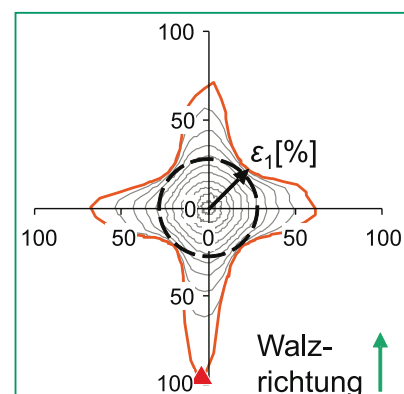
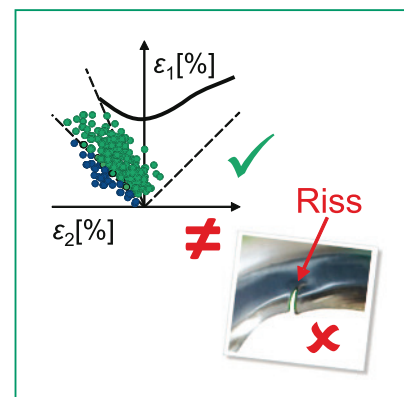


Matthias Schneider

# Ermittlung des Formänderungsvermögens schergeschnittener Kanten von hochfesten Stahlblechen

*Berichte aus dem IFUM · Band 8/2018**Herausgeber: Bernd-Arno Behrens*

## Berichte aus dem IFUM

Wissenschaftliche Schriftenreihe des  
Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen  
der Leibniz Universität Hannover

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Zugleich: Dissertation,  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2018

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2018  
An der Universität 2 ♦ 30823 Garbsen  
Tel: 0511-762-19434 ♦ Fax: 0511-762-18037  
[www.tewiss-verlag.de](http://www.tewiss-verlag.de) ♦ mail: [info@tewiss-verlag.de](mailto:info@tewiss-verlag.de)

ISBN 978-3-95900-243-1  
ISSN 1613-9704

Verlag: TEWISS Verlag,  
TEWISS-Technik und Wissen GmbH

Herstellung: DruckTeam Druckgesellschaft mbH, Hannover  
Printed in Germany

**Ermittlung des Formänderungsvermögens  
schergeschnittener Kanten von  
hochfesten Stahlblechen**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing.  
Matthias Schneider

2018

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. B.-A. Behrens  
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA  
Tag der Promotion: 09.08.2018

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der *Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH* in Kooperation mit dem *Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen* der *Leibniz Universität Hannover*. Dem Leiter des Institutes, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens, gilt in diesem Zusammenhang mein besonderer Dank für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und die Gewährung der dabei erforderlichen wissenschaftlichen Freiheit.

Ebenfalls danken möchte ich

- Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Niemeyer für die Initialzündung zur arbeitsbegleitenden Promotion,
- Herrn Dr.-Ing. Benedikt Ritterbach für die Aufrechterhaltung dieser Möglichkeit,
- meinen Vorgesetzten Herrn Michael Braun und Herrn Ansgar Geffert für die Möglichkeit Arbeit und Promotion in dieser Weise zu kombinieren,
- meinen Kollegen aus dem Bereich Anwendungstechnik der SZMF für ihre Unterstützung,
- Herrn Dr.-Ing. habil. Anas Bouguecha und Herrn Dr.-Ing. Ilya Peshekhodov für die Unterstützung während des gemeinsamen FOSTA Projektes 830 und insbesondere während der anschließenden Promotionsphase,
- Herrn Burac Acun, Herrn Michael Baeck, Herrn Gerrit Schwagmeyer, Herrn Johan Parschukow und Herrn Sebastian Westhäuser für ihre Hilfe während ihres Praktikums bzw. ihrer Abschlussarbeit
- sowie Frau Dr.-Ing. Verena Martin, Herrn Dr.-Ing. Stefan Mütze, Herrn Dr.-Ing. Ilya Peshekhodov und Herrn Dr.-Ing. habil. Anas Bouguecha für die kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Nicht weniger wiegt die Hilfe, die ich im Privaten erleben durfte. Vielen Dank meinen Schwiegereltern Inge und Werner Martin für die vielen Einsätze bei der Betreuung der Kinder. Besonderer Dank gebührt meinen Eltern Gisela und Wolfgang Schneider. Sie haben mich vom ersten Moment an unterstützt.

Ganz zum Schluss möchte ich den drei Menschen danken, die während der Entstehung dieses Buches und den damit verbundenen Tätigkeiten am meisten entbehren mussten.

**Für Anneke Johanna, Philipp Arne und Verena!**

**Danke für euer Verständnis.**

Veltheim (Ohe), im Dezember 2018

Matthias Schneider

# Ermittlung des Formänderungsvermögens schergeschnittener Kanten von hochfesten Stahlblechen

## Kurzfassung

Diese Arbeit dokumentiert die Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Bestimmung des durch Scherschneiden verminderten Formänderungsvermögens einer Stahlblechkante und den Einsatz entsprechender experimenteller Ergebnisse in der Umformsimulation.

Zu Beginn wird der Stand der Technik zur experimentellen Bestimmung des durch Scherschneiden verminderten Formänderungsvermögens einer Stahlblechkante beschrieben. Zum besseren Verständnis des Vorgangs des Scherschneidens werden Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt. Sie weisen zwar eine realitätsnahe Schnittkontur auf, die Reduzierung des Formänderungsvermögens korreliert jedoch nicht mit dem Experiment. Als Konsequenz wird im Folgenden eine experimentelle Bestimmung des Formänderungsvermögens schergeschnittener Kanten angestrebt. Bekannte experimentelle Ansätze werden analysiert und Anforderungen an einen neuen Ansatz abgeleitet. Es wird ein neu entwickelter Versuch präsentiert, bei dem ein schergeschnittenes, kreisrundes Loch einer Stahlblechprobe mithilfe eines Halbkugelstempels bis zum Anriss aufgeweitet wird. Für den ersten Versuchsteil des Scherschneidens können Werkzeugeinsätze nach Norm genutzt werden. Für den Umformschritt werden die ebenfalls standardisierten Werkzeuge zur Aufnahme der Grenzformänderungskurve verwendet. Das mit der jeweiligen Probe erzielte Lochaufweitungsverhältnis  $\lambda$  kann taktil bestimmt werden. Eine detaillierte Analyse des Formänderungs- und Versagensverhaltens ist möglich, wenn der Versuch mit einem optischen Formänderungsanalysesystem dokumentiert wird. Auf Basis einer Formänderungsanalyse wird mithilfe von im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Kriterien der Riss detektiert und die Probe automatisch ausgewertet. Neben der Bestimmung von  $\lambda$  wird ein Polardiagramm der Dehnung des Versuchs erzeugt. Es stellt die örtliche und zeitliche Entwicklung der Hauptdehnung des Lochrandes dar. Auf diese Weise wird der Versuchsablauf bzw. das Werkstoffverhalten anschaulich visualisiert und zwischen einer Aufweitung mit lokalen Einschnürungen oder homogener Aufweitungen unterschieden. Die mithilfe des entwickelten Ansatzes bestimmten Ergebnisse werden zur Erweiterung eines Grenzformänderungsdiagramms genutzt. Die Anwendung des erweiterten Grenzformänderungsdiagramms wird an einem Umformprozess zur Herstellung eines praxisrelevanten Fahrwerksbauteils demonstriert.

Schlagworte: Formänderungsvermögen, Scherschneiden, Stahl, Blech, numerische Simulation, Kantenrissempfindlichkeit

# Determination of shear-cut edge formability in high strength steel sheets

## Abstract

This work documents the development of a new experiment to determine the reduced formability of a steel sheet sheared edge and the use of the corresponding experimental results in numerical forming simulations.

As an introduction the state of the art concerning the determination of reduced formability of a sheared steel sheet is described. For a better understanding of the shear-cutting process a finite element simulation is performed in which the contours of the numerical shear-cut edges are comparable to the experimental contours, however, the reduction of formability does not fit to the experimental results. Below, consequently, it is aimed for an experimental approach for the determination of formability of a shear-cut edge of a sheet material. Published approaches are analyzed and requirements for a new approach are derived.

A newly developed experimental approach is presented, in which a pierced cylindrical hole is expanded with a hemispherical punch until a first crack is recognized. The tools for cutting operation are all standardized and additionally, tools for forming operation are also common as they are normally used for determination of forming limit curve. After the test is performed, the hole-expansion ratio  $\lambda$  can be measured with a tactile system. A much more detailed analysis of the forming and failure behavior is possible if the experiment is documented with an optical strain measurement system. Based on this strain data and some criteria developed in this work, the crack is determined user-independently. In addition to the determination of  $\lambda$ , a polar diagram of strain data is plotted. It visualizes the temporal and local evolution of the major engineering strain close to the hole. Thus, a homogenous expansion or local necking is discernible. The results from the newly developed experimental approach are then used to extend a forming limit diagram. The application of the extended forming limit diagram is demonstrated successfully in a forming process to procedure a practice-relevant chassis part.

Keywords: Forming limit, shear-cutting, sheet steel, numerical simulation, edge-crack sensitivity

## Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Werkstoffbezeichnungen und Normwerte</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1 Hoch- und höchstfeste Stahlblechwerkstoffe.....	3
2.2 Modellierung von Blechwerkstoffen.....	4
2.2.1 Fließverhalten.....	4
2.2.2 Formänderungsvermögen.....	7
2.3 Scherschneiden von Blechwerkstoffen.....	11
2.3.1 Prozessablauf.....	11
2.3.2 Geometrie schergeschnittener Kanten.....	12
2.3.3 Verfahrensvarianten.....	13
2.3.4 Finite-Elemente-Simulation des Scherschneidens.....	14
2.4 Experimentelle Bestimmung des Formänderungsvermögens schergeschnittener Kanten.....	15
2.4.1 Übersicht über mögliche Methoden zur Detektion eines Risses.....	16
2.4.2 Grundlagen der optischen Formänderungsanalyse.....	18
2.4.3 Lochaufweitung mit einem Kegelstempel.....	22
2.4.4 Lochaufweitung mit einem Halbkugelstempel.....	25
2.4.5 Lochaufweitung mit einem Flachbodenstempel.....	25
2.4.6 Biegung in der Blechebene.....	26
2.4.7 Biegung senkrecht zur Blechebene.....	28
2.4.8 Biegung senkrecht zur Blechebene und Zug.....	30
2.4.9 Umstellung eines Flansches.....	31
2.4.10 Zug einer gekerbten Probe.....	32
2.4.11 Zug einer gelochten Probe.....	34
2.4.12 Fazit.....	36
2.5 Berücksichtigung des Formänderungsvermögens schergeschnittener Kanten in der Umformsimulation.....	36
2.5.1 Erweiterung der Grenzformänderungskurve um das Formänderungsvermögen der Kante.....	36
2.5.2 Einsatz von Versagens- oder Schädigungsmodellen.....	37
2.5.3 Durchgängige Schadensakkumulation.....	38
2.5.4 Einflussgrößen auf die Abbildungsqualität des Formänderungsvermögens der schergeschnittenen Kante.....	38
2.5.5 Fazit.....	40
<b>3 Problemstellung, Zielsetzung und Lösungsweg</b> .....	<b>41</b>
<b>4 Umformtechnische Charakterisierung der Versuchswerkstoffe</b> .....	<b>43</b>
4.1 Beschreibung der Versuchswerkstoffe.....	44
4.2 Charakterisierung der Fließeigenschaften.....	44
4.3 Charakterisierung des Formänderungsvermögens.....	48
<b>5 Experimentelle und numerische Untersuchung des Scherschneidens</b> .....	<b>49</b>
5.1 Experimentelle Untersuchung des Scherschneidens.....	49
5.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung.....	49
5.1.2 Geometrie der schergeschnittenen Kanten.....	50
5.2 Numerische Untersuchung des Scherschneidens.....	51
5.2.1 Geometrie und Diskretisierung von Werkzeug und Platine.....	51
5.2.2 Materialverhalten der Platine.....	53
5.2.3 Randbedingungen und Kontaktdefinitionen.....	53



5.2.4	Inverse Parametrisierung des Versagensmodells .....	53
5.2.5	Ergebnisse der Optimierung und Abbildung der experimentellen Schnittkonturen .....	57
5.3	Ergebnisse und Diskussion .....	67
<b>6</b>	<b>Erarbeitung von Anforderungen an die experimentelle Bestimmung des Formänderungsvermögens schergeschnittener Kanten .....</b>	<b>69</b>
6.1	Analyse des Lochaufweitungsversuchs gemäß ISO 16630 .....	69
6.2	Vergleichende Analyse verschiedener Versuche im Hinblick auf die Versuchsdurchführung .....	72
6.3	Numerische Analyse verschiedener Versuche im Hinblick auf den Dehnungszustand an schergeschnittenen Kanten .....	74
6.4	Ergebnis der Analysen .....	78
<b>7</b>	<b>Entwicklung eines neuen Ansatzes zur experimentellen Bestimmung des Formänderungsvermögens schergeschnittener Kanten .....</b>	<b>79</b>
7.1	Aufbau und Durchführung der Lochaufweitung mit Halbkugelstempel .....	79
7.2	Taktile Bestimmung des Lochaufweitungsverhältnisses .....	80
7.3	Bestimmung und Analyse der Dehnung der Probe .....	81
7.3.1	Festlegung des für eine optische Dehnungsanalyse idealen Lochdurchmessers .....	81
7.3.2	Bestimmung des Abstandes der Dehnungsanalyse zum Rand .....	82
7.3.3	Datenaufbereitung in <i>ARAMIS</i> und <i>EXCEL</i> .....	84
7.3.4	Darstellung der Hauptdehnung im Polardiagramm .....	84
7.3.5	Analyse der Dehnungsverhältnisse am Lochrand .....	86
7.3.6	Extrapolation der mittleren Hauptdehnung auf den Lochrand .....	87
7.3.7	Analyse des Einflusses des Belastungszustandes bzw. des elastischen Dehnungsanteiles .....	90
7.4	Bedienerunabhängige Bestimmung des Zeitpunktes der Rissinitiierung .....	91
7.4.1	Manuelle Bestimmung des Zeitpunktes der Rissinitiierung .....	91
7.4.2	Trainingsmenge zur Bestimmung der Unterteilungen und Schwellwerte .....	92
7.4.3	Definition einer Gleichmaßaufweitung .....	93
7.4.4	Definition von Riss-Detektions-Zonen .....	95
7.4.5	Definition von Kriterien für einen Risseintritt .....	96
7.4.6	Bewertung der Detektionsqualität .....	98
7.4.7	Ergebnisse für Trainingsmenge .....	99
7.5	Stand des neu entwickelten, experimentellen Ansatzes .....	100
7.6	Ergebnisse und Diskussion .....	101
7.6.1	Ergebnisse .....	101
7.6.2	Fazit und Ausblick .....	102
<b>8</b>	<b>Berücksichtigung des Formänderungsvermögens schergeschnittener Kanten in der Umformsimulation .....</b>	<b>104</b>
8.1	Numerische Simulation der Lochaufweitung mit Halbkugelstempel zur Bestimmung der Einflussgrößen auf die Vorhersagequalität .....	104
8.1.1	Geometrie und Diskretisierung .....	104
8.1.2	Materialverhalten .....	105
8.1.3	Randbedingungen und Kontaktdefinitionen .....	105
8.1.4	Einflüsse auf die Qualität des Simulationsergebnisses .....	105
8.2	Bestimmung der Kantenelemente .....	107
8.3	Bestimmung eines Ansatzes zur Berücksichtigung des reduzierten Formänderungsvermögens einer schergeschnittenen Kante in der Umformsimulation .....	108

---

8.3.1	Ansätze zur Berücksichtigung des reduzierten Formänderungsvermögens einer schergeschnittenen Kante in der Umformsimulation.....	108
8.3.2	Anforderungen an einen Ansatz zur Berücksichtigung des reduzierten Formänderungsvermögens einer schergeschnittenen Kante in der Umformsimulation.....	109
8.4	Ansatz zur Erweiterung des Grenzformänderungsdiagramms um eine zusätzlich Grenzformänderung für die Kante .....	110
8.5	Exemplarische Anwendung des erweiterten Grenzformänderungsdiagramms auf ein Fahrwerksbauteil .....	111
8.5.1	Bauteilbereich „Außenkante“ .....	112
8.5.2	Bauteilbereich „Durchzug“ .....	113
8.6	Ergebnisse und Diskussion .....	114
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>115</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>118</b>
<b>11</b>	<b>Vorveröffentlichungen .....</b>	<b>132</b>
<b>12</b>	<b>Studentische Arbeiten .....</b>	<b>134</b>
<b>13</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>135</b>
13.1	Geometrie der schergeschnittenen Kanten .....	135
13.2	Zusammenhang zwischen der ebenen Anisotropie und der Dehnungsverteilung bei der Lochaufweitung.....	137
13.3	Entwickelte Makros .....	138

## Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen und Abkürzungen (lat.)	Bedeutung	Einheit
*MAT_015	LS-DYNA Materialmodell *MAT_JOHNSON_COOK	-
*MAT_024	LS-DYNA Materialmodell *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY	-
*MAT_224	LS-DYNA Materialmodell *MAT_TABULATED_JOHNSON_COOK	-
*MAT_036	LS-DYNA Materialmodell *MAT_3-PARAMETER_BARLAT	-
*MAT_ADD_EROSION	LS-DYNA Materialmodell, welches zu einem vorhandenen Materialmodell hinzugefügt werden kann, um Schädigung zu akkumulieren und eine Elementversagen zu steuern	-
$1 - \bar{D}$	Restformänderungsvermögen	-
1D	eindimensional	-
2D	zweidimensional	-
3D	dreidimensional	-
$A$	Fläche	mm <sup>2</sup>
$A_{80}$	Bruchdehnung mit 80 mm Anfangsmesslänge	%
$A_e$	Einschnürdehnung	%
$A_f$	Area fraction bzw. prozentualer Anteil schwarzer Bildpunkte bezogen auf das gesamte Bild	%
$A_{f0}$	prozentualer Schwarzanteil der Zielkontur	%
$A_{f1}$	prozentualer Schwarzanteil des aktuellen Ergebnisses	%
$A_g$	Gleichmaßdehnung	%
AHSS	Advanced High Strength Steel	-
$A_{JC}$	Parameter des Johnson-Cook-Modells zu Beschreibung der Verfestigung im quasistatischen Fall	-
$A_R$	Abstand zum Rand	mm
$A_{R \max}$	maximal möglicher Abstand zum Rand für eine Auswertung	mm
$A_{R \min}$	minimal möglicher Abstand zum Rand für eine Auswertung	mm
ASTM	American Society for Testing and Materials	-
$b$	Abstand zwischen zwei Betrachtungspositionen	mm
$b_0$	Probenbreite im Ausgangszustand	mm
$b_1$	Probenbreite im umgeformten Zustand	mm
$b_A$	Breite der Kantenformabweichung der Austrittsseite	mm
$b_E$	Breite der Kantenformabweichung der Eintrittsseite	mm
BiW	Body in White bzw. Karosserie	-
$B_{JC}$	Parameter des Johnson-Cook-Modells zu Beschreibung der Verfestigung im quasistatischen Fall	-

$b_R$	Breite der Ringzone	mm
$b_{r,i}$	Rissweite $i$ an geprüfter Probe	mm
<i>BUP 600</i>	Blechumform-Prüfmaschine der Firma Zwick mit einer maximalen Tiefungs- und Blechhalterkraft von 600 kN	-
$C$	Wert für die Schädigung des Materials	-
$c$	relativer Schneidspalt	%
CAD	Computer-Aided Design	-
CAE	Computer-Aided Engineering	-
$C_{H1-2}$	Parameter der Fließkurvenapproximation nach Hollomon	-
$C_{HS1-4}$	Parameter der Fließkurvenapproximation nach Hocket-Sherby	-
$C_{Jc}$	Materialparameter zur Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit	-
$C_{krit}$	Materialtypischer Wert für die Schädigung, bei der das Formänderungsvermögen des Werkstoffs erschöpft ist	-
$C_{L1-3}$	Parameter der Fließkurvenapproximation nach Ludwik	-
CP-Stahl	Complexphasenstahl	-
$C_{S1-3}$	Parameter der Fließkurvenapproximation nach Swift	-
$C_{V1-3}$	Parameter der Fließkurvenapproximation nach Voce	-
$D$	Schädigungsvariable	-
$\bar{D}$	gemittelte Schädigungsvariable	-
$D_0$	Anfangsdurchmesser vor Aufweitung (Mittelwert)	mm
$D_1-D_5$	Modellparameter zur Festlegung der Abhängigkeit des Versagensumformgrades $\varphi_v$ von der Spannungstriaxialität $\eta$	-
$\bar{D}_I$	Mittelwert der Schädigungsvariablen im Bereich I	-
$\bar{D}_{Ii}$	Mittelwert der Schädigungsvariablen im Bereich I für $i$	-
$\bar{D}_{IO}$	Mittelwert der Schädigungsvariablen der oberen Blechhälfte im Bereich I	-
$\bar{D}_{IU}$	Mittelwert der Schädigungsvariablen der unteren Blechhälfte im Bereich I	-
$\bar{D}_{II}$	Mittelwert der Schädigungsvariablen im Bereich II	-
$\bar{D}_{III}$	Mittelwert der Schädigungsvariablen im Bereich III	-
$D_{Ei}$	Schädigungsvariable des Elements $i$	-
$D_h$	Enddurchmesser nach Aufweitung (Mittelwert)	mm
$D_{h1}-D_{h2}$	Enddurchmesser nach Aufweiten an der Messstelle 1 bzw. 2	mm
$\bar{D}_O$	Mittelwert der Schädigungsvariable in der oberen Blechhälfte	-
$\bar{D}_U$	Mittelwert der Schädigungsvariable in der unteren Blechhälfte	-
DIN	Deutsches Institut für Normung	-
$d_M$	Durchmesser der Matrize	mm
DP-Stahl	Dualphasenstahl	-
$d_s$	Durchmesser des Stempels	mm

$d_{s1}$	Durchmesser Stempel 1	mm
$d_{s2}$	Durchmesser Stempel 2	mm
DVM	Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V.	-
$E$	Elastizitätsmodul	MPa
EFB	Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.	-
$EFL$	<i>Edge-forming limit</i>	-
$FA$	Facettenabstand	mm
FE	Finite-Elemente	-
FEA	Finite-Elemente-Analyse	-
FEM	Finite-Elemente-Methode	-
$FG$	Facettengröße	mm
$F_{BH}$	Blechhalterkraft	N
FLC	Forming Limit Curve	-
FLD	Forming Limit Diagram	-
$F_{NH}$	Niederhalterkraft	N
FOSTA	Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.	-
$F_{S,max}$	Schneidkraft	N
$f_{Wachstum}$	Porenwachstum	-
GFD	Grenzformänderungsdiagramm	-
GFK	Grenzformänderungskurve	-
GOM	<i>Gesellschaft für optische Messtechnik mbH</i>	-
$h_A$	Höhe der Kantenformabweichung Austrittsseite	mm
$h_E$	Höhe der Kantenformabweichung Eintrittsseite	mm
HER	Hole expansion ratio ( $\lambda$ )	%
HET	Hole expansion test	-
<i>HET-ISO</i>	<i>Hole Expansion Test according to ISO 16630 bzw. Lochaufweitungstest gemäß ISO 16630</i>	-
<i>HET-NAK</i>	<i>Hole Expansion Test with Nakajima punch bzw. Lochaufweitungstest mit Halbkugelstempel</i>	-
$h_R$	Restfläche	mm
$h_s$	Glattschnittanteil	mm
$i$	Berechnungsinkrement	-
ICTP	International Conference on Technology of Plasticity	-
IDDRG	International Deep Drawing Research Group	-
IFU	Institut für Umformtechnik	-
IFUM	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen	-
ISO	International Organisation for Standardization	-
JC	Materialmodell nach Johnson und Cook	-
JC-Modell	Johnson-Cook-Plastizitätsmodell	-
$K$	Verfestigungskoeffizient	MPa

$k_{\text{f}}$	Fließspannung bei quasistatischer Belastung	MPa
$k_{\text{fH}}$	Fließspannung gemäß Approximation nach Hollomon	MPa
$k_{\text{fHS}}$	Fließspannung gemäß Approximation nach Hocket-Sherby	MPa
$k_{\text{fL}}$	Fließspannung gemäß Approximation nach Ludwik	MPa
$k_{\text{fS}}$	Fließspannung gemäß Approximation nach Swift	MPa
$k_{\text{fSHS}}$	Fließspannung gemäß einer Kombination der Approximationen nach Swift und Hocket-Sherby	MPa
$k_{\text{fV}}$	Fließspannung gemäß Approximation nach Voce	MPa
$k_{\text{fVS}}$	Fließspannung gemäß einer Kombination der Approximationen nach Voce und Swift	MPa
<i>KGF</i>	<i>Kantengrenzformänderung</i>	-
$l_0$	Probenlänge im Ausgangszustand	mm
$l_1$	Probenlänge im umgeformten Zustand	mm
<i>LSTC</i>	<i>Livermore Software Technology Corporation</i>	-
$L_{Ei}$	Elementkantenlänge des Elements $i$	mm
$m$	Materialparameter zur Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit	-
$n$	Materialparameter zur Beschreibung der Verfestigung	-
$n_{2-20/A_g}$	mittlere Verfestigungsexponent für den Dehnungsbereich von 2 bis 20 % bzw. bis zur Gleichmaßdehnung $A_g$	-
$n_{\text{JC}}$	Parameter des Johnson-Cook-Modells zu Beschreibung der Verfestigung im quasistatischen Fall	-
$p$	Parallaxe	mm
$P$	Breite eines Pixels	mm
<i>PBS</i>	<i>Portable Batch System (Workload Management Software)</i>	-
<i>PDD</i>	<i>Polares Dehnungs-Diagramm</i>	-
<i>PSD</i>	<i>Polar strain diagram</i>	-
PTFE	Polytetrafluorethylen	-
$P_u$	Mittelpunkt einer unverformten Facette	-
$P_v$	Mittelpunkt einer verformten Facette	-
$q_1$	Parameter der Fließbedingung	-
$q_2$	Parameter der Fließbedingung	-
$r_0$	senkrechte Anisotropie in Walzrichtung	-
$r_{45}$	senkrechte Anisotropie diagonal zur Walzrichtung	-
$r_{90}$	senkrechte Anisotropie quer zur Walzrichtung	-
$r_K$	Abstand zur Schnittkante	mm
$r_{K I}$	Abstand zur Schnittkante für Bereich I	mm
$r_{K II}$	Abstand zur Schnittkante für Bereich II	mm
$r_{K III}$	Abstand zur Schnittkante für Bereich III	mm
$r_{K \max I}$	Maximaler Abstand zur Schnittkante für Bereich I	mm

$r_{K \max II}$	Maximaler Abstand zur Schnittkante für Bereich II	mm
$r_{K \max III}$	Maximaler Abstand zur Schnittkante für Bereich III	mm
$R$	Radius	mm
$RDZ$	Riss-Detektions-Zone	-
$R_{eH}$	obere Streckgrenze	MPa
$R_{eL}$	untere Streckgrenze	MPa
$RK_i$	Risskriterium $i$	-
$R_m$	Zugfestigkeit	MPa
$R_{p0,2}$	Dehngrenze für 0,2 % plastische Dehnung	MPa
RVE	Repräsentatives Volumenelement	-
$s$	aktuelle Blechdicke	mm
$s_0$	Blechdicke im Ausgangszustand	mm
$s_1$	Blechdicke im umgeformten Zustand	mm
$s_K$	Abstand zur Mittelfaser des Bleches	mm
$s_{KU}$	in der unteren Blechhälfte bestimmter Abstand zur Mittelfaser des Bleches	mm
$s_{KO}$	in der oberen Blechhälfte bestimmter Abstand zur Mittelfaser des Bleches	mm
SA HEM	Semi-Automatic Hole Expansion Measurement	-
SAE	Society of Automotive Engineers	-
$T$	Temperatur	°C
$t$	Zeit	s
$T^*$	homologe Temperatur	°C
Tab-JC	Tabulated Johnson-Cook (*MAT_224)	-
$T_m$	Schmelztemperatur	°C
$T_r$	Raumtemperatur	°C
TWIP-Stahl	Twinning-induced-plasticity-Stahl	-
$U$	Schneidspalt	mm
$\ddot{U}$	Überlappung	mm
$u_N$	Niederhalterspalt	mm
$v$	Geschwindigkeit	mm/s
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	-
$v_{ST}$	Stempelgeschwindigkeit	mm/s
WING	Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft	-
$x$	x-Achse im kartesischen Koordinatensystem	-
$y$	y-Achse im kartesischen Koordinatensystem	-
$z$	z-Achse im kartesischen Koordinatensystem	-
$z_{NS}$	Schnittzugabe beim Nachschneiden	mm

Formelzeichen (griech.)	Bedeutung	Einheit
$\alpha$	Winkel zwischen Blickachse und Objektoberfläche	°
$\beta$	Gewichtungsfaktor	-
$\varepsilon$	auf die Anfangsmesslänge bezogene relative Dehnung	%
$\varepsilon_{1\max}$	lokale Maximaldehnung	%
$\varepsilon_p$	plastischer Anteil der auf die Anfangsmesslänge bezogenen relativen Dehnung	%
$\varepsilon_v$	Versagensdehnung	%
$\eta$	Spannungstriaxialität	-
$\lambda$	Lochaufweitungsverhältnis bzw. Hole expansion ratio (HER)	%
$\lambda_g$	maximales Lochaufweitungsverhältnis bzw. Hole expansion ratio (HER) bei dem die Dehnung über den Umfang homogen verteilt ist	%
$\lambda_k$	Lochaufwertungswert bzw. Hole expansion ratio (HER) mit Kompensation der Rissweiten	%
$\nu$	Querkontraktionszahl	-
$\sigma_1$	erste Hauptspannung	MPa
$\sigma_2$	zweite Hauptspannung	MPa
$\sigma_3$	dritte Hauptspannung	MPa
$\sigma_H$	hydrostatischer Spannungsanteil	MPa
$\sigma_{ij}$	Spannungszustand	MPa
$\sigma_{vM}$	Vergleichsspannung nach von Mises	MPa
$\sigma_x$	Spannung in x-Richtung	MPa
$\sigma_y$	Spannung in y-Richtung	MPa
$\sigma_z$	Spannung in z-Richtung	MPa
$\Phi_{Hi}$	Fließpotenzial nach Hill	-
$\varphi$	Umformgrad	-
$\varphi_1$	Hauptformänderung in Blechebene	-
$\varphi_{1, \max}$	maximale Hauptformänderung	-
$\varphi_{1, \min}$	minimale Hauptformänderung	-
$\varphi_2$	Nebenformänderung in Blechebene	-
$\varphi_b$	Formänderung in Richtung der Probenbreite	-
$\varphi_d$	Formänderung in Richtung der Dicke der Probenkante	-
$\varphi_l$	Formänderung in Richtung der Probenlänge	-



$\varphi_r$	Formänderung radial zur Probenkante	-
$\varphi_s$	Formänderung in Richtung der Probendicke	-
$\varphi_t$	Formänderung tangential zur Probenkante	-
$\varphi_{\eta 0}$	$\varphi_v$ für $\eta=0$	-
$\varphi_{\eta m}$	Steigung für $\varphi_v$ abhängig von $\eta$	-
$\varphi_v$	Vergleichsumformgrad	-
$\varphi_v^v$	Vergleichsumformgrad bei Rissinitiierung bzw. Versagensumformgrad	-

### Werkstoffbezeichnungen und Normwerte

Werkstoffbezeichnung	Standard	Werkstoffnummer	Streckgrenze $R_{p0.2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung $A_5/A_{80}$ [%]
HCT600XD	DIN EN 10346 [DIN 09a]	1.0941	340-420	600-700	$\geq 20$
HCT780XD	DIN EN 10346 [DIN 09a]	1.0943	450-560	780-900	$\geq 14$
SZBS600	SZFG* Datenblatt SZBS600 7/2010 [N.N.10a]		480-580	590-720	$A_5$ (2,0 mm < t ≤ 3,0 mm) $\geq 16$ $A_{80}$ (3,0 mm < t ≤ 6,0 mm) $\geq 23$
SZBS800	SZFG* Datenblatt SZBS800 11/2014 [N.N.14a]		$\geq 680$	800-980	$A_5$ (1,8 mm < t ≤ 3,0 mm) $\geq 10$ $A_{80}$ (3,0 mm < t ≤ 8,0 mm) $\geq 12$

\* Salzgitter Flachstahl GmbH (SZFG)