

Predicting Cracks with FEM – A Possibility to Increase the Quality of Cold Forged Components

The technological constraints of cold forming are defined by early material failure on component surfaces during the process. There are a number of approaches to predict this type of failure already. These are characterised by high prediction inaccuracy or great mathematical complexity though. An industrially applicable crack criterion for integrated prediction of surface cracks was developed in the tool machine laboratory WZL of RWTH Aachen, which allows companies in the cold forging industry to predict possible failure on surface components during the product design phase already. The development work was done in cooperation with renowned partners in the industry.

Rissvorhersage mit der FEM – Möglichkeit zur Steigerung der Qualität kaltmassivumgeformter Bauteile

Dipl.-Ing. Alexander Timmer,
Dr.-Ing. Björn Feldhaus und
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c.
Fritz Klocke, Aachen

Die technologischen Prozessgrenzen der Kaltmassivumformverfahren werden durch das frühzeitige Werkstoffversagen an Bauteiloberflächen während der Prozessdurchführung definiert. Zur Vorhersage dieser Versagensform existiert bereits eine Vielzahl

von Ansätzen, die sich jedoch durch eine hohe Vorhersagegenauigkeit oder eine hohe mathematische Komplexität auszeichnen. Daher wurde am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen ein industriell anwendbares Risskriterium zur ganzheitlichen Vorhersage von Oberflächenrissen entwickelt, welches es den Unternehmen der Kaltmassivumformbranche ermöglicht, bereits in der Produktauslegungsphase Aussagen über ein mögliches Versagen an der Bauteiloberfläche machen zu können. Die Entwicklungsarbeit erfolgte dabei in Zusammenarbeit mit namhaften Industriepartnern der Branche.

Trends in der Automobilindustrie

Die Prozesse der Kaltmassivumformung sind wirtschaftliche und ressourcenschonende Verfahren zur Großserienproduktion hochbeanspruchter Bauteile [1]. Der Hauptabnehmer von Kaltmassivumformbauteilen ist mit 70 Prozent an der Gesamtproduktionsmenge traditionell die Automobilindustrie. Aufgrund

eines gestiegenen ökologischen Verbraucherbewusstseins sowie aufgrund von Umweltauflagen seitens der Politik sieht sich diese bei der Entwicklung zukünftiger Mobilitätskonzepte mit Fragestellungen der Emissionsreduktion sowie Energieeffizienzsteigerung konfrontiert [2,3]. Lösungsansätze, um diesen Forderungen gerecht zu werden, sind unter

anderem die Teil- und Vollelektrifizierung des Antriebsstrangs in Form hybrider oder vollwertiger Elektroantriebe sowie die Optimierung des konventionellen Antriebsstrangs [4]. Weitere Lösungsansätze basieren auf der Gewichtsreduktion der verbauten Einzelkomponenten und damit auch kaltmassivumgeformter Bauteile. Eine Möglichkeit

zur Absenkung des Bauteilgewichts ist die Verwendung höherfester Stahlwerkstoffe, wodurch die Wandstärken der Bauteile dünnwandiger ausgelegt werden können. Nachteil dieser höherfesten Stahlwerkstoffe sind die vergleichsweise geringen Bruchdehnungen, infolge dessen ein frühzeitiges Werkstoffversagen noch während des Kaltmassivumformprozesses begünstigt wird. Neben der Verwendung höherfester Stahlwerkstoffe kann eine Gewichtsreduktion ebenfalls durch eine belastungsgerechte Anpassung der Bauteilgeometrie erreicht werden, wodurch Gewichtseinsparungen von bis zu 10 Prozent erzielt werden können [5]. Derart gestaltoptimierte Filigranbauteile zeichnen sich durch eine hohe Geometriekomplexität aus, wobei der umzuformende Werkstoff während der Prozessdurchführung lokal große plastische Dehnungen erfährt. Folglich liegt die Herausforderung für die Branche der Kaltmassivumformung in der Herstellung gewichtsoptimierter Filigranbauteile aus höherfesten Stahllegierungen, wobei die Wahrscheinlichkeit einer irreversiblen Werkstofftrennung zunimmt.

Formen des Werkstoffversagens in Kaltmassivumformprozessen

Das Formänderungsvermögen beschreibt allgemein die Fähigkeit eines Werkstoffs, plastische Formänderungen ohne eine irreversible Werkstofftrennung zu ertragen [6]. In Kaltmassivumformprozessen versagt der Werkstoff bei Erreichen des Formänderungsvermögens durch Zentralrisse im Bauteilinneren oder durch Oberflächenrisse, wobei sich letztere wiederum in Abhängigkeit der Orientierung in Längs- und Scherrisse unterteilen. Diese beiden Formen des Werkstoffversagens sind anhand von Kaltmassivumformbauteilen in Bild 1 dargestellt.

Als Zentralrisse werden periodisch auftretende, pfeilförmige Werkstofftrennungen im Bauteilinneren bezeichnet, welche bei ungünstiger Wahl von Prozessparametern und Werkzeuggeometrie während des Vollvorwärtsfließpressens entstehen. Grund für die Initiierung von Zentralrissen ist das Zusammenspiel von im Werkstoff vorhandenen Gefügeinhomogenitäten, wie beispielsweise karbidische oder sulfidische Einschlüsse, und sich während der Prozessdurchführung entlang der Bauteillängsachse ausbildenden hohen Zugspannungen. Infolge der hohen Zugspannungen wird der Werkstoffzusammenhalt lokal an den Gefügeinhomogenitäten aufgehoben, wodurch es zur Initiierung von Zentralrissen kommt, die bei fortschreitender Umformung weiter anwachsen [7].

Für die Mehrzahl der Kaltmassivumformprozesse versagt der Werkstoff jedoch während der Prozessdurchführung an der Bauteiloberfläche durch die Initiierung und das Wachstum von Oberflächenrissen

in Form von Längs- und/oder Scherrissen. Beide dieser Oberflächenrissarten sind als kritisch einzustufen, da die Oberflächen kaltmassivumgeformter Bauteile häufig Funktionsflächen darstellen und eine vollständige Bauteilfunktionserfüllung im Fall von Oberflächenrissen nicht mehr gewährleistet werden kann. Charakteristisches Merkmal von Längsrissen ist ihre parallele Ausrichtung zur Bauteillängsachse. Scherrisse verlaufen im Gegensatz dazu auf der Bauteiloberfläche unter 45° in Richtung der maximalen Oberflächenschubspannung [8], siehe Bild 1.

Qualität als Motivator für eine simulative Prozessauslegung

Aufgrund ihres häufigen Einsatzes in mechanisch und thermisch hochbelasteten Fahrzeugbereichen werden an die Oberflächen kaltmassivumgeformter Bauteile höchste Qualitätsanforderungen gestellt [9]. Werden diese durch die späteren Einsatzbedingungen definierten Qualitätsanforderungen durch an der Bauteiloberfläche vorhandene Risse nicht erfüllt, verlassen diese kaltmassivumgeformten Bauteile die Produktionskette als Ausschuss, wodurch die Effizienz des jeweiligen Kaltmassivumformprozesses beeinträchtigt wird. Da dem eigentlichen Kaltmassivumformprozess ferner zahlreiche wertschöpfende Teilprozessschritte vorgelagert sind, reduziert sich dadurch ebenfalls die Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette. Zur Steigerung von Prozesseffizienz und -wirtschaftlichkeit werden risskritische Kaltmassivumformprozesse vor Anlauf der Serienproduktion simulativ mittels der Finite Elemente Methode (FEM) ausgelegt. Neben der Vorhersage von Werkstofffluss und Werkzeugbelastung ist die frühzeitige Erkennung risskritischer Oberflächenbereiche und Zeitpunkte während der Prozessdurchführung die zentrale Aufgabe der simulativen Prozessauslegung [10]. Dazu wurden bereits zahlreiche Risskriterien entwickelt und in kommerzielle FEM-Programme implementiert, welche sich jedoch entweder durch eine hohe mathematische Komplexität, eine hohe Vorhersagegenauigkeit oder durch eine erforderliche, zeit- und kostenintensive Bestimmung von Werkstoffkonstanten auszeichnen.

Defizite derzeitiger Risskriterien

Die gegenwärtig verfügbaren Risskriterien unterteilen sich allgemein in die Gruppe der makro- und mikromechanischen Risskriterien [11]. Beide Gruppen von Risskriterien beruhen auf integralen Spannungs-Dehnungs-Zusammenhängen, über welche ein sogenannter Schädigungswert berechnet wird. Wird für das jeweilige Risskriterium während der FEM-Simulation ein werkstoffspezifischer kritischer Schädigungswert erreicht, ist das Formänderungsvermögen des Werkstoffs erschöpft und es kommt der Theorie nach zu einer lokalen, irreversiblen Werkstofftrennung an der Bauteiloberfläche [12]. Zur Bestimmung des

kritischen Schädigungswerts wird der Werkstoff in einfach durchzuführenden Analogieversuchen, beispielsweise Stauch- oder Zugversuchen, bis zur Erreichung des Formänderungsvermögens umgeformt und mittels FEM der dazugehörige kritische Schädigungswert berechnet. Dieser wird nachfolgend als numerisches Äquivalent zur Beschreibung der Rissneigung des umzuformenden Werkstoffs bei der Auslegung komplexer Realprozesse herangezogen.

Die Vorhersagegenauigkeit der derzeit verfügbaren Risskriterien ist mit Abweichungen von teilweise 80 Prozent als nicht ausreichend zu bezeichnen [13]. Grund für diese großen

Abweichungen ist, dass Oberflächenrisse, ungeachtet ihrer hohen Relevanz für die Prozesse der Kaltmassivumformung, bis dato bei der Entwicklung von Risskriterien nicht ausreichend berücksichtigt wurden. So wird in den momentan verwendeten Risskriterien weder phänomenologisch zwischen den Rissarten Längs- und Scherrissen noch zeitlich zwischen den Rissphasen Initiierung und Wachstum differenziert. Unabhängig von Rissart und -phase wird derzeit zur Vorhersage von Oberflächenrisen ein und derselbe funktionale Zusammenhang verwendet [14]. Als unmittelbare Folge dieser Annahme kann das Werkstoffversagen an Bauteiloberflächen in Kaltmassivumformprozessen bisher nur mit

hohen Ungenauigkeiten vorhergesagt werden. Eine simulative Prozessauslegung mit dem Ziel, risskritische Kaltmassivumformprozesse bereits vor Anlauf der Serienfertigung rissfrei auszulegen, ist in der industriellen Praxis gegenwärtig nur eingeschränkt möglich. Folglich beruht die Auslegung industrieller, mehrstufiger Kaltmassivumformprozesse immer noch zu einem Großteil auf dem empirisch gesammelten Wissen erfahrener Mitarbeiter des Unternehmens.

Ganzheitliche Rissvorhersage: Entwicklungsansatz und Vorgehensweise

Um dieser Problemstellung nachzukommen, wurde am Werkzeugmaschinenlabor WZL der

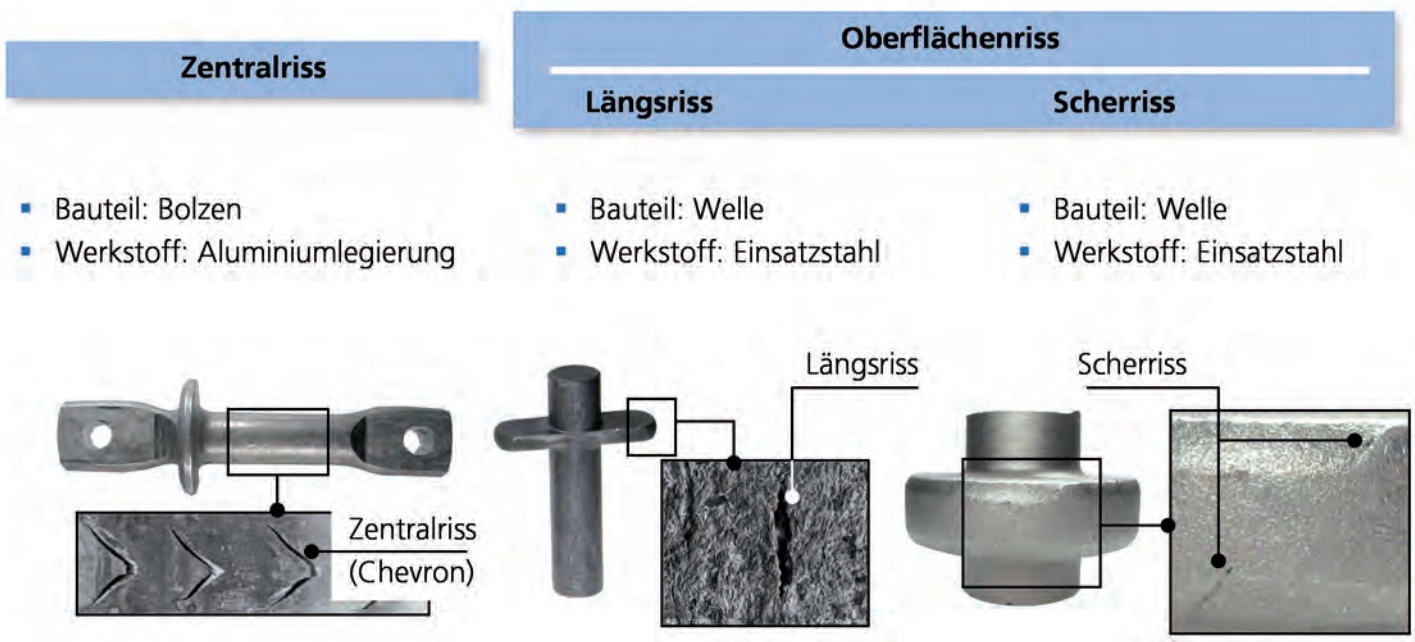


Bild 1: Formen des Werkstoffversagens.

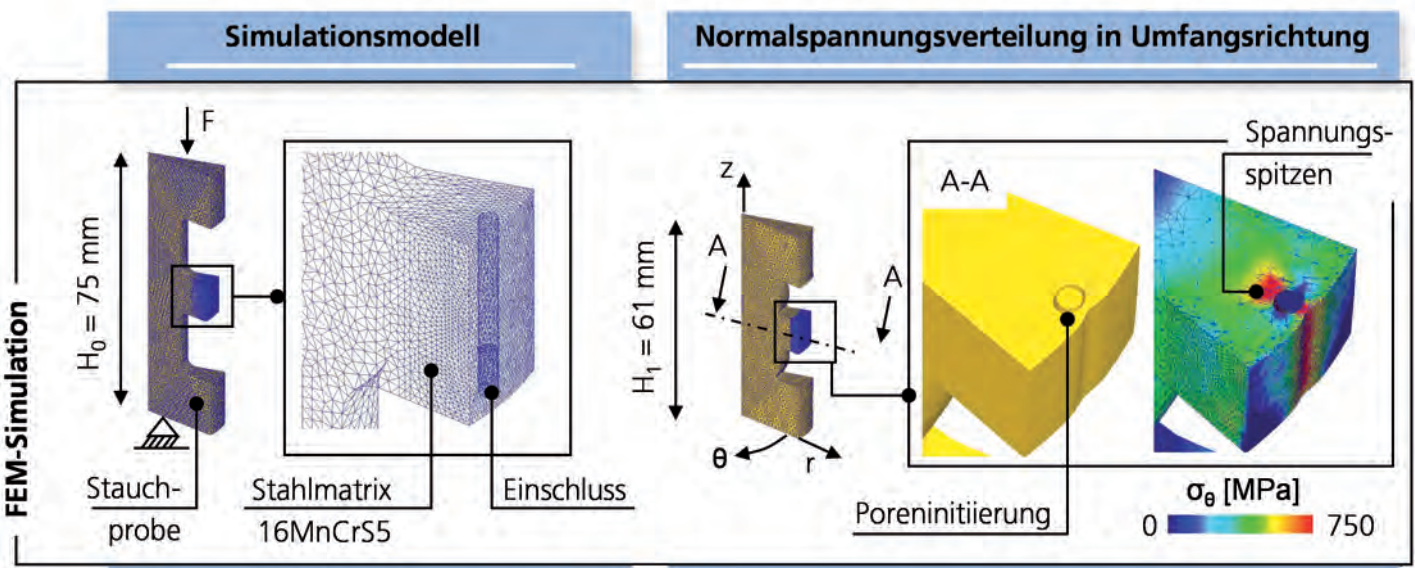


Bild 2: Einfluss von Einschlüssen auf den Spannungszustand.

RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit namhaften Vertretern der Kaltmassivumformbranche ein Risskriterium entwickelt, mit welchem bereits in der Produktauslegungsphase örtlich aufgelöst Aussagen über die während der Prozessdurchführung zu erwartende Oberflächenschädigung gemacht werden können. Ferner erlaubt der entwickelte Ansatz erstmals auch die prozentuale Zusammensetzung der Oberflächenschädigung aus Längs- und Scherrissen vorherzusagen. Das Risskriterium wurde exemplarisch für den häufig für Kaltmassivumformanwendungen eingesetzten Einsatzstahl 16MnCrS5 entwickelt.

Allgemeine Voraussetzung für die Entwicklung eines ganzheitlichen Risskriteriums ist, dass sowohl für Längs- als auch für Scherrisse zunächst die während der Initiierungs- und Wachstumsphase ablaufenden, grundlegenden Schädigungsvorgänge erkannt und verstanden werden. Erst durch den Aufbau dieses Grundlagenverständnisses ist es möglich, spezifisch für die jeweilige Rissart und -phase die maßgeblichen und relevanten Spannungsgrößen zu identifizieren. Aus diesen Spannungsgrößen wird nachfolgend über einen funktionalen Zusammenhang die experimentell zu erwartende Oberflächenschädigung berechnet. Um die relevanten mechanischen Größen benennen zu können, ist die Durchführung von experimentellen und simulativen Grundlagenuntersuchungen erforderlich. Dazu wurden für den untersuchten Einsatzstahl Stauchversuche und entsprechende FEM-Simulationen durchgeführt.

Im Rahmen dieser Grundlagenuntersuchungen konnte anhand von FEM-Simulationen nachgewiesen werden, dass sich während des Umformprozesses an Einschlüssen in der Randzone Spannungskonzentrationen in Umfangsrichtung ausbilden, siehe Bild 2. Diese lokalen, tangentialen Spannungsspitzen bewirken bei weiterer Umformung ein Ablösen der Stahlmatrix vom Einschluss und damit die Initiierung von Poren, welche sich in Richtung der Bauteiloberfläche ausbreiten. Erreicht die Pore die Bauteiloberfläche, versagt diese, wodurch Längsrisse an der Bauteiloberfläche sichtbar werden und sich nachfolgend bei fortschreitender Umformung weiter ausbreiten.

Ferner wurde der Vorgang der Scherrissinitiierung grundlegend untersucht. Anhand von FEM-Simulationen und ergänzend durchgeführten experimentellen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Initiierung von Scherrissen durch Spannungsspitzen der an der Oberfläche wirkenden maximalen Schubspannung begünstigt wird, siehe Bild 3. Grund für die Entstehung dieser inhomogenen Schubspannungsverteilung ist die Oberflächentopographie, die sich beispielsweise als Folge einer Dreh- oder Kugelstrahlbehandlung auf der Bauteiloberfläche ausbildet. Die Span-

nungsüberhöhungen verlaufen dabei unter 45° auf der Bauteiloberfläche, woraus sich der charakteristische Oberflächenverlauf der Scherrisse ergibt.

Zusätzlich zur Initiierungsphase wurden für beide Oberflächenrissarten auch die relevanten Spannungsgrößen der Wachstumsphase identifiziert. So konnte anhand von FEM-Simulationen gezeigt werden, dass das Wachstum von Oberflächenrissen allgemein durch die an der Bauteiloberfläche wirkende mittlere Normalspannung sowie maximale Schubspannung beeinflusst wird. Die aus den Grundlagenuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurden nachfolgend zu einem Risskriterium verdichtet, in welchem aus den zuvor identifizierten Spannungsgrößen die experimentell zu erwartende Oberflächenschädigung berechnet wird. Zusätzlich wird für die rissbehaftete Bauteiloberfläche der Längs- und Scherrissanteil berechnet, sodass zusätzlich Aussagen über die prozentuale Schädigungszusammensetzung der Bauteiloberfläche gemacht werden können.

Anwendung auf mehrstufige, industrielle Kaltmassivumformprozesse

Zur Gewährleistung einer industriellen Anwendbarkeit wurde das entwickelte Risskriterium in das FEM-Softwarepaket DEFORM™ implementiert und unter anderem auf einen mehrstufigen, zweidimensionalen Prozess der ZF Sachs AG zur Herstellung eines Führungszapfens angewendet. Bei diesem Kaltmassivumformbauteil handelt es sich um ein rotationssymmetrisches Net-Shape-Bauteil, welches im Motorraum bei der Montage von Motor und Getriebe zur Lagepositionierung verwendet wird. Während der Produktauslegungsphase des Führungszapfens wurde ein vorläufiges Versuchswerkzeug, bestehend aus den ersten drei Umformstufen Vollvorwärtsfließpressen, Weiten und Querfließpressen, entwickelt und unter Produktionsbedingungen erprobt. Die im Rahmen dieser Erprobung gefertigten Führungszapfen wurden anschließend mikroskopisch analysiert, um die prozentuale Oberflächenschädigung experimentell zu ermitteln. Begleitend zu diesen experimentellen Untersuchungen wurde der dreistufige Kaltmassivumformprozess mit der FEM simuliert und über das entwickelte Risskriterium die während der Prozessdurchführung zu erwartende Oberflächenschädigung vorhergesagt. Den Vergleich von berechneten Vorhersageergebnissen und experimentellen Versuchsergebnissen zeigt Bild 4.

Die maximale Oberflächenschädigung wird für den Führungszapfen mit 9,48 Prozent im oberen Flanschbereich am Übergang zur Stirnseite berechnet. Hinsichtlich der Schädigungszusammensetzung wird der Längsrissanteil an der Oberflächenschädigung zu 99,94

Prozent vorhergesagt. In der nachfolgenden mikroskopischen Untersuchung wurde die maximale Oberflächenschädigung des Führungszapfens für den oberen Flanschbereich

mit 9,5 Prozent ermittelt. Der dazugehörige Längsrisanteil an der Oberflächenschädigung wurde ferner zu 100 Prozent bestimmt. Über das entwickelte Risskriterium konnte damit

der Ort der maximalen Oberflächenschädigung für den Führungszapfen exakt vorhergesagt werden. Hinsichtlich Schädigungsausmaß und -zusammensetzung liegen die Abwei-

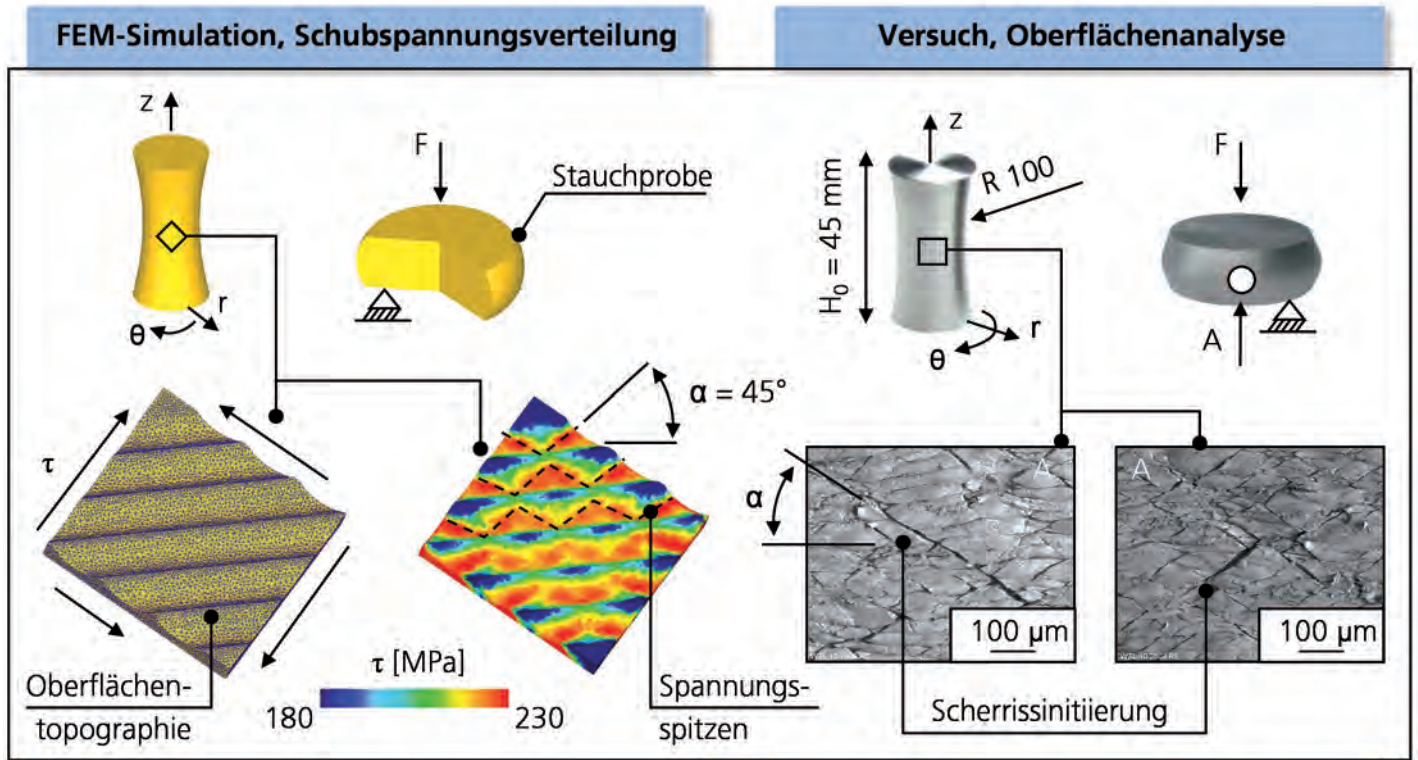


Bild 3: Einfluss der Oberflächentopographie auf den Spannungszustand.

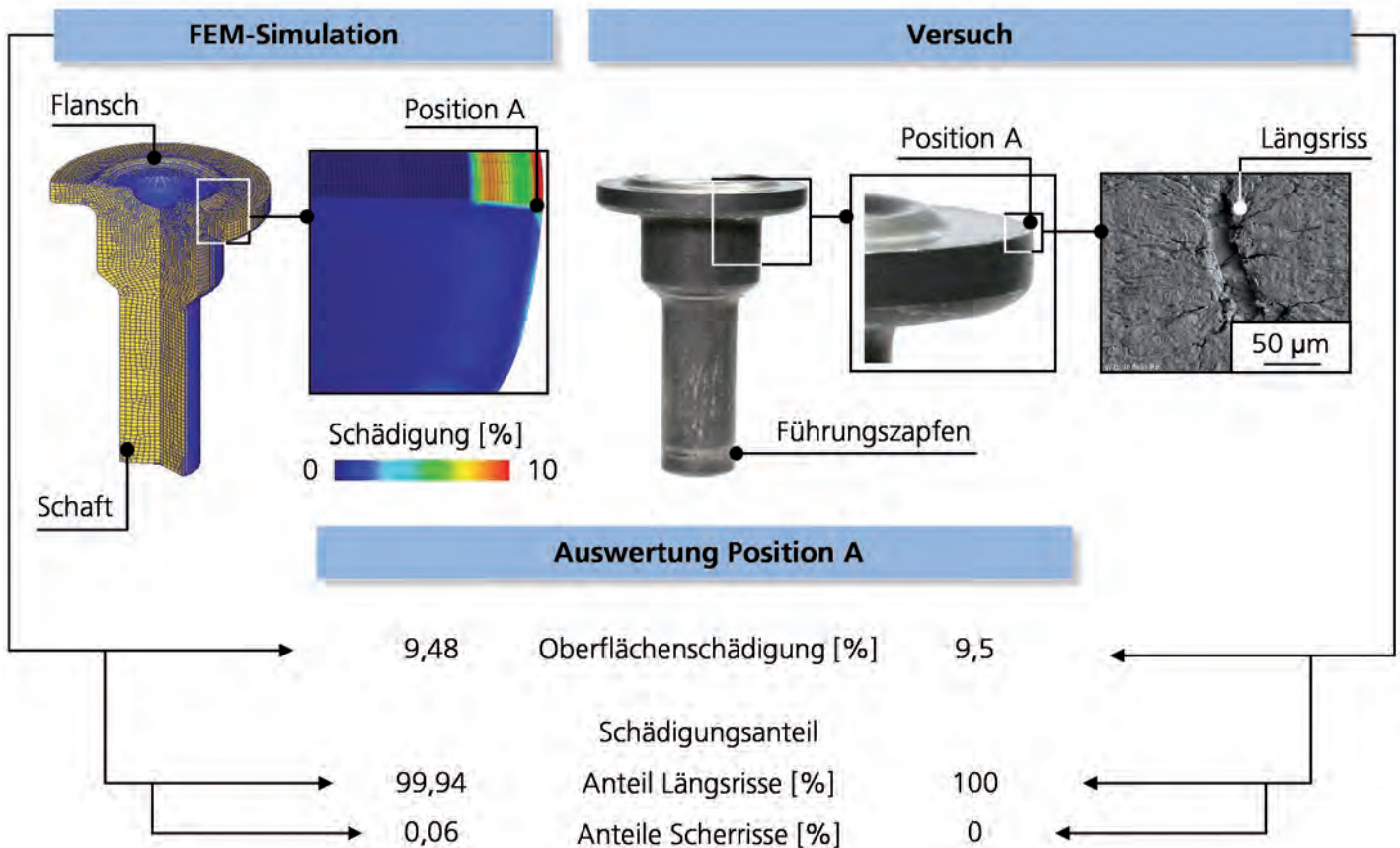


Bild 4: Ganzheitliche Rissvorhersage für einen Führungszapfen.

Bilder: Autoren

chungen im Hundertstelprozentbereich und sind damit vernachlässigbar klein. Auf Grundlage der simulativ und experimentell nachgewiesenen Oberflächenschädigung wurde das vorläufige Werkzeugkonzept zur Herstellung des Führungszapfens anschließend iterativ optimiert, sodass gegenwärtig in der Serienproduktion Führungszapfen mit rissfreien Flanschoberflächen gefertigt werden können. Neben diesem Kaltmassivumformprozess konnte das Risskriterium ferner auf weitere mehrstufige, rotationssymmetrische Industrieerzeugnisse erfolgreich angewendet werden. Folglich steht mit dem entwickelten Risskriterium ein Ansatz zur Verfügung, der für die Prozesse der Kaltmassivumformung eine ganzheitliche Vorhersage von Oberflächenschäden hinsichtlich Ausmaß, Ort und Zusammensetzung der Schädigung erlaubt. Ferner bildet der entwickelte Ansatz über die ganzheitliche Rissvorhersage die Grundlage für die Anpassung und Optimierung bestehender, risskritischer Kaltmassivumformpro-

Danksagung

Die Entwicklung des vorgestellten Risskriteriums erfolgte im Rahmen des AVIF-Projekts A 263. Die Autoren bedanken sich für die Projektförderung bei der gemeinnützigen Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. über den Wirtschaftsverband Stahl- und Metallverarbeitung e. V. WSM und die umfassende Unterstützung durch den projektbegleitenden Ausschuss der German Cold Forging Group (GCFG). Die Langfassung des Abschlussberichtes kann über die Forschungsgesellschaft Stahlverformung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Dipl.-Ing.
Alexander Timmer

zesse. Durch die damit einhergehende Reduktion des Ausschussanteils an der Gesamtproduktionsmenge trägt das Risskriterium maßgeblich zur Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette bei. ■



Dr.-Ing. Björn Feldhaus



Professor Fritz Klocke

Literatur

[1] Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: Einführung in die Fertigungstechnik, 6. Auflage. B. G. Teubner, Stuttgart, 2004

[2] Brühl, J. et al.: Nachhaltige Produktion. In: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik Aachener Perspektiven, AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium 2011. Aachen, 2011

[3] Liewald, M. et al.: State-of-the-Art and Recent Developments in Cold Forging Technology in Europe. In: Proceeding of the 43rd ICFG Plenary Meeting 2010, Darmstadt, Germany. 2010

[4] Malorny, C.; Müller, N.; Wüllenweber, J.: Implikationen der energieeffizienten Mobilität – Chancen und Herausforderungen der deutschen Automobilindustrie. In: Schmiede-Journal. September 2009, S. 18-24

[5] Lindner, G.; Pischel, W.; Schmieder, F.: Leichtbaupraxis. In: Schmiede-Journal. September 2005, S. 34-36

[6] VDI-Richtlinie 3137: Begriffe, Benennungen, Kenngrößen des Umformens. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, Januar 1976

[7] Soyarslan, C; Tekkaya, A. E.: Versagen beim Voll-Vorwärtsfließpressen. In: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung. 2009

[8] Klocke, F.; Timmer, A.; Schongen, F.: Investigation of Surface Crack Types under Axial Compression Loading for a Casehardening Steel. In: Key Engineering Materials. Vol. 452-453 (2011), S. 741-744

[9] Dixit, U. S.; Joshi, S. N.; Davim, J. P.: Incorporation of Material Behavior Modeling of Metal Forming and Machining Processes: A Review. In: Materials and Design. Vol. 32 (2011), S. 3655-3670

[10] Altan, T.; Ngaile, G.; Shen, G.: Cold and Hot Forging, Fundamentals and Applications. ASM International, Ohio, 2005

[11] Breuer, D.: Bestimmung des Formänderungsvermögens bei der Kaltmassivumformung. Dissertation, RWTH Aachen, 2007

[12] Xue, L.: Ductile Fracture Modeling – Theory, Experimental Investigation and Numerical Verification. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2007

[13] Landgrebe, D.: Bestimmung der Formänderungsgrenzen durch duktilen Werkstoffversagen bei Kaltumformverfahren mit Hilfe der FEM. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, 1999

[14] Klocke, F.; Timmer, A.; Bäcker, V.: Crack Prediction in Cold Forging Operations Through a Phenomenological Differentiation of Crack Types. In: Proceedings 12th International Cold Forging Congress (CIRP). Stuttgart, 2011