

Evaluation eines Verfahrens zur Bestimmung der Kantenriss sensitivität von hochfesten Stählen

Dipl.-Wirt.-Ing. Thorsten Gläsner, Volkswagen AG, Komponenten-Werkzeugbau, Braunschweig
Dr.-Ing. Christina Sunderkötter, Volkswagen AG, Konzernforschung, Wolfsburg
Dipl.-Ing. Simon Rommel, Volkswagen AG, Komponenten-Werkzeugbau, Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), TU München
Prof. i.R. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), TU München
Dr.-Ing. Roland Golle, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), TU München

Kurzfassung

Die Entstehung von Kantenrissen bei hochfesten Stahlwerkstoffen stellt die Umformtechnik vor zunehmende Herausforderungen. Das Scherschneiden bewirkt eine Reduzierung des Umformvermögens der Schnittkante. Für die Simulation werden folglich Kennwerte zur Bewertung des Restumformvermögens benötigt, um die Prozesssicherheit zu gewährleisten. Zur Auswahl eines geeigneten Verfahrens, welches die Kantenriss sensitivität ausreichend charakterisiert, werden in diesem Beitrag zwei Prüfmethode n vorgestellt und in Bezug auf deren Aussagefähigkeit untersucht.

1 Einleitung

In der Prozesskette zur umformtechnischen Herstellung von Bauteilen aus hochfesten Stahlblechen [1] zeigt sich vermehrt die Entstehung von Rissen, wenn der Stahlwerkstoff vor dem Umformvorgang durch Scherschneiden bearbeitet worden ist [2]. Zu den kritischen Umformprozessen in diesem Kontext zählt unter anderem das Aufstellen von Krägen (Kragenziehen) und der damit verbundenen tangentialen Zugbeanspruchung im Bereich der Schnittkante [2;3]. In Untersuchungen lässt sich häufig ein Materialversagen unterhalb der vorhergesagten Grenzformänderungskurve, die nur für das unversehrte Material gültig ist, nachweisen. Der Beschnitt reduziert das Umformvermögen der Schnittkante und kann im weiteren Prozessverlauf zu Materialversagen durch Kantenrisse führen. Die Kantenriss sensitivität wird im FLD (Forming Limit Diagram) nicht abgebildet, wodurch in der Umformsimulation ein zu hohes Umformpotential der Schnittkante vorausgesetzt wird [6]. Dieses Verhalten findet sich besonders bei den AHSS (Advanced High Strength Steels) und lässt sich unter anderem auf die Qualität der schergeschnittenen Kante zurückführen [2;4;5]. In den vergangenen Jahren wurden bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, diese Problematik in die Umformsimulation einzubinden. Hierbei dient die FLC (Forming Limit Curve) des ungeschädigten Materials als Basis und wird um das verminderte Umformvermögen der Schnittkante angepasst. Die Anpassung erfordert jedoch experimentell ermittelte Kennwerte, welche die Vorschädigung der Schnittkante berücksichtigen [7].

2 Stand der Technik

Scherschneiden

Das Scherschneiden ist das am häufigsten angewendete Verfahren in der Blechbearbeitung und ist ein Verfahren zur Werkstofftrennung, welches nach *DIN 8580* der Hauptgruppe „Trennen“ sowie der Untergruppe „Zerteilen“ angehört [8]. Nach *DIN 8588* wird das Scherschneiden definiert als ein Zerteilen von Werkstücken zwischen zwei Schneiden, die sich unter Einhalten eines definierten Schneidspalts u aneinander vorbeibewegen [9]. Der Prozess des Scherschneidens unterteilt sich in fünf Phasen, wobei der eigentliche Schneidvorgang in der zweiten bis vierten Stufe stattfindet [10]. Zunächst wird die Niederhalterkraft aufgebaut, anschließend setzt der Stempel auf dem Blech auf wodurch eine elastische Verformung induziert wird (1. + 2. Phase). In der dritten Phase leiten die vom Stempel eingebrachten Druckspannungen und deren Reaktionskräfte sowohl Normal- als auch Schubspannungen in die spätere Schnittfläche ein. Das plastische Fließen des Werkstoffs setzt nach Überschreitung der Schubfließgrenze ein [11]. Senkrecht zur Stempelseite entstehen sogenannte Kanteneinzüge, die während des weiteren Eindringens in das Blech in eine glatte Schnittfläche übergehen und den Glattschnittanteil ausbilden. Sobald die maximale Schubspannung die Schubfestigkeit des Werkstoffs erreicht (Phase 4), ist das Fließvermögen erschöpft. Dabei entstehen in der Regel kleine Risse die von der Matrizenkante ausgehen, da sich an der Blechunterseite die Zugspannungen aus der Werkstoffstreckung und der Blechdurchbiegung aufsummieren. Die Gesamtbelastung ist stempelseitig geringer, da sich die Überlagerung von Druck- und Zugspannungen teilweise gegenseitig aufheben. Demnach entstehen Risse zuerst auf der matrizenzugewandten und im Anschluss auf der stempelzugewandten Seite [12]. In der letzten Phase wird der Butzen in den Matrizenkanal ausgestoßen, bevor der Stempel wieder in die Ausgangslage fährt [13].

Zweistufiges Scherschneiden

Das Nachschneiden, hier als zweistufiges Scherschneiden bezeichnet, ist nach *DIN8588* definiert als das Beschneiden schmaler Ränder von vorgearbeiteten Flächen zum Herstellen sauberer und maßhaltiger Außen- und Innenformen [9]. In der *VDI-Richtlinie 2906* wird diese Beschreibung durch den Zusatz erweitert, dass glatte und möglichst einriss- und abrissfreie Schnittflächen erzeugt werden sollen. Der Nachschneidprozess lässt sich grundsätzlich in die gleichen Phasen wie der Normalschneidprozess einteilen (vgl. Kap. 2.3.2). Ebenso entspricht der Werkzeugaufbau dem des Normalschneidens, wodurch eine Integration der Nachschneidoperation auf den konventionellen Schneidpressen möglich ist. Sondermaschinen sind somit nicht erforderlich [14;15].

Der Nachschneidprozess wird von den geometrischen Prozessparametern Schneidspalt u und der Nachschneidzugabe z beeinflusst (**Abbildung 1**). Der Schneidspalt beschreibt ebenso wie beim konventionellen Scherschneiden den auf die Blechoberfläche projizierten Abstand der Schneidkanten von Stempel und Matrize. Die Nachschneidzugabe beschreibt die Breite des Ringes, der entlang der vorgeschrittenen Kontur abgetrennt wird.

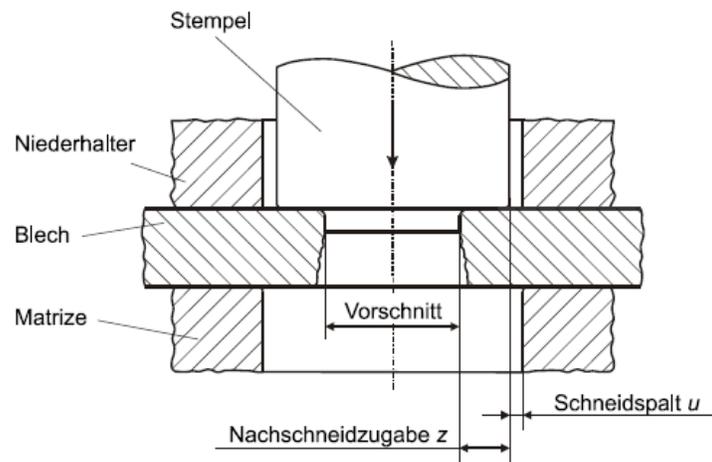


Abbildung 1: Darstellung des Nachschneidprozesses [15]

Als vorgeschchnittene Kontur wird hierbei näherungsweise die Geometrie des Vorschnittstempels angenommen. Für einen hochfesten Stahl ($R_m > 500 \text{ MPa}$, $s = 3,5 \text{ mm}$) mit geringem Formänderungsvermögen empfiehlt sich nach [16] eine Nachschneidzugabe von $z = 0,35 \text{ mm}$ und nach [17] von $z = 0,23 \text{ mm}$, der Schneidspalt sollte in einem Bereich von 3 % bis 4 % [16] bzw. 2 % bis 4 % [17] liegen.

Der Volkswagen Komponenten Werkzeugbau in Braunschweig verfolgt zurzeit einen neuen Ansatz des Nachschneidens: Durch das Nachschneiden sollen keine Funktionsflächen realisiert, sondern die Kantenrissempfindlichkeit von hochfesten Stählen reduziert werden. Dazu wurden die Nachschneidzugabe und der Schneidspalt neu eingestellt. In ersten Untersuchungen an einem mikrolegierten Stahl ($s = 3,5 \text{ mm}$) konnte durch Nachschneiden ($z = 2 \text{ mm}$, $u = 12,5 \%$) das Aufweitverhältnis beim Kragenziehen um bis zu 100 % gesteigert werden [2;18].

Prüfverfahren zur Bestimmung der Kantenrissensitivität

Um das Umformvermögen einer Schnittkante zu charakterisieren, wurde der Lochaufweitungsversuch (LAV) in der ISO16630 standardisiert. Die Ermittlung der Verformungsgrenzen erfolgt durch Aufweitung eines zuvor in ein Blech eingebrachten Loches bis zum Risseintritt (**Abbildung 2**). Dieser wird durch optische Beobachtung des Bedieners detektiert und die Prüfung gestoppt. Anschließend wird der Lochdurchmesser senkrecht zueinander vermessen und die Lochaufweitungskennzahl (LAK) bestimmt [19].

$$\lambda = \frac{D_h - D_0}{D_0} * 100\%$$

λ : Lochaufweitungskennzahl [%]

D_h : Durchmesser nach Versuchsdurchführung [mm]

D_0 : Durchmesser vor Versuchsdurchführung [mm]

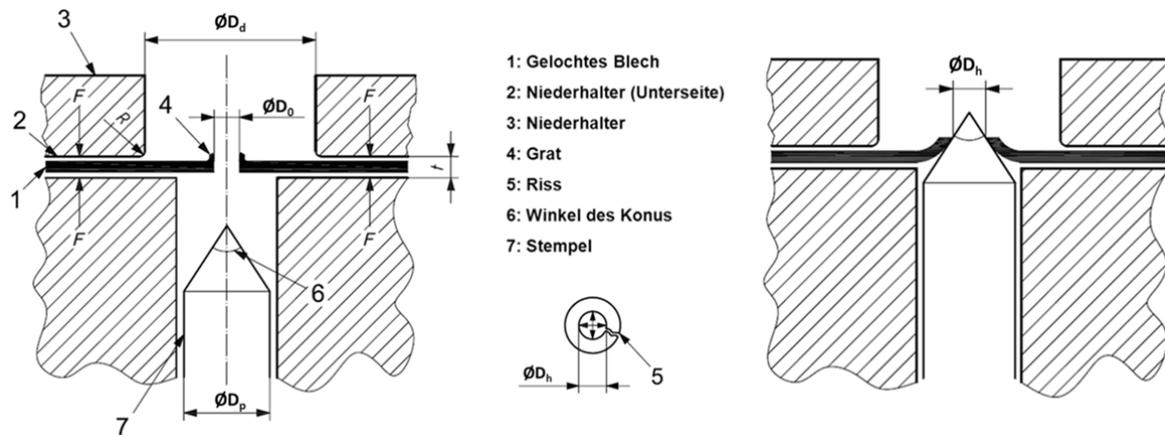


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau vom Lochaufweitungsversuch nach ISO16630 [19]

Zur Validierung dieses Prüfverfahrens wurde vom VDEh ein Ringversuch mit führenden Stahlherstellern und unterschiedlichen Stahlgüten initiiert. Das Ergebnis belegte eine nicht zu vernachlässigende Streuung der Messwerte, die unter anderem auf die kaum zu reproduzierbare Qualität der Schnittkante und ein subjektives Abschaltkriterium zurückzuführen ist [20].

Im Zuge der Notwendigkeit eines standardisierten Prüfverfahrens zur Charakterisierung des Restumformvermögens der Schnittkante, ist in der Literatur eine Vielzahl von alternativen Prüfmethode, wie beispielsweise der Diabolo-Test oder der Nakajima-Test mit Loch, aufgeführt. Ein weiteres Verfahren ist der Kobe-Test **Abbildung 3**), bei dem ein Blechstreifen mit einem zentrisch gestanzten Loch versehen und uniaxial belastet wird. Vor der Versuchsdurchführung wird ein Messraster in definierten Abständen im Bereich der Schnittkante aufgebracht. Die Prüfung wird gestoppt sobald ein Riss, ausgehend von der Lochkante, zu detektieren ist. Anhand des Messrasters werden die resultierenden Dehnungen nach der Versuchsdurchführung im Abstand von 1 mm Abstand zur Lochkante vermessen [21].

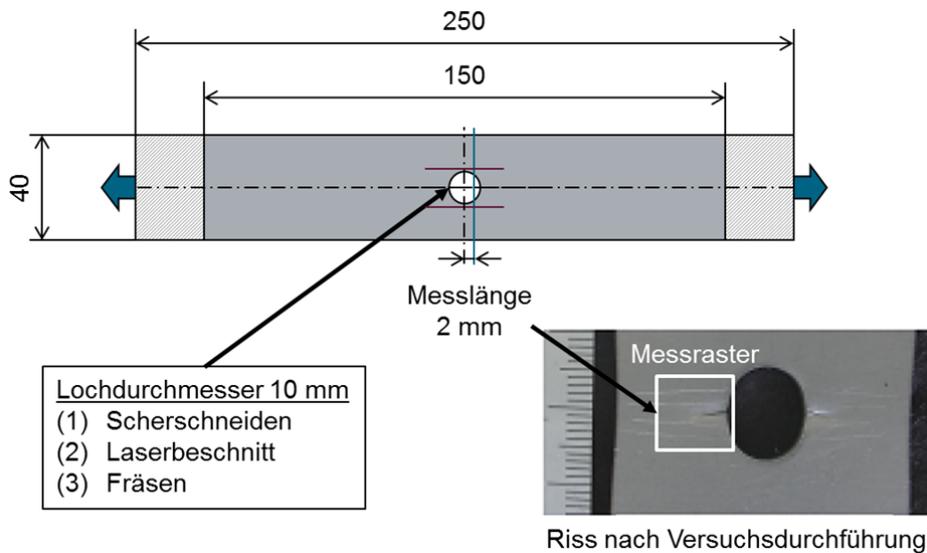


Abbildung 3: Schematischer Versuchsaufbau des Kobe-Tests [nach 21]

Hinsichtlich der Evaluation eines Verfahrens zur Bestimmung der Kantenrissensitivität wurde, neben dem Lochaufweitungsversuch nach ISO 16630, auch der Test mit Lochzugprobe, in Anlehnung an den Kobe-Test, hinsichtlich Einflussfaktoren und den daraus resultierenden Streuungen näher untersucht. Zur Bewertung der erzielten Ergebnisse wurde der Lochaufweitungsversuch als Referenzverfahren herangezogen.

3 Experimentelle Untersuchungen

In der Automobilindustrie werden in Struktur- und Fahrwerksbauteilen vermehrt hochfeste Mehrphasenstähle eingesetzt [3;2]. Diese modernen Stahlkonzepte erreichen hohe Festigkeiten durch ein Zusammenspiel von festigkeitssteigernden Mechanismen bei gleichzeitig guten duktilen Eigenschaften. Dualphasenstähle (DP-Stähle) bestehen dabei aus einer ferritischen Matrix, in die eine meist martensitische Phase eingelagert ist. Das Komplexphasengefüge (CP-Stähle) dagegen setzt sich aus ferritisch-bainitischen Bestandteilen zusammen. Im Vergleich zu DP-Stählen weisen CP-Stähle bei gleicher Festigkeit deutlich höhere Streckgrenzen auf [3]. Studien zum Lochaufweitungsvermögen haben gezeigt, dass das erreichbare Lochaufweitungsverhältnis stark durch das Gefüge des Werkstoffes bestimmt wird. [23;24;25;26] konnten zeigen, dass sich mit CP-Stählen deutlich höhere Aufweitverhältnisse erzielen lassen als mit DP-Stählen. Dies wird von den Autoren durch die Härteunterschiede zwischen den einzelnen Phasen im Gefüge, welches bei CP-Stählen im Vergleich zu DP-Stählen sehr viel geringer sind, begründet. Lokale Spannungen an Phasengrenzen sind daher bei den Komplexphasenstählen geringer.

Im Rahmen der eigenen Untersuchungen kamen verschiedene hochfeste Stähle mit einer Mindestzugfestigkeit von 780 MPa zum Einsatz. Hierzu wurden zwei kaltgewalzte Dualphasenstähle mit unterschiedlichen Eigenschaften in Nenndicken von 2 mm (HCT780X) bzw. 1,77 mm (HCT780X) und zwei Mehrphasenstähle (HDT780C), in jeweils 3,5 mm Blechdicke, ausgewählt. Der HCT780X in 1,77 mm Blechdicke zeichnet sich ferner durch eine verbesserte Eigenschaft für Krageziehoperationen aus. Zu Beginn der experimentellen

Versuchsreihen wurden die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe jeweils durch Zugversuche nach ISO 6892-1 ermittelt (Probenentnahme erfolgte konform zur DIN EN ISO 377). Dies erfolgte anhand von je fünf Flachzugproben mit einer Anfangslänge von 80 mm (Probenform 1). Basierend auf dem VDA-Werkstoffblatt 239-100 „Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung“ und der Volkswagen Hausnorm VW 50065 wurden die hochfesten Stähle längs zur Walzrichtung geprüft. In **Tabelle 1** sind jeweils die gemittelten Werte aufgeführt:

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften der Versuchswerkstoffe

Mechanische Kennwerte	Einheit	Stahlwerkstoffe			
		HCT780X 2,0 mm	HCT780X 1,77 mm	HDT780C 3,5 mm	HDT780C 3,5 mm
Dehngrenze $R_{p0,2}$	MPa	576	553	677	730
Zugfestigkeit R_m	MPa	827	818	812	818
Streckgrenzenverhältnis $R_{p0,2} / R_m$	%	69,25	67,60	83,38	89,24
Bruchdehnung A_{80}	%	15,9	13,6	14	13,1

Sowohl die Proben für den Lochaufweitungsversuch als auch den Test mit Lochzugprobe wurden mit einem Werkzeug gefertigt, um werkzeugseitige Einflussfaktoren auszuschließen. Dieses ermöglicht die Einstellung definierter Schneidspalte mittels auswechselbarer Matrizen. Der Stempeldurchmesser blieb hierbei konstant, um einen gleichbleibenden Lochdurchmesser zu erzielen [4]. Neben dem konventionellen einstufigen Beschnitt, wurden ergänzend Untersuchungen mit zweistufig schergeschnittenen Proben durchgeführt. Durch Wasserstrahlschneiden erzeugte Schnittkanten dienten für das jeweilige Verfahren als Referenzparameter. Die Probengeometrien und verwendeten Schneidparameter sind der **Tabelle 2** zu entnehmen.

Tabelle 2: Probengeometrie und Beschnittparameter

	Einheit	Lochaufweitungsversuch (ISO 16630)	Test mit Lochzugprobe
Probengeometrie	mm	90 x 90	220 x 40
Lochdurchmesser	mm	10	20
Schneidparameter		Schneidspalt 5% / 15% / 20% zweistufiger Beschnitt (1 mm Nachschneidzugabe) / Wasserstrahlbeschnitt	

Lochaufweitungsversuch

Die Durchführung der Lochaufweitungsversuche erfolgte der Norm entsprechend. Das Probenblech wurde gratseitig in Stempelrichtung eingelegt, um eine maximale Beanspruchung der Kante zu erzielen. Ziehsticks im Niederhalter verhindern hierbei das Nachfließen des Probenmaterials. Zur Minimierung der Reibung zwischen Stempel und Blech wurde zudem Schmiermittel eingesetzt. Die Rissdetektion erfolgte optisch. Sobald ein durchgängiger Riss vom Außen- zum Innendurchmesser zu erkennen war, wurde der Versuch gestoppt und der Lochdurchmesser manuell vermessen (**Abbildung 4**).

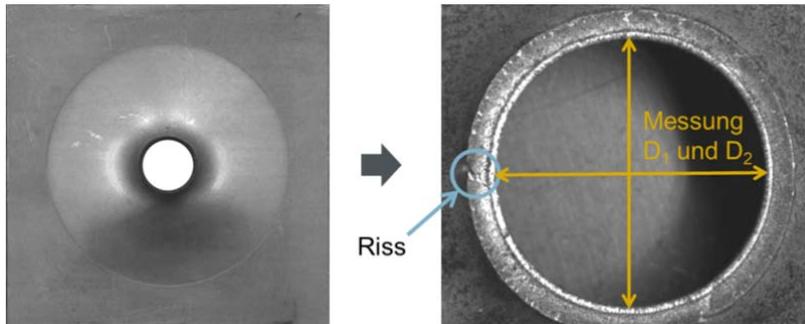


Abbildung 4: Bestimmung der LAK an untersuchter Probe

Test mit Lochzugprobe

Die rechteckige Zugprobe wird zentrisch mit einem gestanzten Loch versehen und in einer Universalprüfmaschine mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/s uniaxial belastet. Das Materialversagen tritt dabei stets an der schmalsten Position des Stegs, ausgehend von der Schnittkante, ein. Unmittelbar an der Lochkante liegt eine einachsige Spannung vor, welche mit zunehmendem Abstand zum Loch in eine „plane strain“-Belastung übergeht [22]. In der Simulation konnte die uniaxiale Belastung an der Schnittkante nachgewiesen werden (**Abbildung 5**).

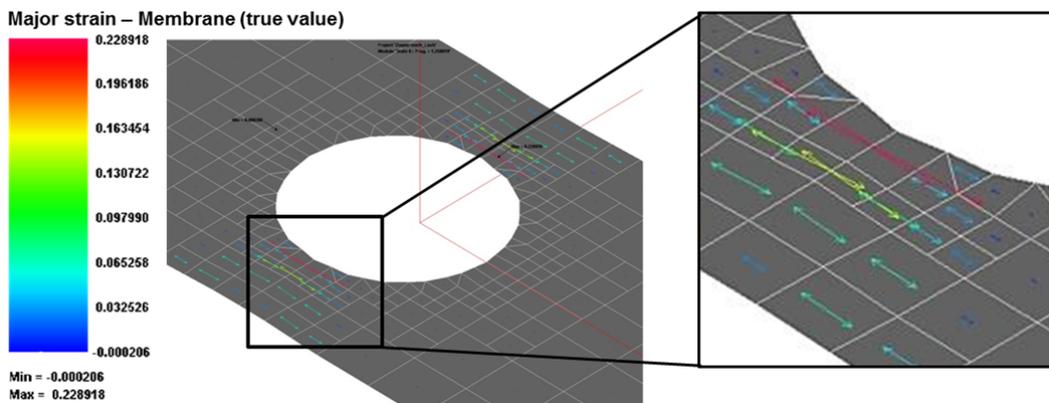


Abbildung 5: Simulation der resultierenden Belastungen im Lochzugversuch

Darüber hinaus ist die uniaxiale Belastung an den Schnittkanten, welche beim Aufstellen von Krägen in der Serienproduktion induziert und als kritisch bewertet wird, im Test mit Lochzugprobe abbildbar. **Abbildung 6** zeigt den simulativen Abgleich der resultierenden Dehnpfade im Umformprozess.

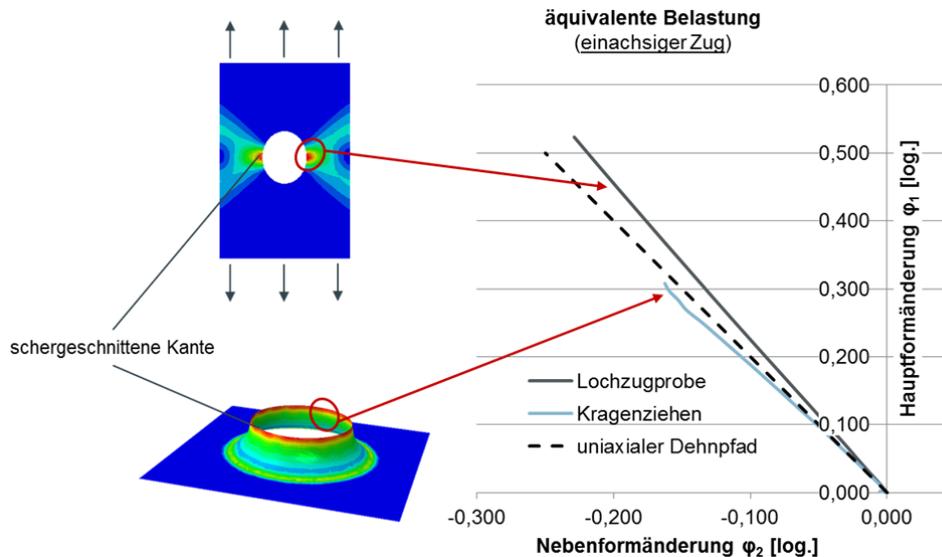


Abbildung 6: Vergleich der resultierenden Dehnpfade an den Schnittkanten beim Ziehen von Krägen und dem Test mit Lochzugprobe

Zur Bestimmung der maximal erreichbaren Formänderungen wurde das System Aramis der Fa. Gom für den Test mit Lochzugprobe eingesetzt. Dieses ermöglicht eine simultane Aufnahme der Formänderungen während der Versuchsdurchführung. Die optische Dehnungsmessung erfolgte mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 10 Bildern/s.

Somit konnte im Anschluss eine schrittweise Bestimmung des Risseintritts und der entsprechenden Formänderung an der Schnittkante vorgenommen werden.

Als Abbruchkriterium diente hierbei ein Riss durch die gesamte Blechdicke. Dazu wurde das letzte Bild vor Risseintritt ausgewählt und die resultierenden Formänderungen über Linienschnitte tangential zur Lochkante, im Bereich der schmalsten Stegposition, auf beiden Seiten ausgewertet. Die Schnitte wurden sowohl unmittelbar an der Kante, als auch im Abstand von einer Facette zur Lochkante gesetzt. Anhand der dargestellten Diagramme, lässt sich ein vergleichsweise nahezu identischer Verlauf der Hauptformänderungen der jeweiligen Seite nachweisen. Darüber hinaus zeigt sich, dass die resultierenden Formänderungen unmittelbar an der Kante und im Abstand von einer Facette bereits geringe Abweichungen aufweisen.

4 Ergebnisse

4.1 Einfluss des 2-stufigen Scherschneidens

In den folgenden Ausführungen wird der auftretende Effekt des 2-stufigen Scherschneidens anhand des Versuchswerkstoffes HDT780C mit einer Blechdicke von 3,5 mm erläutert und ins

Verhältnis zu konventionell geschnittenen Proben gesetzt. Beim Eindringen des Schneidstempels in die Blechplatte kommt es in der Scherzone zum plastischen Fließen des Werkstoffs, wobei sich das Gefüge deformiert. **Abbildung 7** zeigt Lichtmikroskopieaufnahmen der deformierten Gefügestrukturen quer zur Schnittfläche von den nachgeschnittenen ($z = 1$ mm) und den konventionell geschnittenen ($z = \infty$) Proben.

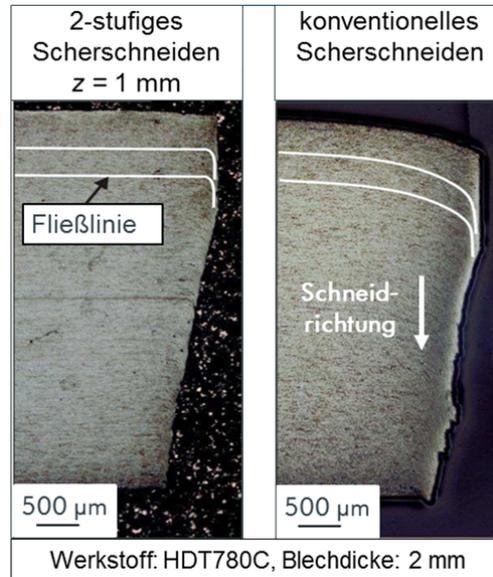


Abbildung 7: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Gefügestruktur einer nachgeschnittenen ($z = 1$ mm) und konventionell geschnittenen ($z = \infty$) Schnittkante

Der Verlauf der Fließlinien zeigt, dass die Streckung des Gefüges zur Schnittkante hin zunimmt. Die Deformation des Gefüges wurde bei 1000-facher Vergrößerung untersucht. Dazu kam das Messverfahren nach Wu zum Einsatz [27]. Dabei werden die Fließlinien im Bereich der Schnittkante markiert und vermessen. Die Einflusszone der Gefügedeformation befindet sich zwischen der Schnittkante und den unter dem Winkel $\zeta \geq 90^\circ$ verlaufenden Fließlinien, wie in der **Abbildung 8** dargestellt.

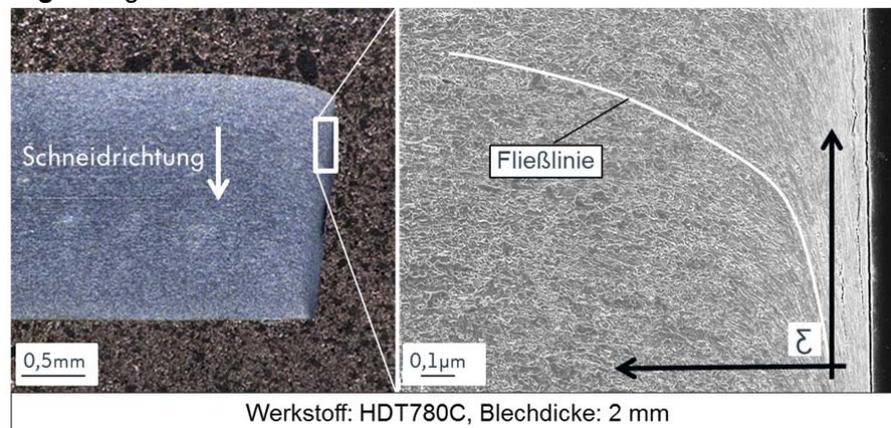


Abbildung 8: Deformierte Randzone des konventionell schergeschnittenen HDT780C in $s = 2$ mm mit markiertem Fließwinkelkriterium nach Wu [27]

An der Schnittkante ist die Gefügestreckung so stark, dass eine lichtmikroskopische Auflösung nicht mehr möglich ist. Aus diesem Grund werden entlang der Schnittkante REM-Aufnahmen angefertigt. Diese Aufnahmen zeigen in Übereinstimmung mit der Literatur, dass die Deformation des Gefüges in Schneidrichtung kontinuierlich steigt (**Abbildung 9**). Die stärkste Gefügedeformation liegt am Ende des Glattschnitts vor.

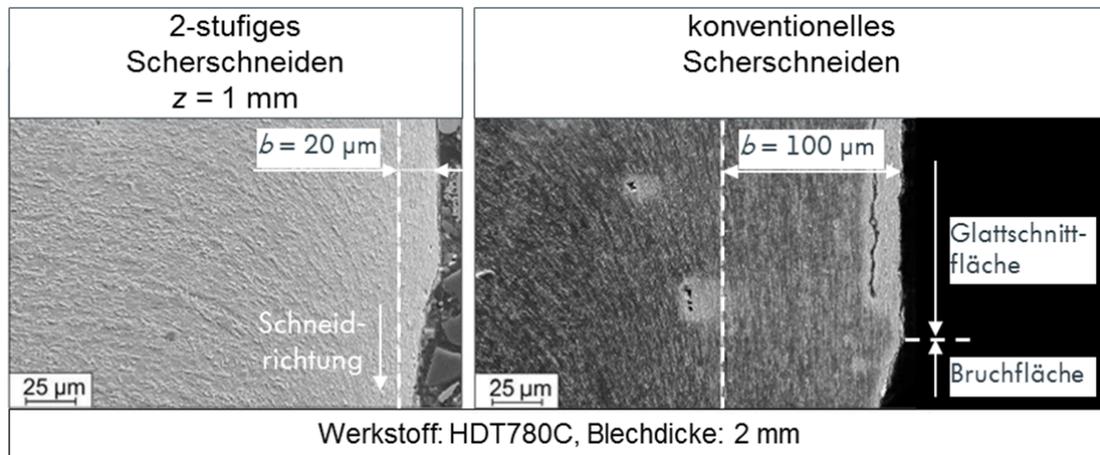


Abbildung 9: REM-Aufnahmen von der stark deformierten Randzone der nachgeschneiderten ($z = 1 \text{ mm}$) und konventionell geschneiderten ($z = \infty$) Versuchsproben (HDT780C)

Die Breite des parallel zur Schnittkante ausgerichteten Gefüges ist bei allen nachgeschneiderten Versuchsproben wegen des reduzierten Werkstoffflusses wesentlich geringer als bei den konventionell geschneiderten Proben. Beim Nachschneiden ergibt sich eine Breite von $b = 20 \mu\text{m}$, beim konventionellen Scherschneiden eine Breite von $b = 100 \mu\text{m}$. Aufgrund der extremen Gefügedeformation und der hohen Spannungen kommt es in diesen Bereichen häufig zur Bildung von Poren. Die Poren entstehen an harten Phasen (TiC, TiN), die als Ausscheidungen im Werkstoff vorliegen (**Abbildung 10**). Die Ursache dafür sind hohe lokale Spannungen, welche sich aufgrund des Härteunterschieds an den Phasengrenzen ergeben. Diese führen zu einem Ablösen der Matrix von den härteren Ausscheidungen. Häufig liegen die Ausscheidungen in kettenförmigen Strukturen vor, sodass sich die Poren zu einem Mikroriss verbinden.

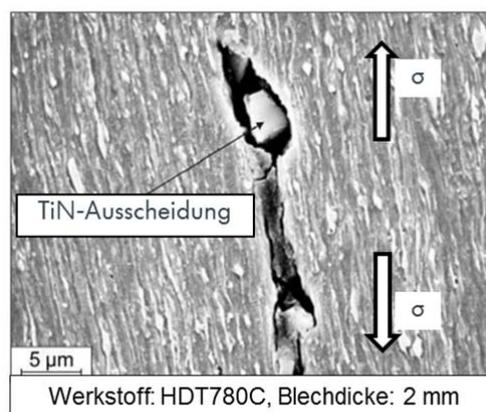


Abbildung 10: Porenbildung an einer Titannitrid (TiN) - Ausscheidung infolge hoher Zugspannungen (σ)

Die Poren und Mikrorisse treten ausschließlich im Bereich der stark deformierten Randzone auf. Beim Nachschneiden ist diese Zone auf einen sehr kleinen Bereich beschränkt, wodurch die Wahrscheinlichkeit der Porenbildung deutlich geringer ist als beim konventionellen Scherschneiden. Sollte es dennoch zur Porenbildung kommen, so treten diese ausschließlich in unmittelbarer Oberflächennähe auf. Ein Wachstum der Poren in das Materialinnere wird aufgrund der steigenden Duktilität verhindert. Das Nachschneiden reduziert somit die Schädigung der Randzone im Vergleich zum konventionellen Scherschneiden.

Die Ausbildung der stark deformierten Zone beim 2-stufigen Scherschneiden hängt von der Größe der Nachschneidzugabe und des Schneidverfahrens ab. Zur Quantifizierung der Schnittkantenverfestigung wurden Härtemessungen durchgeführt. In **Abbildung 11** sind die Härteverläufe über den Schneidweg in unterschiedlichen Abständen zur Schnittkante ($l = 20, 40, 160 \mu\text{m}$) dargestellt.

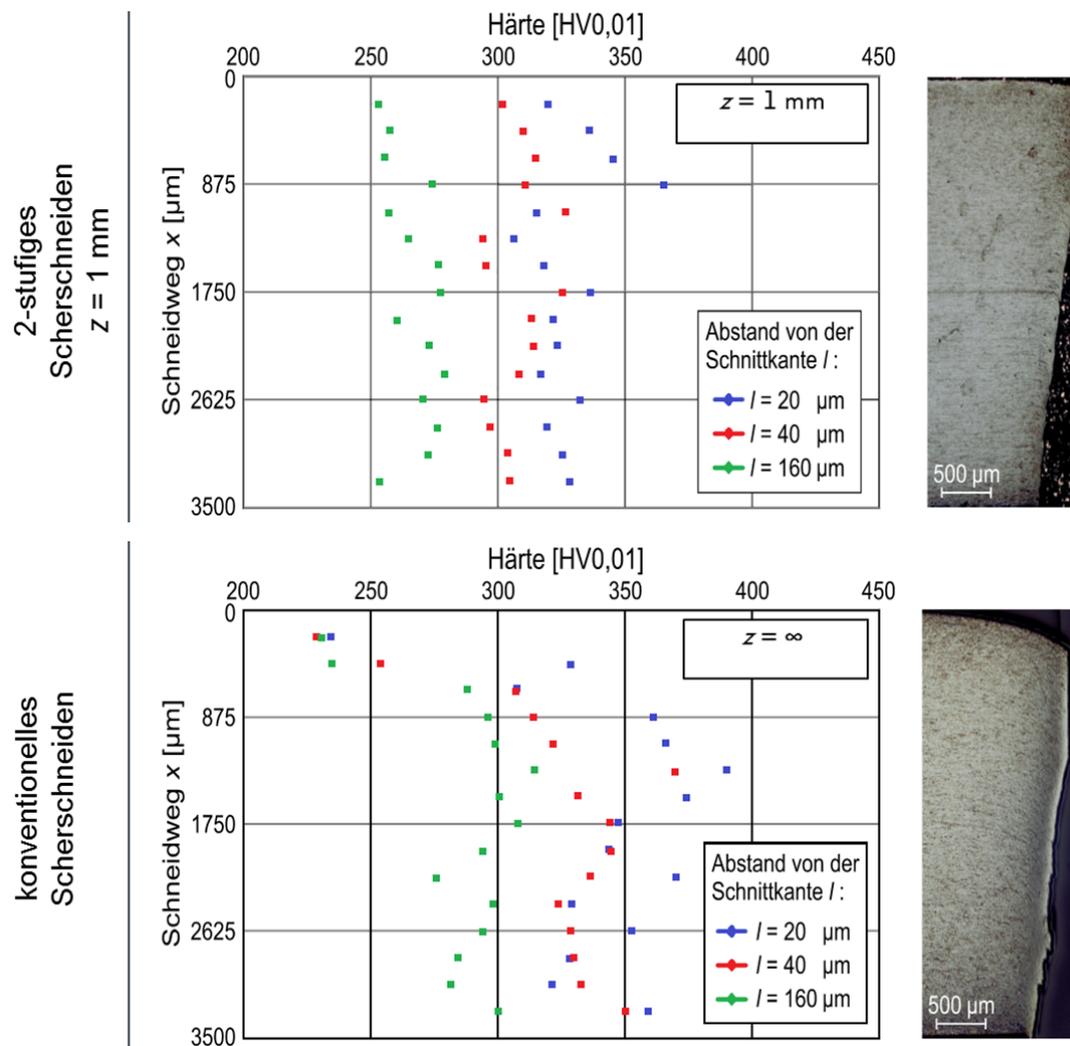


Abbildung 11: Härte über den Schneidweg in unterschiedlichen Abständen zur Schnittkante der nachgeschrittenen ($z = 1$) und konventionell geschnittenen Proben ($z = \infty$)

Die Härteverläufe der nachgeschnittenen ($z = 1 \text{ mm}$) und der konventionell geschnittenen ($z = \infty$) Versuchsproben zeigen übereinstimmende Tendenzen. Alle Härtewerte steigen mit zunehmendem Schneidweg steil an, erreichen am Ende des Glattschnitts ein Maximum und nehmen dann tendenziell wieder ab. Die Härteverläufe stehen damit im Einklang mit der optischen Analyse, bei welcher mit zunehmendem Schneidweg (bis zum Glattschnittende) eine zunehmende Gefügedeformation nachgewiesen wird.

Auch aus den Härtemessungen geht hervor, dass der Nachschneidprozess zu einer signifikanten Verkleinerung der stark deformierten und verfestigten Randzone an der Schnittkante führt. Die besten Ergebnisse hinsichtlich Gefügedeformation und -schädigung werden bei einer Nachschneidzugabe von $z = 1 \text{ mm}$ erzielt. Eine Vergrößerung der Nachschneidzugabe führt tendenziell zu schlechteren Ergebnissen. Damit zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen den Gefügedeformationen/-schädigungen und den maximal erreichbaren Hauptformänderungen beim Lochzugversuch.

4.2 Versuchsreihen Lochaufweitungsversuch und Test mit Lochzugprobe

Das jeweils erreichbare maximale Lochaufweitverhältnis in Abhängigkeit verschiedener Schneidparameter ist für die untersuchten Werkstoffe in **Abbildung 12** dargestellt. Analog zu den Ergebnissen von [26] zeigt sich auch in den eigenen Untersuchungen, dass Dualphasenstähle grundsätzlich ein geringeres maximales Lochaufweitvermögen erreichen, als dies bei Komplexphasenstählen der Fall ist. Zusätzlich haben die experimentellen Versuchsreihen ergeben, dass auch die Fertigungsmethode des Lochs einen Einfluss auf die Kantenrissempfindlichkeit der Werkstoffe ausübt. Die Proben mit wasserstrahlgeschnittenen Kanten zeigen überwiegend die höchsten erreichbaren Kantenbelastungen. Dies steht in Übereinstimmung mit zahlreichen Untersuchungen, welche die Umformbarkeit von schergeschnittenen Kanten untersucht haben [25;26;27]. Zurückzuführen ist dies nach [28] auf die Tatsache, dass die Verfahrensgrenze des Kragenziehens am stärksten durch die Kaltverfestigung in der Randzone beeinflusst wird. Weiterhin begründet er das geringere Aufweitverhältnis der geschnittenen Löcher neben den bereits genannten Einflussgrößen durch die raue Restbruchzone. Daher werden die geringsten Aufweitverhältnisse erreicht, wenn das zum Kragenziehen benötigte Loch durch klassische Scherschneidverfahren hergestellt wird. Der HCT780X erreicht in diesem Fall lediglich einen Wert von $\lambda = 25 \%$. Im Gegensatz dazu werden mit dem 2-stufigen Scherschneiden nach [18] deutlich höhere Werte erzielt, die auf einem ähnlichen Niveau wie die wasserstrahlgeschnittenen Proben liegen. Dies bestätigt die Annahmen von [18], dass durch die Wahl des Scherschneidvorganges die Schereinflusszone rund um das Vorloch den Stahlwerkstoff in seinem Umformverhalten unterschiedlich stark beeinflusst.

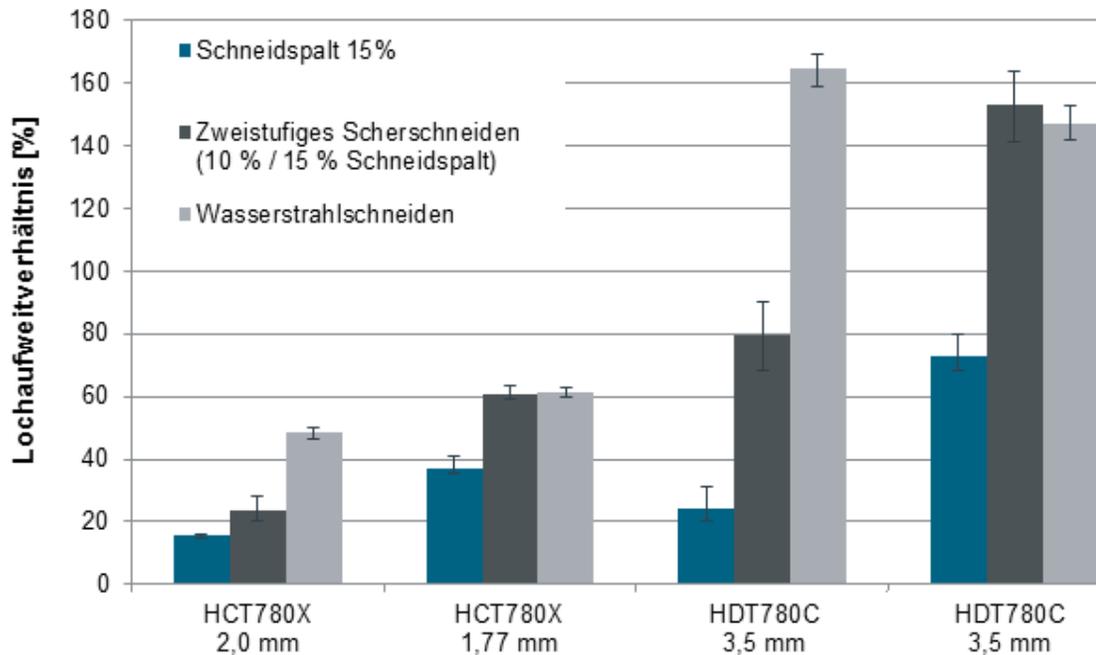


Abbildung 12: Ergebnisse der Versuchsreihen aus den Lochaufweitungsversuchen

Die Ergebnisse der Lochaufweitungsversuche zeigen deutliche Unterschiede in den maximal zu erreichenden Aufweitverhältnissen in Abhängigkeit von Werkstoff und Parameterkombinationen. Parallel wurde mit den identischen Werkstoffen und Parametern der Test mit Lochzugprobe durchgeführt. Zur Auswertung wurde von jedem Beschnittparameter sowohl für den LAV als auch den Test mit Lochzugprobe bis zu sieben Proben untersucht und ein Mittelwert der jeweiligen Versuchsreihe gebildet. Die jeweils maximalen und minimalen ermittelten Kennwerte wurden zudem nicht betrachtet. Die aus dem Test mit Lochzugprobe resultierenden Ergebnisse sind in **Abbildung 13** dargestellt.

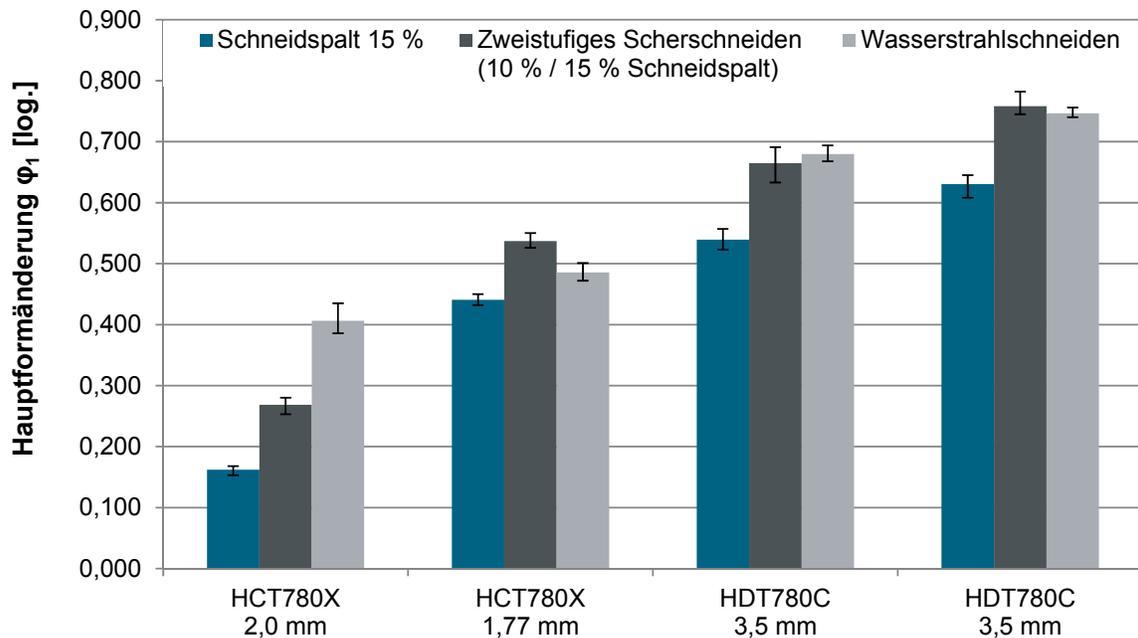


Abbildung 13: Ergebnisse der Versuchsreihen aus dem Test mit Lochzugprobe

Anhand der dargestellten Ergebnisse zeigt sich, dass die Auswertung aus den Versuchsreihen zum Test mit Lochzugprobe tendenziell zu vergleichbaren Resultaten führen, wie diese bereits in Lochaufweitungsversuchen nachgewiesen werden konnten. Im Vergleich ist bei beiden Verfahren eine deutliche Abhängigkeit der Schneidparameter auf das Restumformvermögen der Schnittkante erkennbar. Bei dem HCT780X in 1,77 mm und dem HDT780C in 3,5 mm ist zudem eine deutliche Steigerung des Restumformvermögens der Schnittkante durch einen 2-stufigen Beschnitt nachweisbar.

Der größte Vorteil des Tests mit Lochzugprobe im Vergleich zum Lochaufweitungsversuch ist in **Abbildung 14** dargestellt. Dort sind die aus dem jeweiligen Prüfverfahren resultierenden Streuungen der Ergebnisse in Abhängigkeit von Werkstoff und Schneidparameter gegenübergestellt. Zur Verdeutlichung wurde die mittlere Streuung über alle Versuchsreihen (horizontale Linie) bei beiden Verfahren gebildet. Anhand dieser lässt sich bei dem Test mit Lochzugprobe eine vergleichsweise deutlich geringere und zudem homogen verteilte Streuung nachweisen. Hingegen zeigen sich für den LAV besonders bei den Proben mit schergeschnittenen Kanten hohe Streuungen. Für den genormten Lochaufweitungsversuch beträgt die Streuung rund 17 %, welche bei dem Test mit Lochzugprobe auf 8 % reduziert werden konnte.

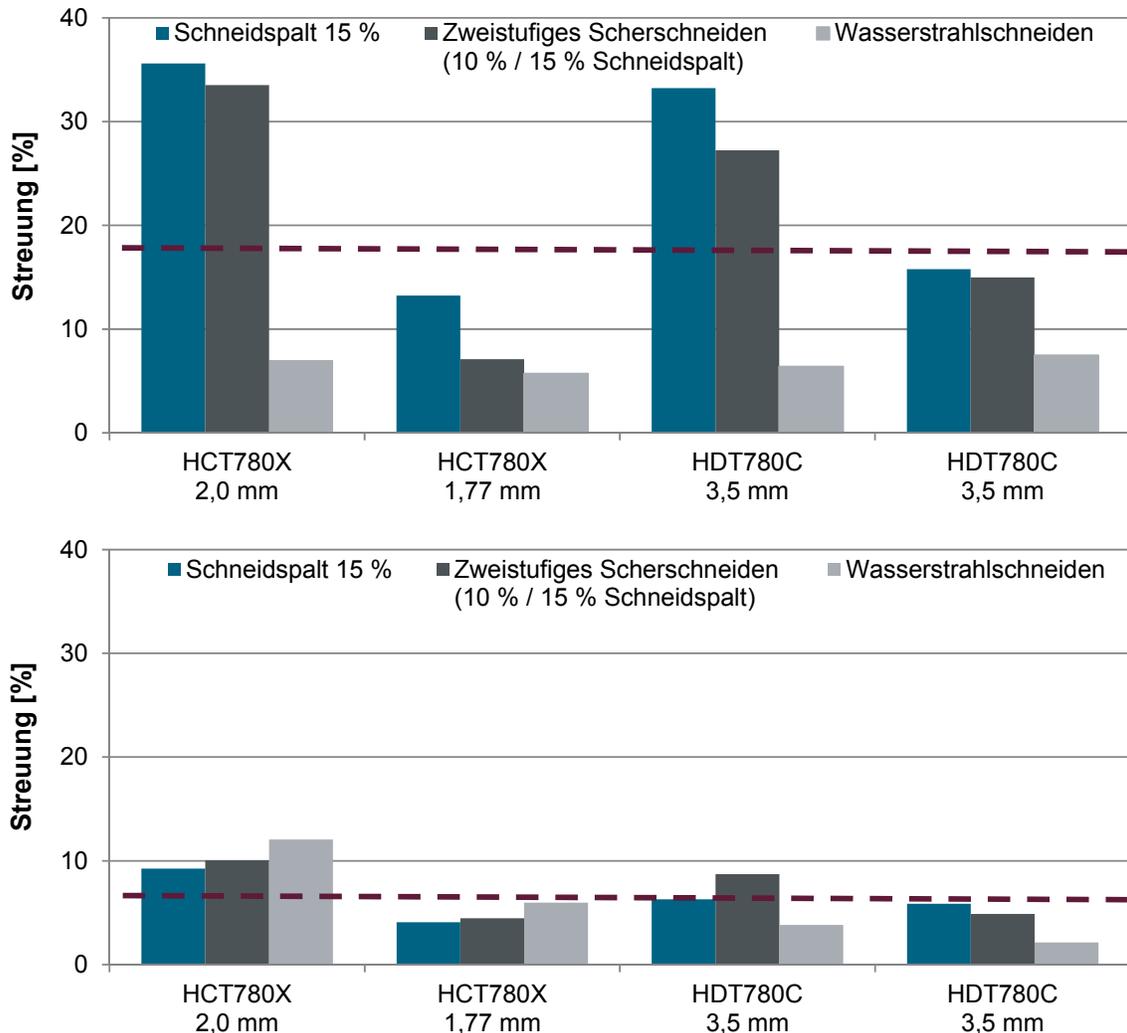


Abbildung 14: Streuungen der Messergebnisse aus dem LAV (oben) und dem Test mit Lochzugprobe (unten)

4.3 Einfluss der Auswertungsmethode beim Test mit Lochzugprobe

Die optische Auswertung und Bestimmung der Haupt- und Nebenformänderungen, unmittelbar vor Risseintritt, wurden wie beschrieben mit dem optischen Messsystem ARAMIS der Firma Gom durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass diese Ergebnisse von dem gewählten Abstand zur Lochkante abhängig sind. Ausgewertet wurde an der Kante, im Abstand von zwei Facetten und im Abstand von vier Facetten. Bei einer virtuellen Facettenkantenlänge von 0,73 mm ergeben sich damit Abstände von ca. 1,46 bzw. 2,92 mm zur Kante. In **Abbildung 15** ist zu erkennen, dass lediglich in unmittelbarer Nähe zur Kante ein uniaxialer Dehnpfad vorliegt. Mit steigendem Abstand weicht der Formänderungspfad zunehmend von diesem ab.

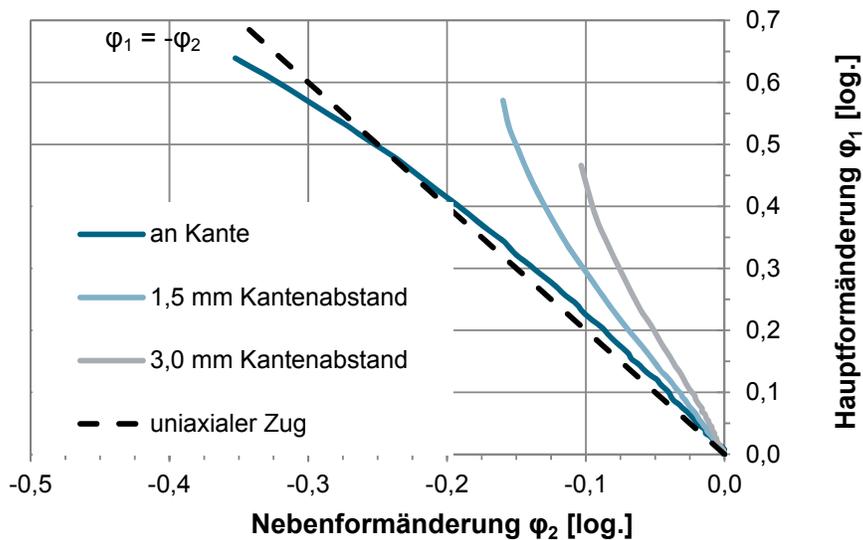


Abbildung 15: Bestimmung der Dehnpfade in definierten Abständen zur Schnittkante aus den Lochzugversuchen (Werkstoff: HDT780C, Blechdicke: 3,5 mm, Schneidspalt: 15 %)

Besonders die Verschiebung in Richtung des ebenen Dehnungszustands, dem Tiefpunkt der Forming Limit Curve (FLC), ist als kritisch zu beurteilen, da bei diesem Belastungsfall ein Versagen bei vergleichsweise geringeren Hauptformänderungen eintreten kann.

Des Weiteren konnten bei der Auswertung der Haupt- und Nebenformänderungen in einem definierten Facettenabstand zur Schnittkante weitere Herausforderungen festgestellt werden. Zur Auswertung wurden, wie bereits erläutert, Stufenpunkte in definierten Abständen anhand des virtuellen Gitters erzeugt. Die induzierte Zugspannung bewirkt jedoch eine Deformation der ursprünglichen Facetten, wodurch sich die virtuellen Messlängen verändern. Dies ist insbesondere im Bereich der schmalsten Stegposition, wo die höchsten Formänderungen auftreten, zu beobachten. In **Abbildung 16** ist deutlich zu sehen, dass sich die in der undeformierten Stufe erzeugten Abstände zur Schnittkante reduzieren. Somit ist eine korrekte Auswertung des Versuchs nur begrenzt möglich.

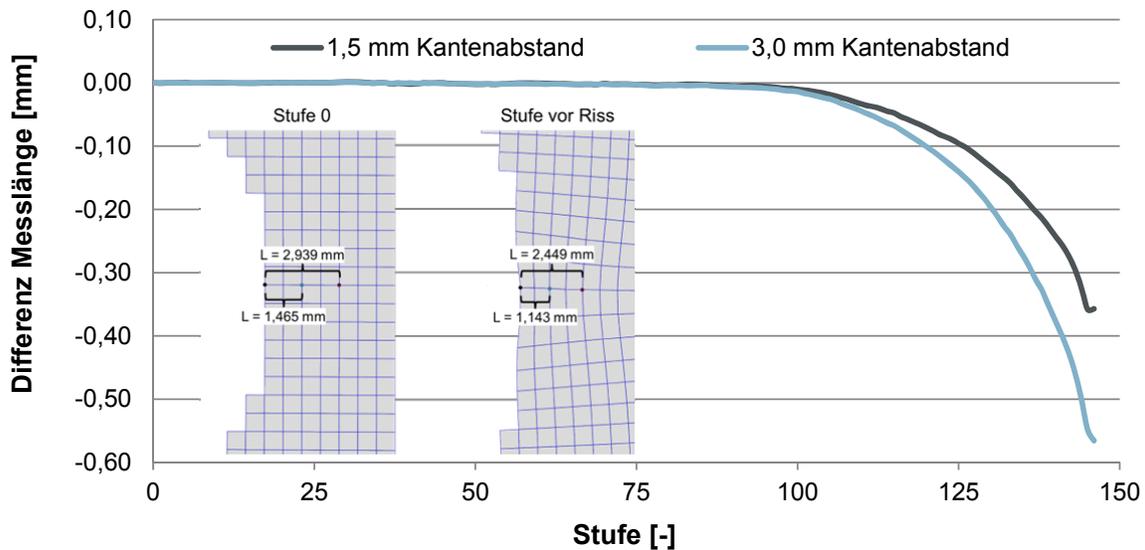


Abbildung 16: Einfluss der Facettendeformation auf die Auswertung in definierten Abständen zur Lochkante (Werkstoff: HDT780C, Blechdicke: 3,5 mm, Schneidspalt: 15 %)

5 Zusammenfassung

In Struktur- und Fahrwerksbauteilen der Automobilindustrie werden vermehrt hochfeste Mehrphasenstähle eingesetzt. Neben zahlreichen Vorteilen, wie eine erhöhte Festigkeit bei gleichzeitig guten duktilen Eigenschaften, konnte gezeigt werden, dass bei Umformvorgängen eine erhöhte Kantenrissempfindlichkeit von der Kante ausgeht. Besonders ausgeprägt zeigt sich dies, wenn durch einen Scherschneidvorgang das Material zunächst getrennt und anschließend kalt umgeformt wird. In Untersuchungen lässt sich häufig ein Materialversagen unterhalb der vorhergesagten Grenzformänderungskurve nachweisen. In der Konzeptphase des Werkzeugentstehungsprozesses führt dies zu ungenauen Aussagen über die Herstellbarkeit von Bauteilen.

In der Literatur ist eine Vielzahl alternativer Prüfmethode zur Bestimmung der Kantenrissensitivität zu finden. Im Rahmen der eigenen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass neben dem standardisierten Lochaufweitungsversuch nach ISO 16630 auch der durchgeführte Test mit Lochzugprobe geeignet ist, die Kantenrissensitivität zu bestimmen.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Versuchsreihen des jeweiligen Verfahrens belegen einen tendenziell vergleichbaren Einfluss der Schneidparameter auf das Restumformvermögen der Schnittkante. Die besten Ergebnisse mit schergeschnittenem Loch werden durch das 2-stufige Scherschneiden erzielt. Darüber hinaus ließ sich eine deutliche Reduzierung der Streuungen beim Test mit Lochzugprobe erreichen. Hierbei ist die Auswertemethodik von essentieller Bedeutung, um geeignete und reproduzierbare Kennwerte zu erhalten. Anhand der dargestellten Ergebnisse konnte ferner eine Steigerung der ertragbaren Kantenbelastung durch das zweistufige Scherschneiden nachgewiesen werden.

Danksagung

Wir danken ArcelorMittal Global Research and Development (Maizières-lès-Metz, Frankreich) für die Bereitstellung der Versuchswerkstoffe und die Unterstützung bei der Durchführung von Versuchsreihen.

Literatur

- [1] Klocke, F.: Fertigungsverfahren, Band 4: Umformen. Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 2006
- [2] Gläsner, T. et al.: Zweistufiges Scherschneiden reduziert die Kantenrissempfindlichkeit. BlechRohreProfile, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2013
- [3] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- [4] Chiriac, C.; Chen, G.: Local Formability Characterization of AHSS - Digital camera based hole expansion test development. International Deep Drawing Research Group, Olofström, Schweden, Juni 2008
- [5] De Cooman, B. C. et al.: Hole Expansion Performance of TWIP Steel. The 9th International Conference on Technology of Plasticity, Gyeongju, Korea, September 2008
- [6] Gula, G., Beier, T., Keßler, L.: Charakterisierung des Umformverhaltens von beschnittenen Kanten bei mehrphasigen Blechwerkstoffen für die Berücksichtigung in der Methodenplanung. 33. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, Fellbach, April 2013
- [7] Liewald, M.; Gall, M.: Experimental investigation of the influence of shear cutting parameters of the edge crack sensitivity of dual phase steels. International Deep Drawing Research Group, Zürich, Schweiz, Juni 2013
- [8] N.N.: Fertigungsverfahren - Einteilung, DIN-Norm 8580, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [9] N.N.: Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, DIN-Norm 8588, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [10] Hoffmann, H., Neugebauer, R, Spur, G.: Handbuch der Fertigungstechnik, 2. Auflage Carl Hanser Verlag, München, 2012,
- [11] Hasegawa, K.; Kawamura, K.; Urabe, T.; Hosoya, Y.: Effects of Microstructure on Stretch-flange-formability of 980 MPa Grade Coldrolled Ultra High Strength Steel Sheets, ISIJ International, Vol. 44 No. 3 (2004), S. 603–609

- [12] Timmerbeil, F.-W.: Untersuchungen des Schneidvorganges bei Blech, insbesondere beim geschlossenen Schnitt, Dissertation, TH Hannover, 1957
- [13] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [14] Kühlewein, R.: Einfluss der Prozessparameter auf das Nachschneiden schergeschnittener Konturen, Dissertation, TU München, 2003
- [15] Kühlewein, R.; Wiemer, H.: Funktionsflächen durch Nachschneiden, Bleche Rohre Profile 3 (2004), S. 30-31
- [16] Guidi, A.: Nachschneiden und Feinschneiden, Carl Hanser Verlag, München, 1965
- [17] Romanowski, W.P.: Handbuch der Stanzereitechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1968
- [18] Gläsner, T.: Methods to decrease cut edge sensitivity of high strength steels, Key Engineering Materials, Vols. 611-612, Seite 1294-1307, 2014
- [19] ISO 16630 - Metallic Materials - Sheet and Strip - Hole expanding test. Juli 2009
- [20] Braun, M. et al.: Ergebnisse eines europäischen Ringversuchs zum Lochaufweitungsversuch nach ISO 16630. Tagung Werkstoffprüfung Berlin 2011, S. 317 – 326
- [21] Watanabe, K. et al.: Simple prediction method for the edge fracture of steel sheet during vehicle collision (1st report) - Evaluation of fracture limit from the edge using small-sized test pieces. LS-DYNA Anwenderforum, Ulm, 2006
- [22] Kessler, L. et al.: An Approach to Model Sheet Failure After Onset of Localized Necking in Industrial High Strength Steel Stamping an Crash Simulations. SAE International - Passenger Cars - Mechanical Systems, Band 1, Ausgabe 1, 2008
- [23] Tetsuo, S.: Strength Steels Sheets for Automobile Suspension and Chassis Use – High Strength Hot-Rolled Steel Sheets with Excellent Press Formability and Durability for Critical Safety Parts, JFE Technical Report No. 4, 2004
- [24] Hasegawa, K.: Effects of Microstructure on Stretch-flange-formability of 980 MPa Grade Cold-rolled Ultra High Strength Steels Sheets, ISIJ International, Vol. 44, No. 3, 2004
- [25] Wurm, A.: Ermittlung umformtechnischer Verfahrensgrenzen und Potenzialbewertung neuer hochfester Karosseriestähle, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2007
- [26] Karellova, A.: Influence of edge conditions on the hole expansion property of dual-phase and complex-phase steels, Materials Science and Technology, 2007

- [27] Wu, X.: Characterization of Mechanically Sheared Edges of Dual Phase Steels. Journal of Materials Processing Technology, Volume 212, Issue 6, Detroit, 2012, pp. 1209 – 1224
- [28] Schlagau, S.: Verfahrensverbesserung beim Kragenziehen durch Überlagern von Druckspannung, Dissertation, TH Darmstadt, 1988