IFUM
Institut für Umformtechnik
und Umformmaschinen
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Verbesserte FE-Simulation des Scherschneidprozesses durch eine temperatur- und dehnratenabhängige Erweiterung des MMC-Modells

DFG-Projektnummer: 199808648

Produktionstechnisches
Zentrum Hannover

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

An der Universität 2 | 30823 Garbsen
Tel. 0511 762 2264 | Fax 0511 762 3001
info@ifum.uni-hannover.de | www.ifum

ABSCHLUSSBERICHT

1 Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen:	BE 1691/133-4
Projektnummer:	199808648
Titel des Projekts:	Verbesserte FE-Simulation des Scherschneidprozesses durch eine temperatur- und dehnratenabhängige Erweiterung des MMC-Modells
Name(n) des/r Antragstellenden:	Professor Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens
Dienstanschrift/en:	Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen An der Universität 2 30823 Garbsen
Name(n) der Mitverantwortlichen:	-
Berichtszeitraum (gesamte Förderdauer):	01.10.2020 – 30.09.2024

2 Zusammenfassung / Summary

Zur Entwicklung eines dehnraten- und temperaturabhängigem MMC-Versagensmodells, ist es zunächst erforderlich mittels Eliminierung des Maschineneinflusses auf den Prozess eine hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Spielbehaftete Wälzlager in Kniehebelpressen verursachen während der Schneidprozesse eine unkontrollierte Kippbewegung des Stößels. Dies hat einen Einfluss auf die Schnittflächenqualität der gefertigten Bauteile. Daher wurde ein System zum Ausgleich der maschinenabhängigen Anfangsverlagerung konzipiert, konstruiert und in den Stanzautomaten MSC2000 der Fa. Schuler integriert, welcher es ermöglicht, die Lagerspiele zu überwinden und die auftretende Stößelkippung zu minimieren. Anhand von Schliffbildern konnte eine Verbesserung des Glattschnittanteils von bis zu 10 % infolge der minimierten Stößelkippung nachgewiesen werden. Des Weiteren wurde ein numerisches Scherschneidmodell entwickelt, um die Qualität der Schnittfläche vorherzusagen. Ein iterativer experimentell-numerischer Ansatz wurde verwendet, um das Fließ- und Versagensverhalten der untersuchten Werkstoffe (DC04, X5CrNi18-10, HCT980, HCT600) bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten zu modellieren. Die Validierung des Versagensmodells erfolgte mit quasistatischen Scherschneidversuchen, die mit dem modifizierten Stanzautomaten durchgeführt wurden, durch Abgleich von Kraft-Weg-Verläufen und Schnittflächen. Anschließend wurden die temperatur- und dehnratenabhängigen Daten in das numerische Modell integriert und die Hochgeschwindigkeits-Scherschneidversuche aus dem Vorgängerprojekt erneut simuliert. Die Vorhersagegenauigkeit des numerischen Modells bezogen auf das experimentelle 95 %-Konfidenzintervall konnte in der zweiten Phase von 38 % auf 92 % erhöht werden.

To develop a strain-rate and temperature-dependent MMC failure model, it is necessary to ensure high reproducibility by eliminating the influence of the machine on the process. Bearing clearances in knuckle-joint presses lead to an uncontrolled ram displacement during cutting processes. This has an impact on the quality of the cut surface of the finished components. Therefore, a system to compensate for the machine-dependent initial displacement was developed, constructed and integrated into the Schuler MSC2000 automated punching press, which makes it possible to compensate the bearing clearances and minimize the ram displacement. Using metallography images, it was possible to demonstrate an improvement of up to 10 % in the smooth cut percentage as a result of minimized ram displacement. Furthermore, a numerical shear cutting model was developed to predict the cut surface quality. An iterative experimental-numerical approach was employed to model flow and failure behaviour of investigated materials (DC04, X5CrNi18-10, HCT980, HCT600) at various temperatures and strain rates. The mechanical validation of the used failure model was performed with the quasi-static shear cutting experiments done with modified automated punching press by comparing force-displacement curves and cut surfaces. Subsequently, the temperature and strain-rate dependent data were integrated into the numerical model and high-speed shear cutting experiments from the previous project were re-simulated. The prediction accuracy of the numerical model in relation to the experimental 95 %-confidence interval was increased from 38 % to 92 % in the second phase.

3 Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

AP 1: Aufbau eines Modellversuchs für quasistatische Dehnraten beim Scherschneiden

Maschinenseitige Einflüsse in Form von Verlagerungen des Stößels aufgrund elastischer Nachgiebigkeiten und Lagerspiele haben eine unmittelbare Auswirkung auf die Schnittkantenqualität. Da der Stößel mit dem Stempel eine starre mechanische Einheit bildet, hat die Stößelkippung zur Folge, dass auch der Schneidstempel während des Schnittes kippt und somit der Betrag des Schneidspalts über der Schnittkantenlänge variiert. Mit einem System zum Ausgleich der maschinellen Anfangsverlagerung wurde der Einfluss der eingesetzten Umformmaschine auf den Schneidprozess minimiert. Hierzu bedurfte es genauer Kenntnis der Maschineneigenschaften und deren Auswirkungen auf den Prozess. Vorab wurde mittels eines optischen Verlagerungsmesssystems (GOM Pontos) ein Soll-/Ist-Vergleich der Stößeltrajektorie beim Scherschneiden durchgeführt. Anhand dieser Messungen wurden die betriebsbedingten Stößelbewegungen aufgrund von Lagerspielen als maßgeblich für die Anfangsverlagerung (v_{aZ}) identifiziert. Anschließend erfolgte eine statische Pressenvermessung in Anlehnung an DIN 55189 zur Quantifizierung der Anfangsverlagerung sowie der Kraft, welche zur Überwindung der Lagerspiele benötigt wird. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden ein

aus Pneumatikzylindern, Druckspeichern und Koppelgestängen bestehender Stößelgewichtsausgleich (SGA) ausgelegt, gefertigt und in die Versuchspresse integriert (Abbildung 1a). Bei aktivem SGA sinkt die vertikale Anfangsverlagerung um ca. 80 % (Abbildung 1b) und somit der maschinenseitige Prozesseinfluss deutlich. Abbildung 2 zeigt eine erhebliche Minderung der durch Prozesskräfte verursachten Kippung während des Schneidprozesses.

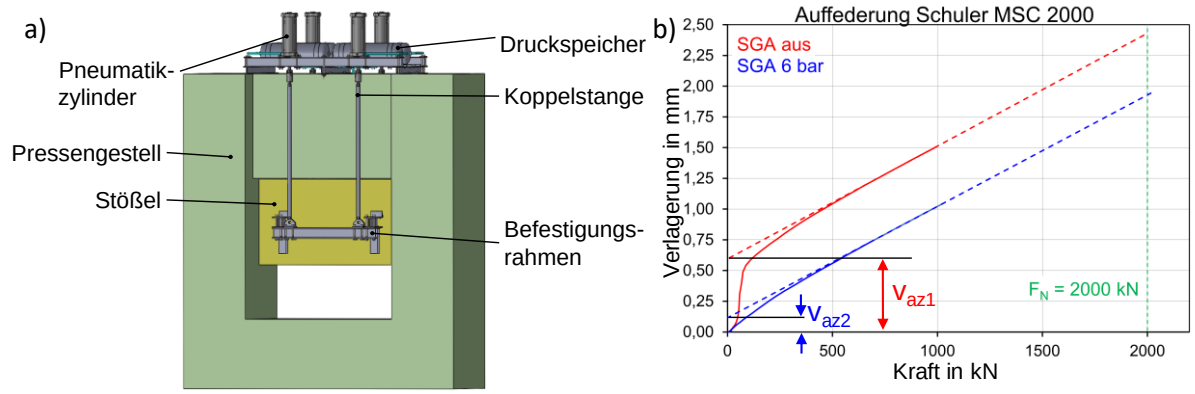

Abbildung 1: a) Pressenmodell mit montiertem SGA und b) Vergleich der vertikalen Verlagerung der Versuchspresse bei statischer Belastung mit und ohne SGA.

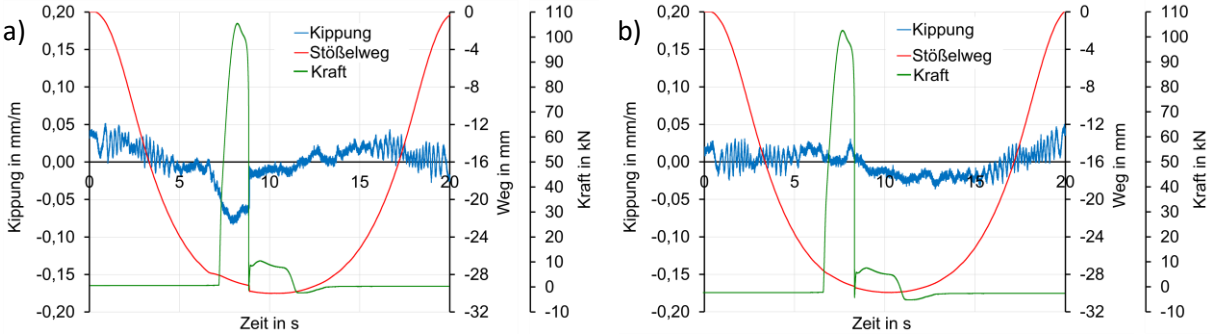

Abbildung 2: Vergleich der Stößelkippung a) ohne und b) mit aktivem SGA (Werkstoff X5CrNi18-10, Blechstärke 1,5 mm).

AP 2: Durchführung von quasistatischen Schneidversuchen

Mit quasistatischen Schneidversuchen werden Kraft-Weg-Verläufe und die entsprechenden Schnittflächenkennwerte zur Validierung der Simulation bereitgestellt. Diese wurden auf der mittels SGA nachgerüsteten servoelektischen Kniehebelpresse MSC2000 der Firma Schuler und einem Lochwerkzeug (ø 35 mm) sowie Versuchsproben aus den Blechwerkstoffen DC04 (1.0338), X5CrNi18-10 (1.4301), HCT600 (1.0941) und HCT980 (1.0944) mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm und einer Blechstärke von 1 mm bzw. 1,5 mm durchgeführt.

Die Versuche erfolgten in Einzelschnitten bei einer Hubzahl von 3 Hub pro Minute, einer Hubhöhe von 30 mm und einer Anschnittgeschwindigkeit von ca. 0,3 mm/s. Der relative Schneidspalt wurde zwischen 5 %, 10 % und 15 % der Blechdicke variiert. Zwei Stempelkantengeometrien (scharfkantig, 5 mm Radius) wurden untersucht. Die Parameterstudie wurde jeweils mit und ohne aktivem SGA durchgeführt. Anschließend wurden die Schnittflächenkenngrößen der Versuchsproben nach VDI Richtlinie 2906 an zwei gegenüberliegenden Messpunkten (90°

links und rechts zur Einlegerichtung im Werkzeug) anhand von Schliffbildern ermittelt. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse exemplarisch am Beispiel des HCT600 (5 % Schneidspalt, 1,5 mm Blechdicke, scharfkantiger Stempel) dargestellt. Angegeben sind auf die Blechdicke bezogene Werte. Ein aktiver SGA führt tendenziell zu einer Erhöhung des Glattschnittanteils und des Bruchflächenwinkels sowie zu einer Reduzierung der Bruchflächenhöhe. Hingegen hat der SGA keinen signifikanten Einfluss auf die Kanteneinzugshöhe sowie die Schnittgrathöhe.

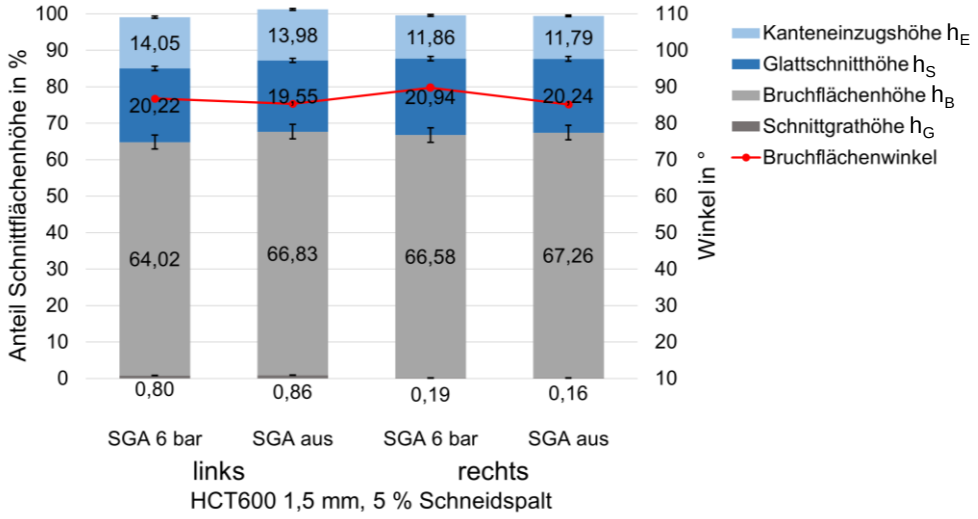

Abbildung 3: Schnittflächenhöhen des geschnittenen Werkstoffs HCT600 (5 % Schneidspalt, 1,5 mm Blechdicke) mit und ohne SGA.

Dieser Zusammenhang ist bei den weiteren Werkstoffen ebenfalls zu erkennen. Zudem konnte gezeigt werden, dass eine Vergrößerung des relativen Schneidspalts und ein voranschreitender Stempelverschleiß die Kanteneinzugshöhe maßgeblich erhöhen und sich negativ auf die Schnittflächenqualität auswirken (siehe Veröffentlichung [Beh24]).

AP3: Charakterisierung des temperatur- und dehnratenabhängigen Versagens- und Fließverhaltens

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die Charakterisierung und Modellierung des temperatur- und dehnratenabhängigen Fließ- und Versagensverhaltens der vier betrachteten Werkstoffe. Dazu wurden Zugversuche bei Temperaturen von 20 °C bis 600 °C am Umformdilatometer DIL805A/D/T der Firma TA Instruments mit quasi-statischer Dehnrate von 0,001 s^{-1} durchgeführt, um das temperaturabhängige Fließverhalten zu charakterisieren. Um das Fließverhalten bei hohen Dehnraten zu ermitteln, wurden am Fraunhofer IWM Hochgeschwindigkeits-Zugversuche mit Dehnraten von 100, 500 und 1000 s^{-1} durchgeführt.

Abbildung 4 a zeigt die aufgenommenen Fließkurven für alle vier Werkstoffe bei Raumtemperatur und einer Dehnrate von 0,001 s^{-1}. Die hier dargestellten Fließkurven wurden mit geeigneten Extrapolationsansätzen für höhere Umformgrade extrapoliert. Abbildung 4 b zeigt die Zugfestigkeit der vier Werkstoffe bei verschiedenen Temperaturen. Die Werkstoffe HCT980

und HCT600 zeigen ein deutlich nichtlineares Temperaturverhalten aufgrund des Blausprödigkeitseffektes. Erst bei Temperaturen von oberhalb 300 °C ist eine deutliche Abnahme der Zugfestigkeit zu beobachten. X5CrNi18-10 und DC04 zeigen ein annähernd lineares Temperaturverhalten und weisen eine abnehmende Zugfestigkeit mit steigender Temperatur auf. Weitere Einzelheiten finden sich in den veröffentlichten Fließkurven in [Ram23].

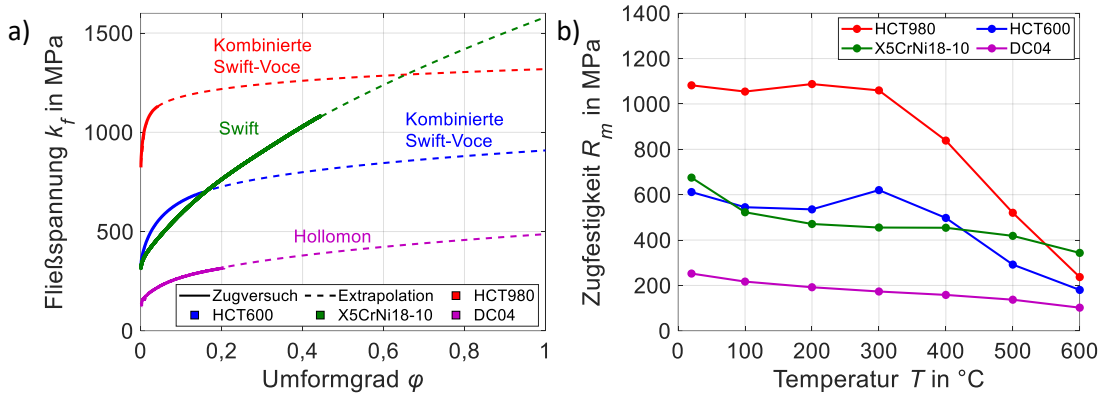

Abbildung 4: a) Fließkurven der Untersuchungswerkstoffe bei Raumtemperatur und einer Dehnraten von 0.001 s^{-1} und b) Temperaturabhängigkeit der Zugfestigkeit.

Die Analyse des spannungsabhängigen Versagensverhaltens unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses erfolgte mit allen vier Werkstoffen mittels Zugversuch an gekerbten Zugproben mit Radien von 3 und 10 mm sowie Scherzugversuchen nach Piers bei Temperaturen von 20 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C und 600 °C bei quasistatischer Dehnrate von 0,001 s^{-1}. Die Variation der Probengeometrie resultiert dabei in charakteristischen Spannungsdreiachsigkeiten und Lodewinkeln. Zusätzlich wurden Zugversuche mit Schmetterlingsproben bei Raumtemperatur unter fünf verschiedenen Winkeln (-3°, 12,5°, 28°, 43,5°, 59°) durchgeführt, um das Versagensverhalten unter Spannungsdreiachsigkeiten zwischen 0 und 0,33 zu ermitteln. Das optische Messsystem ARAMIS der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH wurde verwendet, um den Riss während der Versuche zu detektieren. Weitere Details zum Versuchsaufbau und den verwendeten Probengeometrien finden sich in den Veröffentlichungen [Beh22] und [Ram23]. Um die Versagensumformgrade, Spannungstriaxilitäten und Lode-Winkel zu ermitteln, wurden die Versuche in ABAQUS 2018 modelliert und die experimentell ermittelte Verschiebung beim Versagen als Randbedingung verwendet. Die Beschreibung des Simulationsmodells ist in [Beh22] und [Ram23] zu finden. Die Simulationsmodelle wurden durch den Vergleich von Kraft-Weg-Kurven aus Experimenten validiert. Abbildung 5 a zeigt exemplarisch die Validierung für den HCT980 bei Raumtemperatur. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung. Abbildung 5 b und 5 c zeigen die Evolution des Vergleichsumformgrades in Bezug auf die Spannungsdreiachsigkeit η und den normalisierten Lodewinkel $\bar{\theta}$ für verschiedene Probengeometrien bei Raumtemperatur für HCT980. Da der Spannungszustand während der Umformung variiert, werden die gemittelte

Spannungsdreiachsigkeit η_{av} und der normalisierte Lodewinkel $\bar{\theta}_{av}$ anhand der folgenden Gleichungen berechnet:

$$\eta_{av} = \frac{1}{\varphi_v}\int_0^{\varphi_v} \eta d\varphi\,, \qquad \bar{\theta}_{av} = \frac{1}{\varphi_v}\int_0^{\varphi_v} \bar{\theta} d\varphi$$

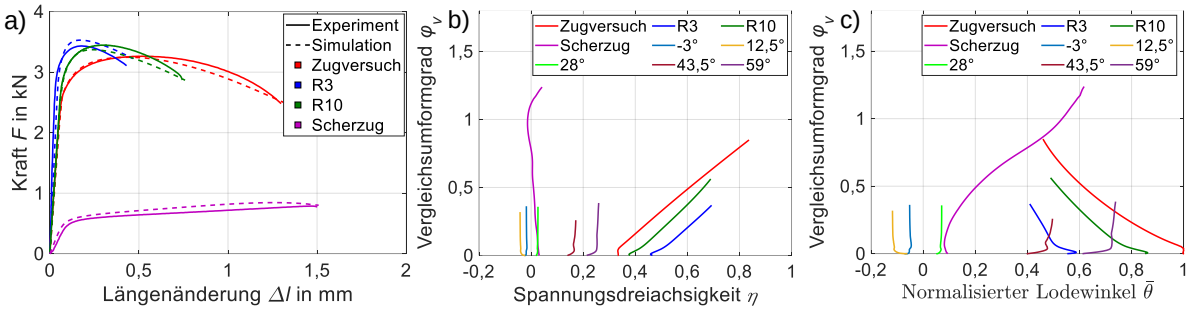

Abbildung 5: a) Kraft-Weg-Kurven für verschiedene Proben bei 20 °C für HCT980 b) Entwicklung des Umformgrades in Bezug auf die Spannungsdreiachsigkeit c) und normalisiertem Lodewinkel.

Der Versagensumformgrad, die gemittelte Spannungsdreiachsigkeit und der gemittelte normalisierte Lodewinkel aus jedem Versuch wurden zur Parametrisierung des modifizierten Mohr Coulomb (MMC) Versagensmodells verwendet. Je Temperatur wurde zunächst eine MMC-Versagensfläche parametrisiert. Die Versagensflächen sind exemplarisch in Abbildung 6 für verschiedene Werkstoffe dargestellt. Das Vorgehen ist detailliert in [Beh22] beschrieben. Anhand der höheren Versagensflächen ist erkennbar, dass sich die Umformbarkeit ausgehend vom Dualphasenstahl über X5CrNi18-10 bis zu DC04 deutlich verbessert.

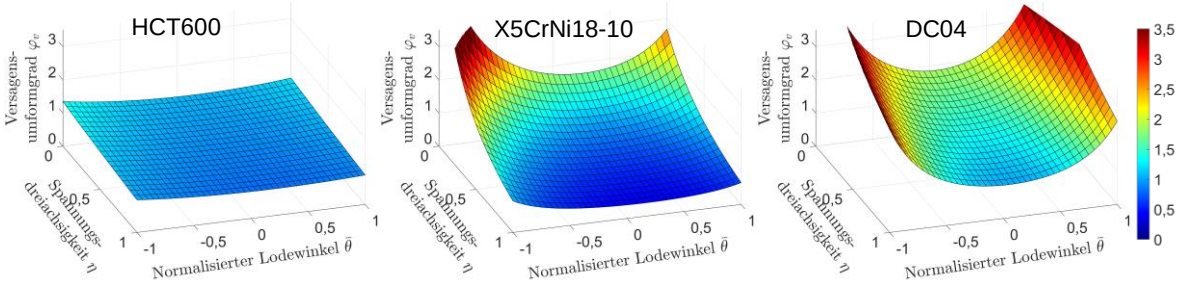

Abbildung 6: MMC-Versagensflächen bei Raumtemperatur für verschiedene Werkstoffe.

AP4 Numerische Integration des temperatur- und dehnratenabhängigen Versagens- und Fließverhaltens sowie Simulation des Scherschneidprozesses

In diesem AP wurde das temperatur- und dehnratenabhängige Versagens- und Fließverhalten in das Simulationsmodell des Scherschneidens integriert, um die Schnittkantenvorhersage zu verbessern. Dazu wurden zunächst die quasistatischen Scherschneidversuche aus AP2 mit SGA simuliert, um das Versagensmodell mechanisch ohne Abhängigkeit von Temperatur und Dehnrate sowie Maschineneinflüsse grundlegend zu validieren. Anschließend wurden die Hochgeschwindigkeits-Scherschneidversuche aus dem Vorgängerprojekt erneut mit Berücksichtigung temperatur- und dehnratenabhängiger Eigenschaften simuliert, um zu analysieren, ob die Vorhersagequalität verbessert werden kann.

Das Simulationsmodell wurde in ABAQUS 2018/Explicit erstellt. Für eine präzise Vorhersage der Schnittkantengeometrie ist ein feines Netz mit einer Elementlänge von 0,01 mm erforderlich. Die Simulation der Charakterisierungsversuche zur Kalibrierung des MMC-Versagensmodells erfolgte jedoch mit einer Netzgröße von 0,075 mm. Anders als das Scherschneiden, welches wegen der Achsensymmetrie in 2D betrachtet werden kann, erfolgte die Simulation der Charakterisierungsversuche in 3D. Eine weitere Verfeinerung des Netzes ist hier daher aufgrund hoher Rechenzeiten nicht praktikabel. Um die Netzabhängigkeit des Versagensumformgrades von der Netzgröße zu berücksichtigen, musste das Versagensmodell in Bezug auf die finale Netzgröße skaliert werden. Die Skalierung erfolgte anhand eines Zugversuches, welcher mit unterschiedlichen Netzgrößen simuliert wurde. Über die ermittelte Regressionsgerade können abschließend die Versagensflächen für eine Netzgröße von 0,01 mm skaliert werden (Abbildung 7).

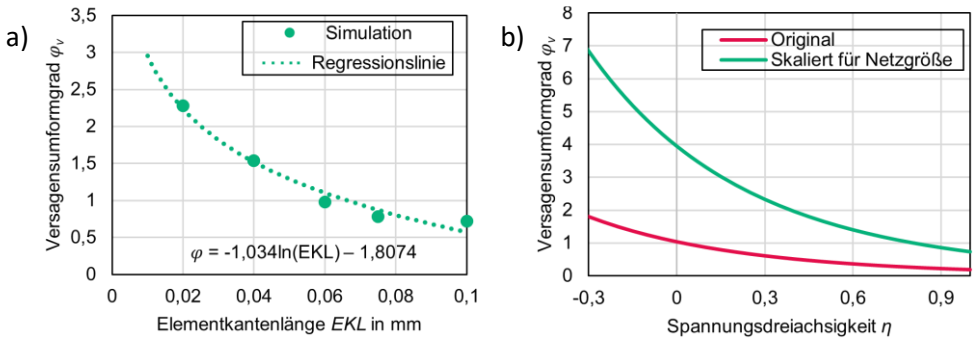

Abbildung 7: a) Abhängigkeit des Versagensumformgrades von der Netzgröße und b) skaliertes und originales MMC-Modell für ebene Dehnungsbedingungen für HCT980 bei 20 °C.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der quasistatischen Scherschneidversuche vorgestellt und diskutiert. Abbildung 8 a und b zeigen die experimentellen und numerischen Zeit-Kraft-Verläufe für den HCT980 mit einem scharfen und einem verrundeten Stempel. Zunächst ist festzustellen, dass zu Beginn der Umformung Abweichungen auftreten. Dies ist auf die Annahme starrer Werkzeuge in der Simulation zurückzuführen. Da die Verschiebungen in den experimentellen Versuchen nicht direkt am Schneidstempel, sondern am Stempel der Maschine gemessen wurden, sind die elastischen Verformungen des Maschinenrahmens und des Stempels in den experimentellen Messungen enthalten. Dies führt zu der beobachteten Diskrepanz im Vergleich zur Simulation. Dennoch wurde für beide Fälle eine gute Übereinstimmung im Bereich des Schneidvorgangs festgestellt. Es ist auch zu erkennen, dass der Effekt des verrundeten Stempels, der zu einer längeren Schnittzeit führt, auch in der Simulation erfasst wurde. Die Abbildung 8 c zeigt eine gute Übereinstimmung für die maximalen Schneidkräfte für alle vier Werkstoffe exemplarisch für eine Dicke von 1 mm, wobei der größte Fehler von etwa 7 % bei HCT980 auftritt.

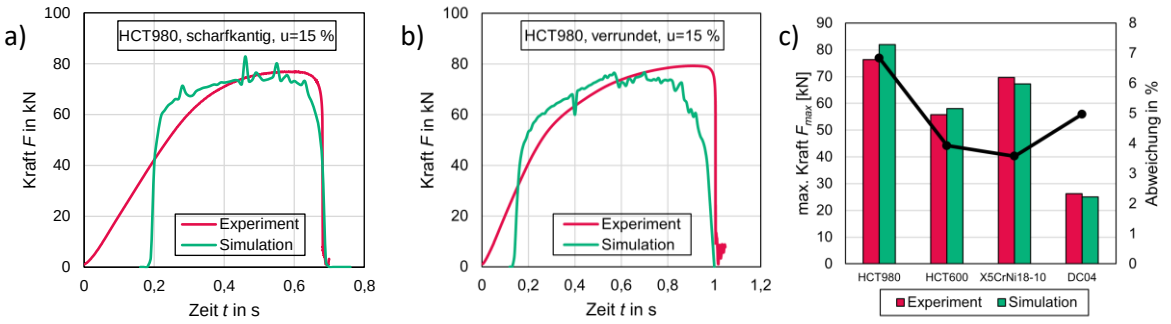

Abbildung 8: Zeit-Kraft-Verläufe für HCT980 a) mit scharfem und b) verrundetem Stempel sowie c) maximale Schneidkraft für Schneidspalt von 15 % und einer Blechdicke von 1 mm für quasistatisches Scherschneiden.

Abbildung 9 zeigt einen Vergleich der Schnittkantengeometrien zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen für HCT980 unter Berücksichtigung verschiedener Prozessparameter für quasistatisches Scherschneiden. Für den Fall eines scharfen Stempels zeigen die simulierten und experimentellen Ergebnisse der Kanteneinzug-, Glattschnitt- und Bruchflächenhöhen sowohl bei einem niedrigen als auch bei einem hohen Schneidspalt eine sehr gute Übereinstimmung. Das Simulationsmodell prognostiziert den Rissfortschritt sehr präzise, wobei die Risse sowohl vom Stempel- als auch von den Matrizen-Seite ausgehen und schließlich zusammenlaufen. Diese Beobachtung stimmt mit den experimentellen Beobachtungen überein. Im Falle eines verrundeten Stempels kommt es zu einer geringfügigen Unterschätzung der Glattschnitthöhe und Überschätzung der Bruchflächenhöhe, wobei jedoch insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten erzielt wurde.

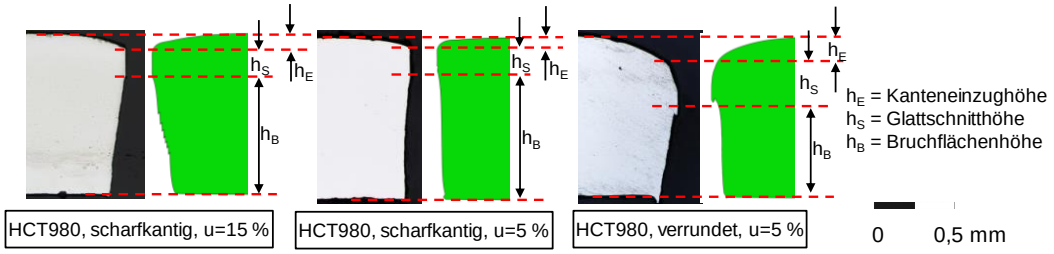

Abbildung 9 Vergleich der Schnittkanten zwischen Experiment und Simulation für HCT980 mit Blechdicke 1 mm.

Vergleichbare Ergebnisse wurden auch für die anderen Werkstoffe erzielt. Exemplarisch zeigt Abbildung 10 ausgewählte Ergebnisse, wobei eine gute Übereinstimmung zu erkennen ist.

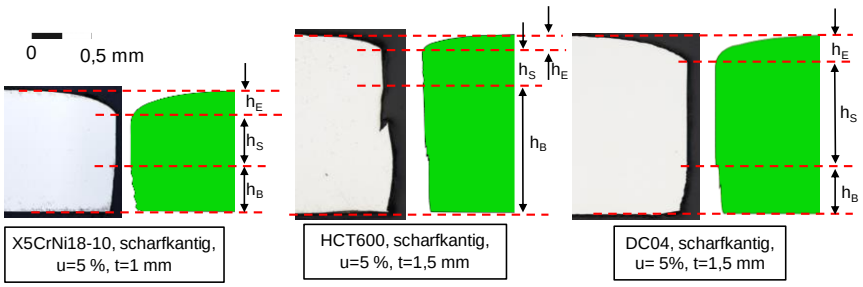

Abbildung 10 Vergleich der Schnittkantengeometrie zwischen Experiment und Simulation für ausgewählte Prozesse.

Nach der mechanischen Validierung des Versagensmodells wurde das

Hochgeschwindigkeits-Scherschneiden der ersten Phase simuliert. Zu diesem Zweck wurden die Versagensflächen bei verschiedenen Temperaturen analog zum Vorgehen bei Raumtemperatur hinsichtlich der Netzabhängigkeit skaliert. Um die Auswirkungen der Dehnraten auf die Versagensfläche zu berücksichtigen, wurde der Johnson-Cook-Skalierungsfaktor für die Dehnratenabhängigkeit $\left(1 + d\ ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon_0})\right)$ verwendet. Die Werte für den Parameter d für die verschiedenen Werkstoffe wurden der Literatur entnommen und betragen 0,069 für HCT980 [Eri18], 0,025 für HCT600 [Rot14], -0,014 für X5CrNi18-10 [Kor18] und 0,002 für DC04 [Pat17].

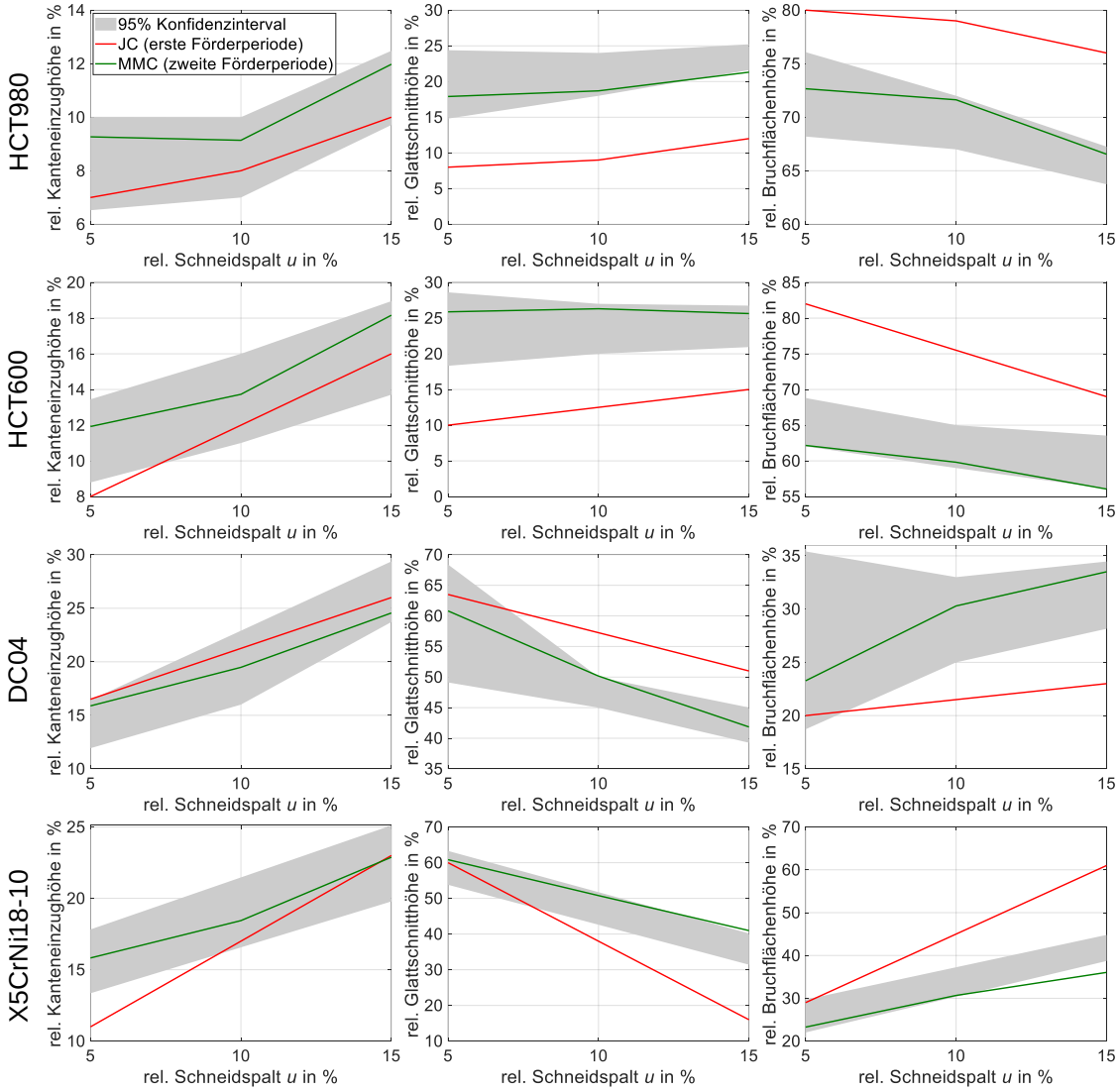

Abbildung 11 Numerisch und experimentell ermittelte Kanteneinzugs-, Glattschnitt- und Bruchhöhe.

Die Ergebnisse des Scherschneidens bei einer Geschwindigkeit von 58 mm/s sind in Abbildung 11 zusammengefasst. Die Integration des Materialverhaltens bei hohen Temperaturen und Dehnraten in das Simulationsmodell verbessert die Vorhersage der Schnittkantengeometrie im Vergleich zur ersten Phase deutlich. Die berechnete Schnittkantenhöhe der verschiedenen Zonen liegt bei allen verwendeten Materialien innerhalb des 95 %-Konfidenzintervalls der experimentellen Ergebnisse. Es ist anzumerken, dass für duktilere Werkstoffe wie DC04 und

X5CrNi18-10 einige Iterationen erforderlich sind, um den geeigneten Skalierungsparameter zu identifizieren, mit dem der Effekt der Netzgröße abgebildet werden kann. Dies ist auf die starke Einschnürung dieser Werkstoffe insbesondere bei höheren Temperaturen zurückzuführen.
Somit führten die in diesem Forschungsprojekt durchgeführten Untersuchungen zur Entwicklung eines Simulationsmodells, das in der Lage ist, die Qualität von Schnittflächen realitätsnah vorherzusagen. Die für den Stanzautomaten entwickelte Modifikation zur Kompensation der Stößelkippung während des Scherschneidens führte zu einer deutlichen Verbesserung der Schnittflächenqualität. Quasistatische Experimente mit kompensierter Stößelkippung ohne überlagerte Einflüsse aus der Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit sowie der Maschine wurden genutzt, um das MMC-Versagensmodell mechanisch zu validieren. Durch die Integration von temperatur- und dehnratenabhängigen Daten in das Simulationsmodell wurde letztendlich die Vorhersagequalität der Schnittfläche im Vergleich zur ersten Phase deutlich verbessert.

Literaturverzeichnis

[Eri18] Erice, B.; Roth, C.C.; Mohr, D.: Stress-state and strain-rate dependent ductile fracture of dual and complex phase steel, Mechanics of Material, Vol. 116, pp 11-32, 2018, doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.07.020

[Kor18] Korkmaz,H.G.; Toros, S.; Halkaci, M.; Halkaci, H.S.: Investigation of hydro-piercing method for stainless steels by finite element method, MATEC Web Conf., Vol. 220, 2018, doi.org/10.1051/matecconf/201822001003

[Pat17] Patil, S.P.; Prajapati, K.G.; Jenkouk, V.; Olivier, H.; Markert, B.: Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation process, Metals, 2017, doi.org/10.3390/met7120556

[Rot14] Roth, C.C.; Mohr, D.: Effect of strain rate on ductile fracture initiation in advanced high strength steel sheets: Experiments and modeling, International Journal of Plasticity, Vol. 56, pp 19-44, 2014, DOI 10.1016/j.ijplas.2014.01.003

4 Veröffentlichte Projektergebnisse

4.1 Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

[Beh22] Behrens, B.-A; Brunotte, K.; Wester, H.; Kock, C.; Kildonaviciute, D.: Determination of temperature dependence in Modified-Mohr-Coulomb failure model for process simulation of shear cutting, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. Vol. 1238 IDDRG, 2022, DOI 10.1088/1757-899X/1238/1/012028

[Beh24] Behrens, B.-A.; Krimm, R.; Friesen, D.; Schmiele, D.: Auswirkung von Maschineneinflüssen auf den Umformprozess, wt Werkstatttechnik online, Ausgabe 10, S. 625-637, 2024, doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-53

[Ram23] Ramirez, D.V.; Wester, H.; Rosenbusch, D.; Behrens, B.-A.: Extension of the modified Mohr-Coulomb fracture model by a strain rate and temperature dependence, Materials Research Proceedings, Vol. 28, pp 1407-1416, 2023, doi.org/10.21741/9781644902479-152

4.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

[Wes24] Wester, H. Behrens, B.-A.: Vortrag: Numerical analysis of the influence of temperature in shear cutting processes using a stress-based damage model. 15th FTF - Forming Technology Forum. 11.-12.09.2024. Ohlstadt

4.3 Patente (angemeldete und erteilte)

Keine