

## Voraussage der Kernrissinitiierung in Querwalzprozessen mithilfe experimenteller und virtueller Methoden

Die durch Finite-Elemente-(FE-)Software gestützte Versagensvoraussage gehört zu den Herausforderungen in der Massivumformung. In einer Studie im Auftrag des Industrieverbands Massivumformung e.V. wurden verschiedene Versagenskriterien anhand innovativer Experimente kalibriert, anschließend in FE-Software implementiert und abschließend auf ihre Anwendbarkeit auf die Kernrissbildung bei Querwalzprozessen geprüft – sowohl in der Warm- als auch in der Kaltumformung.

## AUTOREN



**Tim Komischke, MSc. ETH**

war zum Zeitpunkt der Studie wissenschaftlicher Mitarbeiter des Institute of Virtual Manufacturing (IVP) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich



**Prof. Dr. Pavel Hora**

ist Institutsvorsteher des Institute of Virtual Manufacturing (IVP) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich



**Dipl.-Ing. Harald Hermanns**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Massivumformung (LFM) der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn



**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Michael Marré**

leitet das Labor für Massivumformung (LFM) der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn



**Dr.-Ing. Koos van Putten**

ist Gruppenleiter Umformsimulation bei der SMS group GmbH in Mönchengladbach



**Dominik Wick, M.Sc.**

ist Leiter der Abteilung Entwicklung Kaltmassivumformung bei der EJOT GmbH & Co. KG in Bad Berleburg

Umformprozesse werden üblicherweise vor dem Try-Out an der Presse mit Hilfe von FE-Simulationen auf ihre Machbarkeit untersucht. Dies kann unter anderem Nacharbeitskosten und Zeit bei der Inbetriebnahme an der Presse einsparen. Weiterhin als schwierig erweist sich jedoch die FE-Softwaregestützte Versagensvorausage in der Massivumformung. Unter den vielzähligen Versagenskriterien hat sich bisher keines als allgemeingültig für alle Umformprozesse herausgestellt. Zudem fehlen standardisierte Versuche, welche das sehr große Feld an möglichen Belastungszuständen hinreichend genau abdecken würden. Die Studie untersuchte im warmen Zustand den Werkstoff 16MnCrS5 (1.7139), im kalten Zustand 20MnB4 (1.5525).

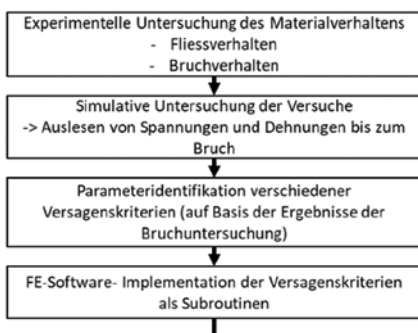
### VORGEHEN

Wie Bild 1 illustriert, untersuchte die Forschungsgruppe beide Materialien zunächst experimentell. Dabei analysierte sie sowohl das Fließverhalten als auch das experimentelle Bruchverhalten. Um die Befunde in Erkenntnisse zum Spannungs-

und Dehnungszustand zu überführen, wurden die Experimente anschließend anhand von FE-Software simuliert. So ließen sich die Zustände bestimmen, unter denen der Bruch für die Materialien eingetreten ist. Diese Spannungs- und Dehnungswerte verwendeten die Experten, um die Parameter verschiedener Versagensmodelle für beide Materialien zu ermitteln und diese als Subroutinen in eine für FE-Software gebräuchliche Formulierung zu überführen. Um den Beginn der Kernrissbildung zu bestimmen, wurden im nächsten Schritt Querwalz-Validierungsexperimente durchgeführt und die erzeugten Werkstücke auf Kernrisse untersucht.

Abschließend ließ sich eine FE-Simulation dieser Querwalzprozesse unter Verwendung der zuvor erstellten Subroutine erstellen. Anhand dieser Subroutine wurde vorausgesagt, wann der Riss im Kern rechnerisch eintreten sollte, in Abhängigkeit der verschiedenen Versagenskriterien. Ein Vergleich des experimentell beobachteten Rissbeginns mit dem rech-

### Herleitung Schädigungsroutinen für FE-Software



### Validierung der Anwendbarkeit in Querwalzprozessen

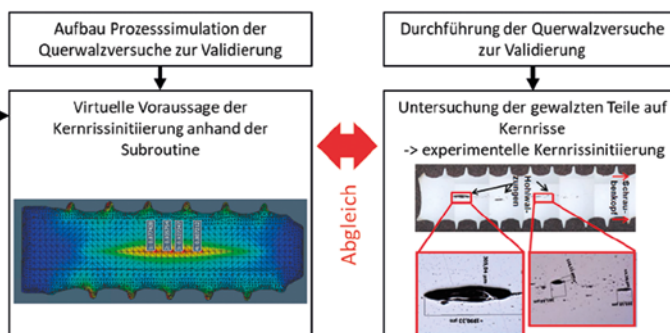


Bild 1: Vorgehen zur Parameteridentifikation der Versagenskriterien, Implementation in FE-Software und anschließender Validierung der Anwendbarkeit auf Querwalzprozesse

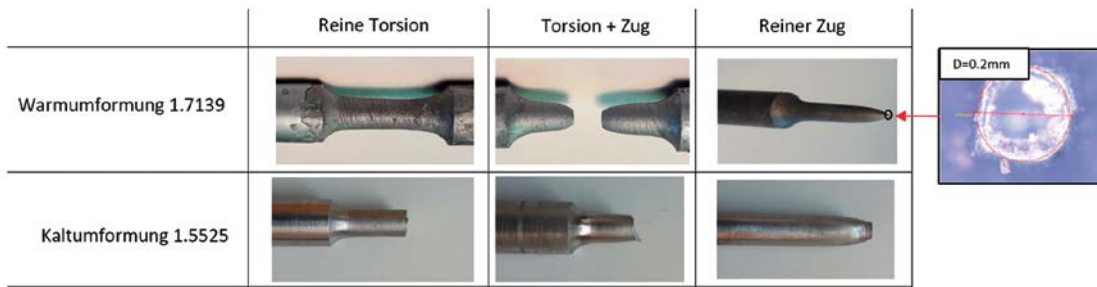


Bild 2: Ergebnisse der Bruchversuche für Warm- und Kaltumformung für die verschiedenen Belastungszustände

nerisch vorausgesagten Rissbeginn ermöglichte eine Bewertung der Anwendbarkeit der verschiedenen Versagenskriterien auf Querwalzprozesse.

**EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES MATERIALVERHALTENS**

Um das Fließverhalten beider Materialien zu analysieren, untersuchten die Experten 16MnCrS5 (1.7139) für Temperaturen zwischen 1.050 °C und 1.250 °C und 20MnB4 (1.5525) zwischen Raumtemperatur und 250 °C. Die Ergebnisse wurden dann mathematisch approximiert und dienten für alle folgenden numerischen Simulationen als Fließkurven. Die Ergebnisse werden hier nicht ausführlich dargestellt, aber sind in [1] zu finden.

Anschließend entwickelte die Forschungsgruppe eine Methodik, um das Bruchverhalten der Materialien experimentell zu untersuchen. Hierzu verwendete sie Torsionsproben und Torsionsproben mit überlagertem Zug sowie ungekerbte und gekerbte Zugproben. In der Warmumformung konnte nur unter reiner Torsion nie ein Probenbruch beobachtet werden. Dagegen entstand in der Kaltumformung bei allen Proben ein Probenbruch, wie in Bild 2 dargestellt. Auch unter reinem Zug ist erkennbar, dass die Umformbarkeit in der Warmumformung extrem hoch ist. Dies macht der geringe Restquerschnitt bei Probenbruch deutlich. Untersucht wurden auch die Temperatur und die Dehnratenabhängigkeit des Bruchverhaltens [1].

**SIMULATIVE ÜBERPRÜFUNG DER VERSUCHE**

Im Anschluss an die Experimente wurden FE-Modelle der Versuche in der FE-Software Simufact Forming aufgebaut und die Versuche bis zum experimentell beobachteten Bruch nachsimuliert. Aus diesen Simulationen wurde dann für jedes Experiment eine zugehörige Dehnung bis zum Bruch herausgelesen und die zugehörigen Spannungswerte (Triaxialität, normierter Lodewinkel-Parameter). Ausgelesen wurden diese Werte jeweils im kritischen Partikel, also an dem Punkt der Probe, an dem der Bruch bekanntermaßen beginnt. Für die Versuche der Warmumformung richtete sich besondere Aufmerksamkeit auf die Temperatur und die Dehnraten während der Umformung, da diese das Materialversagen ebenfalls beeinflussen.

Die simulativ-experimentell ermittelten Daten zum Bruchverhalten der Proben unter verschiedenen Belastungszuständen dienten dazu, die Parameter verschiedener Versagenskriterien für diese Materialien zu bestimmen. Zunächst galt es jedoch zu ermitteln, welche Versagenskriterien für die zwei Anwendungsfälle Warmumformung/Kaltumformung aussichtsreich erscheinen. Im Falle der Kaltumformung waren dies das Johnson-Cook-Kriterium [4] sowie das Mohr-Coulomb-Bruchkriterium [5]. Während das Johnson-Cook-Kriterium die Bruchdehnung nur in Funktion der Spannungs-Triaxialität definiert, verwendet das Mohr-Coulomb-Kriterium darüber hinaus noch den normierten Lodewinkel-Parameter [1].

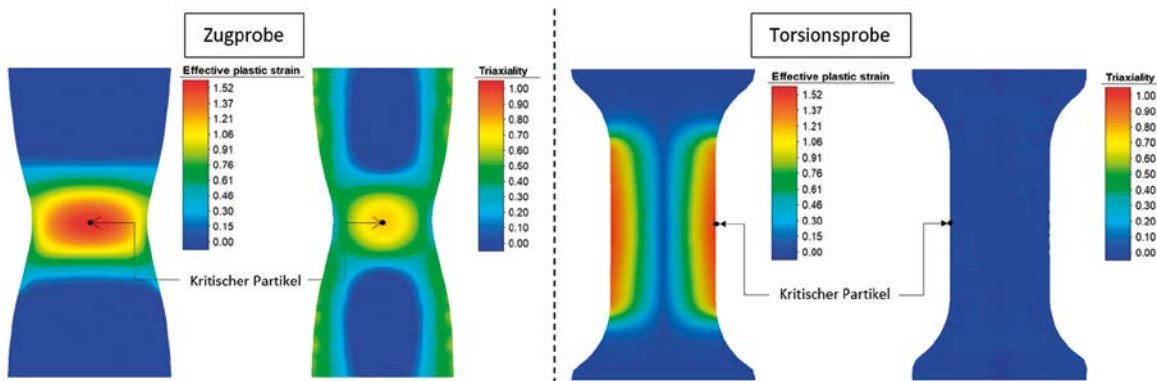


Bild 3: Simulierte Dehnungs- und Spannungszustände über Zug- und Torsionsproben (Kaltumformung) sowie Positionen der kritischen Partikel

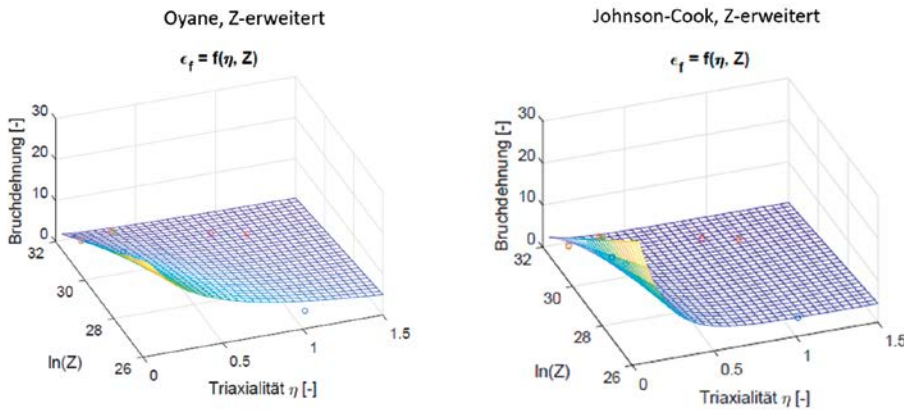


Bild 4: Darstellung der zwei aussichtsreichsten Kriterien zur Anwendung in der Warmumformung im Raum aus Bruchdehnung, Triaxialität und  $\ln(z)$

Aussichtsreich für die Warmumformung erscheinen einer Literaturrecherche zufolge ein Johnson-Cook-Kriterium, das um den Zehner-Hollomon-Parameter  $z$  erweitert wird, sowie ein  $z$ -erweitertes Oyane-Kriterium [2]. Der Parameter  $z$  beinhaltet die Temperatur und die Dehnrates, zwei relevante Größen für das Bruchverhalten in der Warmumformung [2], [3]. Die Verwendung des Zehner-Hollomon-Parameters ist ein innovativer Ansatz, der sich noch nicht als Stand der Technik etabliert hat. Die hier verwendeten Kriterien für die Warmumformung sind also abhängig von der Spannungs-Triaxialität und dem Zehner-Hollomon-Parameter. Beispielhaft sind in Bild 4 nur die sich ergebenden Kriterien zur Anwendung in der Warmumformung illustriert.

Alle Versagenskriterien wurden jeweils in Subroutinen in Fortran geschrieben und anschließend in Simufact Forming eingebunden. Die eigentliche Schädigungsberechnung erfolgt inkrementell, pro Inkrement und Integrationspunkt über eine Uloop-Routine. Die berechneten Werte werden anschließend über eine plotv-Routine ausgegeben.

**QUERWALZVERSUCHE ZUR VALIDIERUNG**

Die Querwalzversuche zur Validierung in der Warmumformung fanden im Labor für Massivumformung (LFM) an der Fachhochschule Südwestfalen statt. Sie wurden mit dem Werk-

stoff 17139 mit einem Ausgangsdurchmesser von 36,0 mm bei einer Umformtemperatur von 1.200 °C auf einer Querkeilwalz-Versuchseinrichtung durchgeführt. Unter realistischen, praxisnahen Randbedingungen des Querkeilwalzens konnten keine Kernrisse erzeugt werden. Daher ließ sich in der Simulation des Querkeilwalzens auch nur testen, ob die Routine korrekt voraussagt, dass keine Kernrisse eintreten werden.

Die hohe Flexibilität der LFM-Versuchsanlage ermöglicht auch eine definierte Umformung mit ebenen Werkzeugen. Diese Prozessgestaltung entspricht dem im ETH ausgeführten Simulationsaufbau. Die Walzversuche mit den ebenen Werkzeugen wurden mit den gleichen Randparametern durchgeführt wie die Querwalzversuche. Die Ergebnisse zeigen deutliche Kernaufreißungen nach acht Überrollungen und bestätigen damit die ETH-Simulationsergebnisse (Bild 5).

**VIRTUELLE VORAUSSAGE DER KERNRISSINITIIERUNG ANHAND DER SUBROUTINE**

Die Validierungssimulationen wurden jeweils in Simufact Forming mit exakt den Geometrien aufgesetzt, die im realen Prozess Anwendung fanden. Die Subroutinen sind so kalibriert, dass ab einer Schädigung von 100 Prozent ein Riss im Werkstück auftreten sollte. Für geringere Schädigungen sollte kein Riss erkennbar sein. Um zu beurteilen, wie genau die Versa-

**Simulationsergebnisse**

Ergebnisse (Prozessdauer 5sek):

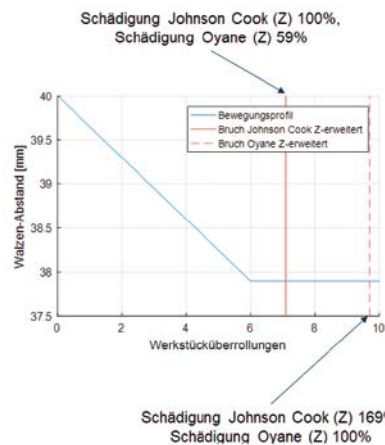
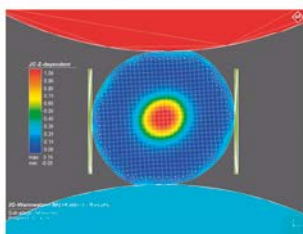


Bild 5: Gegenüberstellung der Ergebnisse von Simulationsmodell und Warmumformung beim Walzvorgang mit ebenen Werkzeugen (links: Simulationsmodell, rechts: Kernaufreißung beim Walzversuch nach acht Überrollungen)



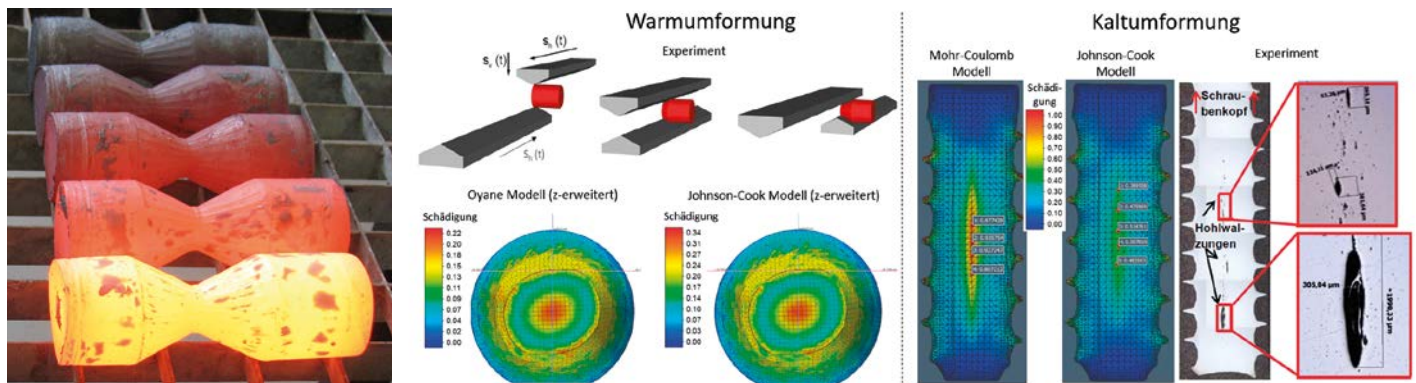


Bild 6: Experimenteller Aufbau und simulierte Schädigungswerte im Kern, links: Warmumformung, rechts: Kaltumformung

Bilder: Autoren

gensvoraussage den Beginn des Risses voraussagt, wurden die Schädigungswerte im Kern zum Zeitpunkt der experimentell beobachteten Rissinitiierung bestimmt. Da für die Warmumformung kein experimenteller Riss erzeugt wurde, konnte die Untersuchung hier nur bestimmen, ob die simulierten Schädigungswerte korrekterweise unter 100 Prozent liegen.

Bild 6 links unten zeigt, dass die Validierungssimulation der Warmumformversuche die kritische Stelle korrekt im Kern voraussagt und dort eine Schädigung nach Oyane von 22 Prozent und nach Johnson-Cook von 34 Prozent liefert. Da beide Werte weit unter den theoretischen 100 Prozent liegen, welche den Rissbeginn signalisieren, sagt die Modellierung korrekt voraus, dass kein Riss auftreten wird.

Wie Bild 6 rechts zeigt, lag die kritisch vorausgesagte Stelle in der Kaltumformung ebenfalls im Kern, wie experimentell bestätigt. Die simulierte Schädigung für das Mohr-Coulomb-Bruchkriterium lag bei experimentell ermitteltem Rissbeginn bei 94 Prozent. Das liegt sehr nah an den theoretischen 100 Prozent, die zu Rissbeginn angezeigt werden sollten. Im Gegensatz dazu lag das Johnson-Cook-Kriterium zu Rissbeginn nur bei knapp 50 Prozent. Es ist damit für die Versagensvoraussage in diesem Prozess deutlich ungenauer als das Mohr-Coulomb-Kriterium.

## FAZIT UND AUSBLICK

Für die Voraussage der Kernrissinitiierung bei Querwalzprozessen unter kalten Bedingungen scheint das Mohr-Coulomb-Modell sehr gut geeignet. Für die Warmumformung konnte korrekt vorausgesagt werden, dass kein Kernriss auftreten wird. Zur Feststellung, wie genau die beiden untersuchten Versagensmodelle der Warmumformung eine Kernrissinitiierung voraussagen, müssen Werkstoffe und Legierungen herangezogen werden, die auch in der Warmumformung zu Kernrissen führen.



- [1] Abschlussbericht zur Studie IMU 56, 2019
- [2] Zhang; X.-M.; Zeng, W.-D.; Ying; S.; Y.-G. Zhou; Y.-G.; Zhao, Y.-Q.; Huan; W.; Yu, H.-Q.: Fracturecriterion for predicting surface cracking of ti40 alloy in hot forming processes. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19(2):pp. 267–271, 2009
- [3] Alexandrov, S.; Wang, P.; Roadman, R.: A fracture criterion of aluminum alloys in hot metal forming. Journal of materials processing technology, 160(2): pp. 257–265, 2005
- [4] Johnson, G. R.; Cook, W. H.: Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering fracture mechanics, 21(1): pp. 31–48, 1985
- [5] Yuanli Bai; T. W.: Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture. International Journal of Fracture, 161, pp. 1–20, 2010



Folgenden Projektbeteiligten sei Dank für die Zusammenarbeit ausgesprochen: Die Hirschvogel Eisenach GmbH beschaffte das nötige Material, während die SMS Group die Probenfertigung sowie die Validierungssimulationen für 1.7139 übernahm. Die Validierungsexperimente für 1.7139 führte das LFM, Fachhochschule Südwestfalen durch. Die EJOT Gruppe führte Versuche und Experimente zur Validierung für 1.5525 durch. Alle übrigen Versuche, Simulationen und Auswertungen führte das IVP der ETH Zürich durch.