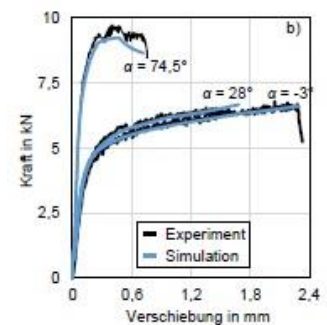
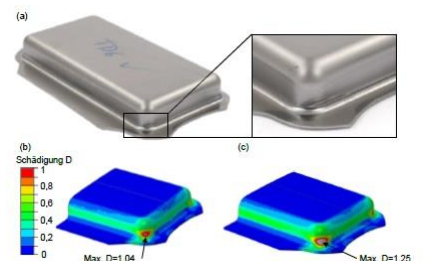
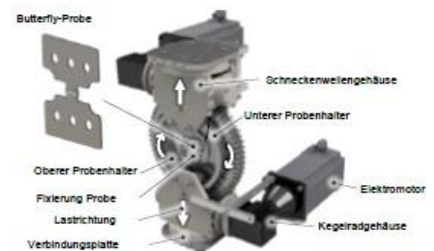


Verbesserte Versagenscharakterisierung von hochfesten Stahlblechwerkstoffen anhand einer neuen Versuchsmethodik für Scherzugversuche in einachsiger arbeitenden Zugprüfmaschinen

DFG-Geschäftszeichen: BE 1691/236-1



Abschlussbericht

Verbesserte Versagenscharakterisierung von hochfesten Stahlblechwerkstoffen anhand einer neuen Versuchsmethodik für Scherzugversuche in einachsig arbeitenden Zugprüfmaschinen



1 Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen: BE 1691/236-1

Projektnummer: 405334714

Titel des Projekts: Verbesserte Versagenscharakterisierung von hochfesten Stahlblechwerkstoffen anhand einer neuen Versuchsmethodik für Scherzugversuche in einachsigen Zugprüfmaschinen

Name(n) des/r Antragstellenden: Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Dienstanschrift/en: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM), An der Universität 2, 30823 Garbsen

Name(n) der Mitverantwortlichen: keine

Name(n) der Kooperationspartnerinnen und -partner: keine

Berichtszeitraum (gesamte Förderdauer): 01.10.2019 – 30.09.2021 (kostenneutral verlängert bis 30.09.2023), Förderzeitraum insgesamt: 24 Monate

2 Zusammenfassung / Summary

Strenge gesetzliche Regelungen zu Emissionen neuer Fahrzeuge sowie hohe Treibstoffpreise führen seit Jahren zu Veränderungen bei Fahrzeugkonzepten. Im gesamten Automobilbau ist eine deutliche Tendenz zu leichteren und sparsameren Fahrzeugen zu erkennen. Um das Gewicht ihrer Produkte zu reduzieren, setzen die Automobilhersteller verstärkt auf moderne Leichtbauwerkstoffe, wie höher- und hochfeste Stähle. Um das hohe Potenzial dieser Stahlwerkstoffe zur Reduzierung des Fahrzeuggewichts optimal nutzen zu können, bedarf es einer zuverlässigen Analyse ihres Umformungsvermögens und des Crashverhaltens der resultierenden Blechbauteile mittels der numerischen Simulation. Diese setzt eine genaue Modellierung des Werkstoffverhaltens unter Prozessbedingungen voraus. Im Hinblick auf die Blechumformung müssen dafür die Fließbedingung, das Verfestigungsverhalten und das Formänderungsvermögen charakterisiert und modelliert werden. Zur Beschreibung des Formänderungsvermögens werden häufig Versagensmodelle verwendet, die eine Rissbildung mit Hilfe des auf dem Spannungszustand gewichteten Vergleichsumformgrads voraussagen. Als Beispiel kann hier das modifizierte Mohr-Coulomb-Versagensmodell genannt werden.

Zur Parametrisierung dieser Versagensmodelle werden Charakterisierungsversuche mit unterschiedlichen Proben in einem breiten Spektrum von Spannungszuständen durchgeführt. Die Lastpfade weisen bei vielen Probengeometrien und Werkstoffen einen nicht konstanten

Verlauf auf, sodass zur Parametrisierung von Versagensmodellen der Lastpfad von vielen Anwendern gemittelt wird und somit zu Ungenauigkeiten führt. Zur Verbesserung der Genauigkeit der Versagenscharakterisierung und -modellierung ist daher von Interesse eine Methodik zu entwickeln, mit der der Werkstoff unter konstanten Lastpfaden geprüft werden kann. Durch die Versagenscharakterisierung von Proben unter konstanten Lastpfaden kann eine genauere Versagensmodellierung für die numerische Auslegung von Umformprozessen mit hochfesten Blechwerkstoffen erzielt werden.

Die Ergebnisse in diesem Forschungsvorhaben haben gezeigt, dass die neue Methodik der Butterfly-Versuche mit Winkelkorrektur einen deutlichen Einfluss auf den kritischen Vergleichsumformgrad sowie den Spannungszustand und somit auf die Versagensmodelle haben. Es konnten konstantere Lastpfade in den Proben erzeugt und somit eine verbesserte Genauigkeit der Versagensmodelle erreicht werden. Die erhöhte Genauigkeit der neuen Methodik mit Winkelkorrektur konnte anhand von Prozesssimulationen eines Tiefziehvorgangs und anschließendem Vergleich zu experimentellen Bauteilen bestätigt werden. Die Untersuchungen wurden für die hochfesten Stähle DP1000 und CP800 durchgeführt.

Strict legal regulations on emissions from new vehicles as well as high fuel prices have been leading to changes in vehicle concepts for years. Throughout the automotive industry, there is a clear trend towards lighter and more fuel-efficient vehicles. In order to reduce the weight of their products, car manufacturers are increasingly relying on modern lightweight materials such as higher-strength and high-strength steels. In order to optimally utilise the high potential of these steel materials for reducing vehicle weight, it is necessary to reliably design their forming capacity and the crash behaviour of the resulting sheet metal components by means of numerical simulation. This requires precise modelling of the material behaviour under process conditions. With regard to sheet metal forming, the flow condition, the hardening behaviour and the forming capacity must be characterised and modelled. To describe the forming capacity, failure models are often used that predict a crack by means of the equivalent plastic strain weighted on the stress state. The modified Mohr-Coulomb failure model is an example of this. To parameterise these failure models, characterisation tests are carried out with different specimen geometries in a wide range of stress states. The load paths are not constant for many specimen geometries and materials, so that the load path is often averaged for the parameterisation of failure models leading to inaccuracies. In order to improve the accuracy of failure characterisation and modelling, it is therefore of interest to develop a methodology with which the material can be tested under constant load paths. By characterising the failure of specimens under constant load paths, more accurate failure modelling can be achieved for the numerical design of forming processes with high-strength sheet materials.

The results in this research project have shown that the new methodology of butterfly tests with loading angle correction have a significant influence on the equivalent plastic strain as well as the stress state and thus on the failure model. More constant load paths could be generated in the specimens and thus an improved accuracy of the failure models. The increased accuracy of the new methodology with loading angle correction was confirmed by process simulations of a deep drawing process and subsequent comparison of the experimental and numerical results. The investigations were carried out for the high-strength steels DP1000 and CP800.

3 Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

Zielsetzung

Das Hauptziel des Projekts besteht in der Entwicklung einer Versuchsmethodik, die eine genaue Charakterisierung des Versagensverhaltens hochfester Stahlblechwerkstoffe in einem breiten Spektrum von Spannungszuständen anhand von Scherzugversuchen in einachsigen Zugprüfmaschinen ermöglicht. Die Genauigkeit und das breite Spannungszustandsspektrum waren dabei durch folgende Merkmale der Methodik zu gewährleisten: Es sollte eine Scherzugprobe verwendet werden, die für eine beliebige Scherzugbeanspruchung in der Blechebene eine Lokalisierung der plastischen Formänderung im Materialinneren und nicht an freien Probenkanten bewirkt. Der Prüfaufbau sollte eine stufenlose Ausrichtung der Probe bezüglich der Krafrichtung der Prüfmaschine für eine genaue Nachempfindung des gewünschten Spannungszustandes ermöglichen. Des Weiteren sollte die Messung der relativen Verschiebung der Probenhalter während des Versuchs mittels optischer Messtechnik möglich sein. Für die Bestimmung des Spannungszustands und des Versagensumformgrads sollte ein numerisches Modell der Versuche erstellt werden, sodass eine exakte Datenbasis für die Kalibrierung spannungsbasierter Versagensmodelle vorliegt. Die entwickelte Methodik sollte eine genauere Charakterisierung des Versagensverhaltens hochfester Stahlblechwerkstoffe in einem breiten Spektrum von Spannungszuständen ermöglichen, wodurch die Genauigkeit der simulationsgestützten Auslegung von Blechumformprozessen mit hochfesten Stahlblechwerkstoffen gesteigert werden kann. Hierdurch sollte wiederum eine bessere Ausnutzung des hohen Potenzials von hochfesten Stahlblechwerkstoffen zur Kosten- und Gewichtsreduzierung neuer Fahrzeuge ermöglicht werden.

Projektspezifische Ergebnisse

AP 1: Auswahl und Charakterisierung des Fließverhaltens von Blechwerkstoffen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden der Komplexphasenstahl CP800 und der Du-
alphasenstahl DP1000 untersucht. Zur Charakterisierung des Fließverhaltens der Blechwerk-
stoffe wurden Zugversuche in 0° , 45° und 90° zur Walzrichtung nach DIN 10275 und DIN
10113 (Raumtemperatur, quasistatisch) durchgeführt. Zur statistischen Absicherung wurde
jede Prüfung fünfmal wiederholt. Basierend auf den experimentellen Versuchsergebnissen
wurden Fließkurven und Anisotropieparameter berechnet. Zur Erweiterung der Fließkurven
aus dem Zugversuch für höhere Vergleichsumformgrade wurden hydraulische Tiefungsversu-
che nach DIN 16808 durchgeführt. Hierdurch konnten biaxiale Fließkurven berechnet und mit
dem Ansatz der äquivalenten plastischen Arbeit nach Sigvant et al. in den einachsigen Span-
nungszustand transformiert werden und zur Extrapolation der Fließkurven aus dem uniaxialen
Zugversuch für höhere Umformgrade herangezogen [SIG09]. Durch die Verwendung der er-
weiterten Fließkurven standen ausreichend experimentelle Daten zur Verfügung, um das
Fließverhalten der Werkstoffe zu extrapolieren und einen Verfestigungsansatz zu parametri-
sieren. Unter Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wurden die Parameter
des Extrapolationsansatzes nach Swift bestimmt [SWI52]. Die durchgeführte Methodik zur Ma-
terialcharakterisierung und die Materialdaten wurden detailliert in [1] veröffentlicht.

AP 2: Bestimmung der Versagensfläche mithilfe der alten Versuchsmethodik nach [BEH13]

Im Rahmen vorheriger Arbeiten wurde eine Butterfly-Probe entwickelt, die die Beschreibung
des Versagensverhaltens für unterschiedliche Spannungszustände ermöglicht [BEH13]. Die
Außenkontur der Probe wurde per Drahterodieren hergestellt und anschließend die Einsen-
kung fräsend eingearbeitet. Die Prüfvorrichtung ermöglicht es die Probe in unterschiedlichen
Orientierungen zur Krafrichtung der Zugprüfmaschine einzuspannen, sodass Spannungszu-
stände im Bereich Scherung, uniaxialer Zug und ebene Zugdehnung durchgeführt werden
können. Für beide Werkstoffe wurden Versuche bei sieben Kraftangriffswinkeln (-3° , $12,5^\circ$,
 28° , $43,5^\circ$, 59° , $74,5^\circ$ und 90°) bei einer Umformgeschwindigkeit von $0,02$ mm/s sowie bei
Raumtemperatur durchgeführt. Während der Versuche wurden die Proben mit Hilfe eines op-
tischen Dehnungsmesssystems (GOM ARAMIS) vermessen und jeder Versuch fünf Mal wie-
derholt. Die relativen Verschiebungen des Probenaufnehmers bis zum Materialversagen wur-
den ausgewertet und dienten als Randbedingung für die numerische Versuchsnachbildung.
Basierend auf den numerisch abgebildeten Butterfly-Versuchen wurden die am Ort der Riss-
initiierung wirkenden Spannungsgrößen zur Parametrisierung der spannungsbasierten Versa-
gensmodelle ausgewertet. Zunächst wurden die numerischen Modelle durch einen Vergleich
der Umformkräfte aus Simulation und Experiment validiert. Anschließend wurden aus den Ver-
läufen der Triaxialität und des bezogenen Lode-Winkels die charakteristischen Werte mit der
Methode von Bao und Wierzbicki berechnet [BAO04]. Der Versagensumformgrad wurde gleich

dem Vergleichsumformgrad beim Versagenszeitpunkt am Versagensort gesetzt. Somit standen sieben Datensätze für eine Parametrisierung von spannungsbasierten Versagensmodellen zur Verfügung. Unter Verwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wurden die Versagensmodelle MMC [BEE10] und CrachFEM [DEL07] für beide Werkstoffe parametrisiert. Die verwendete Methodik zur Charakterisierung der Materialversagens und die Versagensmodelle wurden ausführlich in [1] sowie [2] veröffentlicht.

AP 3: Simulationsgestützte Ermittlung der Kinematik und des Kraftbedarfs der neuen Versuchsmethodik

Die Entwicklungen der Triaxialität und des bezogenen Lode-Winkels während der Umformung der Probe führen dazu, dass charakteristische Werte berechnet werden müssen und somit zu einer Beeinträchtigung der Genauigkeit der Versagensmodelle. Daher wurde zunächst eine Anpassung der Kraftangriffswinkel numerisch ausgelegt, sodass für jeden Kraftangriffswinkel Winkelkorrekturen bekannt sind, die zu einem konstanteren Verlauf der Triaxialität und des bezogenen Lode-Winkels führen. Die Auslegung der Winkelkorrekturen erfolgte iterativ mit Hilfe der numerischen Modelle der konventionellen Butterfly-Versuche aus AP 2. Anhand der Verläufe der Triaxialität und des bezogenen Lode-Winkels wurden erforderliche Winkelkorrekturen numerisch berechnet. Dazu wurde die Winkelkorrektur im Rahmen einer Sensitivitätsstudie mit Hilfe eines Python-Skripts automatisch variiert: Zunächst wurde ein Variationsbereich der Winkelkorrektur und deren Schrittweite festgelegt. Daraufhin wurde für jede Winkelkorrektur im Variationsbereich iterativ eine numerische Simulation durchgeführt und ausgewertet. Um den Zeitpunkt der Winkelkorrektur zu bestimmen, an dem der Kraftangriffswinkel verändert werden soll, wurde die Triaxialität als Indikator herangezogen. Die maximale Abweichung der Triaxialität wurde dabei vom Anwender definiert. Sobald der Verlauf aus Vergleichsumformgrad und Triaxialität eine Änderung aufwies, die größer als die maximale, definierte Abweichung war, begannen die iterativen Simulationen für die Winkelkorrektur. Je nach Ergebnis erfolgten eine bis maximal drei Winkelkorrekturer einmal bis mehrfach wiederholt. Das Vorgehen zur Anpassung der Kraftangriffswinkel und die neue Methodik zur Charakterisierung des Materialversagens wurde ausführlich in [3] publiziert. Exemplarisch ist die iterative numerische Ermittlung optimaler Verstellwinkel in Abb. 1 dargestellt

AP 4: Konstruktion und Fertigung des mechanischen Teils der neuen Versuchsvorrichtung

In diesem AP wurde eine Methodik zur aktiven Winkelverstellung während des Versuchs entwickelt und ein entsprechendes Versuchskonzept erarbeitet. Im Rahmen der Konzeption wurde zunächst eine Anforderungstabelle erstellt und zu lösende Teilaufgaben definiert. Über einen morphologischen Kasten wurden anschließend drei Lösungsalternativen entwickelt und

gegenübergestellt. Aus dem vielversprechendsten Konzept wurde eine Konstruktion abgeleitet. Die entwickelte Versuchsvorrichtung deckte einen Winkelbereich von -5° bis 120° ab und zeichnete sich durch eine aktive Winkelverstellung aus. Die Versuchsvorrichtung besaß einen rotatorischen Freiheitsgrad, für den eine Lagerung erforderlich war, die die Rotation um eine Drehachse in der Probenmitte ermöglicht.

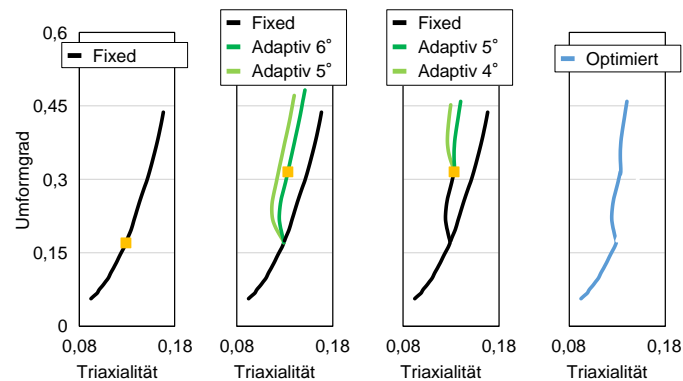


Abbildung 1: Iterative numerische Ermittlung der Winkelverstellung für den Lastwinkel 28°

Die Winkeleinstellung sollte adaptiv im Versuch möglich sein, daher war ein Antriebselement zur Winkelverstellung nötig. Zur Lagerung der Welle wurden Kurvenrollen mit vollrolligen Nadelagern eingesetzt. Diese Kurvenrollen besaßen eine ballige Laufbahn, welche Schiefstellungen der Lager in begrenztem Maße ausgleichen konnte und sehr hohe radiale Traglasten ermöglichte. Im Gegensatz zu einer Gleitlagerung konnte die Winkelverstellung zudem reibungsminimiert und frei von Stick-Slip-Effekten vorgenommen werden. Eine rotatorische Verstellung des Winkels wurde über eine Schneckenwelle und ein Schneckenrad erzielt. Die hohe Übersetzung des Schneckengetriebes von 65 sorgte für die Notwendigkeit eines äußerst geringeren Eingangsdrehmoments. Zum Aufbringen der Rotationsbewegung wurde an die Schneckenwellen jeweils ein Servomotor mit einem Drehmoment von 20 Nm angeschlossen.

AP 5: Konstruktion und Fertigung der steuer- und regelungselektronischen Komponenten

Das entwickelte Versuchswerkzeug wurde in die Zugprüfmaschine integriert und um zwei Servomotoren zur Winkelkorrektur ergänzt. Die Ausführung der elektrischen Antriebsteils erfolgte wie im Antrag vorgesehen als Dienstleistung der TEWISS-Technik und Wissen GmbH. Über ein externes Steuerungssystem wurden die beiden Servomotoren synchron angesteuert. Die synchrone Verstellung der Motoren ist mit der finalen Verstellung der Probe verknüpft, um definierte Winkelkorrekturen einstellen zu können. Mittels einer Benutzeroberfläche wurde die Bedienung des Systems ermöglicht, sodass im Versuch definierte Winkelkorrekturen in Abhängigkeit der Probenverschiebung eingestellt werden konnten. Innerhalb des Versuchs wurde die Verstellung der Probenaufnehmer mit Hilfe eines optischen Messsystems gemes-

sen und als analoges Echtzeitsignal an den Steuerungsrechner weitergeleitet, der eine Winkelverstellung der Motoren und somit dementsprechend auch der Butterfly-Probenaufnehmer mit einer variablen Winkelgeschwindigkeit einleitete. Das neu entwickelte Modul des Butterfly-Versuchs mit inline Winkelkorrektur ist in [3] detailliert beschrieben. Das entwickelte System ist in Abbildung 2 dargestellt.

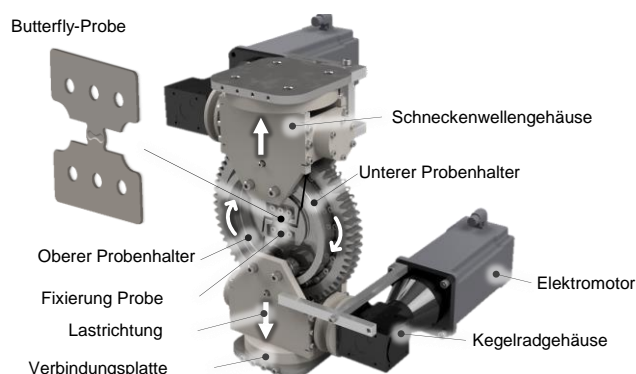


Abbildung 2: Werkzeugsystem zur Durchführung von Butterfly-Versuchen mit adaptiver Winkelkorrektur

AP 6: Bestimmung der Versagensflächen mithilfe der neuen Versuchsmethodik

Basierend auf den in AP 3 ausgelegten Versuchen mit Winkelkorrektur wurden experimentelle Versuche durchgeführt, um die numerischen Modelle zu validieren und den tatsächlichen Versagenszeitpunkt zu detektieren. Die Versuchsbedingungen entsprachen dabei denen aus AP 2. Anhand der Experimente mit Winkelkorrektur wurden die relativen Verschiebungen des Probenaufnehmers bis zum Materialversagen ausgewertet, wie zuvor bei den Versuchen ohne Winkelkorrektur. Die experimentellen Randbedingungen wurden dann für eine erneute numerische Abbildung der Versuche mit Winkelkorrektur verwendet. Durch einen Vergleich der numerischen und experimentellen Umformkräfte der Versuche mit Winkelkorrektur wurden die numerischen Modelle validiert. Anschließend wurden die Verläufe des Vergleichsumformgrads, der Triaxialität und des bezogenen Lode-Winkels am Ort der Rissinitiierung bestimmt sowie die charakteristischen Werte berechnet. Exemplarisch sind die Verläufe der Spannungstriaxialität für drei charakteristische Prüfwinkel in Abb. 3 a) dargestellt. Durch die adaptive Winkelanpassung, können erfolgreich konstantere Spannungstriaxialitätsverläufe erzielt werden. Unter Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wurden Versagensmodelle basierend auf den Ergebnissen der Butterfly-Versuche mit Winkelkorrektur erstellt. Das Vorgehen zur Charakterisierung des Materialversagens ist detailliert in [3] veröffentlicht. Die Validierung erfolgte durch Gegenüberstellung numerischer und experimenteller Kraft-Weg-Verläufe und zeigte eine gute Übereinstimmung.

AP 7: Validierung der bestimmten Versagensflächen

Zur Validierung der zuvor ermittelten Ergebnisse und zur Gegenüberstellung der Versagensmodelle mit und ohne Winkelverstellung wurden experimentelle Tiefziehversuche eines Rechtecknapfs durchgeführt. Auf die Platinen wurde zur Reduktion der Reibung beidseitig Teflonfolie appliziert. Die Tiefziehversuche wurden anschließend unter Variation der Niederhalterkraft mit einer Umformgeschwindigkeit von 10 mm/s durchgeführt.

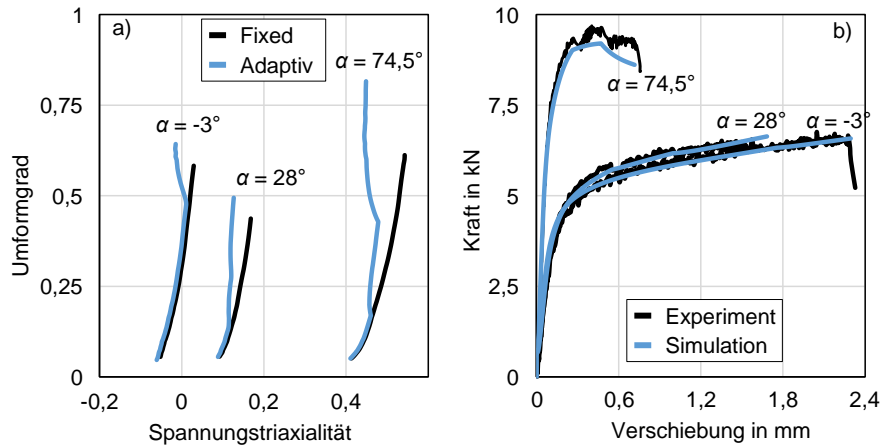


Abbildung 3: Entwicklung der Spannungstriaxialität (a) und Vergleich von experimentellen und numerischen Kraft-Weg Verläufen für den Werkstoff CP800

AP 7: Validierung der bestimmten Versagensflächen

Zur Validierung der zuvor ermittelten Ergebnisse und zur Gegenüberstellung der Versagensmodelle mit und ohne Winkelverstellung wurden experimentelle Tiefziehversuche eines Rechtecknapfs durchgeführt. Auf die Platinen wurde zur Reduktion der Reibung beidseitig Teflonfolie appliziert. Die Tiefziehversuche wurden anschließend unter Variation der Niederhalterkraft mit einer Umformgeschwindigkeit von 10 mm/s durchgeführt.

AP 8: Zusammenführung und Bewertung der Ergebnisse

Der Vergleich der numerisch ermittelten Vergleichsumformgrad-Triaxialitäts-Verläufe zeigte deutlich, dass die Versuche mit Winkelkorrekturen im Vergleich zu den konventionellen Versuchen mit festem Kraftangriffswinkel konstantere Verläufe aufweisen. Dies führte dazu, dass die charakteristischen Werte der Triaxialität und des bezogenen Lode-Winkel kleinere Werte für die Versuche mit Winkelkorrekturen aufwiesen als die konventionellen Versuche. Des Weiteren konnten bei den Versuchen mit Winkelkorrekturen höhere Vergleichsumformgrade bei Materialversagen erzielt werden als bei den konventionellen Versuchen. Darin ist der unterschiedliche Verlauf der parametrisierten Versagensmodelle begründet. Durch den veränderten Spannungszustand und die erhöhten Versagensumformgrade liegt die Versagensfläche mit Winkelkorrektur über der konventionellen. Die Abbildung 4 zeigt dies exemplarisch für den

Werkstoff CP800 für den ebenen Spannungszustand (a) und den ebenen Dehnungszustand (b).

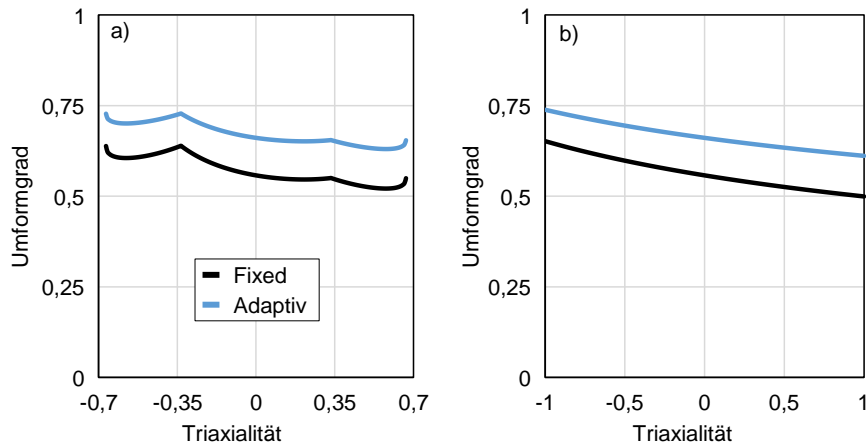


Abbildung 4 Verlauf des MMC Modells für den ebenen Spannungszustand (a) und ebenen Dehnungszustand (b) mit (adaptiv) und ohne (fixed) Winkelkorrektur in den Charakterisierungsversuchen für den CP800

Abschließend erfolgte eine Bewertung der parametrisierten MMC-Modelle anhand experimenteller Tiefziehversuche von Rechteckknäpfen, siehe Abbildung 5 (a). Die höhere Genauigkeit der Versagensmodelle mit adaptiver Winkelkorrektur konnte hierbei nachgewiesen werden. In Abbildung 5 (b,c) sind die ermittelten Schädigungswerte für eine Ziehtiefe von 19 mm bei einer Niederhalterkraft von 125 kN gegenübergestellt.

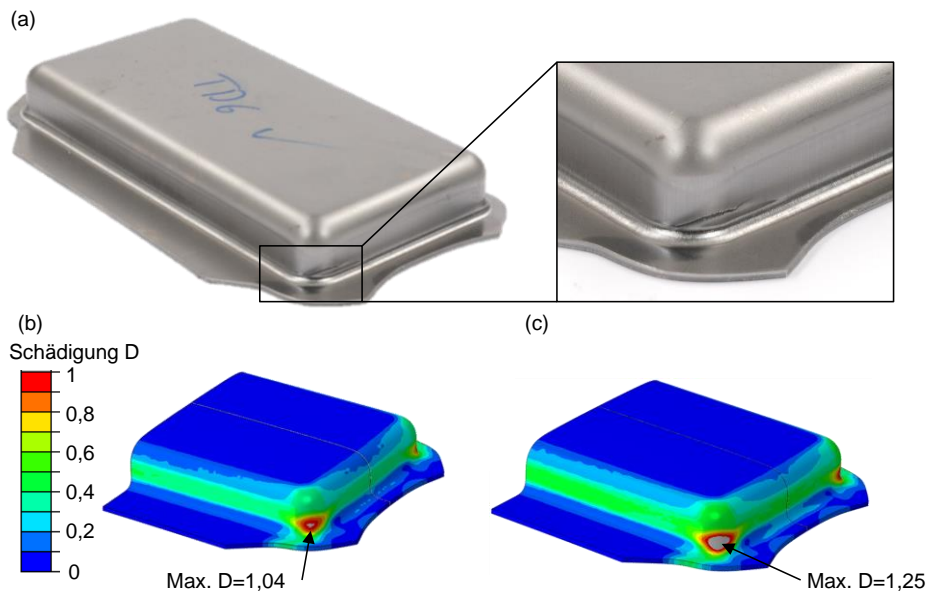


Abbildung 5: Vergleich der Schädigungsmodelle parametrisiert anhand von Butterfly-Versuchen mit adaptiver Winkelanpassung (a) und mit starrem Winkel (b) bei einer Ziehtiefe von 19 mm und experimentell tiefgezogenes Bauteil mit einer Ziehtiefe von 20 mm

Das mittels adaptiver Winkelverstellung parametrisierte MMC Modell (b) weist einen Schädigungswert von 1 auf, wohingegen für das konventionell parametrisierte MMC Modell (c) einen Schädigungswert von 1,25 anzeigt. Ein Schädigungswert von 1 wird bereits bei einer Ziehtiefe

von 15,8 mm erreicht. In den experimentellen Tiefziehversuchen traten Risse bei einer Ziehtiefe von 20 mm auf. Somit konnte das Potential durch eine verbesserte Versagenscharakterisierung durch adaptive Anpassung des Winkels demonstriert werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Ausnutzung des Formänderungsverhaltens höherfester Stahlwerkstoffe und insgesamt realitätsnähere Abbildung des Schädigungsverhaltens in der numerischen Simulation. Der Versagensort wurde durch beide Modelle mit guter Übereinstimmung vorhergesagt.

Literaturverzeichnis

- [BAO04] Bao, Y.; Wierzbicki, T. (2004): On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *Int. J. Mech. Sci.*, 46, 1, S. 81-98.
- [BEE10] Beese, A. M.; Luo, M.; Li, Y.; Bai, Y.; Wierzbicki, T. (2010): Partially coupled anisotropic fracture model for aluminum sheets. *Engineering Fracture Mechanics*, 77, S. 1128-1152.
- [BEH13] Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Vucetic, M.; Peshekhodov, I. (2013): An experimental-numerical method to characterise formability of sheet metals in a wide range of stress states with the help of a tensile-shear test on new butterfly specimens. *Advanced Metal Materials and Technologies*, S. 1-7.
- [DEL07] Dell, H.; Gese, H.; Oberhofer, G. (2007): CrachFem - A Comprehensive Approach for The Prediction of Sheet Metal Failure. *AIP Conf. Proc.*, 908, S. 165-179.
- [SIG09] Sigvant, M.; Mattiasson, K.; Vegter, H.; Thilderkvist, H. (2009): A viscous pressure bulge test for the determination of a plastic hardening curve and equibiaxial material data. *Int J Mater Form*, 2, S. 235-242.
- [SWI52] Swift, H. W. (1952): Plastic instability under plane stress. *J Mech Phys Solids*, 1, S. 1-18.

4 Veröffentlichte Projektergebnisse

4.1 Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

- [1] Behrens, B.-A.; Brunotte, K.; Wester, H.; Dykiert, M. (2021): Fracture Characterisation by Butterfly-Tests and Damage Modelling of Advanced High Strength Steels. *Key Engineering Materials*, 883, S. 294-302. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.883.294, Open-Access.
- [2] Behrens, B.-A.; Rosenbusch, D.; Wester, H.; Dykiert, M. (2021): Comparison of different testing approaches to describe the fracture behaviour of AHSS sheets using experimental and numerical investigations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1157, 012059. DOI: 10.1088/1757-899X/1157/1/012059, Open-Access.
- [3] Stockburger, E.; Wester, H.; Jegatheeswaran, V.; Dykiert, M.; Behrens, B.-A. (2023): Improved failure characterisation of high-strength steel using a butterfly test rig with rotation control. *Materials Research Proceedings*, 28, S. 737-746. DOI: 10.21741/9781644902479-80, Open-Access.

4.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

Keine

4.3 Patente (angemeldete und erteilte)

Keine