

Berücksichtigung von schergeschnittenen Blechkanten zur Auslegung von Formgebungsprozessen höherfester Stahlwerkstoffe in der FEM-Umformsimulation

T. Beier, S. Woestmann

thyssenkrupp Steel Europe AG, Eberhardstraße 12, 44145 Dortmund

1 Einleitung

Hochfeste, kaltumformbare Werkstoffe bieten ein großes Potenzial zur Erfüllung der gestellten wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Anforderungen für den Bereich der Kraftfahrzeuge. In Folge der inzwischen erzielbaren hohen Festigkeiten von bis zu 1200 MPa sollten bei der Planung mit diesen Werkstoffen einige Aspekte im Vorfeld analysiert und bewertet werden. Dabei ist neben einer frühzeitigen Bewertung des Crashvermögens auch die werkstoffgerechte Gestaltung des Umformprozesses von hoher Relevanz. Werkstoffe jenseits der Zugfestigkeit von 800 MPa zeigen mitunter ein deutlich erhöhtes Risiko im Hinblick auf das Kantenversagen bei der Umformung.

Bauteile aus höherfesten Stahlgüten weisen heutzutage anspruchsvolle Geometrien auf, um den hohen Anforderungen des Leichtbaus gerecht zu werden. Umformtechnisch hoch beanspruchte Bereiche bzw. Formelemente sind unter anderem kleine Radien und Bauteilkanten, Durchstellungen, Innen- und Außenecken, sowie Kanten an Entlastungslöchern und Flanschen. Gerade an Bauteilrändern hat der Werkstoff durch den vorrangegangenen Stanzprozess einen Teil seines Umformpotenzials eingebüßt.

2 Eingesetzte Werkstoffe

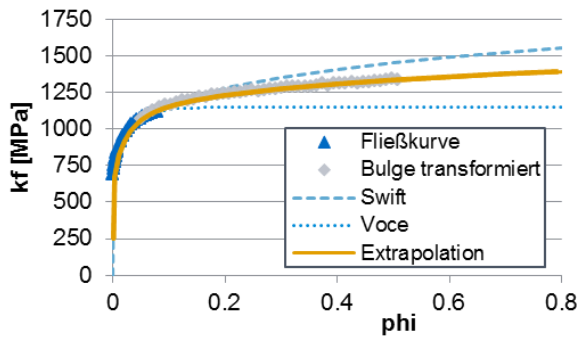
Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Dual- und Complexphasenstählen im Festigkeitsbereich 800 – 1000 MPa. Dualphasenstähle (DP-Stähle) bieten aufgrund ihrer aufeinander abgestimmten Gefügeanteile von Ferrit und Martensit eine besondere Eigenschaftskombination von hoher Festigkeit, niedrigem Streckgrenzenverhältnis, guter Kaltumformbarkeit und Schweißbeignung. Aufgrund des guten Verfestigungsverhalten, ausgedrückt durch einen relativ hohen n-Wert, besitzen die DP-Stähle einen hohen Widerstand gegen lokales Einschnüren, da aufgrund der höheren Verfestigung das Material großflächiger an der Umformung beteiligt wird. Complexphasenstähle (CP-Stähle) weisen eine extrem feine Mikrostruktur auf, die in der Wirkung mit den aufeinander abgestimmten Gefügeanteilen und Ausscheidungshärtung eine besonders attraktive Eigenschaftskombination von hoher Festigkeit mit guter Kaltumform- und Schweißbeignung ergibt. CP-Stähle besitzen im Vergleich zu DP-Stählen mit identischer Zugfestigkeit eine erhöhte Mindeststreckgrenze. Aufgrund ihres sehr feinen Gefüges weisen sie ein gutes Lochaufweitungsvermögen auf.

Die mechanischen Eigenschaften der untersuchten kaltgewalzten Materialien sind in Tab. 1 wiedergegeben. Es ist anzumerken das es sich bei der Werkstoffauswahl um Versuchsmaterialien handelt, welche in etwa den klassischen Varianten der 1. Generation entsprechen. Im Folgenden werden sie nicht nach Norm benannt, sondern mit CP bzw. DP betitelt.

	Beschichtung	R _{p0.2}	R _m	n	A _G	A ₈₀	Dicke	r-Wert		
		[MPa]	[MPa]		[%]	[%]		0°	45°	90°
DP800	Z	486	784	0.15	10.8	17.5	1.5	0.75	0.84	0.84
CP800	ZE	557	823	0.17	11.5	18.8	1.4	0.55	1.23	0.71
DP1000	Z	670	1034	0.12	8.6	13.6	1.5	0.65	0.96	0.76

Tab. 1: Mechanische Eigenschaften Versuchswerkstoffe (Kaltband)

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten FEM Simulationen ist es notwendig die Fließkurven für hohe Dehnungen zu extrapolieren. Die Extrapolation wird durch den hydraulischen Tiefungsversuch abgesichert. Die schematische Vorgehensweise, welche sich in letzten Jahren vielfach bewährt hat [21, 22], ist beispielhaft für den DP1000 in Fig. 1 abgebildet.



Swift

$$\sigma = a \cdot (\epsilon_0 + \epsilon_{eq})^n \quad (1)$$

Voce

$$\sigma = a \cdot (1 - b \cdot e^{-c\epsilon_{eq}}) \quad (2)$$

Kombination Swift & Voce

$$\sigma = a \cdot \text{Swift} + (1 - \alpha) \cdot \text{Voce} \quad (3)$$

Fig.1: Extrapolation Fließkurve auf Basis Bulgetest DP1000 1.5mm

Der Mischungsfaktor α zur Kombination der Extrapolation nach Swift und Voce (3) wird so abgeglichen, dass er die experimentellen Ergebnisse aus Zugversuch und Bulgetest bestmöglich abbildet. Die Messwerte aus dem Bulgetest werden gemäß der ISO16808 [17] über das Äquivalent der plastischen Arbeit auf den einachsigen Spannungszustand umgerechnet. In Fig. 2 (links) sind die extrapolierten Fließkurven der Versuchswerkstoffe dargestellt.

$$Y = \frac{\sigma_{biax}}{\sigma_0} \quad (4)$$

Das Verhältnis Y (4) von equibiaxialem und uniaxialem Zug wird auch für den Fließortabgleich genutzt. Neben den Kennwerten aus dem Zugversuch, kann ein zusätzlicher Stützpunkt für die Fließortkurve aus dem Bulgetest gewonnen werden (Fig. 2 rechts). Es zeigt sich, dass die Anisotropie der untersuchten Güten durch den Hill'48 [18], insbesondere für den equibiaxialen Zug, nur unzureichend genau beschrieben wird. Für die im weiteren Verlauf mit LS-Dyna durchgeführten FEM-Simulationen wird der Fließort Barlat 2000 [19] verwendet, welcher die höhere Fließspannung der Werkstoffe im Bereich der zweiachsigen Spannung, gemäß dem Bulgetest, korrekt wiedergibt. Hierbei ist anzumerken, dass sich der in diesem Fall verwendete Parameter $a=5$ für Stahlwerkstoffe der thyssenkrupp Steel Europe AG, entgegen der Literatur ($a=6$), als zutreffender gezeigt hat [20, 21, 22].

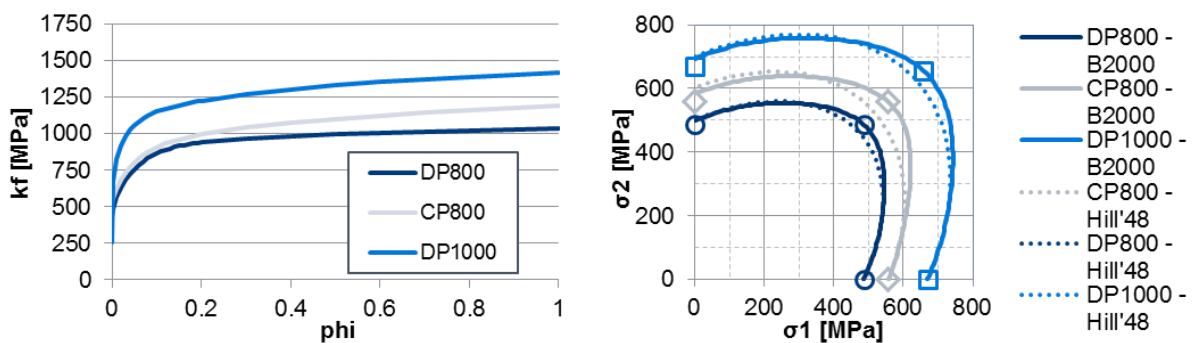


Fig.2: Extrapolierte Fließkurven (links) und Fließort (rechts) der Versuchswerkstoffe

3 Umformpotentials schergeschnittener Blechkanten

Es existiert inzwischen eine umfangreiche Anzahl an Versuchen zur Bestimmung der Kantenrissempfindlichkeit von Stahlwerkstoffen [2, 13, 14]. Lochaufweitungsversuche (HET) sind z.B. ein probates Hilfsmittel zur Abschätzung des Umformpotenzials eines Werkstoffes zur Herstellung von Durchstellungen [3]. Sie können aber auch als Bewertungshilfe zur Auslegung von Umformprozessen mit Kantenrissgefährdeten Flanschbereichen herangezogen werden [4]. Das maximale Lochaufweitungsverhältnis (HER) ist allerdings von mehreren Faktoren abhängig. Neben dem Werkstoffkonzept selbst und der natürlichen Streuung des Werkstoffes [5, 8, 10], spielt unter anderem das Schneidverfahren [12,13], als auch die Belastungssituation während der Umformung eine wesentliche Rolle [1, 4]. Die Belastungssituation wird z.B. beeinflusst durch Stempeltyp/ -geometrie, Ausgangslochung, Ziehring oder das Dehnungsniveau. Zur näheren Analyse der Zusammenhänge von HER, Werkstoff und der Belastungssituation während der Umformung, wurde das in Tab. 2 aufgeführte Versuchsprogramm für die drei in Kapitel 2 beschriebenen Werkstoffe durchgeführt. Die Varianten HET_A und HET_B wer-

den bei tkSE im Rahmen der Werkstoffentwicklung für Kaltgewalzte Feinblechgüten standardmäßig durchgeführt.

Variante	Stempeltyp	Stempel	Ziehring	Loch d_0	Schnittspalt
HET_A (ISO16630)	Konisch 60°	Ø 40 mm	Ø 55 mm	Ø 10 mm	10% bezogen auf Blechdicke
HET_B	Konisch 50°	Ø 100 mm	Ø 110 mm	Ø 20 mm & Ø 40 mm	
HET_C	Flachboden (Marciniak)	Ø 100 mm	Ø 140 mm		
HET_D	Halbrund (Nakajima)	Ø 100 mm	Ø 110 mm		

Tab. 2: Übersicht Versuchsprogramm Lochaufweitung

Bei der Probenpräparation wurden die Ausgangslochungen durch Stanzen hergestellt. Der Schnittspalt betrug dabei 10%, bezogen auf die Blechdicke. Die Versuche wurden auf einer Universalblechprüfmaschine durchgeführt. Der Umformprozess wird von einer Kamera mit telezentrischem Objektiv aufgezeichnet, so dass das maximale Lochaufweitungsverhältnis (5) genau zum Versagenszeitpunkt bestimmt werden kann. Daraus kann eine globale maximale Kantendehnung bestimmt werden. Lokal können zum Versagenszeitpunkt höhere Dehnungen vorliegen [5]. Der Lochdurchmesser d_i wird stempelseitig gemessen. Auf der Blechoberseite liegen z.B. bei den Versuchen mit Kegelstempel höhere HER vor. Je Variante wurden mindestens 5 Wiederholungen durchgeführt.

$$HER = \frac{d_i - d_0}{d_0} \times 100 \quad (5)$$

Die Ergebnisse der Versuche sind in Fig. 3 dargestellt. Es zeigt sich einerseits der Einfluss des Grundwerkstoffes, andererseits der Einfluss der Umformrandbedingungen. Der CP800 zeigt in allen Versuchen die höchste HER, weist aber auch deutliche Streuungen in den Ergebnissen auf. Die hier untersuchte Charge des DP800 zeigt insbesondere für die Lochaufweitung mit Nakajima- und Marciniakstempel abnehmende HER.

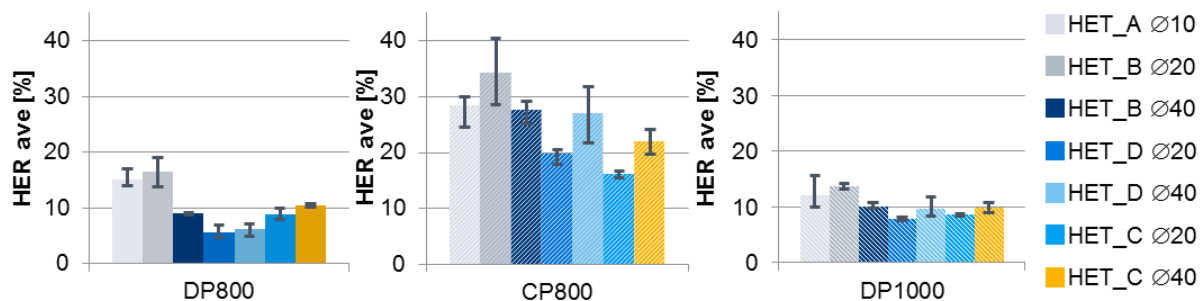


Fig.3: Mittelwerte HER der unterschiedlichen Versuche und der drei Werkstoffe

Die Einflussgrößen und Herausforderungen bei der Lochaufweitung hinsichtlich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit wurden in der Vergangenheit schon mehrfach herausgearbeitet und diskutiert [8, 10, 14]. Durch Variation der Schneidparameter kann noch zusätzlich auf die Kantenrissempfindlichkeit Einfluss genommen werden [1, 12].

4 Bewertung Lochaufweitung mithilfe des orthogonalen Dehnungsgradienten

Zur Untersuchung der Belastung durch die Umformung an der Kante und im kantennahen Bereich wurden mit LS-Dyna die einzelnen Versuche nachgerechnet. Zum Einsatz kommt ein 3D Schalenmodell. Die Anisotropie der Werkstoffe wird wie in Kapitel 2 beschrieben, durch den Fließort Barlat 2000 dargestellt. Für das Fließverhalten bei hohen Dehnungen wird die Fließkurvenextrapolation durch den Bulgetest abgesichert. Vergleicht man z.B. die Lochaufweitung mit einem Flachbodenstempel mit der Lochaufweitung mit einem Kegelstempel, nimmt der Anteil des beteiligten Materials ab und der Biegeanteil an der Umformung nimmt zu. Dies kann unter anderem durch den orthogonalen Dehnungsgradienten beschrieben werden, siehe Fig. 4 rechts. Hierzu wurde die Zunahme der Dehnung zur Kante hin, bezogen auf 5 mm Kantenabstand, in der Simulation ermittelt. Die in den Experimenten

ermittelten HER werden in eine auf die Blechmittelebene transformierte, logarithmische Grenzdehnung umgerechnet. Fig. 4 links zeigt die gefundenen Zusammenhänge für den DP1000. Es liegt in diesem Fall ein annähernd linearer Zusammenhang vor.

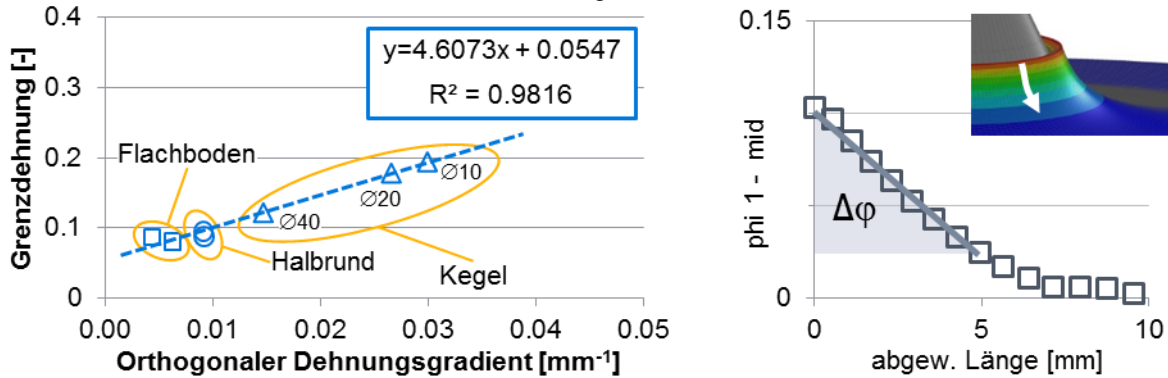


Fig.4: Orthogonaler Dehnungsgradient DP1000 für unterschiedliche HET

Die Auswertung der HET für DP800 und CP800 sind in Fig. 5 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass mit abnehmenden Dehnungsgradienten eine niedrige Grenzdehnung vorliegt. Auch das generell geringe Lochaufweitungsvermögen des DP800 im Vergleich zum CP800 ist ersichtlich. Legt man den Ergebnissen einen linearen Zusammenhang zugrunde, ist das Bestimmtheitsmaß nicht so hoch wie beim DP1000.

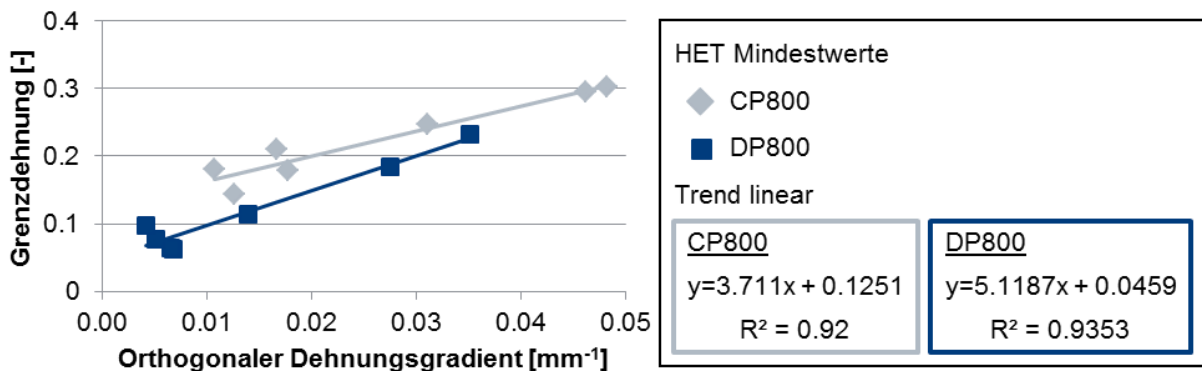


Fig.5: Fig.4:Orthogonaler Dehnungsgradient CP800 & DP800 für unterschiedliche HET

5 Bewertung gerader Stanzkanten mithilfe des orthogonalen Dehnungsgradienten

Im Folgenden soll gezeigt werden, inwiefern die dargestellten Zusammenhänge aus dem vorangehenden Kapitel, welche für Lochaufweitungsversuche ermittelt wurden, auf gerade Stanzkanten (offene Schnitte) übertragbar sind. Dazu wurde für den CP800 der Diaboloversuch durchgeführt. Bei diesem Versuch wird ein 40mm breiter, fest eingespannter Blechstreifen mit einem konkav gewölbten Stempel [1, 13] bis zum Versagen umgeformt. Die Proben wurden ebenfalls mit 10% Schnittspalt durch Stanzen hergestellt, so dass ein vergleichbarer Kantenzustand vor dem Umformen vorliegt. Im Mittel versagten die Proben bei einem Stempelweg von 36 mm.

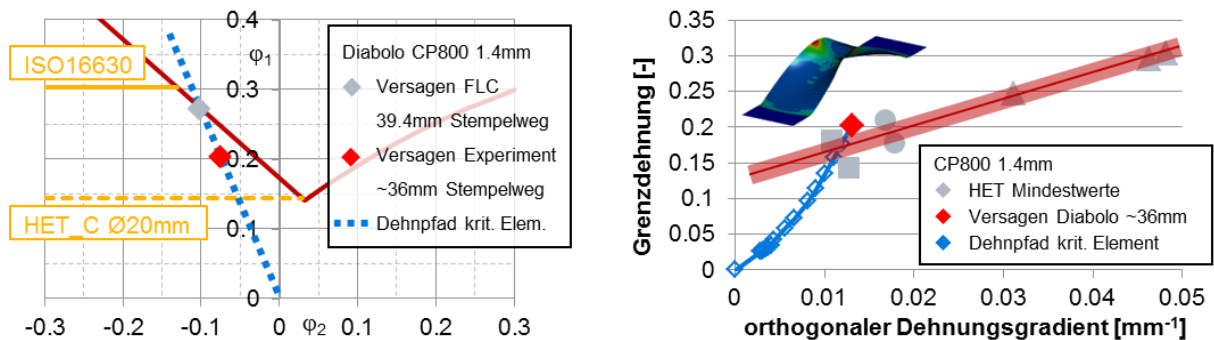


Fig.6: Kantenrissprognose am Beispiel Diabolo-Test CP800

Zur detaillierten Auswertung des Versagens wird der Diaboloversuch ebenfalls mit LS-Dyna nachgerechnet und analysiert. Die Grenzformänderungskurve (FLC) prognostiziert für diesen Fall für den CP800 ein späteres Versagen. In Fig. 6 links ist der Dehnpfad des kritischen Elements aus der Simulation des Diaboloversuchs der FLC gegenübergestellt. Die globalen maximalen Kantendehnungen aus den Lochaufweitungsversuchen lassen sich ergänzend dazu als Versagensgrenze auftragen [16]. Zieht man diese als Bewertungskriterium heran, würde mithilfe des HET nach ISO16630 oder mit HET_C ebenfalls das Versagen nicht zutreffend prognostiziert. Trägt man für den kritischen Kantenbereich die Hauptformänderung in der Membranebene über den orthogonalen Dehnungsgradienten auf, lässt sich der Versagenszeitpunkt den HET aus Kapitel 3 entsprechend zuordnen, Fig. 6 rechts. Es besteht so die Möglichkeit die Belastungssituation an der Kante durch die Umformung mit zu berücksichtigen.

Ähnliche Belastungen lassen sich auch an Tiefziehteilen z.B. aus dem automobilen Karosseriebau ermitteln. Niedrige Dehnungsgradienten findet man in Umformprozessen an tiefziehbeanspruchten Platinenrändern unter dem Niederhalter wieder. Höhere Gradienten liegen bei Durchzügen vor. Fig. 7 zeigt beispielhaft den Dehnpfad kritischer Bereiche an Platinenrändern. Dargestellt wird dieser ebenfalls durch die Entwicklung des orthogonalen Dehnungsgradienten und der Hauptformänderung. Fig. 7 zeigt den Dehnpfad für eine Durchstellung und einen Platinenrand unter dem Niederhalter im Einflussbereich einer Kofferecke.

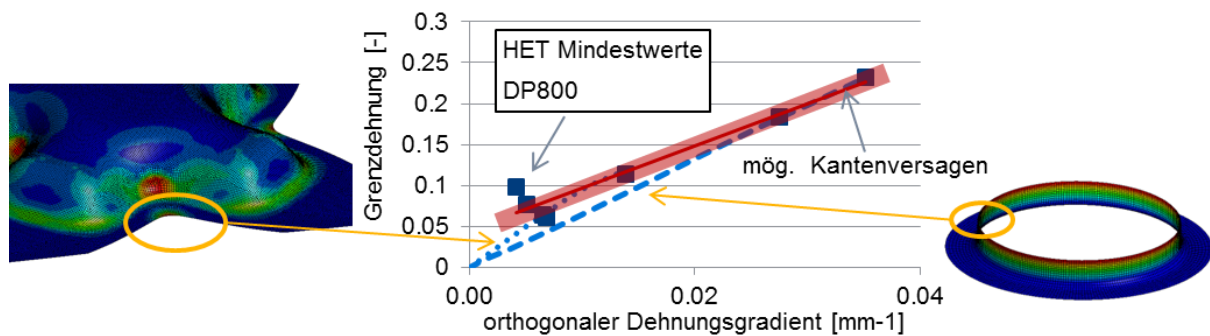


Fig.7: Charakteristische Dehnpfade an Realgeometrieelementen

6 Zusammenfassung & Fazit

Es lässt sich zusammenfassen, dass das Umformpotential von höherfesten Stahlwerkstoffen neben dem Beschnittverfahren, insbesondere vom Werkstoffkonzept und von der Belastungssituation an der Kante und im kantennahen Bereich abhängt. Der orthogonale Dehnungsgradient bietet die Möglichkeit die unterschiedlichen Lochaufweitungsversuche zu differenzieren. Zur Bewertung der Machbarkeit von Realbauteilen ist für kritische Bereiche ein Ersatzversuch mit vergleichbaren Gradienten heran zu ziehen. Eine Dehnungskenngröße, die sämtliche Belastungen beschreibt konnte nicht ermittelt werden. thyssenkrupp Steel Europe kann für Machbarkeitsuntersuchen charakteristische Kennwerte niedriger und hoher Dehnungsgradienten für eine Vielzahl der Serienwerkstoff höherer Festigkeiten zur Verfügung stellen.

7 Literatur

- [1] Beier, T.; Gula, G.; Woestmann, S.; Kessler, L.: „Eine Bewertung des Umformpotenzials von Schnittkanten zur Auslegung von Formgebungsprozessen mit höherfesten Stahlwerkstoffen.“ EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, Bad Boll, Deutschland, 2015
- [2] Schneider, M.; Geffert, A.; Peshekhodov, I.; Vucetic, M.; Behrens, B.-A.: „Overview and comparison of various test methods to determine formability of a sheet metal cut-edge and approaches to the test results application in forming analysis.“ Material Science and Engineering Technology, 46, p. 1196-1217. 2015
- [3] Goncalves, J.; Fouques, D.; Bellut, X.; Zhang, L.; Huang, M.; Van Deventer, J.; Far-rand, B.: „More fruitful and robust hole expansion testing conditions“, IDDRG 2014, Paris, France, 2014
- [4] Iizuka, E.; Urabe, M.; Yamasaki, Y.: „Effect of strain gradient on stretch flange deformation limit of steel sheets – Prediction method of cut edge failure“ Umformen im Karosseriebau, Bad Nauheim, Deutschland 2015
- [5] Braun, M. et al.: „Umformsimulation unter Einbeziehung einer verminderten Umformbarkeit schergeschnittener Stahlblechkanten – Wirksamkeit von 3 verschiedenen Kantenriss-Kennwerten und 3 Software-Systemen im Realversuch.“, Umformen im Karosseriebau, Bad Nauheim, Deutschland 2016
- [6] ISO 16630:2009: Metallic materials – Sheet and strip-hole expanding test
- [7] Keßler, L.; Richter, H.; Rösen, H.; Wöstmann, S.: „Aspects in the design of high-strength steel parts using virtual methods“, Steels in Cars and Trucks, Braunschweig, Germany, 2014
- [8] Braun, M. et al.: „Ergebnisse eines europäischen Ringversuchs zum Lochaufweitungsversuch nach ISO 16630“, DVM Tagung Werkstoffprüfung, Berlin, Deutschland, 2011
- [9] Gula, G.; Beier, T.: „Charakterisierung des Umformverhaltens von beschnittenen Kanten bei mehrphasigen Blechwerkstoffen für die Berücksichtigung in der Methodenplanung.“, EFB-Kolloquium, Felbach, Deutschland, 2013
- [10] Kremaszky, C.; Larour, P.; Freudenthaler, J.; Werner, E.: „Towards more efficient hole expansion testing“, IDDRG 2014, Paris, France, 2014
- [11] Iizuka, E.; Hashimoto, K.; Kuwabara, T.; Ishiwatari, A.; Inazumi, T.: „Effects of anisotropic yield functions on the accuracy of forming simulations of hole expansion“, IDDRG 2009, Golden, CO, USA, 2009
- [12] Gläsner, T.; Sunderkötter, C.; Hoffmann, M.; Volk, W.; Golle, R.: „Zweistufiges Scherschneiden reduziert die Kantenrissempfindlichkeit“, UTF Science I/2013; Meisenbach Verlag
- [13] Gall, M.; Liewald, M.: „Experimental investigation of the influence of shear cutting parameters on edge crack sensitivity of dual phase steels“, IDDRG 2013, Zürich; Schweiz, 2013
- [14] Braun, M.; Richter, A.; Larour, P.; Atzema, C.; Neuhaus, R.; Bültner, M.; Carlsson, B.; Brockmann, S.: „Determination of edge cracking sensitivity – evaluation of the reduced formability of shear-cut steel panel edges with different test methods.“, Forming in Car Body Engineering, Bad Nauheim, Germany, 2013
- [15] Larour, P.; Schauer, H.; Lackner, J.; Till, E.: „Edge crack Simulation with the modular “smiley” forming tool“, International Deep Drawing Research Group Conference, Linz, Austria, 2016
- [16] McEwan, C.; Underhill, R.; Langerak, N.; Botman, G.; de Bruine, M.: „A New approach to predicting edge splits – the combined FLC/HEC-Diagram“, IDDRG 2009, Holden, USA, 2009
- [17] ISO/FDIS 16808: Metallic materials - Sheet and strip - Determination of biaxial stress-strain curve by means of bulge test with optical measuring systems
- [18] Hill, R.: „A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals.“, Proc. Roy. Soc. London Vol.193, 281-297, 1948
- [19] Barlat, F.; Brem, J.C.; Yoon, J.W.; Chung, K.; Dick, R.E.; Lege, D.J.; Pourboghrat, F.; Choi, S.-H.; Chu, E.: „Plane stress yield function for aluminium alloy sheets – part 1: theory.“, International Journal of Plasticity, 1297-1319, 2003
- [20] Heinle, I., Keßler, L., Beier, T., Grass, H., Meinhardt, J., Lipp, A., Bäck, T.: „Challenges in validation of material modelling for forming simulations.“, AutoMetForm, November 24-26, Freiberg, Germany 2010
- [21] Keßler, L., Beier, T., Gerlach, J., Linnepe, M.: „The Impact of Advanced Material Simulation Parameters in Press Shop Operations Using Mild Steel Grades“, SAE World Congress, Detroit, 2010
- [22] Keßler, L., Beier, T., Gerlach, J.: „Erfahrungen beim Abgleich von Werkstoffmodellen für die Umformsimulation mit Stahlwerkstoffen“, 10th LS-DYNA Forum, Filderstadt, 2011
- [23] LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOL. 1, LS-DYNA R7.1 May 26, 2014 rev. 5471, LSTC

Schergeschnittene Blechkanten

in der FEM-Umformsimulation mit LS-Dyna

10.10.2016 | T. Beier¹, S. Woestmann¹, M. Reissner², Dr. H. Gese²

¹ thyssenkrupp Steel Europe AG

² MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer



engineering.tomorrow.together.

thyssenkrupp

Agenda

Charakterisierung der Kantenumformbarkeit

Bewertung der Kantenumformbarkeit in der FEM

Restumformpotential nach dem Beschnitt - Simulation mit MF GenYld+CrachFEM

Zusammenfassung & Fazit



Agenda

Charakterisierung der Kantenumformbarkeit

Bewertung der Kantenumformbarkeit in der FEM

Restumformpotential nach dem Beschnitt - Simulation mit MF GenYld+CrachFEM

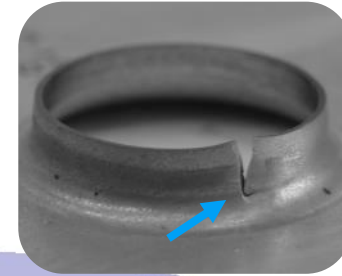
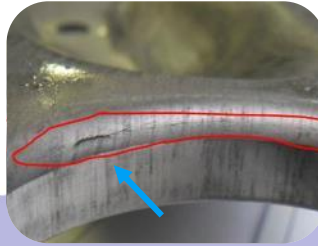
Zusammenfassung & Fazit



Kritische Bereiche an Bauteilen aus höherfesten Stahlwerkstoffen

Bewertungs-/ Prognosemöglichkeiten

Oberflächenriss
an Biegeradien &
Durchstellungen



Kantenriss an
Durchstellungen



Kantenrisse an
offenen Köpfen



Kantenrisse im
Flanschbereich

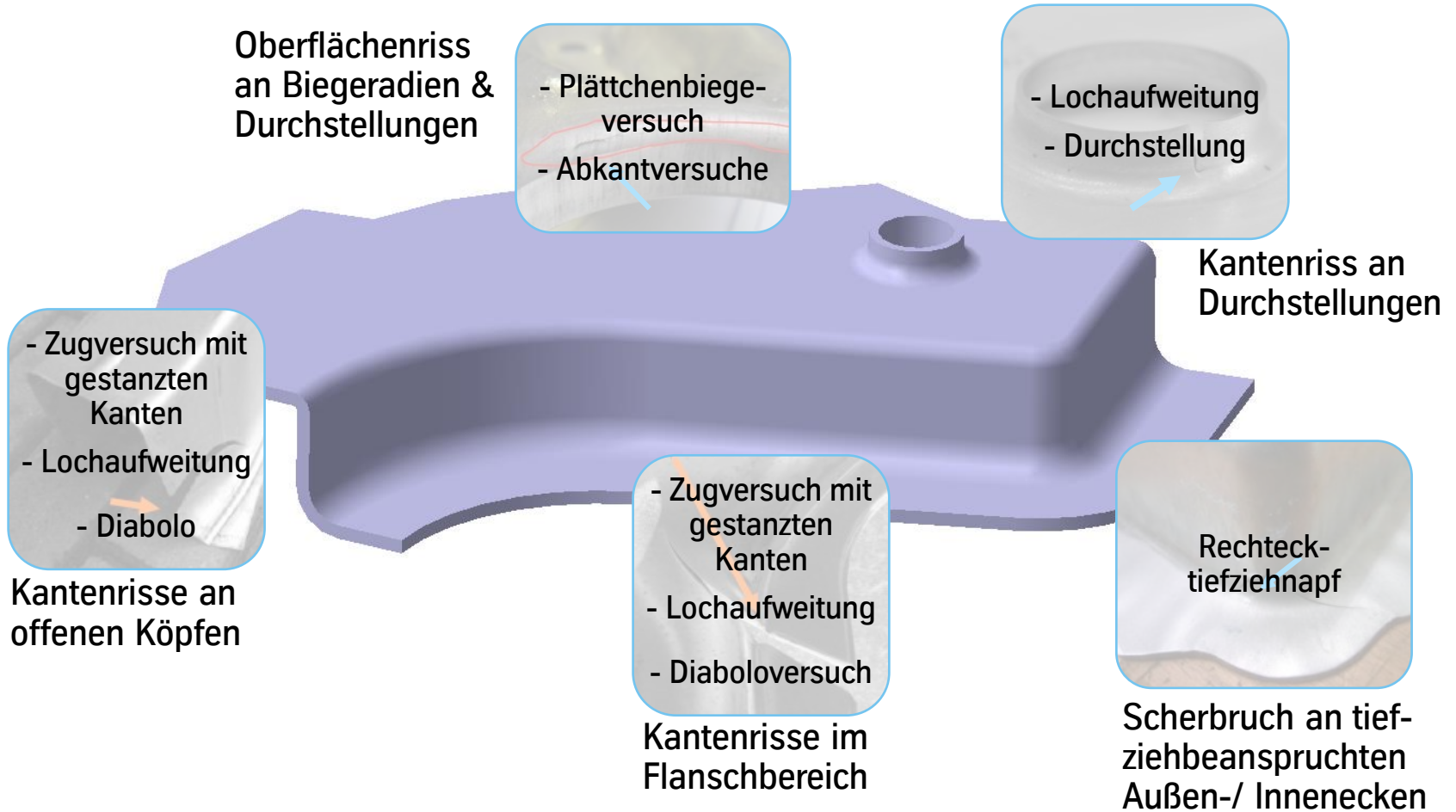


Scherbruch an tief-
ziehbeanspruchten
Außen-/ Innenecken



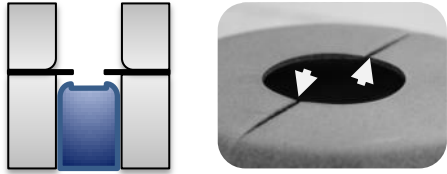
Kritische Bereiche an Bauteilen aus höherfesten Stahlwerkstoffen

Bewertungs-/ Prognosemöglichkeiten

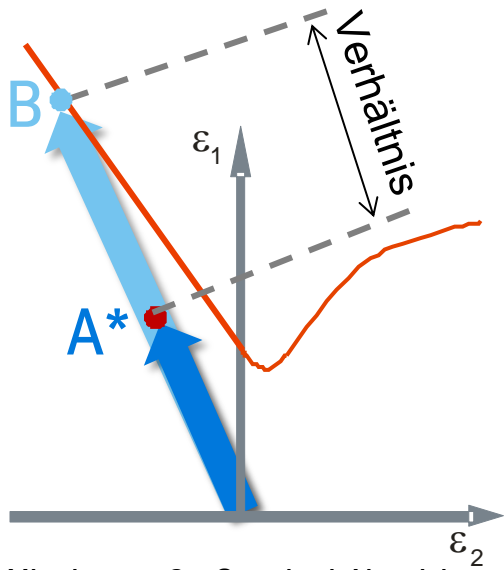


Charakterisierung der Kantenumformbarkeit

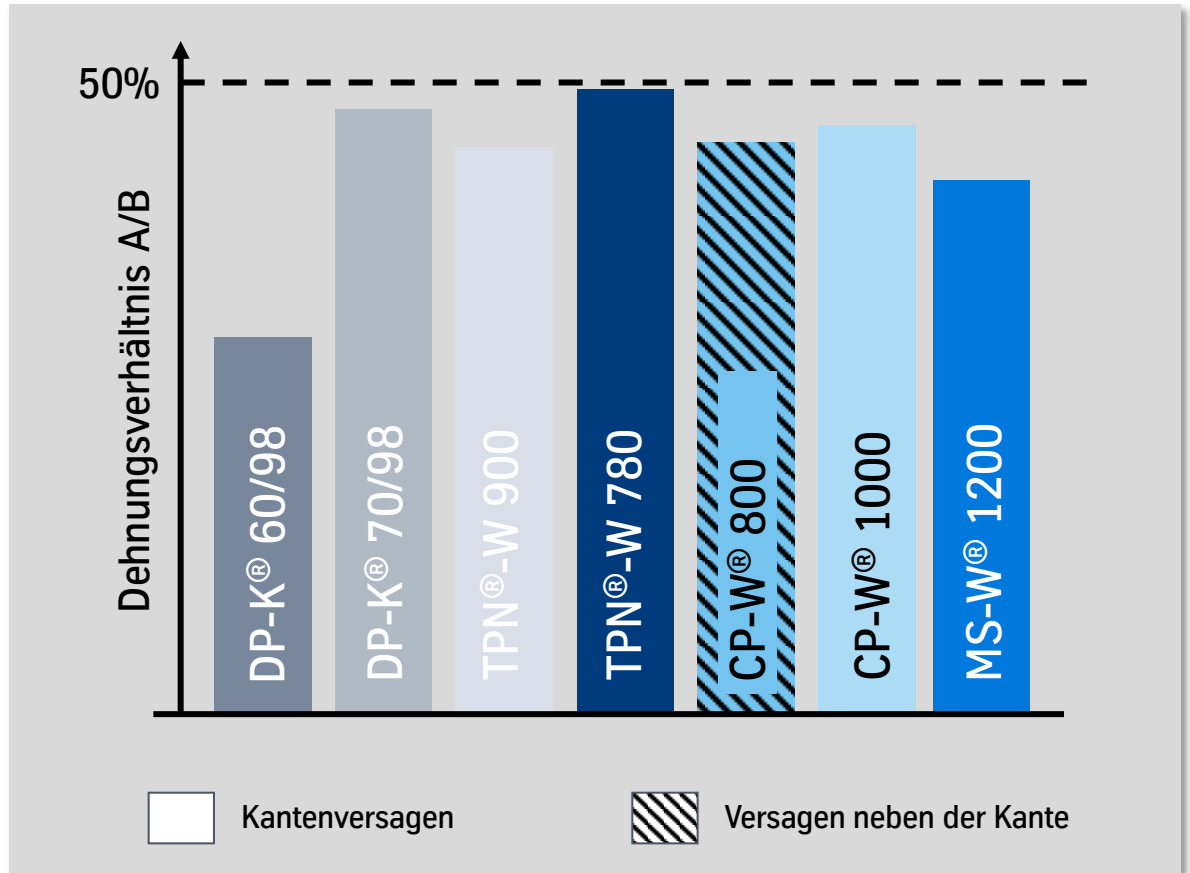
Lochaufweitung beschnittener Kanten im Verhältnis zur FLC



$d_0 = 20\text{mm}$, Schneidspalt 10-12%

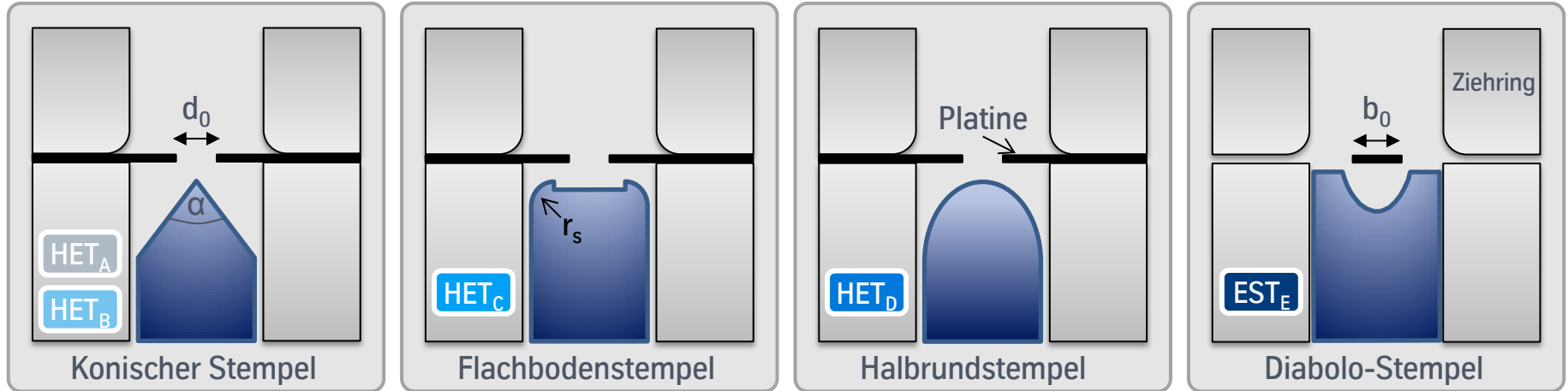


* Mittelwert – 2 x Standard-Abweichung



Charakterisierung der Kantenumformbarkeit

Testvarianten

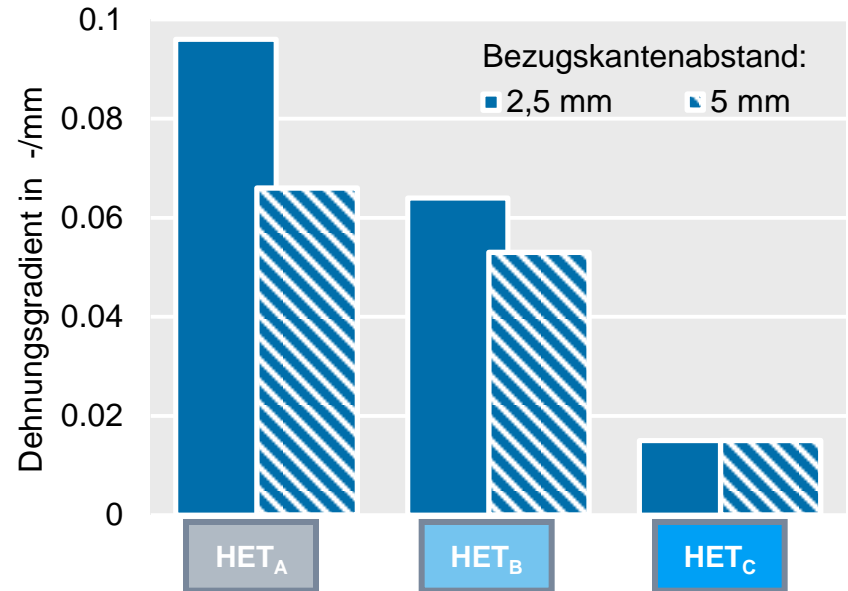
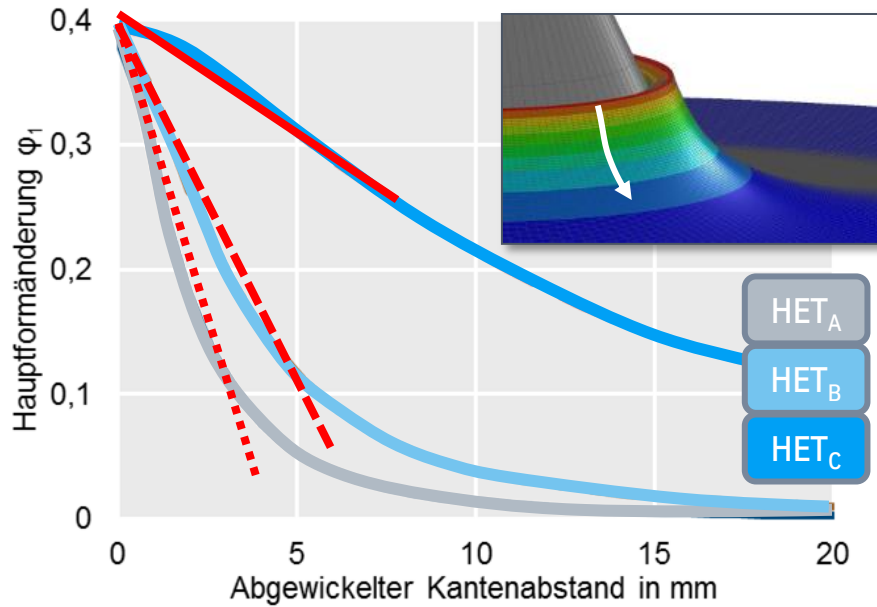


Test	Stempeltyp	Stempel	Std. Lochung	Ziehring	Dehnungs-/ Bewertungskrit.
HET_A (ISO16630)	Konisch 60°	Ø 40 mm	Ø 10 mm	Ø 55 mm	$HER = \frac{d_i - d_0}{d_0} \times 100$
HET_B	Konisch 50°	Ø 100 mm	Ø 20 mm & Ø 40 mm	Ø 110 mm	
HET_C	Flachboden	Ø 100 mm; R15		Ø 140 mm	
HET_D	Halbrund	Ø 100 mm		Ø 110 mm	
	Stempeltyp	Stempelöffnung	Probenbreite	Ziehring	
EST_E	Diabolo	44 mm	40 mm	Ø 110 mm	Lokale Dehnung ϕ_{i_1} / ϕ_{i_v}



Charakterisierung der Kantenumformbarkeit

Differenzierung Testvarianten

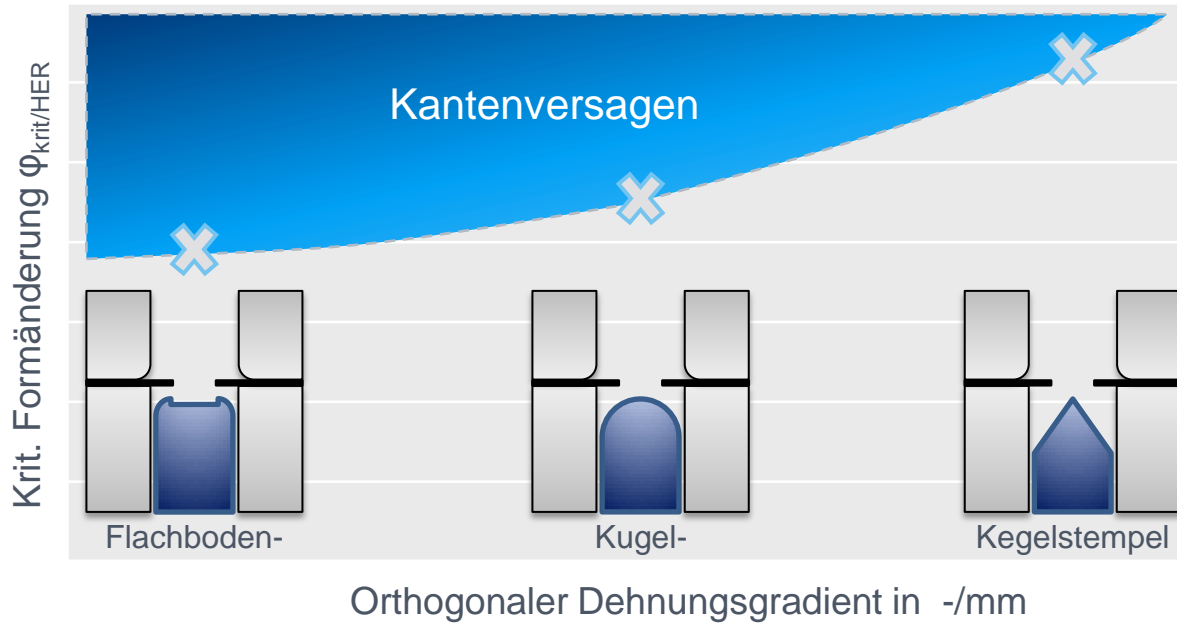


Die Umformungs- und Werkstoffabhängigkeit der Kantenumformbarkeit kann z.B. über Dehnungsgradienten beschrieben werden.



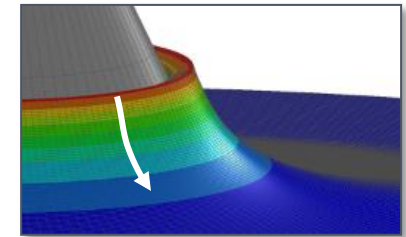
Charakterisierung der Kantenumformbarkeit

Differenzierung Testvarianten



Gradienten variieren mit:

- Stempeltyp,
- Stempelgeometrie,
- \emptyset -Ausgangslochung,
- \emptyset -Ziehring,
- Dehnungsniveau



Anteil des beteiligten Materials nimmt ab / Biegeanteil an der Umformung nimmt zu

Kritische Formänderung an der Bauteilkante abhängig durch Belastungssituation und Zustand der Schnittkante



Agenda

Charakterisierung der Kantenumformbarkeit

Bewertung der Kantenumformbarkeit in der FEM

Restumformpotential nach dem Beschnitt - Simulation mit MF GenYld+CrachFEM

Zusammenfassung & Fazit

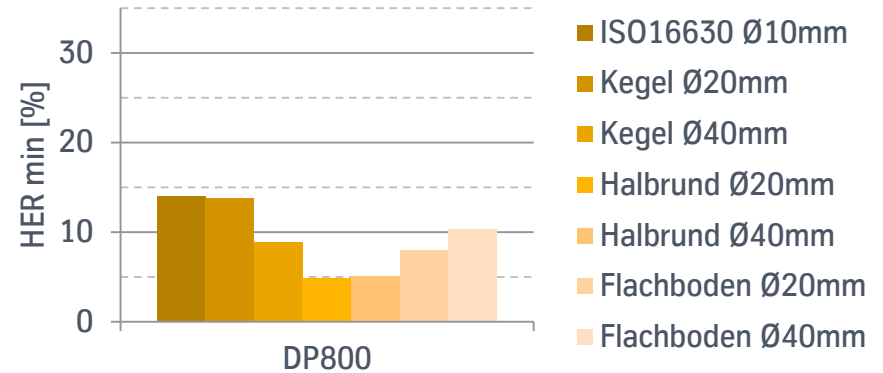
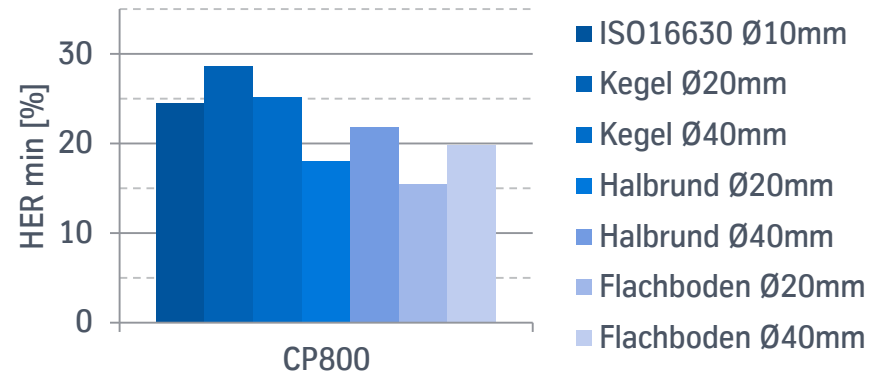
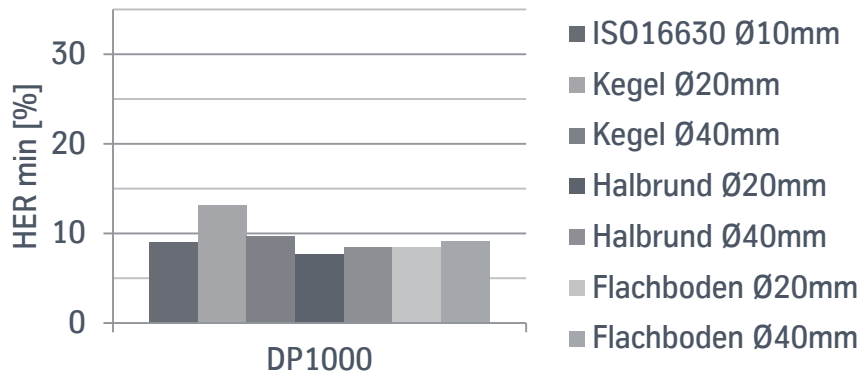


Umformpotential beschnittener Kanten in der Lochaufweitung

Variation Umformbelastung

Versuchsmatrix

- CP800 1.4mm, DP800 1.5mm, DP1000 1.5mm
- Ausgangsloch $\varnothing 10, 20 \text{ \& } 40 \text{ mm}$, gestanzt (Schneidspalt 10%)
- Globale Dehnungsermittlung (HER Kameraunterstützt)
- Variation Werkzeug/ Testverfahren



Deutlicher Einfluss von Festigkeit, Werkstoffkonzept und Umformrandbedingung (Testvariante) auf das Lochaufweitungsvermögen.



Umformpotential beschnittener Kanten in der Lochaufweitung

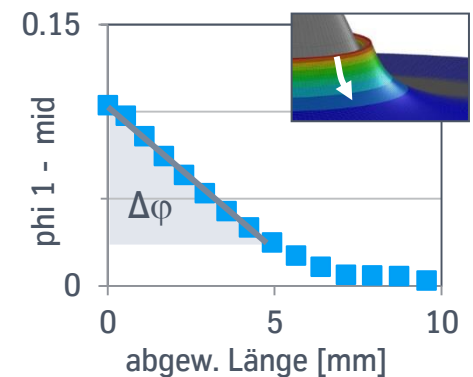
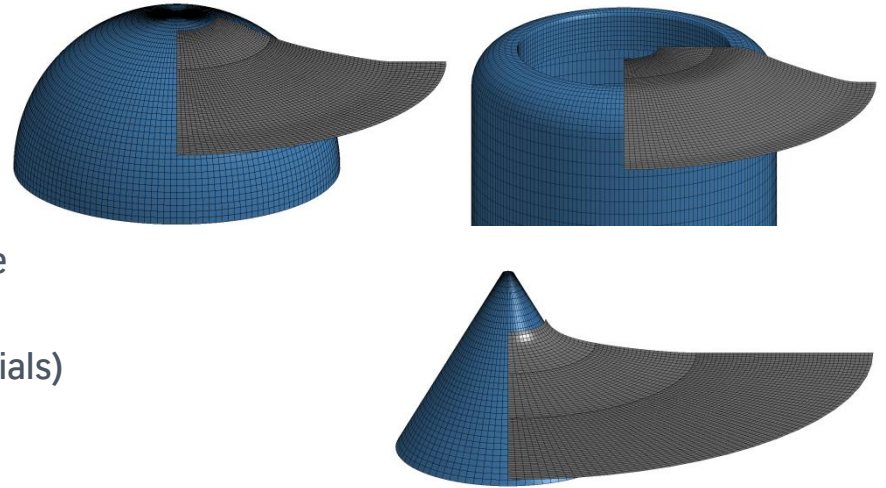
Analyse Umformbelastung mithilfe der FEM

Vorgehensweise

- Abbildung der einzelnen Laborversuche in LS-Dyna
- Auswertung Simulation bei dem im Experiment ermittelten Lochaufweitungsverhältnis (Mindestwerte)
- Ermittlung der Hauptformänderung in der Membranebene durch einen Schnitt orthogonal zur Kante
- Bestimmung des Gradienten (Anteil des beteiligten Materials) linear über einen Bereich von 5mm Kantenabstand

Sim-Details

- Elementkantenlänge Lochrand 0.5 – 1 mm (radial vernetzt)
- Vollintegrierte Schale, 7 Integrationspunkte
- Materialmodellierung mit
 - Fließkurve quasistatisch, Extrapolation für hohe Dehnungen anhand Bulgetest
 - Abbildung Anisotropie der Werkstoffe durch den Fließort Barlat 2000 (*MAT_BARLAT_YLD2000)

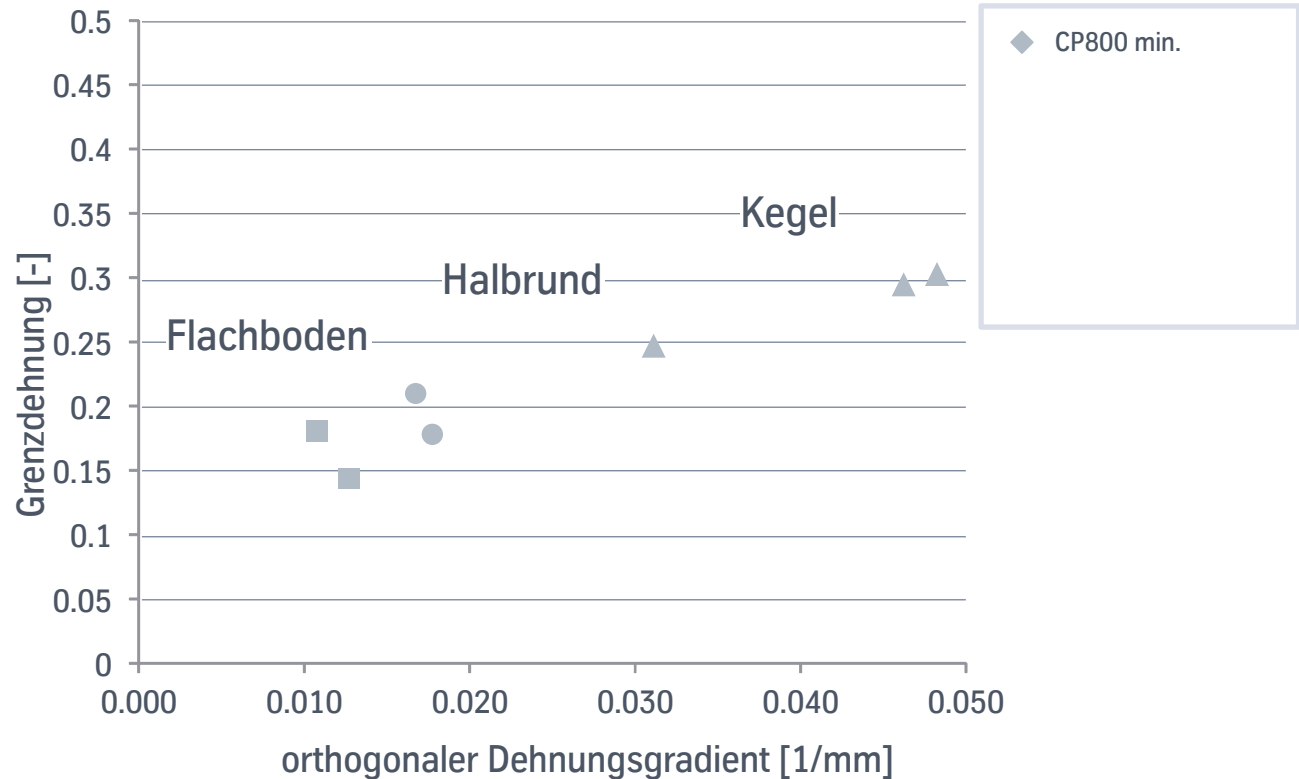
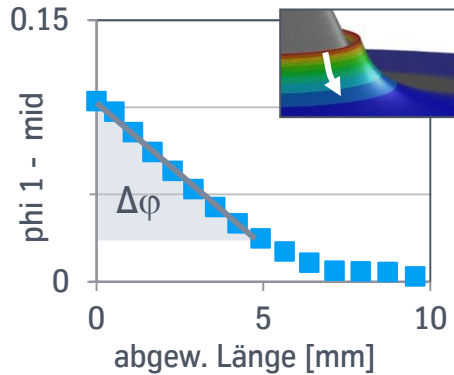


Analyse Lochaufweitungsversuche

Abhängigkeit Lochaufweitung <> Dehnungsgradient

Ansatz zur Auswertung der einzelnen Versuche

- Umrechnung HER (Min-Werte) auf Mittelebene (logarithmisch)
- Ermittlung des orthogonalen Dehnungsgradienten (ϕ_1 Mittelebene)



Die Analyse der Versuche mithilfe der FEM zeigt: mit abnehmendem Anteil des beteiligten Materials (höhere Dehnungsgradienten) steigt das Lochaufweitungsvermögen.

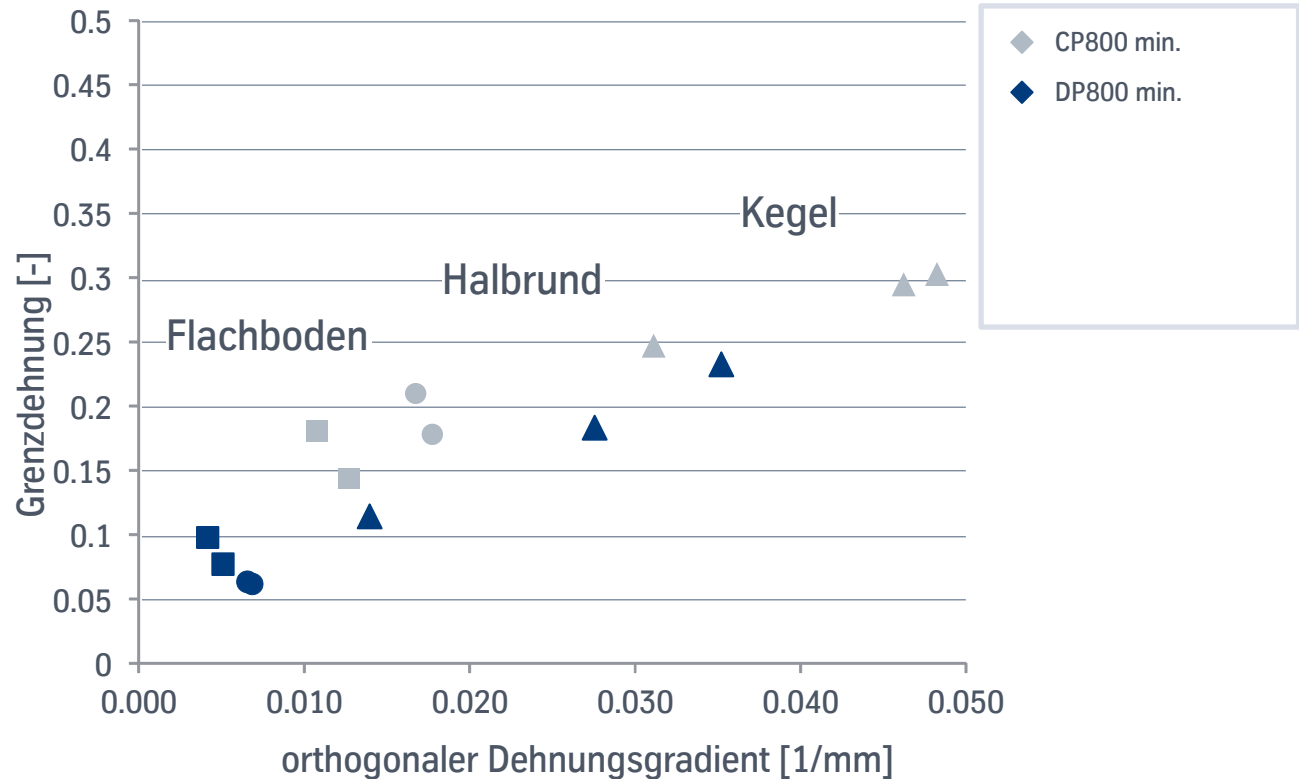
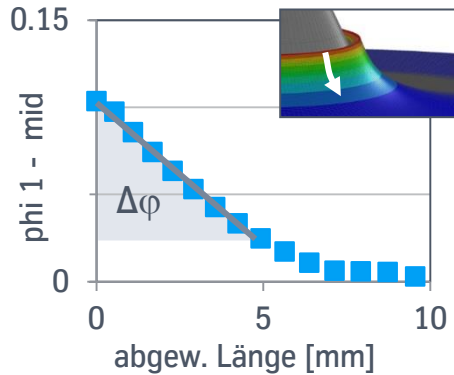


Analyse Lochaufweitungsversuche

Abhängigkeit Lochaufweitung <> Dehnungsgradient

Ansatz zur Auswertung der einzelnen Versuche

- Umrechnung HER (Min-Werte) auf Mittelebene (logarithmisch)
- Ermittlung des orthogonalen Dehnungsgradienten (ϕ_1 Mittelebene)



Die Analyse der Versuche mithilfe der FEM zeigt: mit abnehmendem Anteil des beteiligten Materials (höhere Dehnungsgradienten) steigt das Lochaufweitungsvermögen.

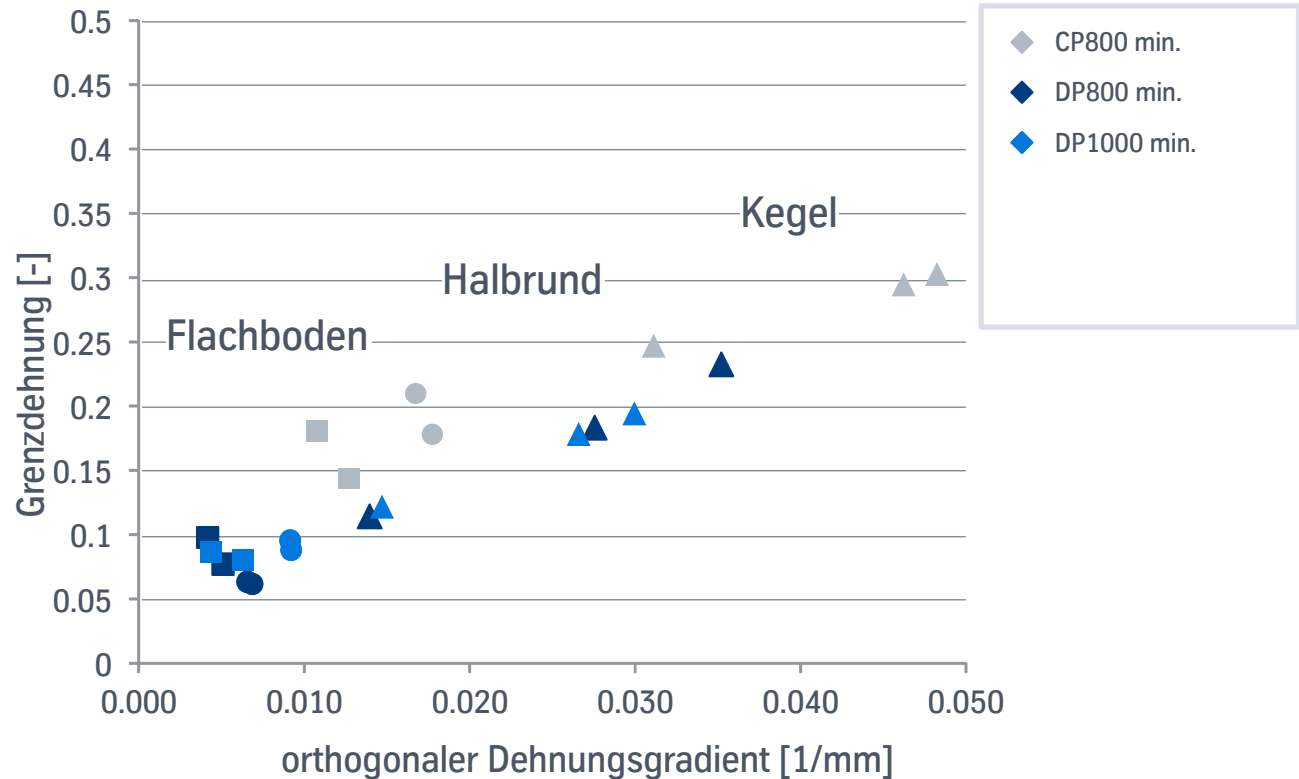
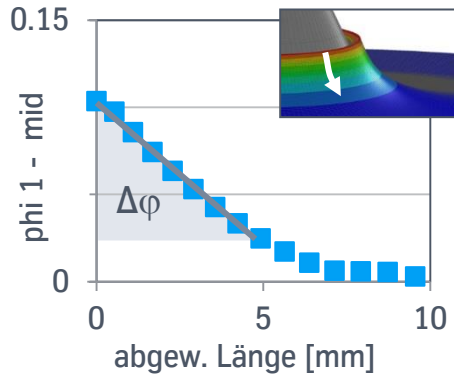


Analyse Lochaufweitungsversuche

Abhängigkeit Lochaufweitung <> Dehnungsgradient

Ansatz zur Auswertung der einzelnen Versuche

- Umrechnung HER (Min-Werte) auf Mittelebene (logarithmisch)
- Ermittlung des orthogonalen Dehnungsgradienten (ϕ_1 Mittelebene)



Die Analyse der Versuche mithilfe der FEM zeigt: mit abnehmendem Anteil des beteiligten Materials (höhere Dehnungsgradienten) steigt das Lochaufweitungsvermögen.

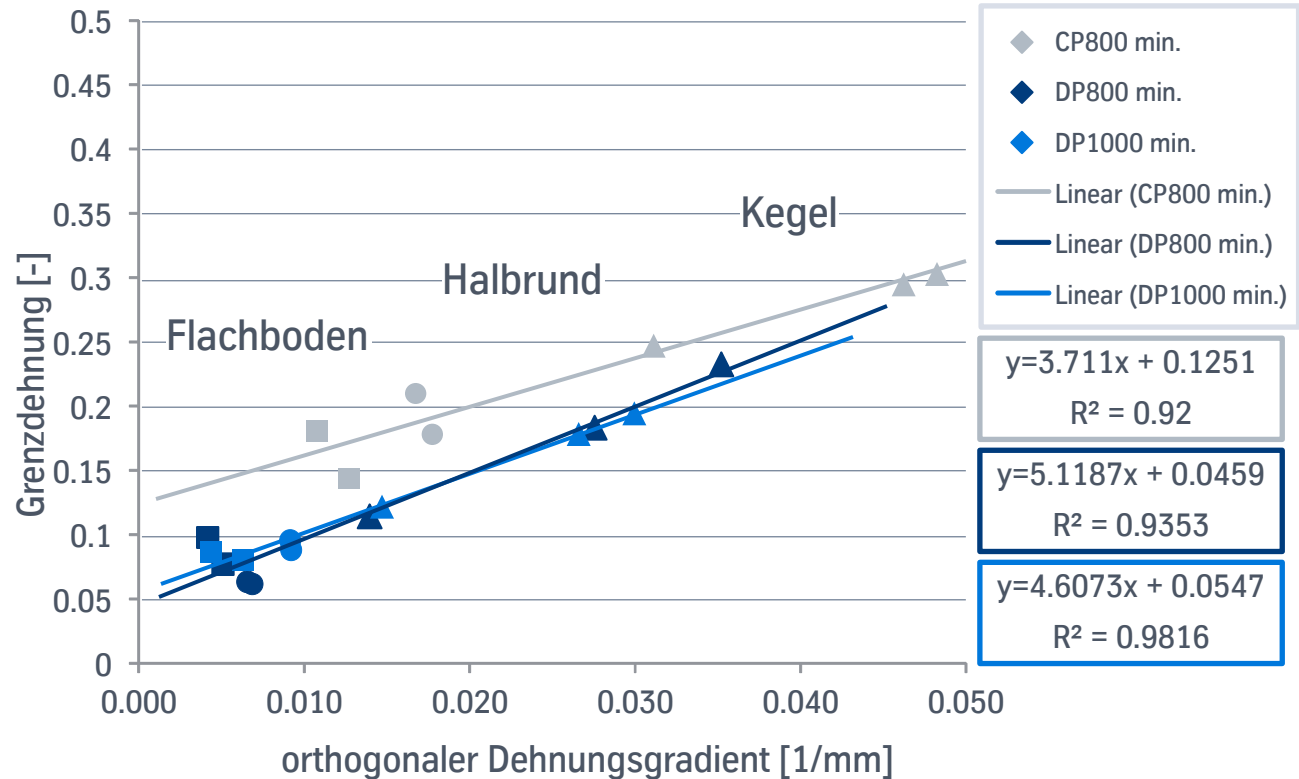
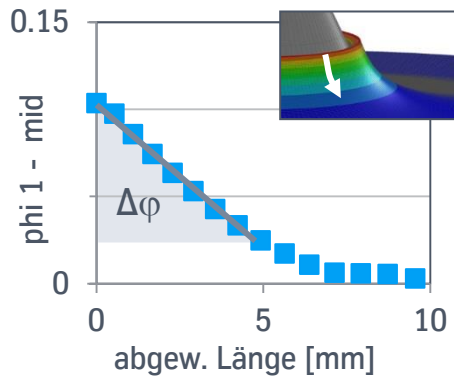


Analyse Lochaufweitungsversuche

Abhängigkeit Lochaufweitung <> Dehnungsgradient

Ansatz zur Auswertung der einzelnen Versuche

- Umrechnung HER (Min-Werte) auf Mittelebene (logarithmisch)
- Ermittlung des orthogonalen Dehnungsgradienten (φ_1 Mittelebene)

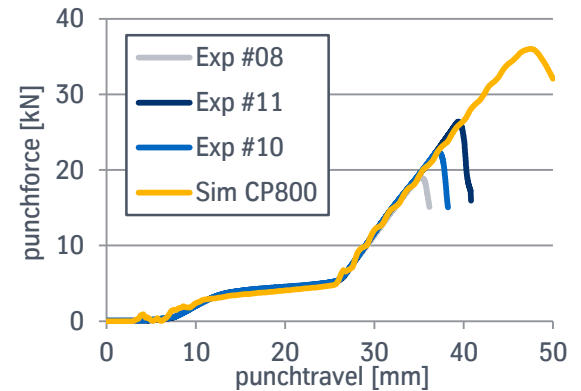
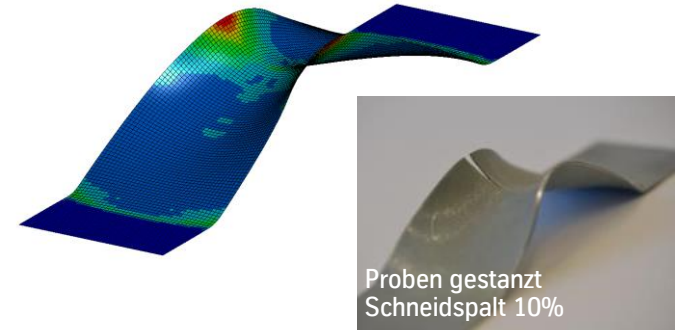
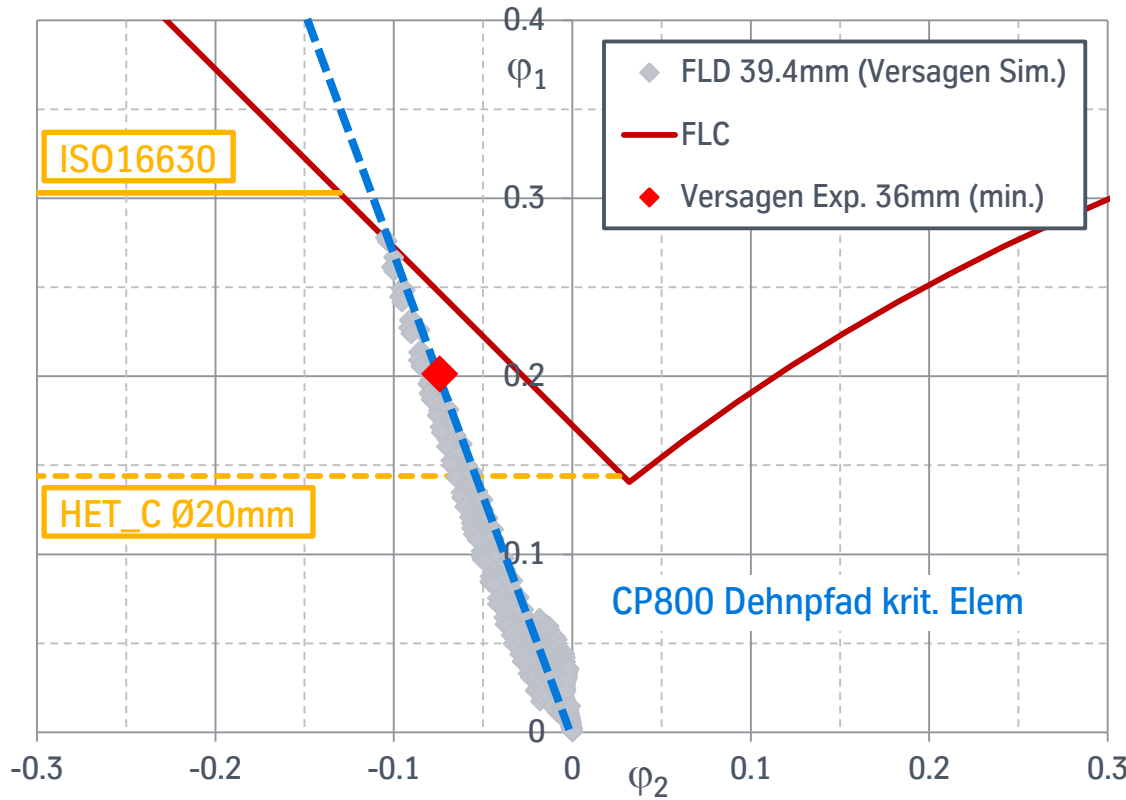


Die Analyse der Versuche mithilfe der FEM zeigt: mit abnehmenden Anteil des beteiligten Materials (höhere Dehnungsgradienten) steigt das Lochaufweitungsvermögen.



Bewertung Kantenversagen anhand FLC

Diabolo-Test – CP800 1.4mm

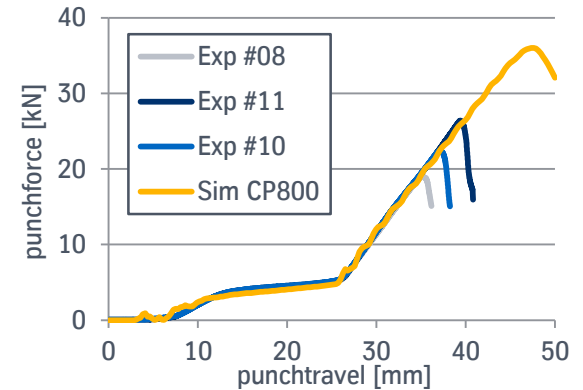
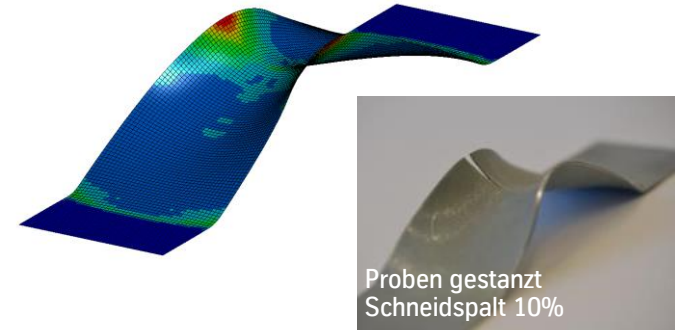
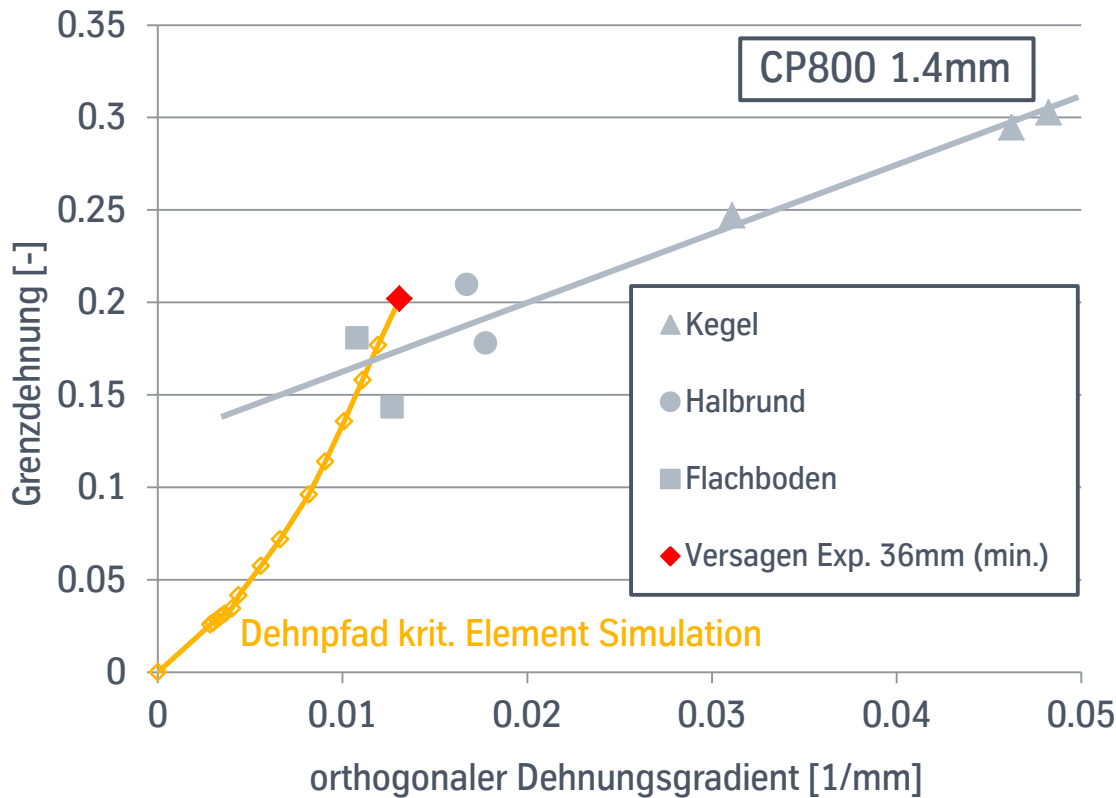


Das Versagen gestanzter Proben im Diabolo-Test kann durch die FLC nicht vorhergesagt werden. Die Ersatzversuche (HET) führen unterschiedlichen Versagensprognosen.



Bewertung Kantenversagen anhand des Dehnungsgradienten

Diabolo-Test – CP800 1.4mm



Die Belastungssituation an der geraden Schnittkante z.B. im Diabolo-Test kann über den orthogonalen Dehnungsgradienten eingegrenzt und dem entsprechenden Ersatzversuch gegenübergestellt werden.



Agenda

Charakterisierung der Kantenumformbarkeit

Bewertung der Kantenumformbarkeit in der FEM

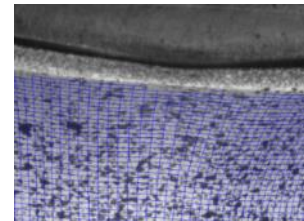
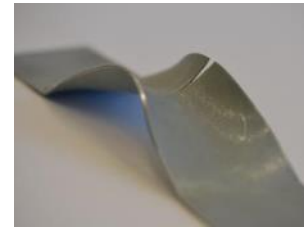
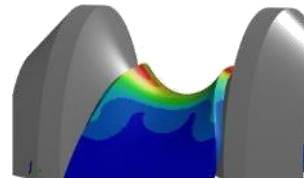
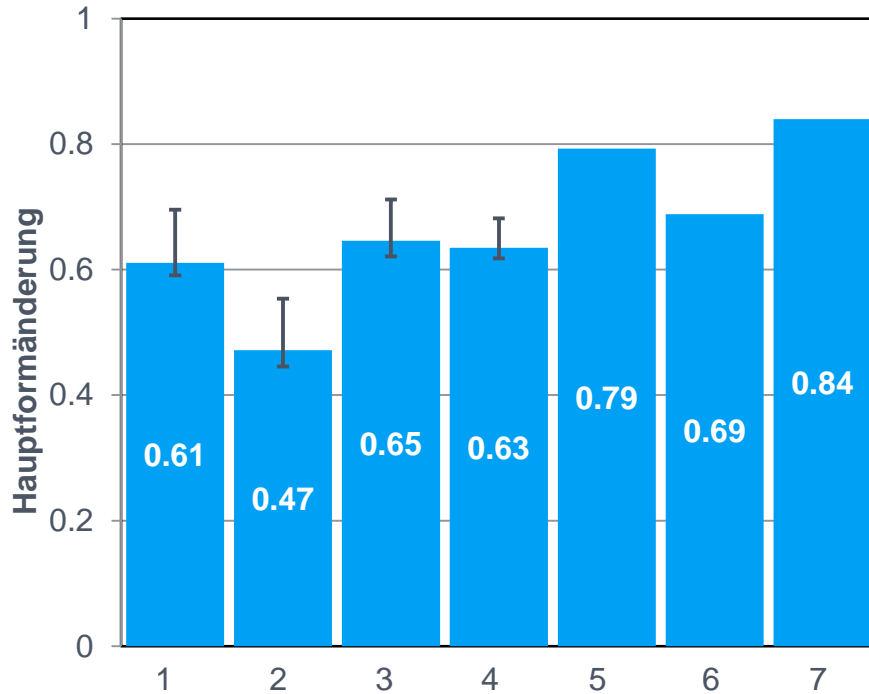
Restumformpotential nach dem Beschnitt - Simulation mit MF GenYld+CrachFEM

Zusammenfassung & Fazit



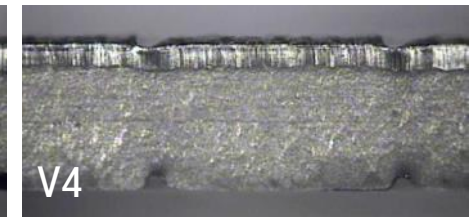
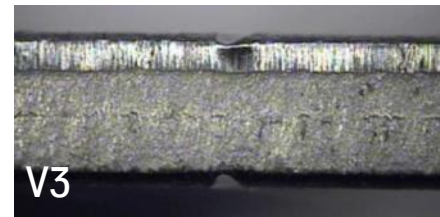
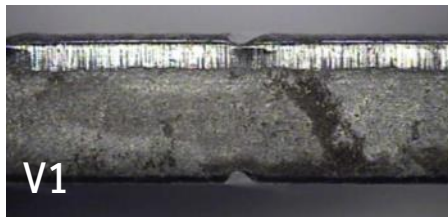
Diabolo-Test – Einfluss Schnittparameter

CP-W[®] 800, 3.2 mm – maximale Formänderung an der Kante



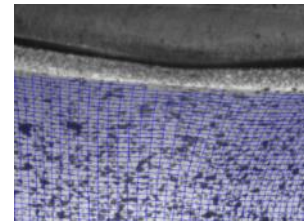
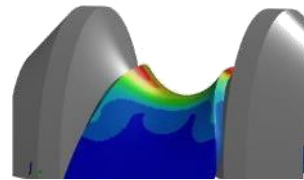
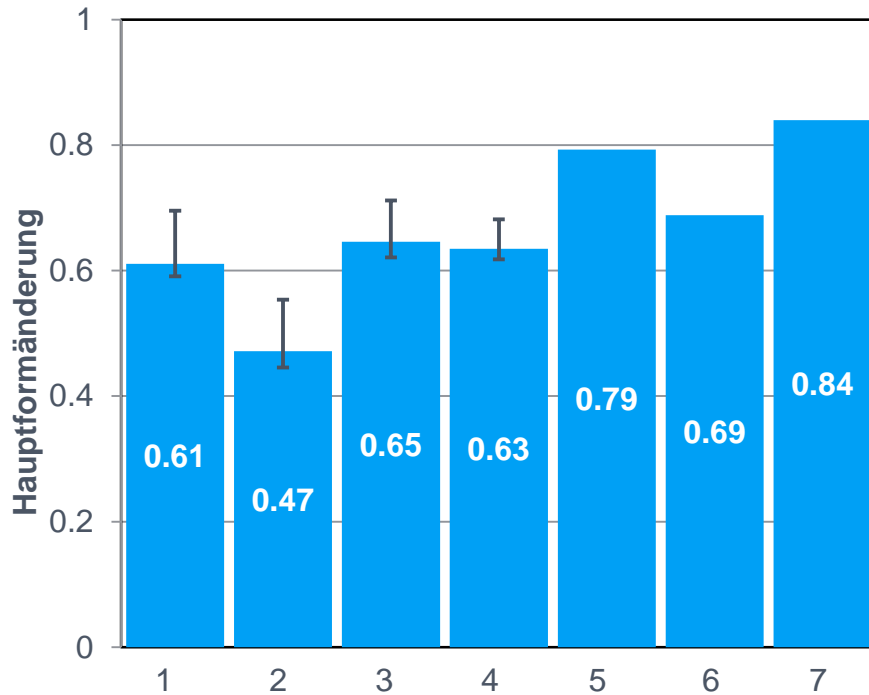
Var	Bezeichnung	Schnittspalt (OP1/OP2)
1	Normalschneiden	7,5%
2	Normalschneiden	18%
3	Nachschneiden 2.56 mm gerade Messer	10% / 5.6%
4	Nachschneiden 2.56 mm 0,5° scherender Schnitt	10% / 5.6%
5	Schleifen (500er Korn) mit Anfasen	
6	Schleifen (220er Korn) ohne Anfasen	
7	Fräsen	

Kante Flansch nach Umformung
Eindrücke -> Haltesicken



Diabolo-Test – Einfluss Schnittparameter

CP-W[®] 800, 3.2 mm – maximale Formänderung an der Kante



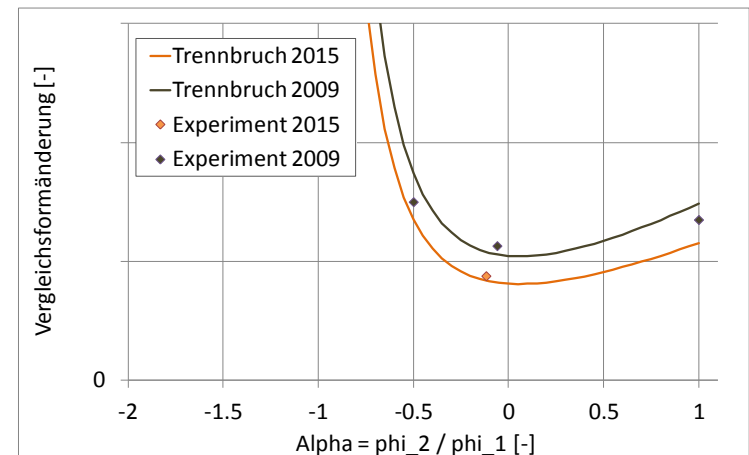
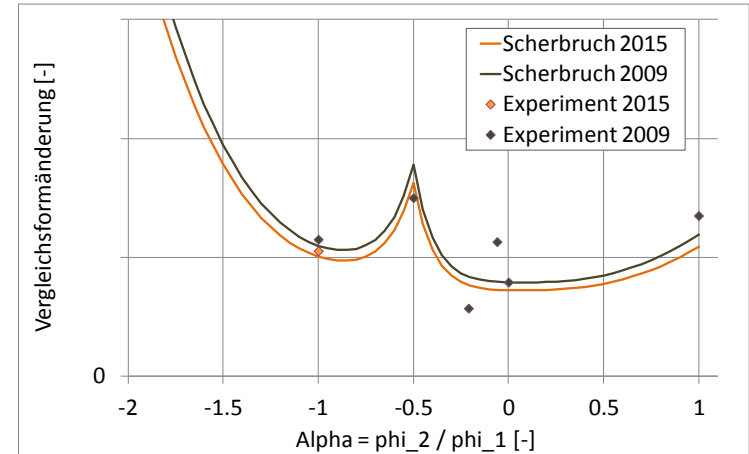
Var	Bezeichnung	Schnittspalt (OP1/OP2)
1	Normalschneiden	7,5%
2	Normalschneiden	18%
3	Nachschneiden 2.56 mm gerade Messer	10% / 5.6%
4	Nachschneiden 2.56 mm 0,5° scherender Schnitt	10% / 5.6%
5	Schleifen (500er Korn) mit Anfasen	
6	Schleifen (220er Korn) ohne Anfasen	
7	Fräsen	

- Durch Nachschneiden kann die maximale Kantendehnung erhöht werden.
- Schnittparameter bzw. der Zustand der Beschnittwerkzeuge wirken sich essentiell auf das restliche Umformvermögen des Werkstoffes aus!

Ermittlung Restumformpotential nach dem Stanzen

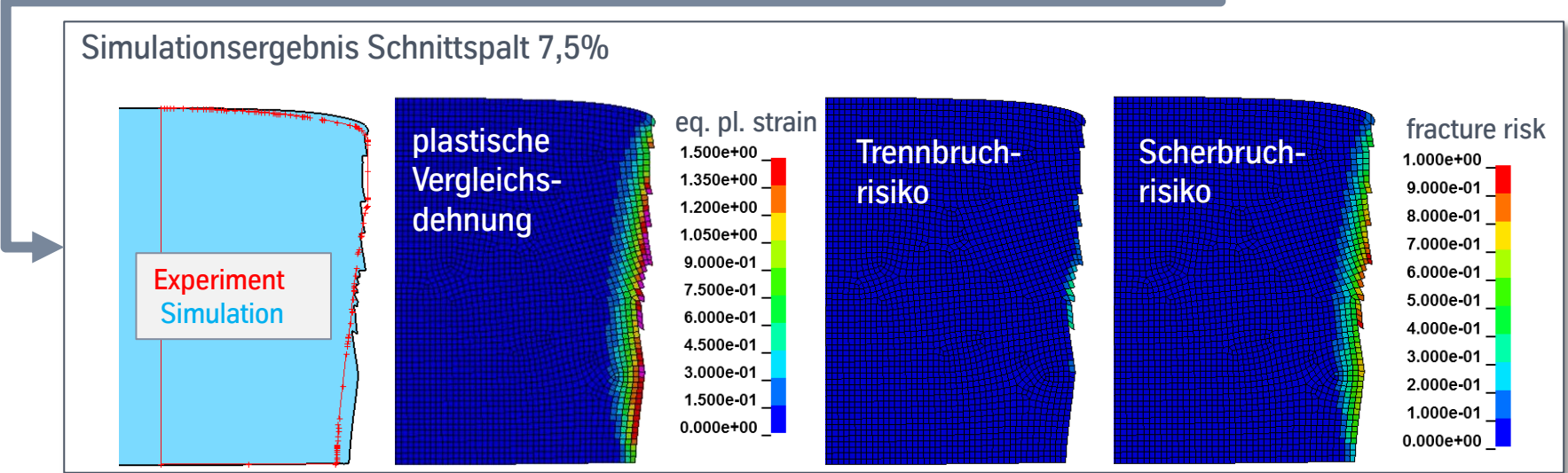
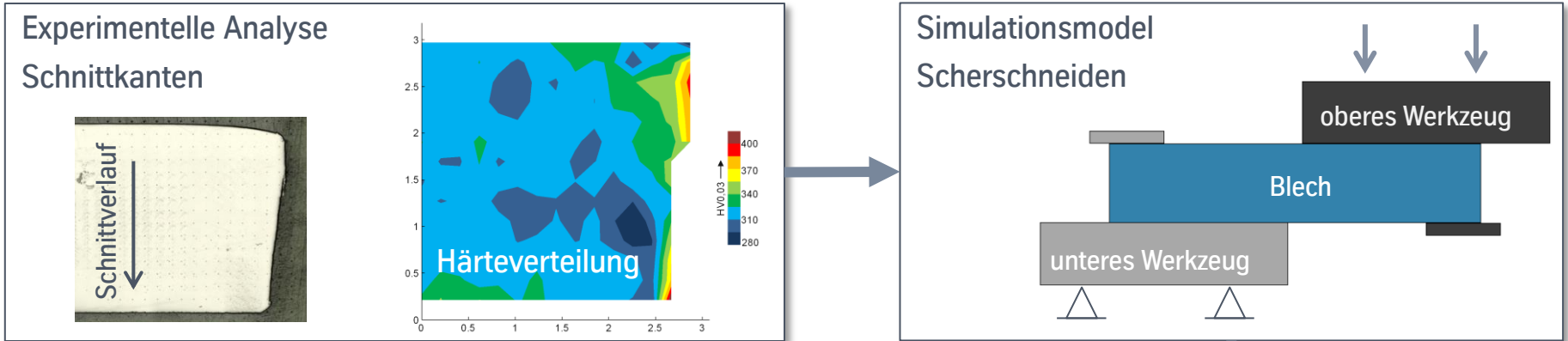
Simulation von Stanzvorgängen mit r-Adaptivität und MF GenYld+CrachFEM

- Aktualisierung Plastizität und Schädigungsmodell an die aktuell vorliegende Charge CP-W[®] 800 in 3.2 mm
 - Anpassung Fließort und Fließkurve
 - Kalibrierung Scherbruch, Trennbruch und Zuginstabilität
- Experimentelle Analyse Schnittkanten (Härte & Kontur)
- Aufbau FEM-Modell für Stanzsimulation mit r-Adaptivität und Kalibrierung der Simulationsparameter
- Stanzsimulation unter Verwendung MF GenYld+CrachFEM für zwei Schnittspalte (7,5 und 18%)
- Ableitung der Vorschädigung an der Stanzkante
- Simulation Diabolo-Versuch mit initialisierter Vorschädigung am Probenrand für die beiden Schnittspalte



Ermittlung Restumformpotential nach dem Stanzen

Simulation von Stanzvorgängen mit r-Adaptivität und MF GenYld+CrachFEM

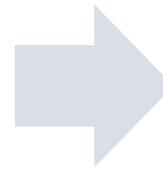
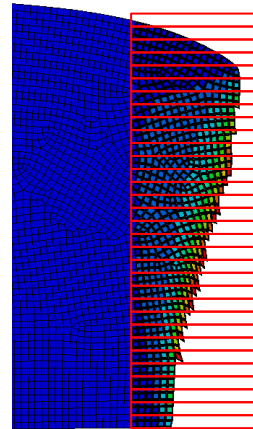


Ermittlung Restumformpotential nach dem Stanzen

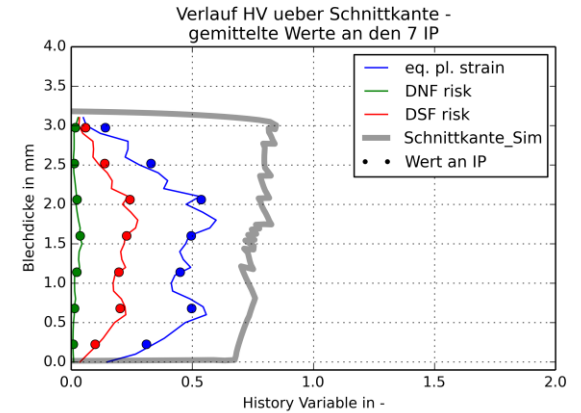
Simulation von Stanzvorgängen mit r-Adaptivität und MF GenYld+CrachFEM

Auswertung der Schneidsimulationen:

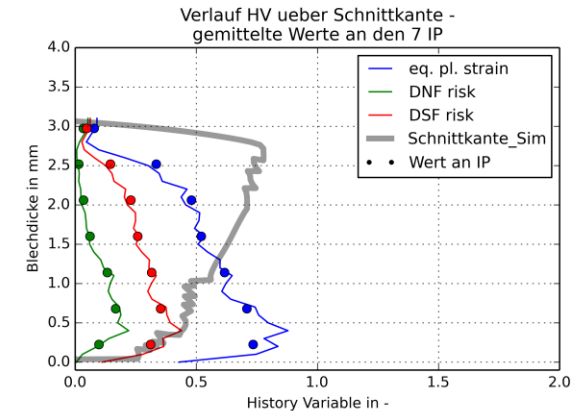
- Abtasten über Blechdicke in Schritten von 0.1mm
- Ermittlung der plastischen Vergleichsdehnung und Bruchrisiken über die Blechdicke
- Bildung der Mittelwerte für jeden Abtastbereich (Mittelwert aller Elemente)
- Bestimmung der Belegung der Integrationspunkte für die anschließende Simulation des Diabolo-Test



Schnittspalt 7,5%



Schnittspalt 18%

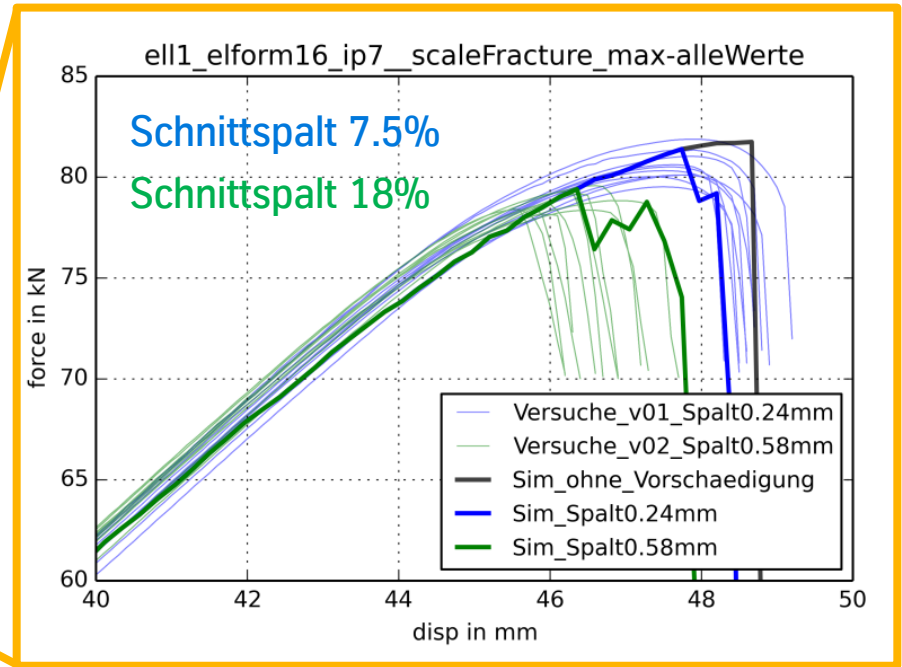
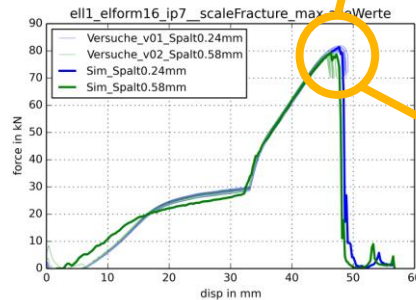
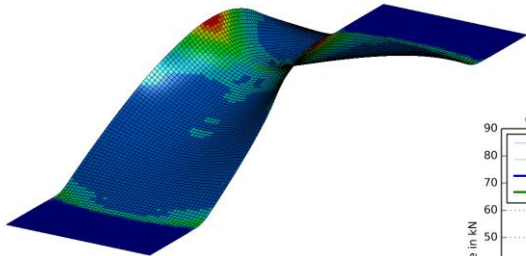


Ermittlung Restumformpotential nach dem Stanzen

Simulation von Stanzvorgängen mit r-Adaptivität und MF GenYld+CrachFEM

Simulation Diabolo-Test für CP-W[®] 800, 3.2 mm:

- 3D-Schalenmodell (vollintegriert, 7 IP)
- Elementkantenlänge 1mm
- Mapping der Vorschädigung auf äußere Elementreihe



Versagenszeitpunkt und/ Anriss sehr gut
Durchriss der Variante 18% etwas zu spät

Unter Berücksichtigung der Vorschädigung in Abhängigkeit der Stanzkonfiguration kann das reale Werkstoffversagen gut wiedergegeben werden.

Agenda

Charakterisierung der Kantenumformbarkeit

Bewertung der Kantenumformbarkeit in der FEM

Restumformpotential nach dem Beschnitt - Simulation mit MF GenYld+CrachFEM

Zusammenfassung & Fazit



Zusammenfassung & Fazit

- Durch Stanzoperationen wird das Umformvermögen von höherfesten Stahlwerkstoffen an der Bauteilkante signifikant verändert.
- Es liegt ein deutlicher Einfluss von Festigkeit, Werkstoffkonzept und Umformrandbedingung (Testvariante) auf das Lochaufweitungsvermögen vor.
- Das Versagen gestanzter Bauteilkanten während der Umformung kann durch die FLC allein nicht vorhergesagt werden.
- Der orthogonale Dehnungsgradient ermöglicht eine Differenzierung unterschiedlicher Lochaufweitungsversuche und eine der Belastungssituation angepasste Versagensprognose.
- Unter Berücksichtigung der Vorschädigung in Abhängigkeit der Stanzkonfiguration kann das reale Werkstoffversagen mit MF GenYld+CrachFEM in LS-Dyna gut wiedergegeben werden.

