gleichartige Punkte weisen unterschiedliche Härtewerte auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Ausformung des Formelementes in der Phase des Nachschiebens eine Werkstoffbevorratung durch reversible Faltenbildung stattfindet.

Die Faltenbildung erfolgt nicht immer symmetrisch. Das führt dazu, dass nach dem Kalibrieren und der damit verbundenen Beseitigung der Falten an diesen Stellen höhere Verfestigungen vorliegen.

Bild 7-14 zeigt für den Werkstoff AlMg3Mn die Härteverläufe an der Schnittlinie unmittelbar vor der Werkstofftrennung für die Formelementhöhen 17 und 22 mm. Für eine jeweils konstante Formelementhöhe sind die Formelemente mit unterschiedlichen Gesamtnachschiebewegen ausgeformt worden. Sowohl die Formelementhöhe als auch der Nachschiebeweg können bei diesem Werkstoff in verhältnismäßig weiten Bereichen variiert werden, ohne dass es zu einem vorzeitigen Versagen kommt. Gegenüber dünnwandigeren Rohren kann vergleichsweise viel Material nachgeschoben werden, da es kaum zur Faltenbildung kommt und stattdessen ein Aufstauchen des Materials stattfindet. Bei einer Formelementhöhe von 17 mm treten im Bereich der Schnittlinie die typischen Härteverläufe ähnlich wie beim DC04 auf, wobei auch Härtemaxima entlang der Rohrlängsachse ausgeprägt sind. An diesen Stellen führt das axiale Nachschieben zur Aufstauchung von Material und damit zu einer Härtesteigerung. Eine Vergrößerung der Formelementhöhe auf 22 mm führt dazu, dass entlang der in gleicher Position verbleibenden Schnittlinie höhere Härtewerte auftreten. Der Härteverlauf ist jedoch auf dem erhöhten Härteniveau deutlich gleichmäßiger. Die Polardarstellung der Härte entlang der Schnittlinie zeigt keine elliptischen sondern nahezu kreisförmige Verläufe (Bild 7-14 rechts).

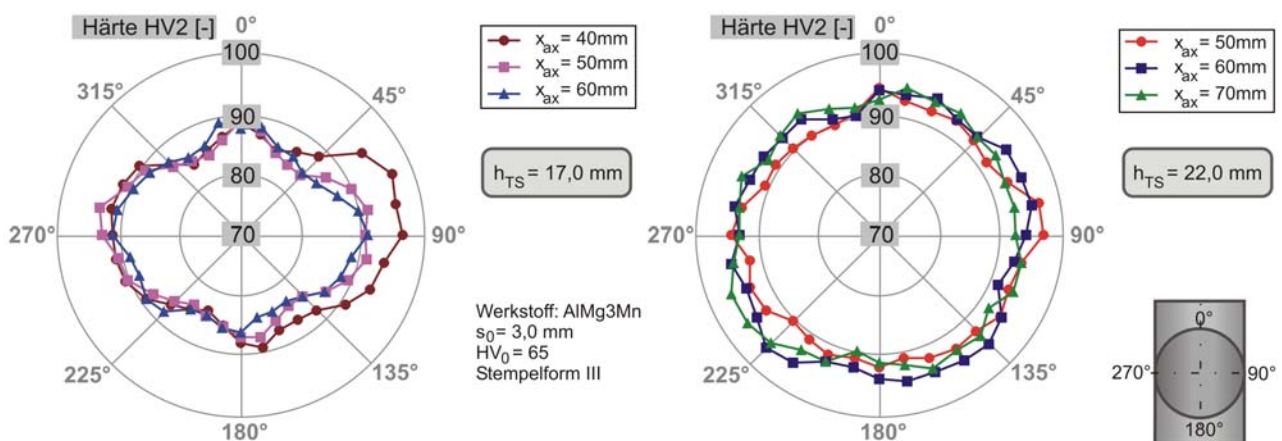


Bild 7-14: Härteverläufe an der Schnittlinie vor der Werkstofftrennung (AlMg3Mn; 3,0 mm)

Für die Formelementhöhe von 22 mm lassen sich somit keine ausgeprägten Härteminima- und –maxima angeben. Es kann festgestellt werden, dass die Vergrößerung der Formelementhöhe im Bereich der Schnittlinie zwar zu höheren Materialbeanspruchungen führt, jedoch gleichzeitig die Homogenität der stofflichen Eigenschaften erhöht. Für den Schneidprozess bedeutet das homogenere stoffliche Schneidbedingungen. Das höhere Verfestigungsniveau beeinflusst den Schneidvorgang nicht negativ.

Die Bewertung der Härteverläufe entlang der Schnittlinie für den Werkstoff S235G2T unterstreicht nochmals die Tendenz, dass die Härtemaxima in 0° und 180°-Richtung nicht ausgebildet werden und sich in diesen Bereichen homogene Härteverläufe ergeben (Bild 7-15). Angesichts der schon verhältnismäßig hohen Schwankungen der Ausgangshärte bei diesem Material (Standardabweichung am Ausgangsrohr etwa 10% der mittleren Härte, vgl. Tabelle 5-4) sowie der begrenzten Möglichkeit der Parametervariation soll auf eine Auswertung der einzelnen Härteverläufe in Bild 7-15 verzichtet werden.

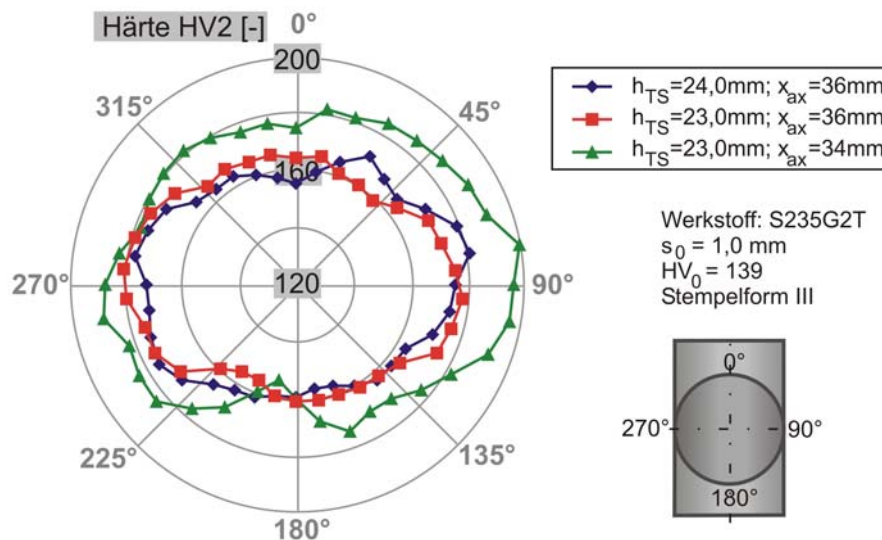


Bild 7-15: Härteverläufe an der Schnittlinie vor der Werkstofftrennung (S235G2T; 1,0 mm)

#### 7.4.4 Zusammenfassung - Schneidbedingungen beim IH-TAS

Die Analyse der geometrischen und stofflichen Schneidbedingungen beim IH-TAS hat gezeigt, dass sich infolge des Umformvorganges entlang der Schnittlinie typische Verläufe ausbilden. Diese Verläufe sind durch mehrere Maxima und Minima der Wanddicken bzw. Härtewerte gekennzeichnet. Die Ausprägung der jeweiligen Maxima und Minima hängt außer vom Werkstoff vor allem von der Formelementhöhe und dem axialen Nachschiebeweg ab. Auch die Stützstempelgeometrie hat Einfluss auf die Härte- und Wanddickenverteilungen und damit auf die Inhomogenität der Schneidbedingungen.

Unter den gegebenen Bedingungen betragen die Wanddickendifferenzen bei allen untersuchten Werkstücken etwa 10% der Ausgangswanddicke. Lässt sich der Umformvorgang des IH-TAS unter verschiedenen Bedingungen realisieren, führen geringe axiale Nachschiebewege zumeist zu deutlich ausgeprägteren Wanddickenminima entlang der Rohrlängsachse und somit zu größeren Wanddickendifferenzen entlang der Schnittlinie. Dies ist besonders bei der Verwendung der Stempelform III zu beobachten. Eine Erhöhung des axialen Nachschiebeweges führt in diesem Fall zu weniger stark ausgeprägten Wanddickenminima und so zu einer homogeneren Wanddickenverteilung. Große axiale Nachschiebewege können zu Aufstauchungen

in 0°- und 180°-Richtung führen, so dass sich an diesen Stellen keine Wanddickenminima mehr ausbilden. Beim S235G2T; 1,0 mm sind aufgrund des sehr engen Prozessfensters für den Umformvorgang des IH-TAS nahezu keine Möglichkeiten vorhanden, den Wanddickenverlauf entlang der Schnittlinie und damit die geometrischen Schneidbedingungen zu beeinflussen. Die Wanddickenschwankungen betragen auch hier etwa 10% bis 15%.

Die Maxima und Minima der Härteverteilungen sind prinzipiell denen der Wanddickenverteilungen entgegengesetzt ausgebildet. Die Härteunterschiede entlang der Schnittlinie betragen, bezogen auf die Ausgangshärte, beim AlMg3Mn zwischen 9 und 20% sowie bei den Stahlwerkstoffen DC04 und S235G2T zwischen 15 und 35%. Tendenziell verringern sich die Härteunterschiede bei größeren Formelementhöhen. Bei größeren Formelementhöhen ist außerdem zu beobachten, dass die Härtemaxima in 0°- und 180°-Richtung z.T. nicht mehr auftreten oder dass sich, wie beim AlMg3Mn; 3,0 mm, überhaupt keine Extremwerte mehr herausbilden. Das bedeutet, die Inhomogenität der stofflichen Schneidbedingungen verringert sich.

In Tabelle 7-4 sind die ermittelten Härte- und Wanddickendifferenzen in einer Übersicht zusammengestellt. Dabei sind jeweils der Absolutwert sowie der auf die Ausgangshärte bzw. Ausgangswanddicke bezogene Wert angegeben.

Tabelle 7-4: Zusammenfassung der maximalen Härte- und Wanddickendifferenzen entlang der Schnittlinie beim IH-TAS

Versuchsmaterial, Wanddicke	Stempel- form	h <sub>TS</sub> [mm]	x <sub>ax</sub> [mm]	Maximale Härteunterschied		Maximale Wand- dickendifferenz	
				ΔHV2 [-]	ΔHV2/HV <sub>0</sub>	Δs [mm]	Δs/s <sub>0</sub>
DC04, 1,0 mm	I	17,5	34	22	21%	0,07	7%
	I	21,5	38	18	17%	0,07	7%
	III	23,0	26	40	37%	0,16	16%
	III	26,0	30	20	19%	0,09	9%
AlMg3Mn, 3,0 mm	III	17,0	40	13	20%	0,38	13%
	III	17,0	50	10	15%	0,31	10%
	III	17,0	60	8	12%	0,30	10%
	III	22,0	50	7	11%	0,33	11%
	III	22,0	60	6	9%	0,30	10%
	III	22,0	70	6	9%	0,32	11%
S235G2T, 1,0 mm	III	24,0	36	30	22%	0,11	11%
	III	23,0	36	25	18%	0,11	11%
	III	23,0	34	45	32%	0,13	13%

### 7.5 Prozessfenster und Arbeitsbereich

Das Prozessfenster beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden definiert sich durch die folgenden zwei Grundbedingungen:

1. Der Berstinnendruck  $p_{iB}$  muss größer sein als der Schneidinnendruck  $p_{iS}$ .
2. Die Werkstofftrennung muss nach ihrer Initiierung entlang der gesamten Schnittlinie erfolgen.

Ob diese beiden Bedingungen erfüllt und das IH-TAS erfolgreich durchgeführt werden kann, hängt im konkreten Fall von einer Reihe werkstück-, werkzeug- und prozessspezifischer Einflüsse ab. Eine Übersicht der wichtigsten Einflussfaktoren auf das IH-TAS ist in Tabelle 7-5 dargestellt.

Tabelle 7-5: Einflussfaktoren auf das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden

werkstückspezifische Einflüsse	werkzeugspezifische Einflüsse	prozessspezifische Einflüsse
<ul style="list-style-type: none"> <li>• stoffliche Ausgangsteileigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Gleichmaß- und Bruchdehnung, n-Wert, r-Wert)</li> <li>• geometrische Ausgangsteileigenschaften (Rohrdurchmesser, Wanddicke, Wanddickenverlauf)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Formelementhöhe</b></li> <li>• Lage der Schneidkante</li> <li>• Stützstempelgeometrie</li> <li>• tribologische Bedingungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>axialer Nachschiebeweg</b></li> <li>• Innendruck beim Nachschieben</li> <li>• radiale Abstützung des Formelementes</li> </ul>

Die Basis für die Realisierung des Innenhochdruck-T-Stück-Abschneidens bildet die Prozessstrategie. In Abschnitt 7.3 wurden drei Prozessstrategien beschrieben. Die Untersuchungen zum IH-TAS zeigen, dass zwei dieser Prozessstrategien anwendbar sind. Es ist möglich, den radialen Stützstempel während des gesamten Vorganges in seiner hinteren Endposition zu belassen, so dass die Schneidkante immer frei ist. Da am Beginn des Umformprozesses eine freie Aufweitung des Formelementes ohne radiale Abstützung erfolgt, ist diese Prozessstrategie nur für gut umformbare Werkstoffe und Rohre, bei denen axiales Nachschieben effektiv möglich ist, geeignet. Bei den anderen Prozessstrategien wird das Formelement mit dem radialen Stützstempel aktiv abgestützt. Es hat sich gezeigt, dass es zwingend erforderlich ist, dass der radiale Stützstempel mit dem Erreichen des axialen Nachschiebeweges auch seine Endposition erreicht hat. Das heißt, in der Phase des Kalibrierens darf keine Bewegung des Stützstempels zu größeren Formelementhöhen erfolgen, da dies unmittelbar zum Bersten im Formelement führt. Es ist somit nicht möglich, das Formelement bei neutralisierter Schneidkante zu kalibrieren und diese dann durch die Bewegung des Stützstempels freizugeben bzw. zu aktivieren. Gegenüber der Prozessstrategie mit festem Stützstempel ist die Prozessstrategie mit aktiver

Abstützung des Formelementes während des axialen Nachschiebens auch für Werkstoffe mit verringertem Umformvermögen sowie Rohre mit eingeschränkten Möglichkeiten des axialen Nachschiebens geeignet. Den nachfolgend dargestellten Untersuchungsergebnissen liegt eine Prozessstrategie zu Grunde, bei der das Formelement während des Umformvorganges mit dem radialen Stützstempel aktiv abgestützt wird und der Stützstempel mit dem Ende des axialen Nachschiebens seine hintere Endposition erreicht.

Von den in Tabelle 7-5 aufgeführten Einflüssen nehmen die Formelementhöhe und der axiale Nachschiebeweg Schlüsselstellungen ein. Zum einen ist es bei der überwiegenden Zahl von IHU-Prozessen möglich, den Vorgang durch Variation dieser Parameter zu steuern, zum anderen haben gerade diese Parameter eine besonders signifikante Auswirkung auf den Umformvorgang und die Schneidbedingungen. Deshalb ist es sinnvoll, das Prozessfenster für das IH-TAS in einem Diagramm anzugeben, bei dem auf der Abszisse der Nachschiebeweg und auf der Ordinate die Formelementhöhe dargestellt werden. In dieses Diagramm kann das Resultat der Innendruckerhöhung, d.h. Bersten oder Innenhochdruckabschneiden eingetragen werden. Die anderen in Tabelle 7-5 angegebenen Kenngrößen und Parameter bleiben konstant.

Zunächst soll der Teilvorgang „Innenhochdruckumformen“ betrachtet werden. Typisch für das Formelement T-Stück ist, dass auch eine Formelementhöhe von null eine Umformung voraussetzt. Die Umformung findet dann primär in den Seitenbereichen des Formelementes (quer zur Rohrlängsachse) statt. Es hängt vor allem von den Werkstückeigenschaften ab, ob zur Ausformung der Formelementhöhe Null ein axiales Nachschieben erforderlich ist. Andererseits kann es unter bestimmten Bedingungen auch möglich sein, ohne axiales Nachschieben T-Stücke mit  $h_{TS} > 0$  auszuformen. Mit zunehmenden axialen Nachschiebewegen steigen die ausformbaren Formelementhöhen der T-Stücke, ohne dass es zum Versagensfall Bersten kommt. Da bei der Verwendung eines Stempels der Form I (glatte Stempelstirnfläche, vgl. Bild 7-6) an der Formelementoberkante werkzeugseitig kein Kalibrierradius existiert, ist hier ein bestimmter Innendruck oder ein sich einstellender Radius am Werkstück als Abbruchkriterium anzusetzen. Mit dieser Voraussetzung existiert ein Arbeitsbereich, in dem das Innenhochdruckumformen von Rohren zu T-Stücken möglich ist (Bild 7-16). Bei großen axialen Nachschiebewegen wird der Arbeitsbereich des Innenhochdruckumformens durch die Versagensfälle Stülpen bzw. Knicken begrenzt, bei großen Formelementhöhen durch den Versagensfall Bersten.

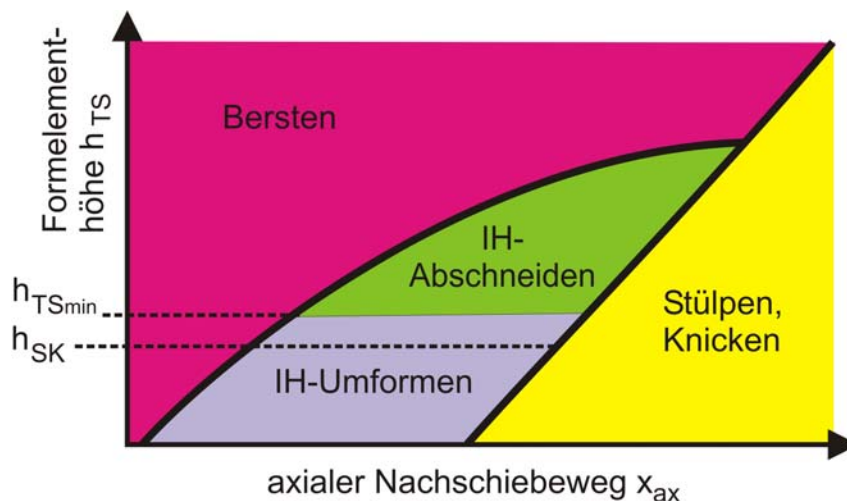


Bild 7-16: Schematisches Prozessfenster für das IH-TAS (Stempelform I)

Es wurde bereits gezeigt, dass beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden von Rohren zunächst das Innenhochdruckumformen als Voraussetzung für das Innenhochdruckabschneiden realisiert werden muss. Der Arbeitsbereich für das Innenhochdruckabschneiden befindet sich deshalb innerhalb des Arbeitsbereiches für das Innenhochdruckumformen. Der kleinste Abstand der Schneidkante vom Außendurchmesser des Ausgangsrohres repräsentiert die verbleibende Kragenhöhe des getrennten T-Stückes und ist in Bild 7-16 mit  $h_{SK}$  angegeben. Zu geringen Formelementhöhen hin wird der Arbeitsbereich des IH-TAS durch eine Mindestformelementhöhe  $h_{TSmin}$  begrenzt. Der Abstand zwischen den Werten  $h_{TSmin}$  und  $h_{SK}$  dokumentiert die minimal notwendige Schneidnutbreite, um unter Innendruckwirkung entlang der Schnittlinie einen kritischen Spannungszustand aufzubauen und das Abschneiden zu realisieren.

In Bild 7-17 ist für den Werkstoff AlMg3Mn; 3,0 mm der für die praktische Realisierung des IH-TAS relevante Bereich des Prozessfensters dargestellt. Das Prozessfenster gilt für einen radialen Stützstempel mit ebener Stempelstirnfläche. Zusätzlich zum Prozessergebnis ist für jeden Punkt jeweils der Berst- bzw. Schneidinnendruck angegeben. Die Bereiche für Formelementhöhen  $h_{TS} < h_{SK}$  sowie für sehr große axiale Nachschiebewege werden dabei vernachlässigt. Der Arbeitsbereich für das IH-TAS dieses Materials verdeutlicht die Möglichkeit, mit den Parametern Formelementhöhe und axiale Nachschiebeweg den Schneidvorgang und besonders das Innendruckniveau, auf dem die Werkstofftrennung erfolgen soll, zu beeinflussen. In Bild 7-17 sind zudem charakteristische Werkstücke enthalten. Das vorzeitige Bersten tritt unter den gegebenen Bedingungen am Übergang vom oberen Formelementradius zur Formelementoberseite um  $90^\circ$  versetzt zur Rohrlängsachse auf.



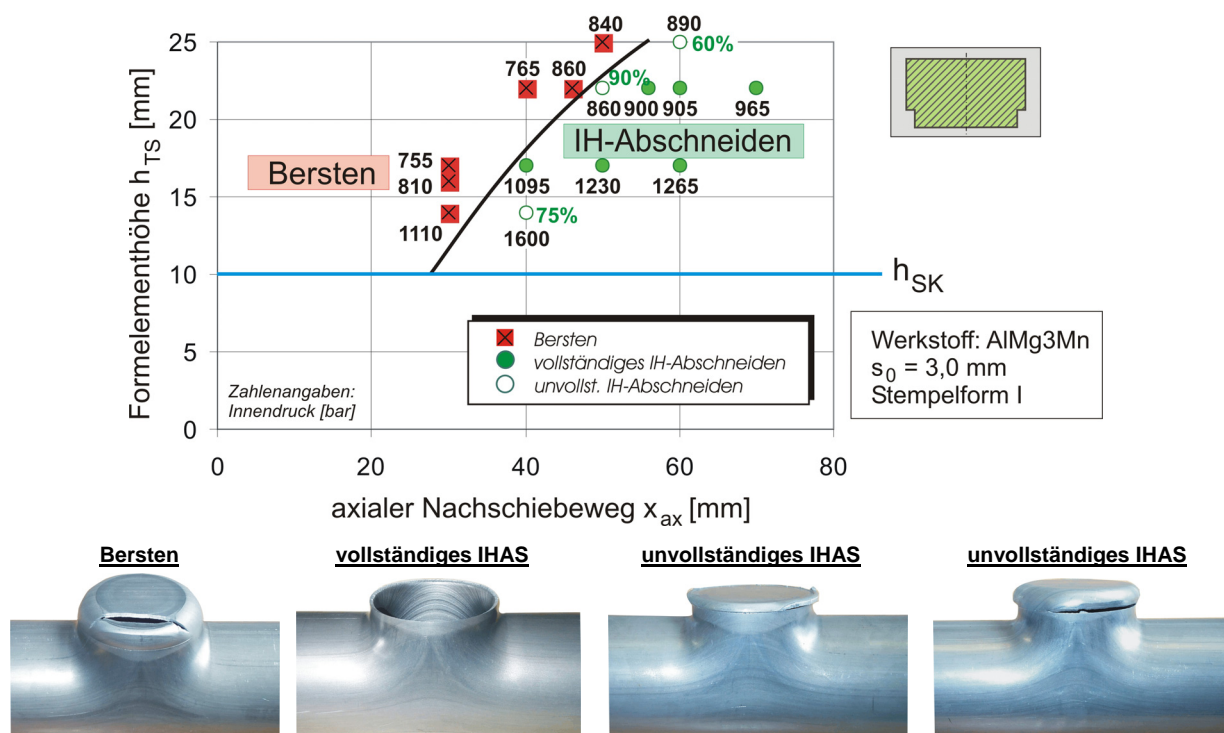


Bild 7-17: Prozessfenster und typische Beispielteile für das IH-TAS (AlMg3Mn; 3,0 mm; Stempel Form I)

Durch gezielte Variation von Formelementhöhe und Nachschiebeweg kann erreicht werden, dass unterhalb des Berstinnendruckes  $p_{iB}$  beim Schneidinnendruck  $p_{iS}$  die Werkstofftrennung entlang der Schneidkante einsetzt. Der Arbeitsbereich des Innenhochdruckabschneidens ist beim AlMg3Mn; 3,0 mm im Grenzbereich zum Bersten sowie zu kleinen Formelementhöhen hin durch unvollständige Werkstofftrennungen über dem Umfang des Formelementes gekennzeichnet.

In Abhängigkeit von den vorliegenden stofflichen Ausgangseigenschaften kann der Arbeitsbereich für das Innenhochdruckabschneiden innerhalb des Prozessfensters jedoch auch deutlich kleiner sein. Bei Werkstoffen mit geringem Umformvermögen und begrenzten Möglichkeiten des axialen Nachschiebens kann der Arbeitsbereich auch völlig entfallen. Bild 7-18 zeigt ein solches Beispiel mit dem Prozessfenster für das IH-TAS des Werkstoffes S235G2T bei Verwendung eines Stützstempels mit ebener Stempelstirnfläche. Das bei geringen Nachschiebewegen auftretende Bersten vor dem Schneiden kann hier auch durch eine Erhöhung der axialen Nachschiebewege nicht verhindert werden. An den Werkstücken kommt es dann zum Stülpen mit nachfolgendem Bersten. Das Stülpen zeigt, dass die Möglichkeiten des axialen Nachschiebens bei diesem Material erschöpft sind. Der prinzipiell zwischen dem Bereich des Berstens und des Stülpens liegende Arbeitsbereich für das Innenhochdruckabschneiden (vgl. Bild 7-16) ist unter den gegebenen Bedingungen für dieses Material nicht existent.

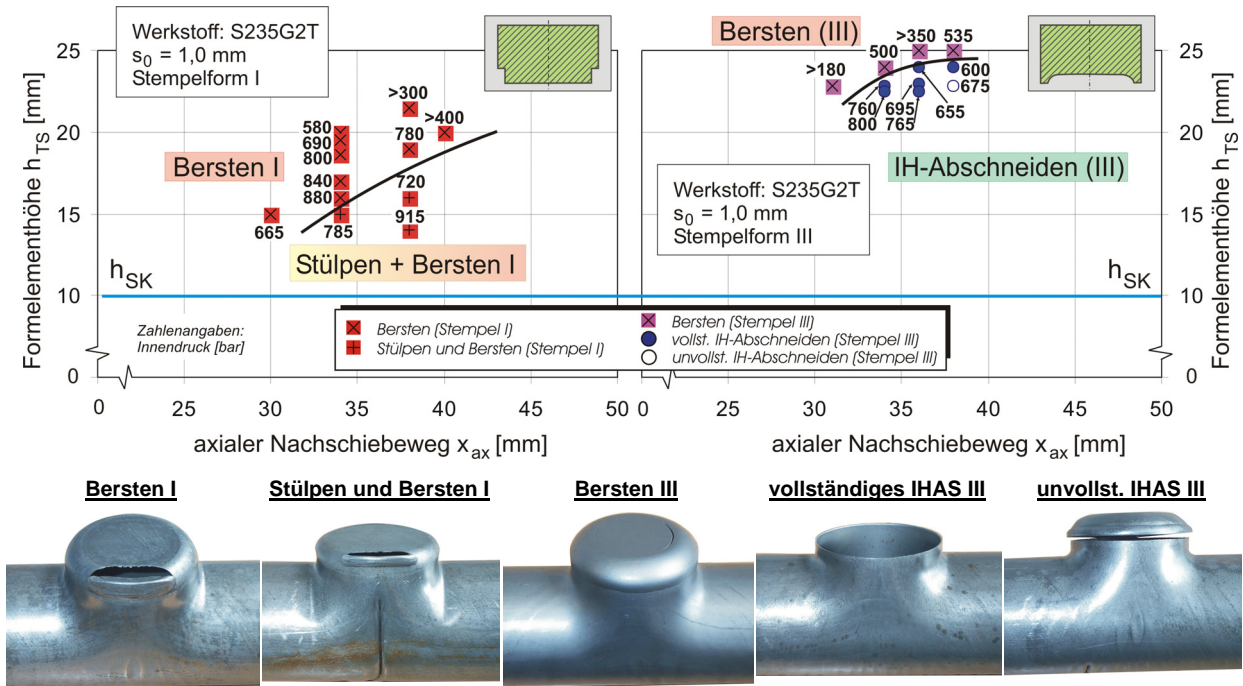


Bild 7-18: Prozessfenster und Beispielteile für das IH-TAS (S235G2T; 1,0 mm; Stempelformen I und III)

Bei Verwendung eines Stützstempels mit ebener Stirnfläche tritt beim S235G2T; 1,0 mm das vorzeitige Bersten, ebenso wie beim AlMg3Mn; 3 mm, um 90° versetzt zur Rohrlängsachse und, wie für das Formelement „T-Stück“ typisch, am Übergang vom oberen Formelementradius zur Formelementoberseite auf. Die Streckziehbeanspruchung erreicht in diesem Bereich einen kritischen Wert, so dass es zum Versagen kommt. Dieser Versagensfall kann hinausgezögert bzw. verhindert werden, wenn das Material in den kritischen Bereichen effektiv abgestützt wird. Dadurch werden zum einen Druckspannungsanteile in das Material eingebracht und zum anderen wird durch die Reibung zwischen Werkstück und Stützstempel das Fließen des Materials behindert. Die Umformung kann in andere, weniger stark beanspruchte Bereiche umgeleitet werden. Die Verwendung eines Stützstempels der Form II (vgl. Bild 7-6) führte zu keiner effektiveren Abstützwirkung. Die Stelle des Versagens wird zwar örtlich leicht verlagert, der Berstdruck jedoch nicht signifikant beeinflusst. Die Stempelform III ist so gestaltet, dass das T-Stück im gesamten oberen Radius bis in den zylindrischen Bereich abgestützt wird. Wie bereits beschrieben, ist der Radialweg des Stützstempels III durch diese konstruktive Gestaltung zum Werkstück hin begrenzt. Bei der Verwendung dieses Stützstempels bildet sich eine beidseitig definierte Schneidnut aus, so dass werkzeugseitig ähnliche Verhältnisse wie beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden von unverformten Rohren vorliegen. Demgegenüber entsteht beim IH-TAS mit einem Stützstempel der Form I eine Schneidnut, die auf der Schneidkantenseite definiert, auf der gegenüberliegenden Seite jedoch frei ist (siehe Bild 7-19).

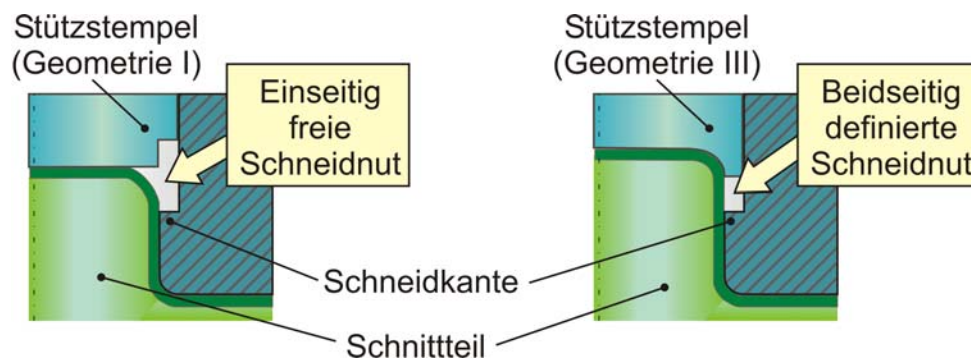


Bild 7-19: Schneidnutausbildung beim IH-TAS in Abhängigkeit von der Stempelform

Im Vergleich zum Stützstempel mit ebener Stirnfläche (I) werden bei Nutzung der Stempelform III größere Formelementhöhen erreicht, bzw. es muss weniger Material in die Umformzone geschoben werden, was besonders bei dünnwandigen Rohren von besonderer Bedeutung ist. Bild 7-18 zeigt das Prozessfenster für den S235G2T; 1,0 mm bei Verwendung des Stützstempels III. Auch hier kommt es bei geringen Nachschiebewegen bzw. großen Formelementhöhen zum Bersten. Durch die Wirkung des Stützstempels III tritt das Versagen im Formelement jedoch entlang der Rohrlängsachse auf. Bei geeigneter Wahl von Formelementhöhe und Nachschiebeweg existiert aufgrund der effektiven Abstützwirkung des Stützstempels ein Arbeitsbereich, in dem das IH-TAS erfolgreich realisiert werden kann. Bei großen Nachschiebewegen kann es zu unvollständigen Werkstofftrennungen kommen. Diese unvollständigen Werkstofftrennungen können im konkreten Fall durch eine Vergrößerung der Formelementhöhe vermieden werden, so dass komplette Werkstofftrennungen erreicht werden.

Mit dem DC04; 1,0 mm zeigt Bild 7-20 ein Prozessfenster für ein Material, für das das IH-TAS unter den gegebenen Bedingungen sowohl mit dem ebenen Stützstempel (I) als auch mit dem an die Formelementgeometrie angepassten Stützstempel (III) realisierbar ist. Der Arbeitsbereich des Innenhochdruckabschneidens verschiebt sich durch die Verwendung des Stützstempels III zu kleineren axialen Nachschiebewegen und größeren Formelementhöhen. Beim Bersten hängen die Versagensorte von der verwendeten Stützstempelgeometrie ab. Sie liegen bei Verwendung des Stützstempels I an den bereits für den S235G2T; 1,0 mm beschriebenen typischen Stellen, d.h. um 90° versetzt zur Rohrlängsachse (90° und 270° des Formelementumfangs). Kommt der Stützstempel III zur Anwendung, verlagern sich die Versagensorte parallel zur Rohrlängsachse, d.h. in die Positionen 0° und 180° des Formelementumfangs. Unvollständige Werkstofftrennungen treten unabhängig vom verwendeten Stützstempel innerhalb des Arbeitsbereiches für das Innenhochdruckabschneiden bei geringen Formelementhöhen und anders als beim S235G2T; 1,0 mm auch bei geringen Nachschiebewegen auf.

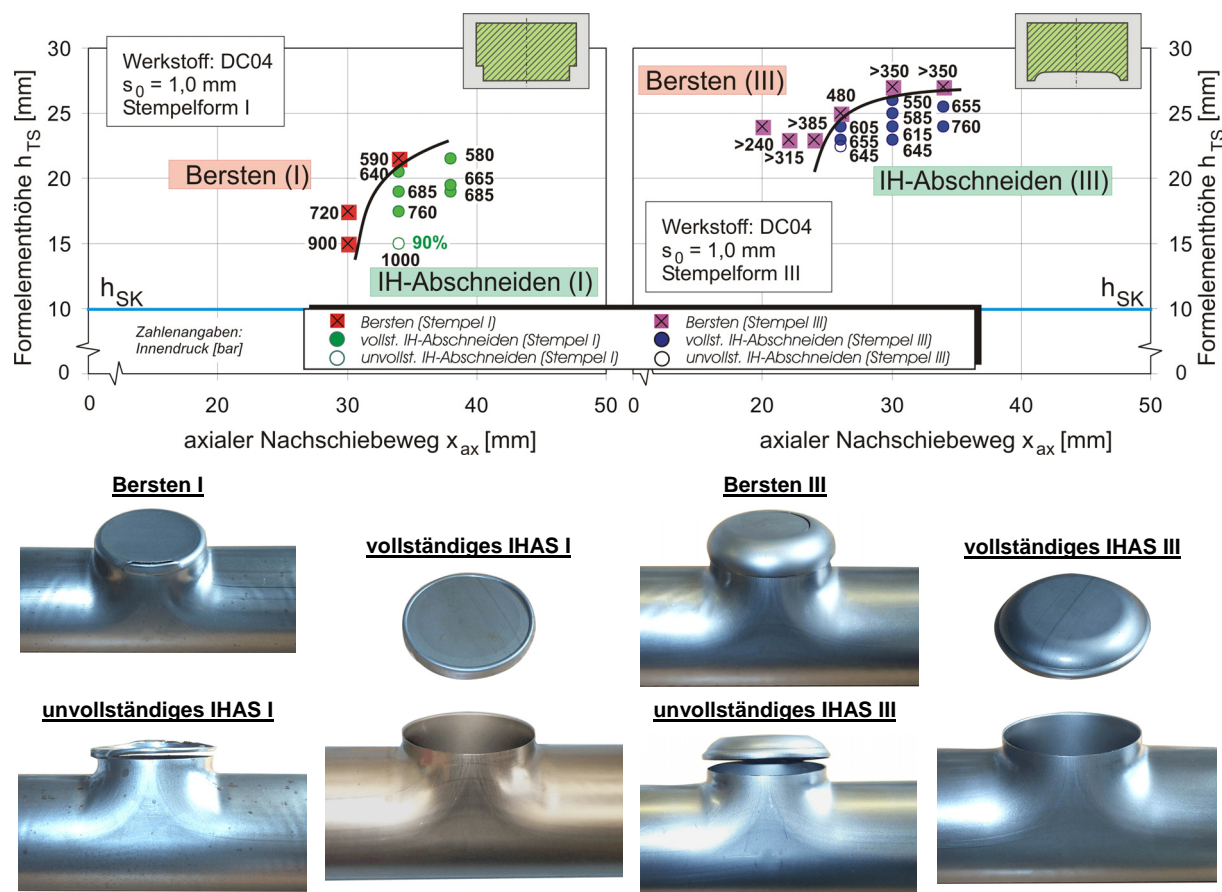


Bild 7-20: Prozessfenster und Beispielteile für das IH-TAS (DC04; 1,0 mm; Stempelformen I und III)

Die Darstellungen der Prozessfenster für das IH-TAS der Ausgangsteile AlMg3Mn; 3,0 mm, S235G2T; 1,0 mm und DC04; 1,0 mm zeigen, dass trotz der aus der Umformung resultierenden, inhomogenen Schneidbedingungen entlang der Schnittlinie das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden in einem spezifischen Arbeitsbereich möglich ist. Haupteinflussparameter sind dabei die Formelementhöhe und der axiale Nachschiebeweg. In jedem Fall muss der Berstdruck des Innenhochdruckumformvorganges höher sein als der Schneidinnendruck des Innenhochdruckabschneidvorganges. Besonders geeignet sind Ausgangsteile mit einem hohen Umformvermögen (DC04; 1,0 mm) bzw. einer hohen Eigenstabilität gegen Faltenbildung und Stülpen (AlMg3Mn; 3,0 mm), so dass genügend Material in die Umformzone geschoben werden kann. Eine besondere Bedeutung kommt der Wirksamkeit der radialen Abstützung zu, die wesentlich durch die Stützstempelgeometrie bestimmt wird. Bei effektiver radialer Abstützung (Stützstempelgeometrie III) kann das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden beim S235G2T; 1,0 mm trotz des eingeschränkten Umformvermögens und der aufgrund der Faltenbildung begrenzten axialen Nachschiebemöglichkeiten erfolgreich durchgeführt werden. Bei ebener Stirnfläche des Stützstempels und damit verringerter Abstützung ist dies nicht der Fall. Unvollständige Werkstofftrennungen, deren Ursache in den inhomogenen Schneidbe-

dingungen liegen, können den Arbeitsbereich des Innenhochdruckabschneidens bei kleinen Formelementhöhen, aber auch am Übergang zum Berstbereich begrenzen.

### 7.6 Schnittkantenqualität

Wie beim Innenhochdruckabschneiden von unverformten Rohren sind auch beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden die Schnittkanten durch einen Einzug- und Trennbereich gekennzeichnet. Da die Schneidbedingungen aufgrund des Umformvorganges entlang der Schnittlinie inhomogen sind, ist es erforderlich, die Schnittkanten an mehreren Stellen des Umfanges zu bewerten. Nachfolgend soll die Schnittflächenausbildung stets an jeweils vier um 90° versetzten Stellen dargestellt werden. Bild 7-21 zeigt die Schnittflächen eines abgeschnittenen T-Stückes aus dem Werkstoff AlMg3Mn; 3,0 mm. In allen Messpunkten liegen deutlich ausgeprägte Trennbereiche vor, die ausschließlich aus Bruchflächenanteilen bestehen. Die Bruchflächen sind verhältnismäßig uneben. Der Einzugsbereich ist entlang der Rohrachse (0° und 180°) deutlicher ausgebildet als in den um 90° versetzten Seitenbereichen (90° und 270°). In den Positionen 0° und 180° des Formelementumfanges führt die Umformung des Materials über die Schneidkante vor der Werkstofftrennung zu einem signifikanten Einzug, während in den Seitenbereichen das Material nur in geringem Maße über die Schneidkante geformt wird, so dass sich kaum ein Einzugsbereich herausbildet.

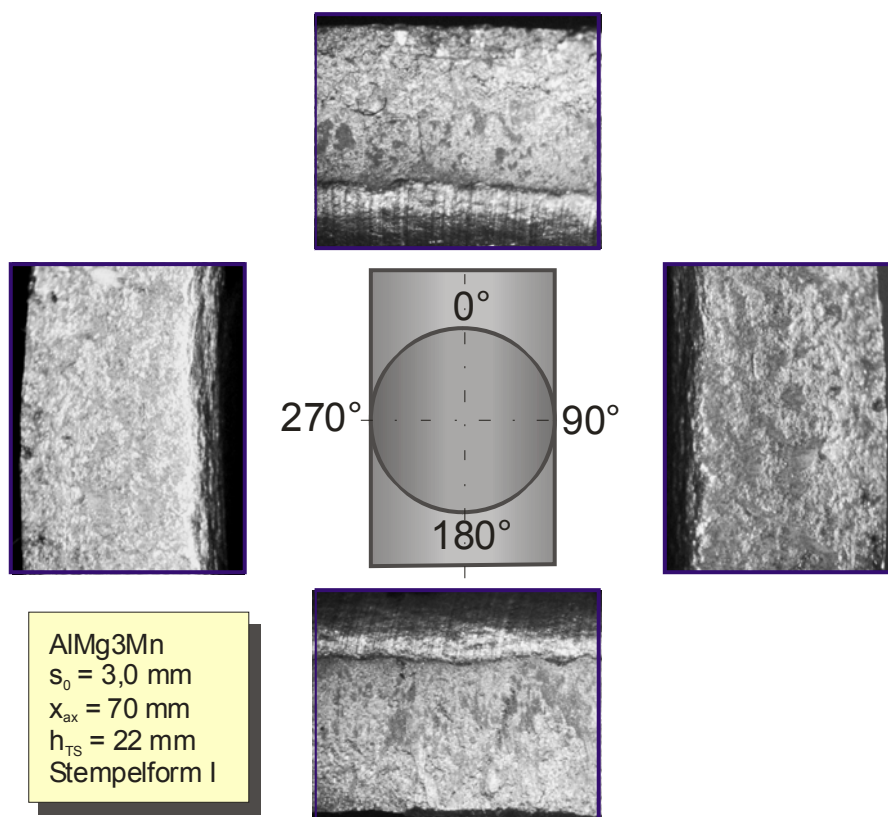


Bild 7-21: Schnittflächenausbildung beim IH-TAS (AlMg3Mn; 3,0 mm)

Für das IH-TAS des gleichen Rohrwerkstoffes, allerdings unter veränderten Umformbedingungen (Nachschiebeweg, Formelementhöhe) sind in Bild 7-22 die Schnittflächen dargestellt. In den Seitenbereichen ( $90^\circ$  und  $270^\circ$ ) treten örtlich begrenzt geometrische Unebenheiten in Form von Ausbrüchen auf der Trennfläche auf. Unmittelbar neben den o.g. Bereichen ist die Trennfläche wieder gleichmäßiger ausgeprägt. In Abschnitt 7.4 konnte gezeigt werden, dass bei geringeren Formelementhöhen inhomogenere Schneidbedingungen vorliegen als bei größeren Formelementhöhen. Die Inhomogenität der geometrischen Schneidbedingungen über den Formelementumfang nimmt mit der verringerten Formelementhöhe von 10 auf 12% nur unwesentlich zu. Die Inhomogenität der stofflichen Schneidbedingungen über den Formelementumfang erhöht sich dagegen von 9 auf 20% signifikant. Die Ausbrüche auf der Trennfläche resultieren vor allem aus der vergrößerten Inhomogenität der stofflichen Schneidbedingungen mit den ausgeprägten Härtemaxima in  $90^\circ$ - und  $270^\circ$ -Richtung. Auf die Schnittflächenausbildung entlang der Rohrlängsachse ( $0^\circ$ - und  $180^\circ$ -Richtung) wirkt sich die Formelementhöhe nicht signifikant aus.

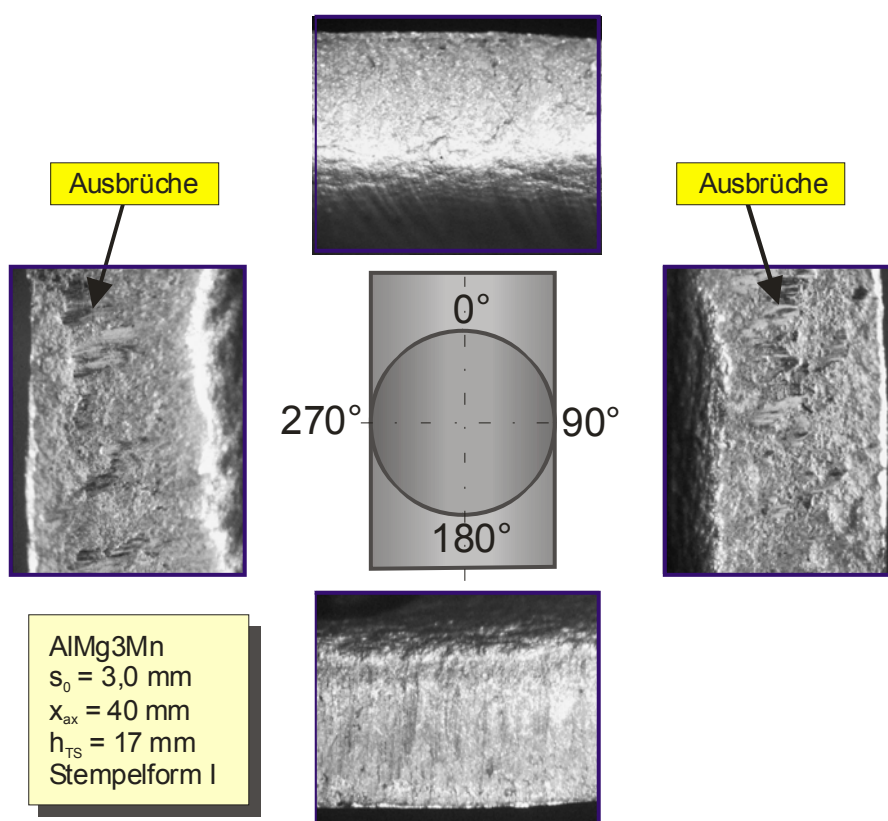


Bild 7-22: Schnittflächenausbildung beim IH-TAS (AlMg3Mn; 3,0 mm)

Bild 7-23 und Bild 7-24 zeigen Schnittflächen nach dem IH-TAS für den Werkstoff DC 04; 1,0 mm bei unterschiedlichen Stempelformen (siehe auch Abschnitt 7.5). Aufgrund seines hohen Umformvermögens bildet sich bei diesem Werkstoff generell ein deutlicher Einzugsbereich aus. Die Grenze zwischen Einzugs- und Trennbereich ist oft unregelmäßig und teilweise verschmiert. Bei Verwendung eines Stützstempels mit

einer an den Formelementradius angepassten Geometrie (III) kommt es, wie in Bild 7-24 gezeigt, in den Seitenbereichen, d.h. in 90°- und 270°-Richtung, zu Ausbrüchen auf der Trennfläche sowie teilweise zur Ausbildung von makroskopischen Absätzen auf der Schnittfläche. Die Ursache sind auch hier die inhomogenen Schneidbedingungen entlang der Schnittlinie, die bei Verwendung der Stützstempelgeometrie III deutlicher ausgeprägt sind als bei der Stützstempelgeometrie I (vgl. Abschnitt 7.4). Die makroskopischen Absätze auf der Trennfläche entstehen, weil die Werkstofftrennung hier nicht aufgrund des Erreichens der Trennbedingung durch den eigentlichen Schneidvorgang erfolgt. Vielmehr werden diese Bereiche durch die Werkstofftrennung in den angrenzenden Bereichen abgerissen. Dabei stellt sich keine geometrisch bestimmte Schnittfläche ein. Die Absätze auf der Schnittfläche können je nach Einsatzzweck des Werkstückes eine Einschränkung des Gebrauchswertes des gesamten Bauteiles bedeuten.

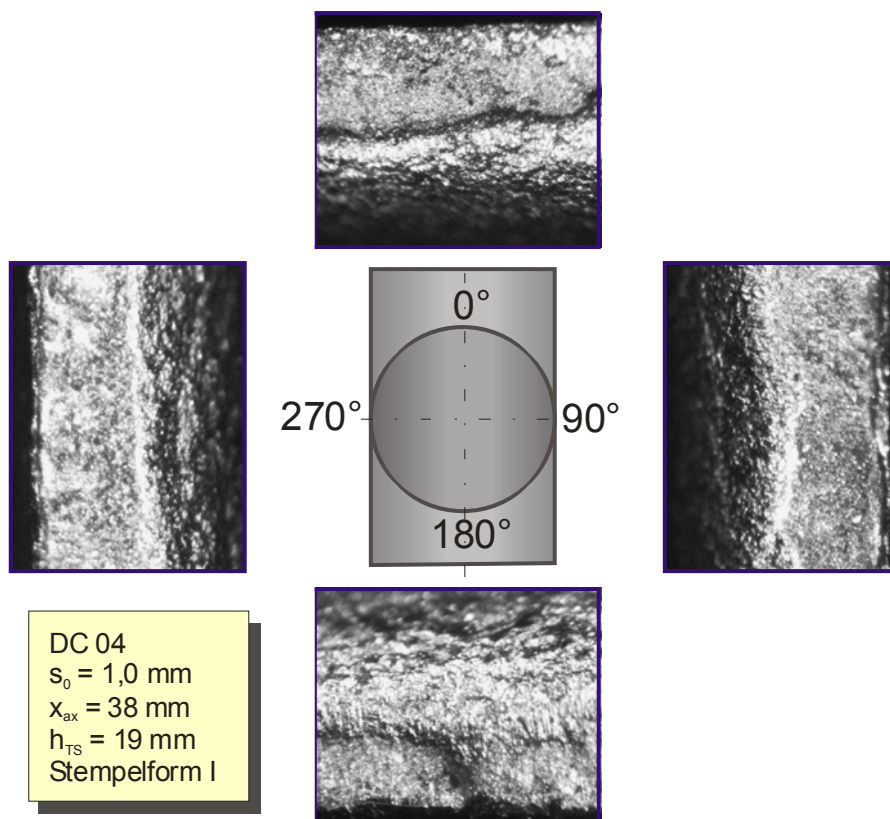


Bild 7-23: Schnittflächenausbildung beim IH-TAS (DC04; 1,0 mm; Stempelform I)

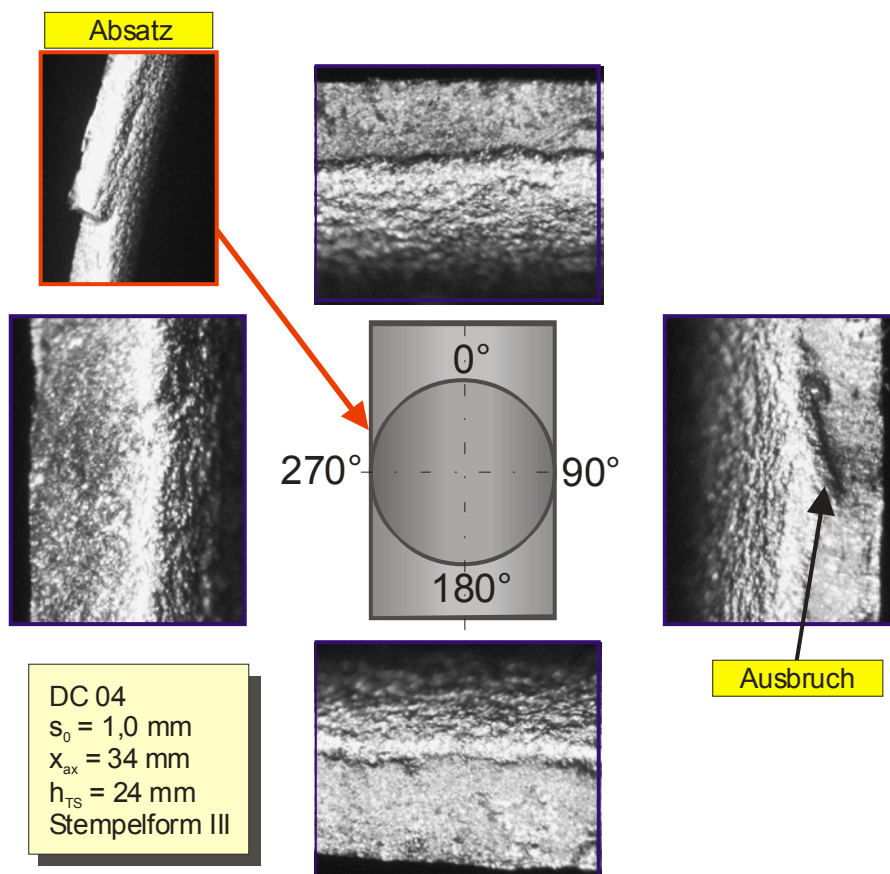


Bild 7-24: Schnittflächenausbildung beim IH-TAS (DC04; 1,0 mm; Stempelform III)

Beim Werkstoff S235G2T; 1,0 mm kommt es bei Verwendung der Stützstempelgeometrie III ebenfalls zur Ausbildung von makroskopischen Absätzen auf der Trennfläche. (Bild 7-25). Allerdings muss angemerkt werden, dass dieses Material ausschließlich bei Nutzung der Stempelform III zu trennen ist. Aufgrund des eingeschränkten Umformvermögens des S235G2T bildet sich nur ein geringer Einzugsbereich aus. Der wesentlich deutlicher ausgeprägte Trennbereich besteht ausschließlich aus Bruchflächen mit hoher Rauigkeit.



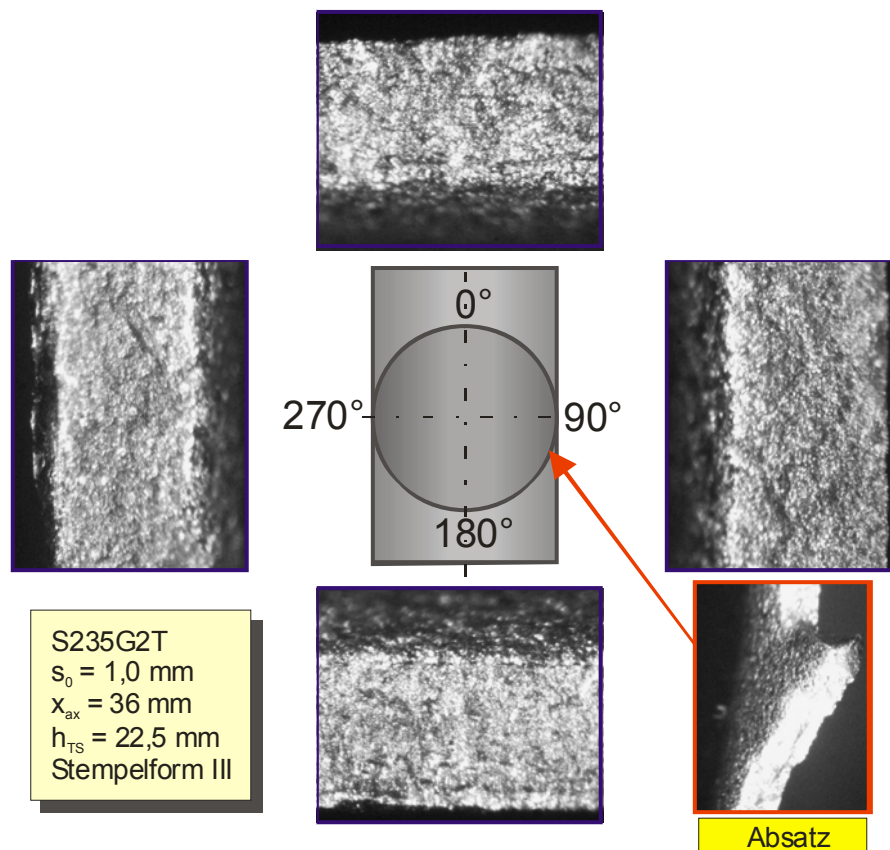


Bild 7-25: Schnittflächenausbildung beim IH-TAS (S235G2T; 1,0 mm; Stempelform III)

## 7.7 Zusammenfassung und Anwenderrichtlinie zum IH-TAS

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde an einem unverformten Rohr durch Innenhochdruckumformen ein asymmetrisches Nebenformelement (T-Stück) erzeugt. Im gleichen Fertigungsschritt wurde das Nebenformelement in seinem zylindrischen Bereich durch Innenhochdruckabschneiden mit Schneidring und Schneidnut über seinen kompletten Umfang abgetrennt. Am Beginn des Prozesses gibt es keinen Kontakt zwischen dem Rohr und der Schneidkante. Erst durch den IHU-Vorgang wird der Kontakt zwischen dem Werkstückwerkstoff und der fest positionierten Schneidkante erreicht. Sowohl die Wechselwirkung zwischen Schneidkante und Werkstückwerkstoff als auch die stofflichen und geometrischen Werkstückeigenschaften entlang der späteren Schnittlinie weisen aufgrund des Umformvorganges eine charakteristische, örtliche Verteilung auf. Es liegen inhomogene Schneidbedingungen vor. Um das IH-TAS erfolgreich realisieren zu können, müssen die folgenden zwei Bedingungen erfüllt sein:

1. Der Berstinnendruck  $p_{IB}$  muss größer sein als der Schneidinnendruck  $p_{IS}$ .
2. Die Werkstofftrennung muss nach ihrer Initiierung entlang der gesamten Schnittlinie erfolgen.

Die Einhaltung dieser Bedingungen erfordert im konkreten Fall eine geeignete Prozessgestaltung unter Beachtung werkstück-, werkzeug- und prozessspezifischer Einflüsse sowie eine darauf abgestimmte, effektive Abstützung des Nebenform-

elementes. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Nebenformelementhöhe und der axiale Nachschiebeweg die wesentlichen Parameter darstellen. In Abhängigkeit dieser Größen ergibt sich ein Prozessfenster, in dem das IH-TAS erfolgreich durchgeführt werden kann. Die Stützstempelgeometrie bestimmt dabei wesentlich die Lage des Arbeitsbereiches und in Abhängigkeit vom Umformvermögen des Materials auch die Machbarkeit des IH-TAS. Die Verwendung eines an die Formelementgeometrie angepassten Stützstempels (Geometrie III) erweitert aufgrund der effektiveren Abstützung des Formelementes gegenüber der Stützstempelgeometrie I die Machbarkeit des IH-TAS. Die Schnittkanten am Endteil sind, wie für das Innenhochdruckabschneiden typisch, durch einen deutlichen Einzug sowie einen Trennbereich gekennzeichnet. In Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften sowie den Umformbedingungen können aufgrund der vorliegenden Inhomogenität der Schneidbedingungen in den Seitenbereichen des abgetrennten Nebenformelementes Ausbrüche auf der Schnittfläche bzw. makroskopische Absätze auftreten. Insgesamt werden beim IH-TAS unter Verwendung eines ebenen Stützstempels (I) Schnittflächen mit besserer Qualität erreicht, während bei der Nutzung des Stützstempels III häufiger geometrische Abweichungen auf der Schnittfläche auftreten.

In Kurzform lassen sich die folgenden Anwenderrichtlinien zusammenstellen:

- Bei fester Schneidkantenposition (Schneidkantenhöhe) ist die Schneidnutbreite variabel und ergibt sich in Abhängigkeit von der Stützstempelposition bzw. Formelementhöhe.
- Als Werkzeugwerkstoff sind die üblichen Werkstoffe für IHU-Werkzeuge zu verwenden.
- Der Trennvorgang muss durch eine Erhöhung des Innendruckes und nicht durch eine Stempelbewegung erreicht werden. Der Stützstempel muss bereits vor der Innendruckerhöhung beim Kalibrieren seine Endposition erreicht haben.
- Grundvoraussetzung ist, dass der Berstinnendruck  $p_B$  des Systems größer ist als der Schneidinnendruck  $p_S$ .
- Die Nebenformelementhöhe und der axiale Nachschiebeweg können zur Erstellung eines Prozessfensters herangezogen werden.
- Der Arbeitsbereich für das IH-TAS ist ein Teil des Arbeitsbereiches für das Innenhochdruckumformen des T-Stückes.
- Von entscheidender Bedeutung für Lage des Arbeitsbereiches und die Machbarkeit des IH-TAS sind die Stützstempelgeometrie bzw. die daraus resultierende Effektivität der Abstützung.

- Ein an die Formelementgeometrie angepasster Stützstempel (Geometrie III) verbessert die Abstützwirkung und vergrößert das Arbeitsfeld und somit die Machbarkeit des IH-TAS.
- Das Innenhochdruckabschneiden findet beim IH-TAS unter inhomogenen stofflichen und geometrischen Schneidbedingungen statt. Diese können in den Grenzbereichen des Arbeitsfeldes des IH-TAS zu unvollständigen Werkstofftrennungen über dem Formelementumfang führen.
- Die Inhomogenität der Schneidbedingungen entlang der Schnittlinie verringert sich bei größeren Formelementhöhen. Sie ist bei Verwendung eines angepassten Stützstempels (III) deutlicher ausgeprägt als bei Verwendung eines ebenen Stützstempels (I).
- Die Schnittkanten an den Endteilen weisen einen ausgeprägten Einzug auf der Formelementinnenseite, einen Trennbereich sowie einen Grat auf der Formelementaußenseite auf.
- Die inhomogenen Schneidbedingungen beim IH-TAS können in den Seitenbereichen des abgetrennten Nebenformelementes (90°- und 270°-Richtung) zu Ausbrüchen und zu makroskopischen Absätzen auf der Trennfläche führen.
- Diese geometrischen Abweichungen auf der Trennfläche treten verstärkt bei der Verwendung einer angepassten Stützstempelgeometrie (III) auf.

## 8 Zusammenfassung

Die Innenhochdruckverfahren haben sich, vor allem mit dem Kernverfahren „Innenhochdruckumformen“, in den letzten Jahren in der industriellen Produktion fest etabliert, speziell wenn Leichtbaustrategien umgesetzt werden sollen. Aufgrund der verhältnismäßig hohen Investitionskosten für die Realisierung der IHU-Technologie sind es zumeist wirtschaftliche Gesichtspunkte, die darüber entscheiden, ob ein Bauteil nach dieser Technologie gefertigt wird. Einen nicht unerheblichen Anteil an den Gesamtkosten nehmen gegenwärtig Zusatzoperationen, wie das Beschneiden der Bauteile, ein. Eine Alternative zu den thermischen und mechanischen Trennverfahren stellt das Innenhochdruckschneiden dar. Es bietet die Möglichkeit, Trennoperationen an Bauteilen, integriert in IHU-Prozess sowie IHU-Werkzeug, durchzuführen und ermöglicht es so, die Effektivität und Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses deutlich zu steigern.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist die wissenschaftliche und technische Erschließung des Innenhochdruckabschneidens (IHAS) mit Schneidring und Schneidnut von Rohren als Voraussetzung für eine fundierte und effektive Planung und Realisierung dieser Technologie. Das umfasst die Schaffung von Verfahrensgrundlagen sowie die wissenschaftlich-technologische Determinierung des Innenhochdruckabschneidens von unverformten Rohren beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden (IH-EAS). Darauf aufbauend erfolgt die Anwendung des Innenhochdruckabschneidens in unmittelbarer Verknüpfung mit dem Innenhochdruckumformen beim Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden (IH-TAS). Die Arbeit beinhaltet dementsprechend Untersuchungen zum IHAS unter homogenen Schneidbedingungen (Innenhochdruck-Einfachabschneiden) sowie unter inhomogenen Schneidbedingungen (Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden).

In theoretischen Betrachtungen werden aufbauend auf dem Stand der Technik eine weiterführende Systematik des Trennens von Hohlprofilen erarbeitet sowie das Innenhochdruckabschneiden in die Systematik der Fertigungsverfahren eingliedert. Der zur Werkstofftrennung beim Innenhochdruck-Einfachabschneiden führende Spannungszustand wird in drei Stufen modelliert. Für die experimentellen Untersuchungen kommt eine breite Palette von Stahl- und Aluminiumrohren verschiedener Wanddicken zur Anwendung. Zur Machbarkeit des IH-EAS wird der Einfluss der Schneidnutgeometrie, vor allem der Schneidnuttiefe herausgearbeitet. Unter den gegebenen Bedingungen ist für die Schneidnuttiefe die halbe Schneidnutbreite empfehlenswert. Auf der Basis der experimentellen Untersuchungsergebnisse wird ein empirischer Ansatz zur Bestimmung des Schneidinnendruckes angegeben. Darüber hinaus wird eine modellbasierte Berechnungsvorschrift für den Schneidinnendruck entwickelt, in die ausschließlich Werkstoffkennwerte, die Rohrabmessungen sowie die Schneidnutbreite eingehen, d.h. es sind keine

empirischen Korrekturfaktoren notwendig. Die Schnittkantenqualität der Endteile wird in Abhängigkeit von den Ausgangsteileigenschaften sowie den Umformbedingungen umfassend untersucht.

Im Hinblick auf das industriell häufig angewendete Innenhochdruckumformen von Doppelteilen, die anschließend getrennt werden müssen, wird eine Verfahrensvariante zur Realisierung des Innenhochdruck-Doppelabschneidens (IH-DAS) erarbeitet. Diese Verfahrensvariante basiert darauf, dass die beiden Werkstofftrennungen in separaten Schneidnuten ablaufen. Das IH-DAS ist somit ein parallel ablaufendes, doppeltes Innenhochdruck-Einfachabschneiden und zeigt die prinzipielle Möglichkeit auf, eine noch höhere Anzahl von Werkstofftrennungen in Form des Innenhochdruck-Mehrfachabschneidens zu realisieren.

Für ausgewählte Ausgangsteile werden das IH-EAS unter axialen Nachschiebekräften und das IH-EAS mit Elastomerabstützung in der Schneidnut untersucht. Die dabei ermittelten Verfahrensgrenzen bestätigen den bei der Modellierung des Spannungszustandes beim Innenhochdruckabschneiden beschriebenen wesentlichen Einfluss der axialen Zugspannungsanteile auf den Ablauf und das Ergebnis des Schneidvorganges.

In Anwendung und Erweiterung der Ergebnisse zum Innenhochdruck-Einfachabschneiden wird als weiterer Schwerpunkt der Arbeit das Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden (IH-TAS) behandelt. Das IH-TAS stellt eine Verfahrenskombination von Innenhochdruckumformen und Innenhochdruckabschneiden dar, bei der der Kopfbereich eines T-Stückes unmittelbar nach dem Umformvorgang durch Innenhochdruckabschneiden abgetrennt wird. Mit dem IH-TAS wird ein wichtiger Beitrag zur Weiterentwicklung des Innenhochdruckabschneidens geleistet, da erstmals das Innenhochdruckabschneiden unter inhomogenen Schneidbedingungen systematisch untersucht wird. Das IH-TAS ist aber auch als Verfahrensvariante selbst von großem Interesse, da das T-Stück ein industriell häufig zur Anwendung kommendes Formelement ist, wobei in vielen Fällen der Kopfbereich des Formelementes in einem separaten Arbeitsgang mechanisch oder thermisch abgetrennt werden muss. Die Inhomogenität der stofflichen und geometrischen Schneidbedingungen beim IH-TAS, die sich aus dem Innenhochdruckumformvorgang ergibt, wird umfassend dokumentiert. Darauf aufbauend wird der Einfluss von Rohrwerkstoff, Stützstempelgeometrie sowie verschiedener Prozessparameter systematisch untersucht. Als wichtigste Prozessparameter beim IH-TAS werden die Formelementhöhe sowie der axiale Nachschiebeweg herausgearbeitet. In Abhängigkeit von diesen beiden maßgeblichen Prozessparametern können für ausgewählte Rohrarten typische Prozessfenster dargestellt werden. Zudem wird in Wechselwirkung mit der Inhomogenität der Schneidbedingungen, den Prozessparametern und der Stützstempelgeometrie die Schnittkantenqualität der Endteile beschrieben.

Neben der Untersuchung des Innenhochdruck-T-Stück-Abschneidens als Fertigungsverfahren wird mit den vorliegenden Arbeiten zugleich der Nachweis erbracht, dass das Innenhochdruckabschneiden erfolgreich in Innenhochdruckumformprozesse integriert werden kann. Damit wird das Potential dieser innovativen Technologie aufgezeigt und gleichzeitig die Basis für weitere industrielle Anwendungen geschaffen.

## **9 Schlussfolgerungen und Ausblick**

Mit den dargestellten Ergebnissen der systematischen Untersuchungen zum Innenhochdruckabschneiden unverformter Rohre und in Verfahrenskombination mit dem Innenhochdruckumformen wurde eine umfassende Basis für die Anwendung dieser effektiven Fertigungsalternative in der industriellen Praxis geschaffen. Der im Stand der Technik dargestellte unzureichende Erkenntnisstand zum Innenhochdruckabschneiden ist mit der vorliegenden Arbeit umfassend erweitert und ausgebaut worden. Somit ist es nunmehr möglich, Trennvorgänge an unverformten Rohren, d.h. unter homogenen Schneidbedingungen, auf wissenschaftlicher Basis auszulegen und reproduzierbar durchzuführen. Für die Weiterentwicklung des Innenhochdruckabschneidens von Hohlprofilen ist es jedoch notwendig, die vorliegende Datenbasis zum Grundvorgang hinsichtlich weiterer Werkstoffe, der erforderlichen Schneidnutgeometrien sowie des Einflusses des Rohrdurchmessers systematisch zu erweitern. Ein umfassender Wissensstand wurde zum Innenhochdruck-T-Stück-Abschneiden erarbeitet, bei dem der Trennvorgang unter inhomogenen stofflichen und geometrischen Schneidbedingungen realisiert wird. Besonders im Hinblick auf die praktische Umsetzung des Innenhochdruckabschneidens stellt das IH-TAS einen sehr wichtigen Schritt bei der Weiterentwicklung dieses Verfahrens dar. Beim IH-TAS werden kreisringförmige Querschnitte getrennt (Kategorien A1 und B1, vgl. Abschnitt 4.2) und die Schnittlinie verläuft in einer Ebene senkrecht zur Formelementachse (Kategorie C1). In der industriellen Praxis gibt es jedoch eine Vielzahl von Trennaufgaben an IHU-Bauteilen, die nicht den oben genannten Kategorien entsprechen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind, basierend auf den Arbeiten zum IH-TAS, weiterführende Untersuchungen zum Innenhochdruckabschneiden unter inhomogenen Schneidbedingungen notwendig. Ein Schwerpunkt zukünftiger Forschungen auf diesem Gebiet wird das Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen mit Rechteckquerschnitten sein (Bild 9-1). Bei vielen industriellen IHU-Anwendungen werden aus rohrförmigen Ausgangsteilen Hohlprofile mit Rechteckquerschnitten hergestellt, so dass die Forderung besteht, diese Bauteile unmittelbar nach dem IHU-Vorgang zu trennen. Zu den stofflich und geometrisch inhomogenen Schneidbedingungen, die sich aus dem Umformprozess ergeben, kommt beim IH-EAS von Rechteckquerschnitten die Inhomogenität des Schnittlinienverlaufes.

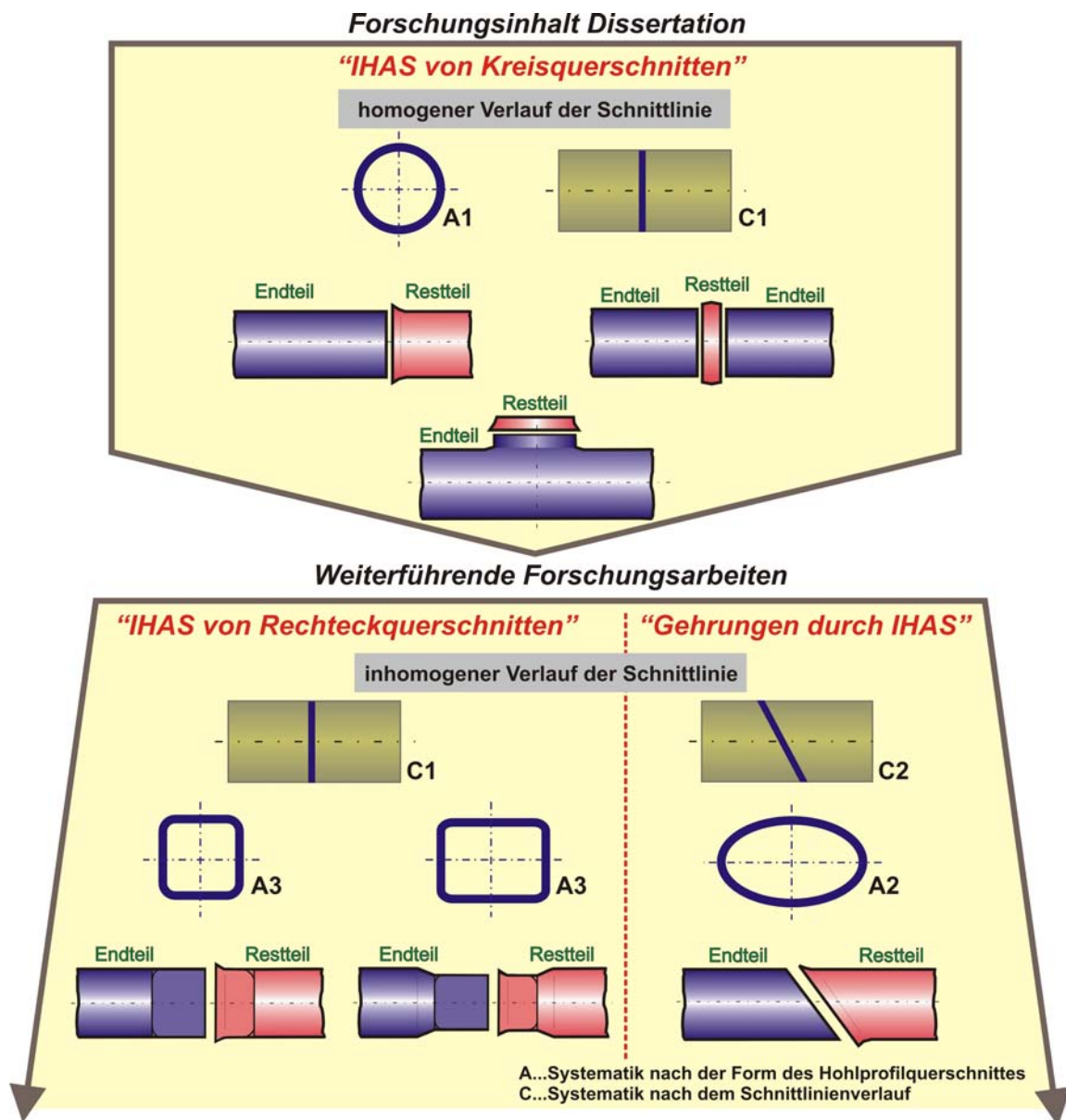
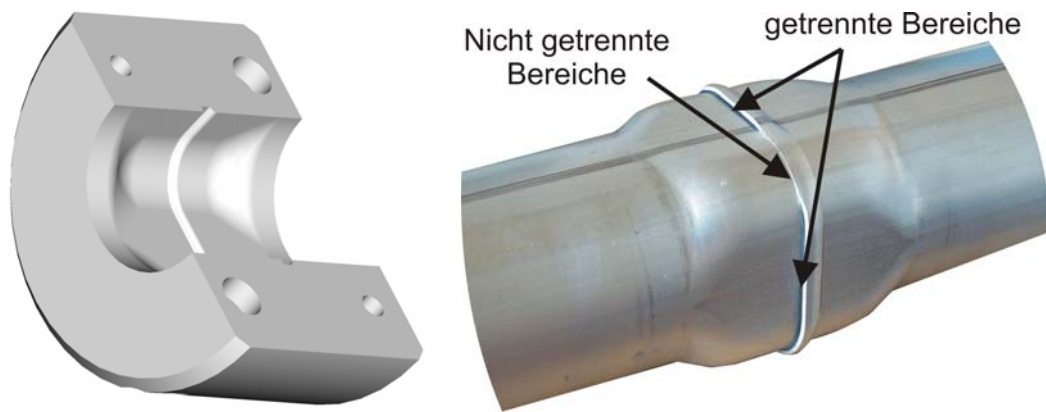


Bild 9-1: Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten zum Innenhochdruckabschneiden

Der besondere Anspruch beim IH-EAS von Rechteckquerschnitten besteht darin, dass sich der Spannungszustand in den Eckbereichen vom Spannungszustand in den geraden Bereichen unterscheidet und trotzdem eine Werkstofftrennung über dem gesamten Umfang erreicht werden muss. Erste Pilotversuche zeigen, dass die geraden Bereiche vollständig, die Eckbereiche jedoch nur teilweise abgetrennt werden (Bild 9-2). Hier ergibt sich weiterführender Forschungsbedarf. Für die Realisierung dieser Arbeiten kann bezüglich des Grundvorganges das mit der vorliegenden Dissertation behandelte IH-EAS von unverformten Rohren als Basis herangezogen werden. Das Innenhochdruckabschneiden unter inhomogenen Schneidbedingungen beim IH-EAS von Rechteckquerschnitten kann auf Grundlage der Erkenntnisse zum IH-TAS erarbeitet werden.



**Bild 9-2: IH-EAS von Rechteckquerschnitten; links: Werkzeug; rechts: unvollständige Werkstofftrennung**

Eine weitere praxisrelevante Aufgabe, die unmittelbar auf der vorliegenden Arbeit aufbaut, ist die Realisierung von Gehrungen an rohrförmigen Ausgangsteilen. Durch die Veränderung der Lage der Schnittebene zur Rohrlängsachse ergibt sich auch eine Veränderung des zu trennenden Querschnittes (siehe Bild 9-1). Wesentliche Erkenntnisse können auch für diese Forschungsaufgabe vom Grundvorgang beim IH-EAS von unverformten Rohren abgeleitet werden.

Mit der vorliegenden Arbeit konnten wesentliche Defizite bezüglich des Kenntnisstandes zum Innenhochdruckabschneiden von Hohlprofilen beseitigt werden. Die Ergebnisse zeigen das Potential des Innenhochdruckabschneidens als Beitrag zur Steigerung der Effektivität der IHU-Technologie und liefern grundlegende Erkenntnisse sowohl zum Grundvorgang als auch zum Einsatz des Innenhochdruckabschneidens für industrielle Anwendungen. Mit der nun vorliegenden Wissensbasis können weitere praxisrelevante Trennaufgaben (siehe Beispiel in Bild 9-2) effektiv und auf wissenschaftlicher Grundlage entwickelt und bearbeitet werden. Wenn das Innenhochdruckabschneiden durch weitere Forschungsarbeiten systematisch weiterentwickelt wird, findet diese Technologie einen festen Platz in der industriellen IHU-Fertigung und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Effektivität der Produktion.



## 10 Literaturverzeichnis

- /1/ Bieling, P.:  
Untersuchungen zum Aufweitstauchen von Rohren zu Hohlwellen.  
Dissertation, Universität Gesamthochschule Paderborn, 1992.
- /2/ Böhm, A.:  
Numerische Simulation von Verfahren der Innenhochdruckumformung unter besonderer Berücksichtigung des Aufweitens im geschlossenen Gesenk.  
Dissertation, Universität-Gesamthochschule-Paderborn, 1993.
- /3/ Dudziak, K.-H.:  
Prozeßmodell zum Innenhochdruckumformen von hohlwellenförmigen Werkstücken.  
VDI-Fortschrittsberichte Reihe 2, Fertigungstechnik, Nr. 368.  
Dissertation, Universität-Gesamthochschule-Paderborn, 1996.
- /4/ Eichhorn, A.:  
Innovative Fertigungstechnologien – Umformen und Lochen mit Innenhochdruck.  
In: EFB-Kolloquium: „Innenhochdruckumformen – eine Alternative in der Fertigungstechnik“, Tagungsband T16, Fellbach, 05./06. März 1996.
- /5/ Hanicke, L.; Lassl, G.; Holm, S.; Strandberg, Ö.:  
Lighter Car Body In Aluminium With Hydroforming Technology, R & D Result.  
IBEC 1996, Detroit; Reg.-No.: 96-98230-11, Volvo Car Corporation.
- /6/ Engel, B.:  
Verfahrensstrategie zum Innenhochdruckumformen.  
Berichte aus Produktion und Umformtechnik, Band 30, 1996.
- /7/ Klaas, F.; Kaehler, K.:  
Weniger Werkstoff. Spanloses Fertigen innovativer Hohlteile mit den Innenhochdruck-Umformverfahren.  
Maschinenmarkt; 100 (1994) Heft 3, S. 20 – 23.
- /8/ Oswald, J.; Wenzel, H.:  
Bauteilentwicklung zum IHU.  
Arbeitsband zum EFB–Fortbildungspraktikum: „Innenhochdruckumformen von Rohren“; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, September 1997, S. 145 – 155.
- /9/ Bobbert, D.:  
Innenhochdruckumformen - Beispiele und neue Entwicklungen in der Praxis.  
Stahl und Eisen, Band 121 (2001) Heft 6, Seite 73 – 78.
- /10/ Elsinghorst, D; Böhm, A.:  
Auf dem Weg in eine 'goldene' Zukunft. Technologische und wirtschaftliche Aspekte des Innenhochdruck-Umformens. Teil 2.  
Blech (1999) Heft 3, Seite 72 – 80.

- /11/ Krux, R.; Brosius, A.; Homberg, W.; Kleiner, M.:  
Prozessintegriertes Lochen und Trennen bei Hochdruckumformprozessen.  
Abschlussbericht zum Forschungsprojekt der Studiengesellschaft für Stahlanwendung, Universität Dortmund, 2002.
- /12/ Geissler, S.; Ostermann, T.:  
High-tech-Abgaskrümmen mit IHU-Verfahren fertigen.  
Blech InForm (2004); Heft 2, Seite 24 – 26.
- /13/ N. N.:  
Mehr Sicherheit durch IHU. A-Säule und Windlauf des BMW 3er Cabrio.  
Blech, Rohre, Profile (2001); Heft 2, Seite 58 – 59.
- /14/ Rieger, R.:  
Lochen und Schneiden von Bauteilen mit flüssigem Druckmedium.  
Dissertation am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart, 2002.
- /15/ Jaster, R.:  
Flexible Schnitte:  
Maschinenmarkt (2004); Heft 30, Seite 22 – 23.
- /16/ N. N.:  
Laser beschneidet IHU-Bauteile.  
SMM Schweizer Maschinenmarkt 105 (2004), Heft 13, S. 52 – 53.
- /17/ Graf, D.; Nagel, M.:  
Anlagen zum Trennen und Formbeschneiden von mittels Hydroforming hergestellten Werkstücken unter Verwendung des Scherschneidens.  
Arbeitsband zum EFB–Fortbildungspraktikum: „Innenhochdruckumformen von Rohren“; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, September 2003, S. 301 – 307.
- /18/ Cherek, H; Prier, M.; Leitloff, F.-U.:  
Innenhochdruckumformen – Eine Technologie mit Zukunft.  
Tagungsband zum 8. Umformtechnischen Kolloquium Darmstadt (UKD) 2003, PtU Darmstadt, April 2003, 103 – 109.
- /19/ DIN 8580:  
Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.  
Ref. Nr. DIN 8580:2003-09; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- /20/ DIN 8588:  
Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe.  
Ref. Nr. DIN 8588:2003-09; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- /21/ VDI 3146:  
Blatt 1: Innenhochdruck-Umformen – Grundlagen.  
Blatt 2: Innenhochdruck-Umformen – Maschinen und Anlagen.  
Verein Deutscher Ingenieure; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000.

- /22/ Eichhorn, A.; Bietke, D.:  
Grundlagen zum Innenhochdruckschneiden.  
Arbeitsband zum EFB–Fortbildungspraktikum: „Innenhochdruckumformen von Rohren“; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, September 2004, S. 119 – 124.
- /23/ Hartke, G.:  
Volumengenaue Knüppelabschnitte durch Scherschneiden.  
Fortschritt–Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 134, VDI Verlag, Düsseldorf, 1987.
- /24/ Timmerbeil, F.-W.:  
Untersuchung des Schneidvorganges bei Blech, insbesondere beim geschlossenen Schnitt.  
Dissertation, Technische Hochschule Hannover 1956.
- /25/ Thomson, T.:  
Glatte Lochwandungen beim Lochen von Grobblechen.  
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt 1966.
- /26/ Schmütsch, H.-H.:  
Einflussgrößen auf das Schneidergebnis beim Scherschneiden von Feinblechen.  
VDI Verlag, Düsseldorf 1990.
- /27/ Eickhoff, W.:  
Über das Lochen von Grobblech.  
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1961.
- /28/ Cammann, J.-H.:  
Untersuchungen zur Verschleißminderung an Scherschneidwerkzeugen der Blechbearbeitung durch Einsatz geeigneter Werkstoffe und Beschichtungen.  
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1986.
- /29/ Fugger, B.:  
Untersuchung der Verschleißvorgänge beim Scherschneiden von Feinblechen.  
Dissertation, Universität Hannover, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1984.
- /30/ Neumann, C.-P.:  
Die Schneidbarkeit von Elektroblech und ihre Prüfung unter besonderer Berücksichtigung von Blechwerkstoff und Schneidspalt.  
Dissertation, Technische Hochschule Hannover, 1979.
- /31/ Pöllmann, A.:  
Prozessparameter beim Scherschneiden von Karosserieblechteilen.  
Dissertation, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik Berlin, 1997.
- /32/ Eichhorn, A.:  
Umformen und Lochen rohrförmiger Teile durch Innenhochdruck.  
Unveröffentlichter Bericht, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1993.

- /33/ Jahnke, H.; Retzke, R.; Weber, W.:  
Umformen und Schneiden.  
Verlag Technik, Berlin 1981.
- /34/ Hoogen, M.:  
Einfluss der Werkzeuggeometrie auf das Scherschneiden und Reißen von  
Aluminiumfeinblechen.  
utg – Fortschrittberichte, Band 6.  
Dissertation, Technische Universität München, 1999.
- /35/ Lange, K.:  
Umformtechnik Band 3: Blechbearbeitung.  
Springer Verlag, Berlin 1990.
- /36/ Lippmann, H.; Mahrenholtz, O.:  
Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe. Erster Band.  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1967.
- /37/ Lippmann, H.:  
Mechanik des plastischen Fließens. Grundlagen und technische Anwendungen.  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1981.
- /38/ Tschätsch, H.:  
Praxis der Umformtechnik – Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge.  
Verlag Vieweg Praxiswissen, Braunschweig/ Wiesbaden 2001.
- /39/ Gräfen, H. (Hrsg.):  
Lexikon Werkstofftechnik.  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- /40/ Rotter, F.:  
Genaue Werkstücke wirtschaftlich fertigen.  
Industrie Anzeiger 107 (1985), Heft 26, S. 17 – 21.
- /41/ Edelstahlwerke Buderus AG, Feintool AG Lyss, Hoesch Hohenlimburg GmbH,  
Kaltwalzwerk Brockhaus:  
Umformen und Feinschneiden – Handbuch für Verfahren, Werkstoffe,  
Teilegestaltung.  
Verlag Hallwag AG, Bern/Schweiz 1997.
- /42/ Hoffmann, H.; Fritsch, C.:  
Optimierung der Schnittflächenqualität beim Schneiden von Aluminium und  
Magnesium.  
In: Vom Werkstoff zum Bauteilsystem. Tagungsband Ranshofener Leicht-  
metalltage, Ranshofen 2002, S. 200 – 210.

- /43/ Siegert, K.; Jamadar, K.:  
Abscheren metallischer Werkstoffe bei unterschiedlichen Spannungen,  
Geschwindigkeiten und Temperaturen.  
Kolloquium „Erweiterung der Formgebungsgrenzen bei Umformprozessen“, 11.-  
12. September 2001, Bonn, S. 37 – 42.
- /44/ Eichhorn, A.; Bietke, D.:  
Innenhochdruckabschneiden von innenhochdruckumgeformten Hohlprofilen mit  
Rechteckquerschnitt.  
AiF/EFB-Forschungsantrag EFB 09/103 vom 22.05.2003, Universität Magdeburg,  
2003.
- /45/ Zünkler, B.:  
Geometrische Einflüsse beim Lochen von Ronden.  
Bänder Bleche Rohre, 26 (1985) 4, S. 101 – 105.
- /46/ Ulrich, L.:  
Schnittflächenqualität beim Scherschneiden von Feiblechen.  
Blech, Rohre, Profile 43 (1996), Heft 4, Seite 187 – 190.
- /47/ Krämer, W.:  
Beitrag zur Kraft- und Arbeitsermittlung beim Schneiden von Blech.  
Industrieanzeiger, 90 (1968) 19, S. 361 – 365.
- /48/ VDI 2906:  
Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werk-  
stücken aus Metall.  
Blatt 2: Scherschneiden.  
Verein Deutscher Ingenieure; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994.
- /49/ Ming Li:  
An experimental investigation on cut surface an burr in trimming aluminium  
autobody sheet.  
International Journal of Mechanical Sciences, 42 (2000), S. 889 – 906.
- /50/ Eichhorn, A.; Häfke, F.; Motsch, S.:  
Untersuchungen zum Umformen und Lochen mit Innenhochdruck von Rohren mit  
örtlich unterschiedlichen stofflichen und geometrischen Eigenschaften.  
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben AiF/EFB 10411 B, EFB-Forschungs-  
bericht Nr. 114, Universität Magdeburg, 1997.
- /51/ Anwendungsspezifische Weiterentwicklung des hydraulischen Rohr-Innendruck-  
Umformens zur Herstellung hohlförmiger Bauteile der Automobil- und  
Gerätebauindustrie.  
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben AiF/EFB 10872 B, EFB-Forschungs-  
bericht Nr. 138, Technische Universität Darmstadt.
- /52/ N. N.:  
Innenhochdruck-Umformen von Auspuffteilen.  
Blech, Rohre, Profile (2001), Heft 6, Seite 46 – 47.

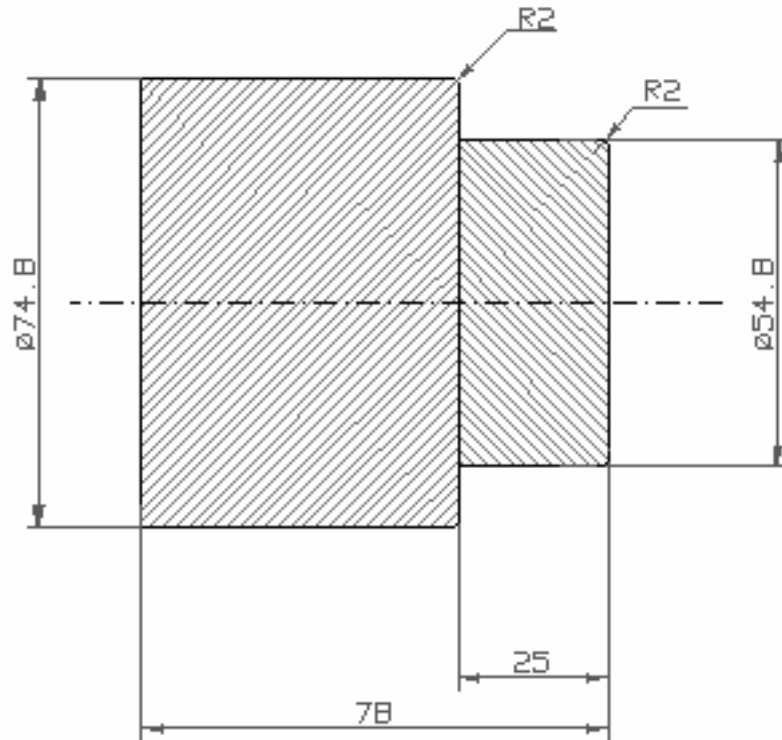
- /53/ N. N.:  
Mit Innenhochdruck umgeformte Vorderradträger.  
Werkstatt und Betrieb (1997), Heft 10, S. 925.
- /54/ Hoffmann, A.; Birkert, A.:  
Gestaltungsrichtlinien für die Auslegung von innenhochdruckumgeformten Strukturbauteilen aus Aluminium.  
In: Tagungsband zur Internationalen Konferenz Hydroumformung „Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen“, Band 2 (2001) S. 325 – 340.
- /55/ Patentschrift DE 40 35 625 A1:  
Verfahren und Werkzeug zur Herstellung eines Durchbruches in der Wandung eines Hohlkörpers ausgebildeten Werkstückes und Werkzeug zur Durchführung des Verfahrens.  
09.11.1990, Audi AG, Ingolstadt.
- /56/ Patent DE 43 220 63 C1:  
Verfahren und Vorrichtung zum Ausschneiden eines Ausschnittes aus einer Wandung eines nach dem Innenhochdruck–Umformverfahren hergestellten Hohlkörpers.  
02.07.1993, Wilhelm Schäfer Maschinenbau GmbH & Co., Wilnsdorf.
- /57/ Patent DE 195 06 067 C1:  
Verfahren zum Ausschneiden eines Ausschnittes aus der Wandung eines als Hohlkörper ausgebildeten Bauteils und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.  
22.02.1995, Friedrich Krupp AG, Essen, Dortmund.
- /58/ Eichhorn, A.:  
Innovative Entwicklungen zum Umformen, Trennen und Fügen mit Innenhochdruck.  
In: Tagungsband zum MPK 99, Magdeburger Produktionstechnisches Kolloquium, 5.-6. Mai 1999, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1999, S. 1 – 5.
- /59/ Uchida, M.; Kojima, M.:  
Hydropiercing of tube wall in hydroforming.  
Konferenz-Einzelbericht: Advanced Technology of Plasticity 2002, Proc. of the 7th ICPT Internat. Conf. on Technol. of Plasticity, Band 2 (2002), S. 1483 – 1488.
- /60/ Patentschrift DE 197 16 816 A1:  
Verfahren und Vorrichtung zum Trennen eines nach dem Innenhochdruck-Umformverfahren hergestellten Hohlkörpers.  
29.10.1998, Forschungsgesellschaft Umformtechnik mbH, Stuttgart.
- /61/ Patentschrift DE 197 24 037 A1:  
Verfahren zum Schneiden eines Hohlkörpers.  
10.12.1998; Audi AG, Ingolstadt.

- /62/ Patentschrift DE 199 09 928.6:  
Vorrichtung zum teilweisen oder vollständigen Durchtrennen eines Werkstückes.  
06.03.1999; Audi AG, Ingolstadt.
- /63/ DIN EN 10002:  
Metallische Werkstoffe: Zugversuch.  
Teil 1: Prüfverfahren (bei Raumtemperatur).  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 1991.
- /64/ Petzold, W.; Eichhorn, A.; Bietke, D.:  
Ermittlung von Kenngrößen zur Beschreibung des Umformverhaltens von  
Rohren.  
Abschlussbericht zum DFG-Forschungsprojekt PE 550 / 3-2, Otto-von-Guericke-  
Universität Magdeburg, 1998.
- /65/ Eichhorn, A.; Bietke, D.:  
Ausgangsteile beim Innenhochdruckumformen und Prüfung ihrer  
Umformeignung.  
Arbeitsband zum EFB–Fortbildungspraktikum: „Innenhochdruckumformen von  
Rohren“; Universität Magdeburg, September 2004, S. 17 – 34.
- /66/ Reihle, M.:  
Ein einfaches Verfahren zur Aufnahme von Fließkurven von Stahl bei  
Raumtemperatur.  
Arch. Eisenhüttenwesen 32 (1961), S. 331 – 336.
- /67/ Hielscher, Ch.:  
Entwicklung eines Halbzeugprüfverfahrens für das Innenhochdruck-Umformen  
von Hohlprofilen.  
Dissertation, PtU der Technischen Universität Darmstadt, Berichte aus  
Produktion und Umformtechnik, Bd. 48, Shaker Verlag, 2001.
- /68/ Lange, K.; Roll, K.; Tekkaya, A.; Wanheim, T.:  
Prozesssimulation und –optimierung.  
Umformtechnik Band 4: Sonderverfahren, Prozesssimulation, Werkzeugtechnik,  
Produktion.  
2. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1993.
- /69/ Roll, K.; Gröber, M.:  
Numerische Prozeßsimulation in der Blechumformung – Möglichkeiten und  
Grenzen.  
In: Tagungsband zur Internationalen Konferenz „Neuere Entwicklungen in der  
Blechumformung“; Fellbach (bei Stuttgart); 1994; S. 423 – 442.
- /70/ Tekkaya, A.:  
Stand der Simulation in der Blechumformung.  
Blech, Rohre, Profile (1998) ; Heft 11, S. 62 – 69.

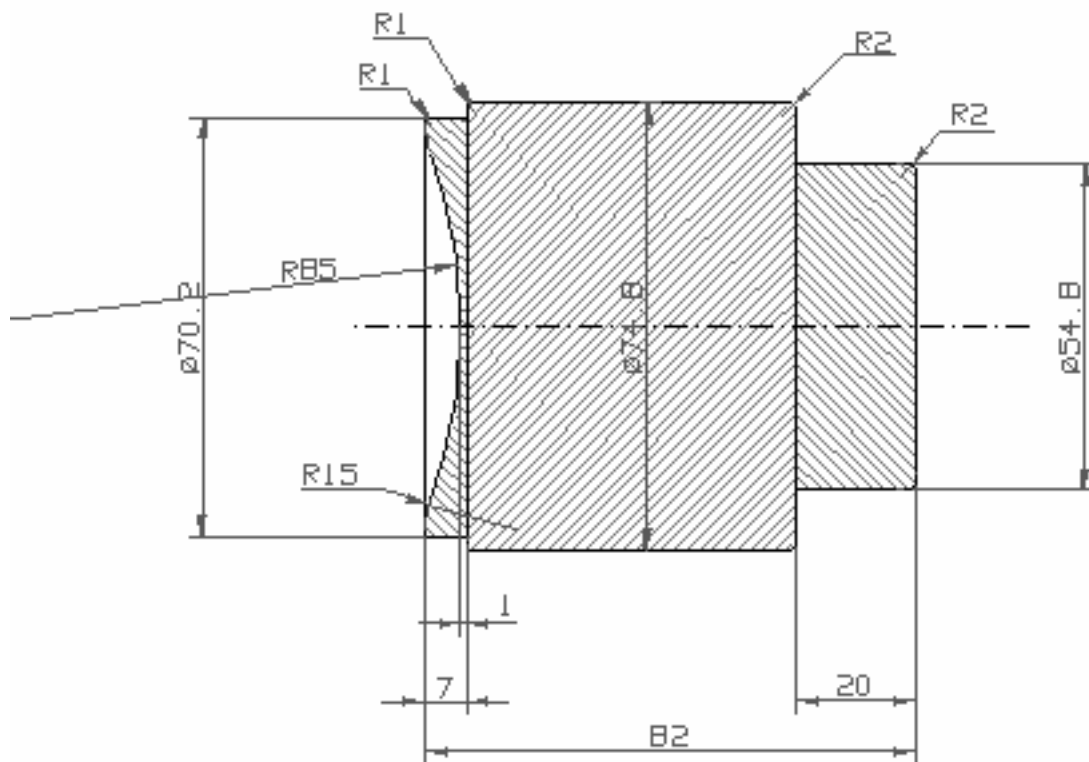
- /71/ Tekkaya, A.:  
State-of-the-Art of Simulation of Sheet Metal Forming.  
Int. Conf. SheMet '98, University of Twente (Netherlands), Enschede, S. 53 – 66.
- /72/ Goijaerts, A.M.; Govaert, L.E.; Baaijens, F.P.T.:  
Evaluation of ductile fracture models for different metals in blanking.  
Journal of Materials Processing Technology, 110 (2001), S. 312 – 323.
- /73/ Faura, F.; Garcia, A.; Estrems, M.:  
Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process.  
Journal of Materials Processing Technology, 80-81 (1998), S. 121 – 125.
- /74/ Samuel, M.:  
FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process.  
Journal of Materials Processing Technology, 84 (1998), S. 97 – 106.
- /75/ Neugebauer, R.; Putz, M.; Bräunlich, H.; Kräusel, V.:  
Schneiden und Lochen – ein entwicklungsorientierter Bereich der Blechbearbeitung.  
In: Tagungsband zur Internationalen Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“; Fellbach (bei Stuttgart); 11. und 12. Mai 2004; S. 255 – 276.
- /76/ Hill, R.:  
The mathematical theory of plasticity.  
Oxford University Press, London, 1971.
- /77/ Groche, P.; Metz, C.; Kaufmann, M.:  
DIN-Fachbericht 137 – Einbindung der Innenhochdruck-Verfahren in die Normenreihe DIN 8580ff.  
Ausgabe 2003-09; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- /78/ Eichhorn, A.:  
Innenhochdruckumformen von Rohren. Verfahrenscharakteristik.  
Arbeitsband zum EFB-Fortbildungspraktikum: „Innenhochdruckumformen von Rohren“; Universität Magdeburg, September 2004, S. 1 – 16.
- /79/ DIN 9870:  
Begriffe der Stanztechnik.  
Blatt 2: Fertigungsverfahren und Werkzeuge zum Zerteilen.  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 1972.



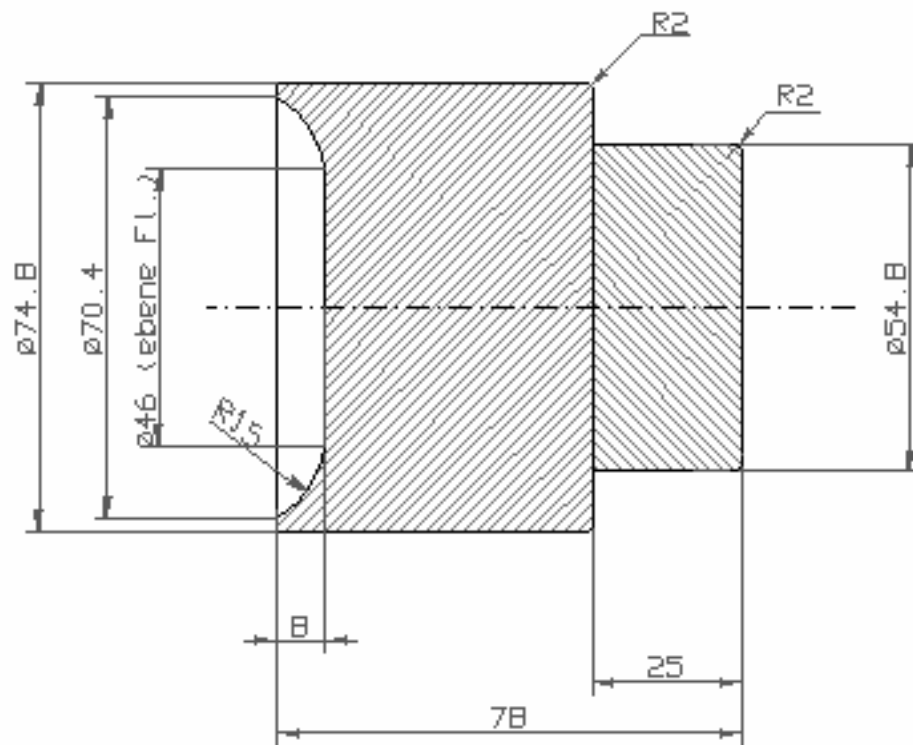
### 11 Anhang: Stützstempelgeometrien beim IH-TAS



Anhang 1: Geometrie des Stützstempels I (Skizze)



Anhang 2: Geometrie des Stützstempels II (Skizze)



Anhang 3: Geometrie des Stützstempels III (Skizze)

## **Lebenslauf**

### **Persönliche Daten**

Name: Dirk Bietke  
Geburtsdatum: 20. März 1971  
Geburtsort: Eisenhüttenstadt  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Familienstand: verheiratet, 3 Kinder

### **Ausbildung**

1977 - 1987 Polytechnische Oberschule Eisenhüttenstadt  
1987 - 1989 Erweiterte Oberschule Eisenhüttenstadt  
Abschluss: Abitur  
1989 - 1990 Wehrdienst / Zivildienst  
1990 - 1995 Hochschulstudium: Werkstofftechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Abschluss: Diplomingenieur für Werkstofftechnik  
1995 - 1996 Aufbaustudium: Sicherheitstechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Abschluss: Sicherheitsingenieur

### **Praktika**

1991 SKL AG Magdeburg  
Abteilung Materialprüfung  
1994 MTU Maintenance Hannover,  
Abteilung Forschung und Entwicklung

### **Beruf**

seit 1997 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für  
Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Abteilung: Umform- und Zerteiltechnik