

# Multiinstrumentelle zerstörungsfreie Analyse der lokalen Wasserstoffeffusion im Vergütungsstahl 42CrMo4

M. von Pavel<sup>1,2</sup>, G. Manke<sup>3</sup>, M. Pohl<sup>3,4</sup>, F. Walther<sup>1</sup>

matthias.vonpavel@tu-dortmund.de

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Werkstoffprüfungstechnik (WPT), TU Dortmund;

<sup>2</sup> RIF, Institut für Forschung und Transfer e.V., Dortmund; <sup>3</sup> Euro-Labor GmbH, Bochum;

<sup>4</sup> Institut für Werkstoffe - Werkstoffprüfung, Ruhr-Universität Bochum

Vergütungsstähle werden häufig zur Konstruktion hochbelasteter Bauteile eingesetzt. Kommen diese Stähle in Kontakt mit Wasserstoff und dringt dieser in das Gefüge ein, kann es zu einem frühzeitigen Versagen kommen [1]. Bereits Wasserstoffgehalte < 1 ppm können sich bei hochfesten kubisch-raumzentrierten Stählen kritisch auswirken [2]. Für den Wandel zu einer wasserstoffbasierten Wirtschaft sind daher zerstörungsfreie Analyseverfahren notwendig, die neben der lokalen Wasserstoffkonzentration auch die hervorgerufene Schädigung im Gefüge bewerten. Verfahren, wie bspw. die TDMS, sind hierzu nicht in der Lage, da sie einerseits zerstörend sind und andererseits nur eine integrale Wasserstoffkonzentration bestimmen.

Es wird eine alternative zerstörungsfreie Methode zur Analyse der Wasserstoffkonzentration vorgestellt. Zunächst werden Proben aus dem Vergütungsstahl 42CrMo4 im vergüteten und normalisierten Wärmebehandlungszustand elektrochemisch mit Wasserstoff beladen. Während der anschließenden Wasserstoffeffusion an Luft erfolgt eine quantitative Analyse der lokalen Wasserstoffkonzentration mit einer elektrochemischen Messzelle, der Local Hydrogen Analysis (LHA) [3]. Durch mikromagnetische Sensoren wird qualitativ der Einfluss von Wasserstoff auf die Mikrostruktur untersucht. Eigenspannungen werden in  $\cos(\alpha)$ -Röntgenbeugungsmessungen ermittelt. Die Ergebnisse der LHA zeigen eine exponentielle Abnahme der Wasserstoffkonzentration. Das Verhalten lässt sich durch die Wirbelstromamplitude und -phase nachvollziehen, die mit unterschiedlichen Wasserstoffkonzentrationen im Stahl korrelieren.

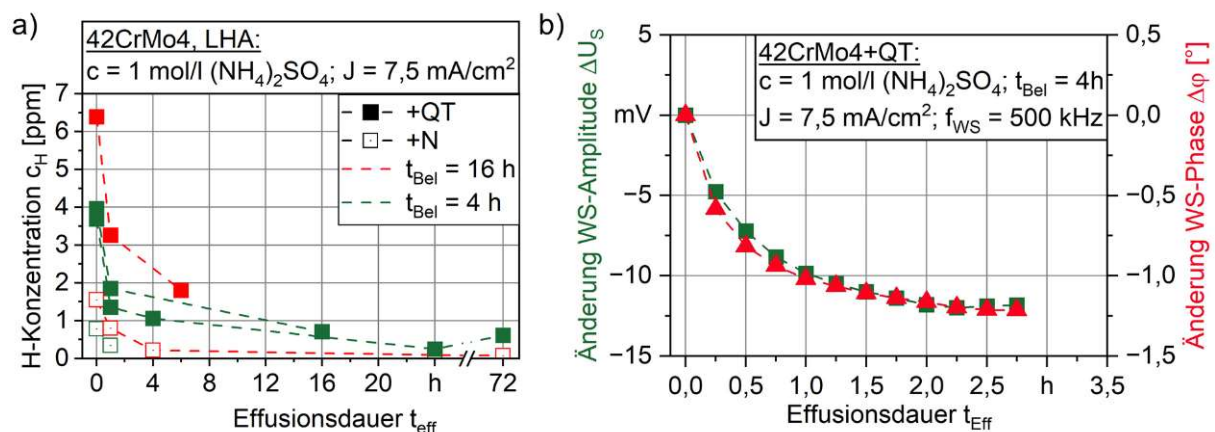


Abbildung 1: a) Abnahme der lokalen Wasserstoffkonzentration in Abhängigkeit der Effusionsdauer, der Beladedauer und der Gefügestruktur; b) Änderung der Wirbelstromamplitude und -phase in Abhängigkeit der Effusionsdauer.

- [1] Donnerbauer, K.; Nickel, T.; von Pavel, M.; Otto, J.; Gerdes, L.; Roza Vasquez, J.; Lingnau, L.; Koch, A. Walther, F.: Methodology for hydrogen-assisted fatigue testing using in situ cathodic charging. Accepted. Materials 2025.
- [2] Jürgensen, J.; Pohl, M.: Impact and Detection of Hydrogen in Metals. HTM Journal of Heat Treatment and Materials 78, 5 (2023) 257–275. <https://doi.org/10.1515/htm-2023-0020>
- [3] Manke, G.; Jürgensen, J.; Pohl, M.: Development of an In Situ Measuring Cell to Non-Destructive, Local Measurement of Diffusible Hydrogen Content in Steels. Proceedings of the 2016 International Hydrogen Conference (2017) 440–445. [https://doi.org/10.1115/1.861387\\_ch49](https://doi.org/10.1115/1.861387_ch49)

# **Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion an höchstfesten Spannstählen**

**N. Maczionsek, M. Pohl**

Institut für Werkstoffe, Ruhr-Universität Bochum

Spannbetonbauten, insbesondere Brücken, sind durch steigendes Verkehrsaufkommen zunehmend belastet. Allein in Deutschland sind etwa 4500 Großbrücken sanierungsbedürftig. Für diese Konstruktionen wird hochfester Spannstahl verwendet, der in verschiedenen Formen (Spannstahlstab, Spannstahldraht, Spannstahlritze) nach DIN EN 10138 mit Festigkeiten bis 2160 MPa eingesetzt wird.

Obwohl die Spannstähle im alkalischen Milieu des Betons vor Korrosion geschützt sind, können sie durch das ungünstige Zusammenwirken von empfindlichem Werkstoff, hinreichend hohen Spannungen und korrosivem Medium durch kathodische Spannungsrisskorrosion versagen.

International sind Spannstähle mit Festigkeiten bis zu 2360 MPa erhältlich, deren Resistenz gegenüber Wasserstoffversprödung ist jedoch weitgehend unerforscht. Werkstoffuntersuchungen sollen klären, ob höhere Festigkeiten das Risiko einer Wasserstoffversprödung steigern und welche Standfestigkeitsreserven bestehen. Aus diesem Grund werden mechanische Tests und mikroanalytische Untersuchungen durchgeführt, um die Schädigungsmechanismen und kritischen Wasserstoffniveaus im Material zu analysieren.

# Automated Sample Extraction and Semantic Segmentation of industrial Charpy V-notch specimens

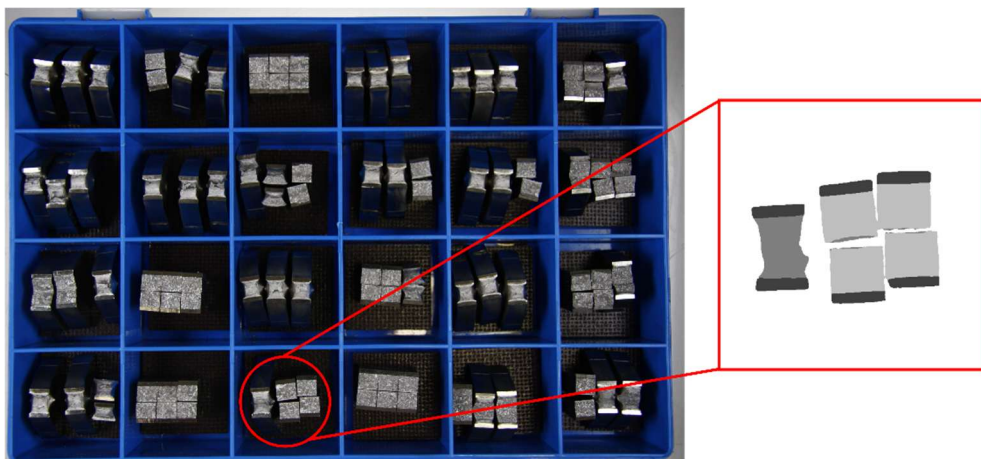
A. Herges<sup>1,2,\*</sup>, B.-I. Bachmann<sup>1,2</sup>, S. Scholl<sup>3</sup>, F. Mücklich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Functional Materials, Saarland University, 66123 Saarbrücken, Germany

<sup>2</sup> Material Engineering Center Saarland, 66123 Saarbrücken, Germany

<sup>3</sup> AG der Dillinger Hüttenwerke, 66763 Dillingen, Germany

In this poster a novel workflow for the automated analysis of Charpy V-notch impact test specimens using semantic segmentation, postprocessing, and pixel-wise evaluation is presented. The workflow begins with the extraction of individual sample bundles, each containing three specimens of one material, sampling position in the weld and same test temperature in one compartment of a sample box. These bundles are identified from digital images of industrial sample boxes, overcoming challenges such as varying lighting and sharpness. With recent advances in machine learning for fractography [1], this work applies semantic segmentation, using a DenseNet backbone, to the extracted sample bundles to evaluate fracture surfaces. The algorithm demonstrates high accuracy in segmenting sample bundles as well as individual samples after postprocessing. Furthermore, pixel-wise evaluation of the segmentation results compared to ground truth evaluations of experts not only offers deeper insights into the algorithm's performance but also reveals potential biases in the segmentation process. This approach bridges the gap between previous work on small-scale, high-resolution specimen imaging and the challenges posed by large-scale, industrial sample processing using lower-resolution images. The findings emphasize the importance of robust evaluation strategies in developing machine learning methods for automated material characterization workflows.



**Figure 1:** Sample Bundle Extraction and Semantic Segmentation of Charpy V-notch specimens in a sample box.

## References:

[1] J. Rosenberger, J. Tlatlik, and S. Münstermann, "Deep learning based initial crack size measurements utilizing macroscale fracture surface segmentation," *Eng Fract Mech*, vol. 293, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.engfracmech.2023.109686.

# Fraktographische Erscheinung wasserstoffinduzierter Brüche

J. Jürgensen\*, M. Pohl

Institut für Werkstoffe, Ruhr-Universität Bochum, [\\*juergensen@wp.rub.de](mailto:juergensen@wp.rub.de)

Nicht zuletzt durch die zunehmende Bedeutung von Wasserstoff als klimaneutraler Energieträger kommen immer mehr Werkstoffgruppen in Kontakt mit Wasserstoff. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, dezidierte Werkstoffprüfungen unter Einfluss von Wasserstoff durchzuführen, um sicherzustellen, dass auch bei erhöhter Temperatur und hohem Druck keinesfalls wasserstoffinduzierte Rissbildung (Wasserstoffversprödung) eintritt. Wasserstoffversprödung führt zu einer signifikanten Verschlechterung der mechanischen Kennwerte, im Extremfall sogar zum Bruch in der elastischen Geraden und damit zum spontanen Bauteilversagen.

Das Poster gibt eine Übersicht der fraktographischen Erscheinung von wasserstoffinduzierten Brüchen an unterschiedlichen metallischen Werkstoffen. Hierzu wurden die **Tab. 1** aufgeführten Werkstoffe mit Wasserstoff beladen und im Slow Strain Rate Test bis zum Bruch belastet. Anschließend wurden die Bruchflächen fraktographisch im Rasterelektronenmikroskop betrachtet und mit wasserstofffreien Referenzproben verglichen.

An allen Werkstoffen wurde eine z.T. signifikante Beeinflussung der mechanischen Kennwerte infolge der Wasserstoffbeladung beobachtet. Analog dazu zeigen die dokumentierten Bruchstrukturen eine spezifische Abhängigkeit vom Werkstoff und dessen Festigkeit sowie der Gitterstruktur.

**Tab. 1:** Übersicht des Versuchsprogramms

Nr.	Werkstoff	Beladung	Beladeparameter	Diffusibler Wasserstoff
1	Kohlenstoffstahl C60E – Ferrit-Perlit	Elektrochemisch	1 mol $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $I_D = -10 \text{ mA/cm}^2$ $t = 4 \text{ h}$	0,88 ppm
2	Kohlenstoffstahl C60E – vergütet			1,24 ppm
3	Kohlenstoffstahl C60E – bainitisch			2,31 ppm
4	Gusseisen GJS-400-16	Druckwasserstoff	150 bar, 150 °C, 7 d	1,30 ppm
5	Duplex-Stahl X2CrNiMoN22-5-3		280 bar, 250 °C, 28 d	17,20 ppm
6	Austenitischer Stahl X6CrNiTi18-10		100 bar, 350 °C, 28 d	28,20 ppm
7	CoCr-Legierung		275 bar, 150 °C, 21 d	2,30 ppm

# CPFEM-Berechnungen zur mehrachsigen Ermüdung des austenitischen Edelstahls P558

**T. Ngeru, S. Hanke**

Materials Science and Engineering, Institute for Metal Technologies, University of  
Duisburg-Essen, Lotharstraße 1, 47057 Duisburg, Germany

Die meisten Komponenten in Betrieb erleben komplex gestaltete Spannungszustände mit mehreren Achsen. Dennoch werden die meisten Ermüdungsversuche zur Analyse der Rissbildung in einem einachsigen Zugversuch durchgeführt, da multiaxiale Ermüdungsversuche nicht nur teuer sind, sondern auch spezielle Geräte und Proben erfordern. Um die begrenzte Verfügbarkeit von experimentellen Daten zu adressieren, wird in dieser Studie der Konzept der Ermüdungsindikatorparameter (FIPs) als stellvertretermaße für die treibende Kraft zur Bildung von Ermüdungsrissen auf der Skala eines Schadensprozesszone eingesetzt. Zwei Arten von FIPs werden in dieser Studie verwendet: der Fatemi-Socie-FIP, der gut geeignet ist, um die Ermüdungsrissbildung und das frühe Wachstum der treibenden Kräfte entlang der Gleitspuren zu erfassen, und den FIP der Kornrandimpingement, der die Ansammlung irreversibler plastischer Scherdehnung an einem Kornrand und die Normalspannung an diesem Kornrand berücksichtigt.

Da nur die höchsten Magnituden der FIPs von Interesse sind, da sie die höchsten assoziierten treibenden Kräfte für die Bildung von Ermüdungsrissen aufweisen, werden Extremwertverteilungen (EVDs) der FIPs berechnet. Die Gumbel-EVD ist als geeignet für diese Charakterisierung nachgewiesen worden.

Mikrostruktur-sensitive Kristallplastizität-Finite-Elemente-Methode (CPFEM) Modelle mit spezifischen Kornmorphologien und -texturen werden auf P558 austenitischen Stahl (BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG) angewendet, der zuvor unter verschiedenen Belastungsbedingungen (reiner Torsion, einachsiger Ermüdungsversuch und biaxialer Ermüdungsversuch) [1] experimentell getestet wurde.

Eine Menge von Iso-Lebenslinien im Gamma-Flächenraum wird generiert, die eine Reihe von möglichen multiaxialen Dehnungszuständen berücksichtigt. Diese Studie unterstreicht die Bedeutung der Anwendung von FIPs zur Analyse der multiaxialen Ermüdungsverhalten von austenitischen Stählen, die für die Komponentenentwicklung und Sicherheit von wesentlicher Bedeutung ist. Die Ergebnisse dieser Studie können verwendet werden, um genaue und zuverlässige Ermüdungslebensdauervorhersagen für komplexe Belastungsbedingungen zu entwickeln.

[1] Ngeru, T.; Kurtulan, D.; Hanke, S.: Mechanical Behavior and Life Prediction of a Low Nickel/High Nitrogen Austenitic Steel under Pure Torsion, Uniaxial Tension-Compression, and Multiaxial Fatigue. In: Materials Performance and Characterization 13/1 (2024) 20230065. DOI: 10.1520/MPC20230065

# Fraktographische Untersuchung von Ermüdungsbruchflächen unter dem Einfluss von Wasserstoff

M. Kucher, M. Graf, A.S. Jelinek

Department Werkstoffwissenschaften, Montanuniversität Leoben

Angesichts der zunehmenden Nutzung von Wasserstoff in der Energiewirtschaft ist ein fundiertes Verständnis der Wasserstoffversprödung essenziell, um die Sicherheit von Materialien unter realen Einsatzbedingungen zu gewährleisten. Für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit, ist daher eine Evaluierung unter in-situ Wasserstoffbeladung erforderlich. Hierfür wurde eine elektrochemische in-situ Wasserstoffbeladung in einem Ermüdungsprüfstand implementiert (siehe Abbildung 1), um die Auswirkungen von Wasserstoff auf die Ermüdungsfestigkeit eines weichmartensitischen Stahls 1.4313 (X3CrNiMo13-4) zu analysieren. Die Ermüdungsversuche wurden bei einem Spannungsverhältnis von  $R=0,1$  und einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Die elektrochemische Beladung erfolgte mittels 2-Elektroden-Setup und 22% NaCl-Lösung mit 1 g/l Thiourea bei 50°C. Neben der Ermittlung der Bruchlastspielzahl, wurde das Hauptaugenmerk auf die fraktographische Untersuchung der Ermüdungsbruchflächen mittels Rasterelektronenmikroskopie gelegt. Die Bruchflächen zeigten typische Merkmale der Wasserstoffversprödung, darunter wasserstoffinduzierte Sprödbrüche mit „klaffenden“ Korngrenzen, duktil verformte Haarlinien („Krähenfüße“) an den Kornflächen und transkristalline „gefiederte“ Anteile, sowie Anzeichen von Quasispaltbruchs. Diese Ergebnisse bestätigen die zuverlässige Funktionsweise des entwickelten Setups, das sich somit für weiterführende Untersuchungen eignet.

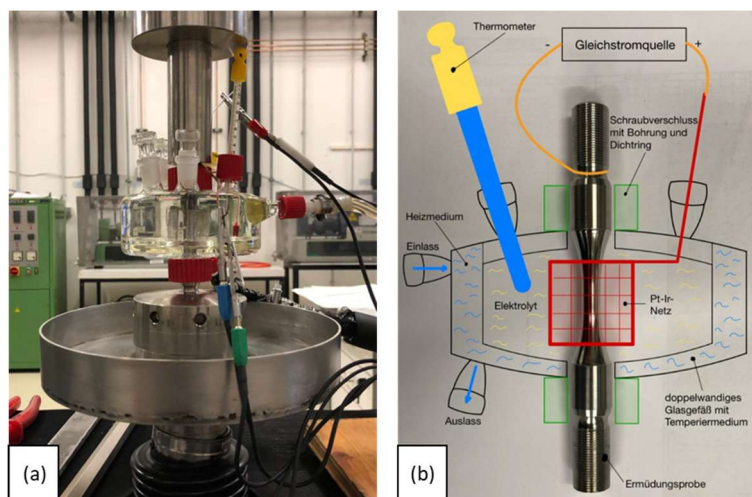


Abbildung 1: Realer Versuchsaufbau mit der implementierten Beladungszelle (a) und eine schematische Skizze des Versuchsaufbaus (b).

# **Der Böschungsschnitt mittels Ionenstrahl – er schließt die Lücke zwischen metallographischem Schliff und der Präparation mittels Focused Ion Beam (FIB)**

**C. Legner, K. Pfeffer, R. Bretzler**

fem Forschungsinstitut; Katharinenstraße 13–17; 73525 Schwäbisch Gmünd; Deutschland

In der Schadens- und Werkstoffuntersuchung ist die präzise Analyse von Mikrostrukturen entscheidend für das Verständnis der Eigenschaften von Materialien. Böschungsschnitte, die durch den Einsatz von Ar-Ionenstrahlen erzeugt werden, stellen eine innovative Methode dar, die als Übergangstechnik zwischen traditionellen metallographischen Schliffen und der hochpräzisen Präparation mittels Focused Ion Beam (FIB) fungiert. Diese Technik ermöglicht es, die Querschnittfläche mittels REM/EDX bei hoher Auflösung zu untersuchen, während sie gleichzeitig die Vorteile der schnellen Probenvorbereitung und der Erhaltung der Materialintegrität bietet. Durch den kontrollierten Abtrag von Material mittels Ionenstrahlen können detaillierte Einblicke in die Mikrostruktur und die Phasenverteilung gewährt werden, was für die Charakterisierung der Werkstoffe von großer Bedeutung ist. Der vorliegende Poster-Beitrag beleuchtet die Methodik des Böschungsschnitts, vergleicht sie mit den herkömmlichen metallographischen Verfahren und der Präparation von FIB-Schnitten und zeigt ihre Anwendungsmöglichkeiten in der modernen Materialforschung.

# **Bruchzähigkeitsprüfung von Siliziumnitrid: Anwendung von Laserablation zur Kerbenherstellung**

**M. Munz, Ch. Krug, T. Lube**

Lehrstuhl für Struktur- und Funktionskeramik, Department für Werkstoffwissenschaften,  
Montanuniversität Leoben, Franz Josef-Straße 18, A-8700 Leoben, Österreich

Als wesentliches Qualifikationsmerkmal für keramische Werkstoffe wird häufig ein Mindestwert der Bruchzähigkeit gefordert. Zur Messung der Bruchzähigkeit von Keramiken existieren verschiedene Methoden, die auf dem Prinzip basieren, prismatische Biegeproben mit einem definierten Anfangsriss oder einer scharfen Kerbe zu brechen.

Auch bei Wälzkörpern (Kugeln oder Rollen) aus Siliziumnitrid ist ein Mindestwert der Bruchzähigkeit nachzuweisen. Diese Bauteile sind im Betrieb insbesondere durch Rissbildung und -wachstum an der Oberfläche gefährdet. Fertigungsbedingt können sie einen Gradienten in Gefüge und Eigenspannungen entlang der radialen Richtung aufweisen, was zu unterschiedlichen Eigenschaften an der Oberfläche und im Zentrum führt. Anwendungsrelevante Materialeigenschaften sollten daher bevorzugt an der Oberfläche gemessen werden. Hierfür existiert ein Verfahren, das die „Surface Crack in Flexure“-Methode mit dem „Notched-Ball“-Test kombiniert. Dieses Verfahren ist jedoch experimentell aufwendig und erfordert fraktographische Expertise.

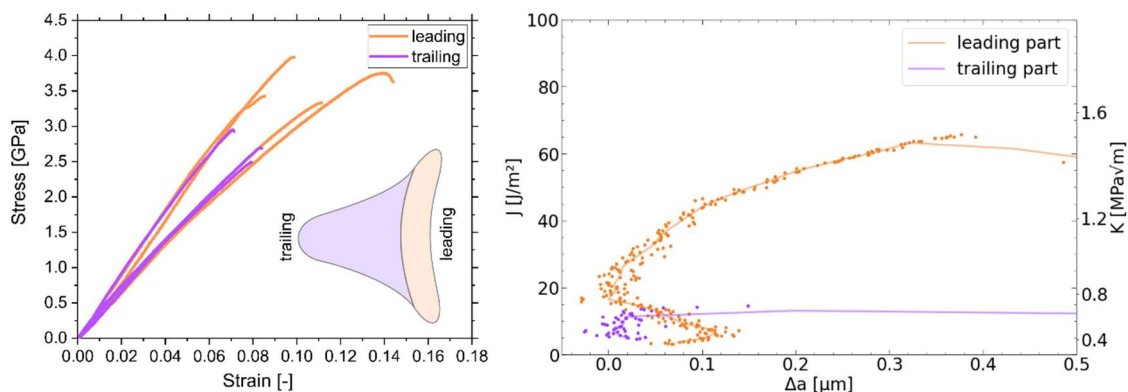
In der vorliegenden Arbeit wird eine alternative Methode vorgestellt, um gezielt Startdefekte in die gekrümmte Oberfläche von Kugeln einzubringen. Mithilfe eines Femtosekundenlasers können scharfe Kerben mit beliebiger Geometrie präzise erzeugt werden. Zunächst wurde an prismatischen Proben eine Parameterstudie durchgeführt, um optimale Bedingungen für die Materialablation von Siliziumnitrid zu ermitteln. Die erzeugten Kerben sowie die Bruchflächen unterhalb der Kerben wurden mikroskopisch untersucht. Zwei Kerbgeometrien (durchgehende Oberflächenkerben und halb-elliptische Kerben) wurden eingesetzt, um die Bruchzähigkeit zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigten, dass die mit lasergekerbten Proben gemessenen Werte mit den Resultaten äquivalenter, standardisierter Methoden (SEVNB, SCF) übereinstimmen.

# Verformung und Versagen im auxetischen Nanokompositgefüge des Napfschneckenzahns

M. Wurmshuber\*, J.-K. Kim, J. Wilmers, X.-L. Peng, Y. Liu, H. Gao, S.H. Oh, S. Bargmann, M. Göken, D. Kiener

\*Lehrstuhl WW1, Department Werkstoffwissenschaften, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Martensstraße 5, 91058 Erlangen, Deutschland

Die Zähne der gemeinen Napfschnecke (*Patella vulgata*) zeigen die höchste Festigkeit aller in der Natur vorkommenden Materialien, sogar höher als die der Spinnenseide. Zurückzuführen ist diese hohe Festigkeit von über 3 GPa auf das Nanokompositgefüge des Zahns, welches aus Eisenoxid-Stäbchen (Goethit) eingebettet in eine Siliziumoxid-Matrix besteht. Hier gibt es einen Unterschied zwischen dem Teil des Zahnes der beim Schabvorgang der Nahrungsaufnahme vorgeht (leading part) und dem der nachzieht (trailing part). Während der trailing part aus größeren, weniger dicht gepackten und eckigeren Stäbchen besteht, weist der leading part kleinere, dichter gepackte und rundliche Nanostäbchen auf. Des Weiteren ist die Anordnung der Stäbchen unterschiedlich: im trailing part sind sie parallel zur Zahnachse ausgerichtet, im leading part ordnen sie sich in chiralen Strukturen an, mit Stäbchenbündel umgeben von senkrecht dazu ausgerichteten Stäbchen. Diese chirale Anordnung führt zu einer auxetischen Materialantwort auf mechanische Belastung, also einer negativen Querkontraktionszahl. Dieses außerordentliche Verhalten erlaubt es dem Napfschnecken Zahn Spannungskonzentrationen umzuverteilen und erklärt die äußerst hohe Festigkeit des Keramik-Keramik-Kompositgefüges. Das Verformungs- und Bruchverhalten des Napfschneckenzahns – sowohl im trailing als auch im leading part – werden in dieser Arbeit mit Hilfe von mikromechanischen Methoden untersucht und diskutiert. Nanoindentation, Mikropillarversuche und Mikrobruchversuche zeigen zusammen mit TEM Untersuchungen und FEM Simulationen, warum dieses Material so fasziniert und ein Vorbild für zukünftige bioinspirierte Werkstoffe sein kann.



# Inter- und transgranularer Bruch in Keramiken mit eingestelltem Gefüge

**A. Jabr, D. Salamon, R. Bermejo**

Department Werkstoffwissenschaft, Lehrstuhl für Struktur- und Funktionskeramik,  
Montanuniversität Leoben, Österreich

Der Widerstand polykristalliner Keramiken gegen Rissausbreitung hängt stark von der Korngröße (KG), der Korngrenzstruktur und der kristallographischen Ausrichtung der Körner ab. In dieser Studie wurden ZnO-Keramiken mit Korngrößen zwischen etwa 100 nm bis 10 µm durch Verwendung eines feinen Ausgangspulvers (~100 nm) hergestellt. Das Gefüge wurde durch konventionelles Sintern (TS), Rapid Sintering (RS) und Cold Sintering (CSP) bei gleichbleibenden Dichtewerten (>97 %) variiert. TS-Proben zeigten ein signifikantes Kornwachstum (KG ~ 11 µm), während RS das Kornwachstum auf ~650 nm begrenzen konnte. CSP erzeugte dichte Proben mit einer Korngröße nahe der des Ausgangspulvers (~100 nm) aufgrund der niedrigen Sintertemperaturen (< 350°C). Fraktografische Untersuchungen und Bruchzähigkeitsmessungen zeigten, dass in CSP- und TS-Proben bevorzugt intergranularer Bruch auftritt. Im CSP-Gefüge findet Rissablenkung entlang der Körner mit Nanometergröße, während es im TS-Gefüge zur Koaleszenz von Mikrorissen kommt. Das RS-Gefüge (KG ~ 650 nm) zeigt einen Mischbruch aus inter- und transgranularem Bruch. In diesem Gefüge ist für die Rissausbreitung entlang der Korngrenzen mehr Energie als im feinkörnigen CSP-Gefüge notwendig und gleichzeitig wird eine reduzierte Mikrorissbildung im Vergleich zum TS-Gefüge beobachtet. Dadurch wird intergranularer Bruch erschwert und transgranularer Bruch ermöglicht. Mit diesem Gefüge konnte die höchste Bruchzähigkeit erzielt werden. Diese Ergebnisse unterstreichen die Rolle des Gefüges für die Optimierung der mechanischen Eigenschaften. Für eine Variation der Korngröße im gezeigten Größenbereich kommt den neuen Sintermethoden Rapid Sintering und Cold Sintering besondere Bedeutung zu.

# Hydrogen embrittlement of iron-based Fe-Ni-Al-alloys

N. Yadzhak, U. Glatzel

Metals and Alloys, University of Bayreuth, Prof.-Rüdiger-Bormann-St. 1, 95447,  
Bayreuth, Germany

Iron-based alloys, often referred as ferritic superalloys, are a promising class of high-temperature alloys due to their low density, low costs, and excellent mechanical properties up to temperatures of 700 °C. Possible interesting applications are power-generating turbines and steam turbines [1]. The wide range of the existing and potential applications of the Fe-Ni-Al system is attributed to their desired properties, such as a high melting point and good oxidation resistance [2], as well as an attractive price. However, the major drawbacks of this group of alloys are enhanced brittleness and poor ductility at room temperature [2, 3]. As hydrogen also causes embrittlement, the effect of hydrogen on such sensitive materials needs fundamental understanding.

The main aim of the present study is to investigate hydrogen influence on mechanical properties of Fe-rich Fe-Ni-Al alloys at room temperature. In this regard, the alloys consisting of 65 at-% iron and varying content of nickel and aluminium are considered. After solution heat treatment and ageing, the samples have a bcc ferritic matrix [2]. The hydrogen effect was studied by cathodic hydrogen charging of the alloy in an aqueous sulphuric acid solution by varying the current density and charging time. The influence of hydrogen on the considered alloys was investigated by studying their mechanical properties for each charging mode and related to the corresponding hydrogen concentration.

**Keywords:** hydrogen embrittlement, mechanical properties, iron-based alloys, Fe-Ni-Al alloys

## References:

1. P. Liaw, G. Ghosh, M. Asta, M. Fine, and C. Liu, "Computational design and prototype evaluation of aluminide-strengthened ferritic superalloys for power-generating turbine applications up to 1,033 K," Univ. of Tennessee, Knoxville, TN (United States), 2010.
2. E. Contreras-Piedras, H. J. Dorantes-Rosales, V. M. López-Hirata, F. Hernández Santiago, J. L. González-Velázquez, and F. I. López-Monroy, "Analysis of precipitation in Fe-rich Fe–Ni–Al alloys by diffusion couples," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 558, pp. 366–370, 2012, doi: 10.1016/j.msea.2012.08.013.
3. Hector J. Dorantes-Rosales, Victor M. Lopez-Hirata, Jorge L. Gonzalez-Velazquez, Nicolas Cayetano-Castro, and Maribel L. Saucedo-Muñoz, "Precipitation Process in Fe-Ni-Al-based Alloys," in *Superalloys*, Mahmood Aliofkhazraei, Ed., Rijeka: IntechOpen, 2015, Ch. 4.

# Schadenstoleranz von 3D-gedruckten Keramiken mit eingestelltem Gefüge

J. Schlacher<sup>1</sup>, S. Nohut<sup>2</sup>, M. Schwentenwein<sup>2</sup>, R. Bermejo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department Werkstoffwissenschaft, Montanuniversität Leoben, Franz Josef Strasse 18,  
8700 Leoben, Österreich

<sup>2</sup>Lithoz GmbH, Mollardgasse 85a/2/64-69, 1060 Wien, Österreich

In dieser Arbeit wurde das Potenzial der LCM (Lithography-based Ceramic Manufacturing) 3D-Drucktechnologie zur Entwicklung neuartiger Multimaterial-Keramiksyste­me auf Aluminiumoxidbasis untersucht. Dazu wurden im Wesentlichen zwei Designkonzepte zum Aufbau von keramischen Schichtarchitekturen mit eingestelltem Gefüge zur Erhöhung der Schadenstoleranz verfolgt. Im ersten Konzept (Design mit Eigenspannungen) wurden Schutzschichten aus Aluminiumoxid zwischen Aluminiumoxid-Zirkonoxid (ZTA)-Bereichen eingebettet. Die gezielt eingestellten Druckeigenspannungen in den internen Aluminiumoxid-Schichtbereichen wirken als Barriere gegen Rissausbreitung und sorgen für eine Mindestfestigkeit der Architektur. Die Anwendung dieses Konzeptes auf komplexere 3D-Architekturen mit eingebetteten Schutzbereichen wurde hiermit erstmals an einem Demonstrator (keramische Turbinenschaufel) erfolgreich nachgewiesen [1]. Im zweiten Konzept (Design mit schwachen Grenzflächen) wurde die Möglichkeit zur Herstellung keramischer 3D-Bauteile aus Aluminiumoxid mit internen porösen Bereichen, welche zur Ablenkung bzw. Limitierung von fortschreitenden Oberflächenrissen führen, untersucht. Ein optimiertes Design mit eingebetteten porösen Schichten wurde an einem 3D-gedruckten Demonstrator (keramische Düse) erfolgreich übergeführt, welches eine hohe Thermoschockbeständigkeit mit dem Potenzial einer gezielten Leichtbauweise kombinieren würde [2]. Es konnte somit gezeigt werden, dass schadenstolerante Designansätze auch auf 3D-gedruckte Keramikteile anwendbar sind, welche in Zukunft neue Anwendungsfelder für Strukturkeramiken ermöglichen könnten.

## Referenzen

[1] J. Schlacher, S. Geier, M. Schwentenwein, R. Bermejo, Towards 3D-printed alumina-based multi-material components with enhanced thermal shock resistance, *J. Eur. Ceram. Soc.* 44 (4) (2024) 2294–2303. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.11.009>.

[2] J. Schlacher, L.B. Mateus, S. Nohut, M. Schwentenwein, R. Bermejo, Thermal shock resistant 3D-printed ceramic components through spatially tailored porosity, *Addit. Manuf.* 96 (2024) 104582. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104582>.

# **In situ Untersuchungen der Falzbarkeit von 6xxx-Aluminiumlegierungen in Abhängigkeit von der Mikrostruktur**

**Florian Zrim<sup>1</sup>, Stefan Mitsche<sup>1</sup>, Georg Falkinger<sup>2</sup>, Angela Thum<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Graz Centre for Electron Microscopy (ZFE), Steyrergasse 17, 8010 Graz, Austria

<sup>2</sup> AMAG rolling GmbH, Lamprechtshausenerstrasse 65, 5282 Ranshofen, Austria

6xxx- Aluminium Legierungen finden im gefalzten Zustand häufig Anwendung in der Automobilindustrie, z. B. bei Motorhauben, Türen oder Seitenwandrahmen. Beim Falzen wird der Rand eines Bleches um bis zu 180° gebogen, was in einem komplexen und stark ausgeprägten Belastungszustand resultiert, der sowohl Zug- als auch Druckbelastung beinhaltet. Diese mechanische Beanspruchung kann unerwünschte Risse im Material hervorrufen, welche maßgeblich von der Mikrostruktur abhängen. Die Falzbarkeit wird dabei von Faktoren wie Primärphasen, Textur und Korngrenzenausscheidungen beeinflusst. Der Zusammenhang von Mikrostruktur und Falzbarkeit wird mithilfe von Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht, wobei ein in situ 3-Punkt Biegeversuch zum Einsatz kommt. Eine spezielle Auswertung wurde verwendet, welche es erlaubt Standard REM Bilder mit Elektronenrückstreubeugung (EBSD) zu überlagern. Dies erlaubt eine präzise Korrelierung von Merkmalen wie Risse, Poren oder Präzipitaten zur Kornmorphologie und Textur. Weiters wurde in MTEX, einer MATLAB-Toolbox zur Analyse von Orientierungsdaten, eine Methode implementiert, die die Starrkörperrotation während des Biegeprozesses berücksichtigt und kompensiert, wodurch präzise Texturmessungen über große Bereiche gebogener Proben ermöglicht werden. Mit den genannten Methoden wurde unter anderem der, in der Literatur bekannte, positive Einfluss von Würfeltextur auf die Falzbarkeit untersucht. Erste Ergebnisse zeigen keine klare Korrelation von Scherbändern und Würfeltextur. Des Weiteren wird im in situ Versuch Digitale Bildkorrelation (DIC) eingesetzt, um den lokalen Dehnungszustand der Oberfläche mit EBSD Daten zu verbinden.

# **Elektrochemie im Fokus: Wie Prozessparameter die Wasserstoffbeladung beeinflussen**

**M. Jordt, F. Schäfer, C. Motz**

Experimentelle Methodik der Werkstoffwissenschaften, Universität des Saarlandes

In Zeiten der Energiewende wird Wasserstoff als vielversprechender, nachhaltiger Energieträger angesehen. Folglich ist die Belastung von Materialien in wasserstoffreicher Umgebung im Hinblick auf die bekannten Effekte der Wasserstoffversprödung zu einem zentralen Thema für Industrie und Forschung geworden. Dieses gut dokumentierte Phänomen erfordert den Fokus auf das Materialverhalten unter Wasserstoffeinwirkung sowie ein Verständnis der grundlegenden Mechanismen von Wasserstoffeffekten. Verschiedene Methoden zur Wasserstoffbeladung, darunter traditionelle Techniken wie das Autoklavieren bei erhöhten Temperaturen und Wasserstoffdrücken, elektrochemische Beladung mit unterschiedlichen Elektrolyten sowie innovative Ansätze wie die Plasmabeladung werden in der Materialprüfung und wissenschaftlichen Forschung eingesetzt. Die Elektrochemie stellt hierbei eine einfache, schnelle und kosteneffiziente Möglichkeit dar, Proben mit Wasserstoff zu beladen. Hierfür finden verschiedenste Elektrolytsysteme Anwendung. Neben der Beladungsdauer gibt es jedoch sehr viele Einflussfaktoren wie die Stromdichte, verwendete Säuren und Rekombinationsgifte und deren Konzentration und verschiedenste Umgebungsbedingungen wie Baddurchmischung, Temperatur oder das Spülen mit inerten Gasen. Die Wahl wird hierbei meist anhand empirischer Erfahrungen getroffen oder an prüftechnische Bedingungen angepasst. Systematische Studien über die Einflussfaktoren auf den erzielbaren Wasserstoffgehalt sind in der Literatur jedoch schwer zu finden. Eine solche wird präsentiert.

# Einfluss von erhöhten Gehalten an Spurenelementen auf die getrennt eutektoide Umwandlung in einem niedrig legierten übereutektoiden Stahl

M. Graf<sup>1</sup>, P. Haslberger<sup>2</sup>, M. Galler<sup>3</sup>, O. Glushko<sup>1</sup>, R. Schnitzer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Christian Doppler Laboratory for *Knowledge-based Design of Advanced Steels*, Department of Materials science, Montanuniversität Leoben, 8700 Leoben, Austria

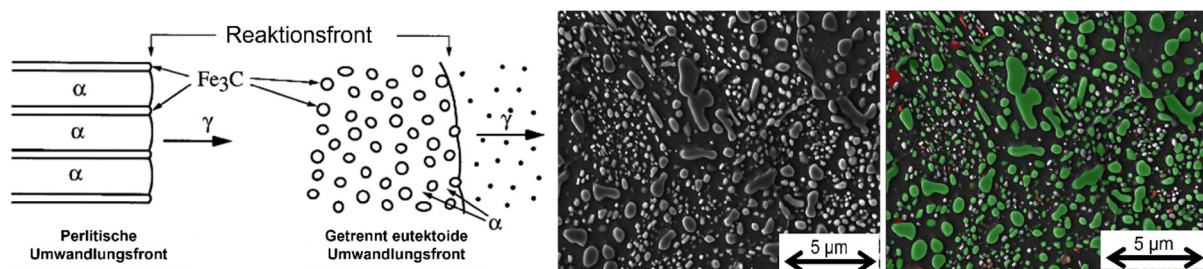
<sup>2</sup> voestalpine Forschungsservicegesellschaft Donawitz GmbH, 8700 Leoben, Austria

<sup>3</sup> voestalpine Wire Rod Austria GmbH, 8792 St. Peter-Freienstein, Austria

Aufgrund aktueller Bestrebungen, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Eisen- und Stahlerzeugung durch den vermehrten Einsatz von Schrott im Elektrolichtbogenofen zu reduzieren, kann es zu einer Erhöhung der Gehalte an Spurenelementen (Kupfer, Zinn, Nickel, ...) in den Stählen kommen. Dies kann zu einer Veränderung der Stahleigenschaften, wie z.B. das Verzögern von Phasenübergängen zu tieferen Temperaturen [1], führen. Der Einfluss dieser Spurenelemente auf die getrennt eutektoide Umwandlung in einem übereutektoiden Stahl wurde untersucht.

Die getrennt eutektoide Umwandlung (engl. divorced eutectoid transformation (DET)) beschreibt eine nicht kooperativ ablaufende eutektoide Umwandlung im Stahl, die anstelle von oder mit der perlitischen Umwandlung stattfinden kann. Das dabei entstehende Gefüge setzt sich zusammen aus einer ferritischen Matrix und sphärischen Zementitpartikeln (siehe Abbildung) [2]. Um den Einfluss von diversen Wärmebehandlungsparametern zu untersuchen, wurden makroskopische Härtewerte ermittelt, sowie die Partikelgrößen- und Partikelrundheitsverteilung mittels KI-gestützter Bildanalyse [3] in hochauflösenden rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (siehe Abbildung) von einem übereutektoiden Stahl und Varianten davon mit erhöhten Gehalten an Spurenelementen bestimmt.

Es hat sich gezeigt, dass eine geringe Unterkühlung bzw. Abkühlgeschwindigkeit nach dem Austenitisieren, sowie eine Austenitisierungstemperatur die näher an der A<sub>1</sub>-Temperatur liegt, die getrennt eutektoide Umwandlung begünstigen. In der Literatur [4] sowie bei diesen Untersuchungen finden sich erste Hinweise, dass bei erhöhten Gehalten an Spurenelementen eine begünstigende Wirkung auf die getrennt eutektoide Umwandlung stattfinden kann.



**Abbildung 1:** Links: Schematische Darstellung der verschiedenen eutektoiden Umwandlungsformen [3]. Mitte: Vollständig sphäroidisiertes Gefüge nach getrennt eutektoider Umwandlung. Rechts: KI-gestützte Auswertung der Partikelgrößen und -rundheit.

[1] J. Duan, D. Farrugia, J. D. Poplawsky, C. Davis, Z. Li, *Effect of impurities on phase transformation and precipitation in a low-carbon steel*, *Materialia* 36 (2024) 102141.

[2] J. D. Verhoeven & E. D. Gibson, *The divorced eutectoid transformation in steel*, *Metall. Mater. Trans. A* 29 (1998) 1181–1189.

[3] A. Kirillov, E. Mintun, N. Ravi, H. Mao, C. Rolland, L. Gustafson, T. Xiao, S. Whitehead, A. C. Berg, W.-Y. Lo, P. Dollar, R. Girshick, *Segment Anything*, *arXiv* (2023) 2304.02643.

[4] H. K. D. H. Bhadeshia, *Steels for bearings*, *Prog. Mater. Sci.* 57/2 (2012) 268-435.

# Ein Verfahren zur Festigkeitsprüfung von additiv hergestellten Keramiken

**M. Staudacher<sup>1</sup>, T. Lube<sup>1</sup>, U.Scheithauer<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Montanuniversität Leoben, Department Werkstoffwissenschaft, Franz Josef-Straße 18,  
A-8700 Leoben, Österreich

<sup>2</sup> Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme, D-01277 Dresden,  
Deutschland

Additiv gefertigte Bauteile aus Keramik weisen als Folge des Herstellverfahrens strukturierte Oberflächen auf. Beim stereolithografischen Herstellungsverfahren hängen die Geometrie und die Periodizität dieser Strukturen vom Winkel zwischen der Baurichtung und der jeweiligen Oberfläche ab. Daher kann auch die Festigkeit von additiv gefertigten keramischen Bauteilen von der Oberflächenorientierung in Bezug auf die Baurichtung abhängen.

Um zuverlässige Materialdaten für die Konstruktion von Bauteilen bereitzustellen, muss die Festigkeit routinemäßig für verschiedene Verarbeitungsbedingungen zur Verfügung gestellt werden. Auch als Mittel zur Qualitätskontrolle und Prozessüberwachung können diese Messungen herangezogen werden. Wenn genormte Methoden und Proben, die für konventionell hergestellte Keramiken entwickelt wurden, für additiv hergestellte Proben verwendet werden, ist die Bestimmung der Festigkeit aufwändig und kostspielig. In einem kürzlich abgeschlossenen Projekt wurde daher ein neuartiger Probekörper entwickelt, der die speziellen Probeneigenschaften, die durch Fertigung mittels des LCM-Verfahrens (ein stereolithographisches Verfahren) entstehen, abbildet. Er ermöglicht es, mit einem einzigen Druckauftrag eine ausreichende Menge an Festigkeitsproben für die statistische Festigkeitsbewertung herzustellen.

Das Grundprinzip des Prüfverfahrens sowie die Erkenntnisse aus einem Ringversuch werden vorgestellt. Dafür wurden Probekörper in drei verschiedenen Konfigurationen von vier Partnern hergestellt. Die thermische Nachbehandlung und Prüfung wurde zur Gänze bei einem der Partner durchgeführt, um Einflüsse aus diesen Verfahrensschritten zu minimieren. Letztendlich wurden die Geometrie und Festigkeit von mehr als 2000 Einzelproben analysiert. Dies liefert eine Fülle von Ergebnissen, die nicht nur eine Beurteilung der Festigkeit in Abhängigkeit von der Orientierung erlauben, sondern auch die Bewertung der Form der Proben und ihrer Gleichmäßigkeit ermöglichen. Es wird gezeigt, dass durch die Einführung einer automatisierten Geometrieauswertung mit vergleichsweise geringem Aufwand eine große Menge an Festigkeits- und Geometriedaten gewonnen werden kann.

# Charakterisierung des Ausbreitungsverhaltens mikrostrukturell kleiner Risse mittels Wechselstrompotentialmethode

**L. Walch<sup>1\*</sup>, Th. Klünsner<sup>1</sup>, B. Sartory<sup>1</sup>, St. Marsoner<sup>1</sup>, L. Egger<sup>1</sup>, A. Hohenwarter<sup>2</sup>, A. Hackl<sup>3</sup>, G Ressel<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Materials Center Leoben Forschung GmbH, Roseggerstraße 12, A-8700, Leoben, Austria

<sup>2</sup> Department of Materials Science, Chair of Materials Physics, Montanuniversität Leoben, Jahnstraße 12, A-8700 Leoben, Austria

<sup>3</sup> voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG, Mariazeller-Straße 25, A-8605, Kapfenberg, Austria

\* Kontaktdaten korrespondierender Autor: [lukas.walch@mcl.at](mailto:lukas.walch@mcl.at)

Für viele Werkzeuge der metallverarbeitenden Industrie fluktuieren die Lasten während der Anwendung auf hohem Niveau, was zu Materialermüdung und Werkzeugversagen führt. Üblicherweise wird die Ausbreitung von Ermüdungsrissen an von langen Kerben über die ganze Probendicke ausgehenden kurzen Rissen untersucht. Dadurch wird das Ausbreitungsverhalten allerdings über die gesamte Mikrostruktur entlang der anwendungsspezifisch unrealistisch breiten Rissfront gemittelt. Um diesen Mangel passender Methoden zur Messung und Beobachtung der Rissausbreitung an realitätsnahen Rissfronten zu beheben, wurde eine neuartige Methode entwickelt. Diese Methode ermöglicht es, das Wachstum kleiner Risse ausgehend von sehr kleinen künstlich eingebrachten Defekten mittels der Wechselstrompotentialmethode zu messen. Die Anwendung dieser Methode wird in der vorliegenden Arbeit anhand von Mikrometergroßen halb elliptischen Kerben demonstriert, die in Proben eines pulvermetallurgisch hergestellten Schnellarbeitsstahls mittels fokussiertem Ionenstrahls eingebracht wurden. Die Potentialänderung wurde mittels gezielter Kalibrierversuche mit variierenden R-Werten zur Risslänge korreliert und für Versuche mit unterschiedlicher Mikrostruktur eingesetzt. Die *in situ* gemessene Gesamtrisslänge wurde nach dem Gewaltbruch der Probe mit der an der Bruchfläche gemessenen Risslänge verglichen und bestätigt. Mit der Methode können erfolgreich zyklische Risswiderstandskurven in Abhängigkeit der Mikrostruktur und des R-Werts von sehr kleinen Rissen in Schnellarbeitsstählen gemessen werden. Diese Messmethode ermöglicht somit Aussagen zu den frühen Ermüdungsrisswachstumsstadien ausgehend von kleinen Defekten in höchstfesten Schnellarbeitsstählen.

Schlagworte: *Wechselstrompotentialmethode; ACPD Methode; zyklische R-Kurve; kurze Risse; kleine Risse; Schnellarbeitsstahl*

# **Eine Untersuchung der spannungsinduzierten martensitischen Umwandlung bei Kavitationsbeanspruchung von dem Stickstoff legierten Cronidur 30**

**F. Krafft<sup>1</sup>, J. Stella<sup>2</sup>, M. Pohl<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Werkstoffe, Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum

([frank.krafft@t-online.de](mailto:frank.krafft@t-online.de), [pohl@wp.rub.de](mailto:pohl@wp.rub.de))

<sup>2</sup> Materials Science Department, Universidad Simón Bolívar, 1080 Caracas, Venezuela

([jstella@usb.ve](mailto:jstella@usb.ve))

Cronidur 30 ist ein stickstofflegierter und rostfreier Stahl, der in den letzten Jahren auf potentielle neue Anwendungen hin untersucht wurde. Die Zusammensetzung liefert nicht nur eine hervorragende Korrosionsresistenz, sondern auch interessante mechanische Eigenschaften aufgrund seiner Fähigkeit, spannungsinduzierte martensitische Umwandlung aufzuweisen. In der vorliegenden Arbeit wird Cronidur 30 gegen Kavitationserosion nach der ASTM G32 Norm bei Raumtemperatur geprüft. Das Material wurde bei fünf Temperaturen (1050, 1075, 1100, 1125 und 1200°C) lösungsgeglüht und anschließend in Öl abgeschreckt. Zusätzlich zum Masseverlust wurden die kavitationsbeanspruchten Proben mittels Röntgenprüfung und Rasterelektronenmikroskopie in Verbindung mit EBSD (Electron Backscatter Diffraction) charakterisiert.

Die Masseverlustkurven beweisen einen höheren Kavitationswiderstand von Cronidur 30 im Vergleich mit anderen rostfreien Stählen, wie 1.4462 (Duplex) und austenitischen Stählen wie 1.4301 und dem Kappenringstahl P900. Die Ergebnisse zeigen einen starken Einfluss von der Lösungsglüh-temperatur bei Cronidur 30 auf die Umwandlungsrate von Austenit in alpha-Martensit durch Kavitation, die vermutlich in Verbindung mit der Verteilung austenitstabilisierender Legierungselemente (N, C) steht. Außerdem hat die EBSD-Charakterisierung einen deutlichen Einfluss der Kornorientierung auf die lokale Kavitationsresistenz gezeigt. In dieser Hinsicht ist es bemerkbar, dass plastische Verformung und martensitische Umwandlung austenitischer Körner unter Kavitationsbeanspruchung stark von der Kornorientierung abhängig sind. Auffallend ist eine niedrigere Kavitationsresistenz bei Cronidur 30 für die bei 1125 und 1200°C lösungsgeglühten Proben, die einen sehr stabilen Austenit aufweisen.

# Insights into weld metal hot cracking of austenitic stainless steels: Atomistic characterization of crack surfaces

S. Kiranbabu<sup>1</sup>, A. Landefeld<sup>1</sup>, Th. Willidal<sup>2</sup>, O. Glushko<sup>1,3\*</sup>, R. Schnitzer<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Christian Doppler Laboratory for Knowledge-based Design of Advanced Steels, ,  
Department of Materials Science, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef Straße 18, Leoben,  
8700, Austria

<sup>2</sup> voestalpine Böhler Welding Austria GmbH, Böhler-Welding-Straße 1, Kapfenberg, 8605,  
Austria.

<sup>3</sup> Department of Materials Science, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef Straße 18,  
Leoben, 8700, Austria

\*Presenter: Oleksandr.Glushko@unileoben.ac.at

Austenitic stainless steels often undergo weld metal hot-cracking as a result of detrimental segregation of elements such as S, P, Nb and Ti. Accurate quantification of these segregating elements is central to comprehend the underlying mechanisms involved in hot-cracking phenomenon. Till now there were no attempts to characterize the hot-crack surfaces at atomistic scale as this partly involves complex crack opening protocols.

In the current scenario, using novel crack-opening methods, we successfully opened weld metal cracks in single and multi-pass ASS welds. In a single-pass weld the crack is located along the center line and has a length of about 20 mm. In case of multi-pass weld a 3 mm long crack is located near the abutting weld-pass interfaces. These opened crack surfaces were later protected with ~ 500 nm Ag deposition prior to SEM, TEM and APT investigations.

The SEM fractographic investigations implied dendritic nature of the crack surfaces, further confirming the observed cracks can be attributed to hot cracks.. The TEM and APT investigations showed 25-33 at. % S segregation at single and multi-pass crack surfaces. The multi-pass crack additionally showed ~ 14 at. % C, 0.4 at. % Nb and 0.4 at. % Ti segregation. All these elements are concluded to be segregated towards the last stages of weld pool solidification and thus caused cracking of interdendritic interfaces. Further, these cracks occurred without phase formation, as possible stoichiometric phases such as M<sub>2</sub>S and M<sub>3</sub>S are thermodynamically unstable under weld pool conditions. There was no P detected and thus herein P did not contribute to the weld crack formation.

## Verhalten von einem bleifreien Messing (CuZn10Si5Al1) bei Kavitationserosion und zyklischer Beanspruchung:

J. Stella <sup>1</sup>, M. Pohl <sup>2</sup>, F. Krafft<sup>2</sup>, A. Treff <sup>3</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Simón Bolívar, 1080 Caracas, Venezuela ([jstella@usb.ve](mailto:jstella@usb.ve))

<sup>b</sup> Institut für Werkstoffe, Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum. ([pohl@wp.rub.de](mailto:pohl@wp.rub.de))

<sup>c</sup> Otto Fuchs Dülken GmbH & Co. KG, Heiligenstraße 70, I 41751 Viersen ([alexander.treff@otto-fuchs.com](mailto:alexander.treff@otto-fuchs.com))

Kavitationserosion von einem bleifreien Messing (CuZn10Si5Al1) wurde mittels Schwingungskavitation untersucht. Die neue Legierung weist einen ausgezeichneten Widerstand gegen Kavitation im Vergleich mit kommerziellen Kupfer-Basis-Legierungen auf, die vorher unter ähnlichen Bedingungen untersucht wurden. Unterschiedlich zu den meisten Kupfer-Basis-Legierungen besitzt die untersuchte Legierung grundsätzlich eine hexagonal dichtest gepackte Struktur.

Die Charakterisierung mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD) zeigt einen großen Einfluss der Kornorientierung auf die lokale Resistenz gegen Kavitationserosion. Auffällig ist in der Inkubationsphase, dass Körner mit Oberflächen parallel zu (0001)-Ebene erhebliche Zwillingsbildung aufweisen.

Zudem wurde das mechanische Verhalten der Legierung durch Zug- und zyklische Beanspruchung untersucht. Die Ergebnisse zeigen ein ungewöhnliches anelastisches Verhalten bei der wiederholten Entlastung der Proben, die einem Zwillings-/Entzwillings-Prozess zugeschrieben werden. Eine mögliche Korrelation zwischen dem hohen Kavitationswiderstand der Legierung und ihrem mechanischen Verhalten wird analysiert.

# **Einfluss einer Druckwasserstoffbeladung auf die mechanischen Eigenschaften und die Bruchstruktur ausgewählter Kupferbasiswerkstoffe**

**T. Marte; J. Jürgensen; M. Pohl**

Ruhr-Universität Bochum, Lehrgebiet für Werkstoffprüfung, Universitätsstraße 150,  
44801 Bochum

Die Produktion von Wasserstoff sowie dessen Speicherung, Transport und Nutzung in bestehenden Prozessen und Bestandsanlagen bringt neue materialeitige Herausforderungen mit sich. Wasserstoff wirkt auf viele Werkstoffe versprödet und kann dadurch zu einem vorzeitigen Bauteilversagen führen. Dies kann nicht nur mit einem erheblichen Sicherheitsrisiko, sondern auch mit einem großen wirtschaftlichen Schaden verbunden sein. Es ist daher notwendig alle Materialien, die mit Wasserstoff in Kontakt kommen auf ihre Verträglichkeit hin zu untersuchen. Während die Wechselwirkung zwischen Stählen und Wasserstoff bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen war, ist die Datengrundlage für Kupferwerkstoffe noch nicht ausreichend, um deren Potential vollständig auszuschöpfen. Die hier vorgestellten Untersuchungen sollen deshalb einen ersten Überblick geben. Das Versuchsprogramm umfasst insgesamt 26 Kupferbasislegierungen, die sich hinsichtlich ihrer Legierungsgruppe, der wirksamen Verfestigungsmechanismen, ihrer Festigkeit sowie ihrer Verarbeitungsbedingungen unterscheiden. Nach einer dreiwöchigen Druckwasserstoffbeladung (200°C, 275 bar) zeigen die meisten Legierungen nach dem Langsamzugversuch (SSRT) keine oder nur geringfügige Veränderungen der mechanischen Eigenschaften sowie der Bruchstruktur. Die Ergebnisse werden durch eine umfangreiche Wasserstoffanalytik (thermische Desorptionsmassenspektrometrie (TDMS) zum Nachweis des diffusiblen Wasserstoffanteils und Trägergasschmelzextraktion (SE) zum Nachweis des getrapten Wasserstoffanteils) ergänzt. Dabei bestätigt sich u.a. die bereits aus der Literatur bekannte geringe Diffusionsgeschwindigkeit sowie Löslichkeit von Wasserstoff in Kupferbasiswerkstoffen [1].

[1] C. San Marchi, B.P. Somerday: *Technical Reference on Hydrogen Compatibility of Materials*, Sandia Report SAND2012-7321, 2012, 4001-1 – 4001-8.

# Nanoindentations-Untersuchung der Mikroskopischen Verteilung Mechanischer Eigenschaften in Komplexen Stählen

U. D. Hangen

Bruker Nano GmbH, Dennewartstrasse 25, 52068 Aachen

Das schnelle Kartieren lokaler mechanischer Eigenschaften gelingt durch Nano-Härtemessungen, die schnell und in großer Zahl durchgeführt werden. Der minimale Abstand der Messungen liegt dabei bei 50 nm bis zu mehreren Mikrometern, mit einer Rate von mehr als einer Messung pro Sekunde. Die so vermessenen lokalen Materialeigenschaften, wie Härte, reduzierter E-Modul, Kriechen und viele mehr, lassen sich zu einer Darstellung der verteilten mechanischen Eigenschaften mit hoher räumlicher Auflösung kombinieren.

Für die Eindringversuche wurde ein Hysitron TI980 TriboIndenter verwendet. Drei Fallstudien an Stahlproben werden vorgestellt, die neue Einblicke in das Zusammenspiel zwischen den mechanischen Eigenschaften des Materials im Nanobereich und seinem mechanischen Verhalten vom Mikro- bis zum Makrobereich bieten. Die Studien umfassen einen Vergleich von Nanoindentations-Härtekarten mit Mikro-Vickers-Härteprüfungen, einen Vergleich der Nano-Härtekarten komplexer Phasenstahllegierungen mit deren Verformbarkeit sowie einen maschinellen Lernansatz zur Identifizierung von Clustern mit ähnlichem Verhalten in einer komplexen Legierung.

Hintsala, E. D., et al. (2023). Mechanical Spectroscopy: Machine Learning and High Speed Nanoindentation for High Throughput Material Evaluation. *Microscopy and Microanalysis*, 29(Supplement\_1), 774-775.

Becker, B. R., et al. (2022). Automated analysis method for high throughput nanoindentation data with quantitative uncertainty. *Journal of Applied Physics*, 132(18), 185101.

Chang, Y., et al. (2021). Revealing the relation between microstructural heterogeneities and local mechanical properties of complex-phase steel by correlative electron microscopy and nanoindentation characterization. *Materials & Design*, 203, 109620.

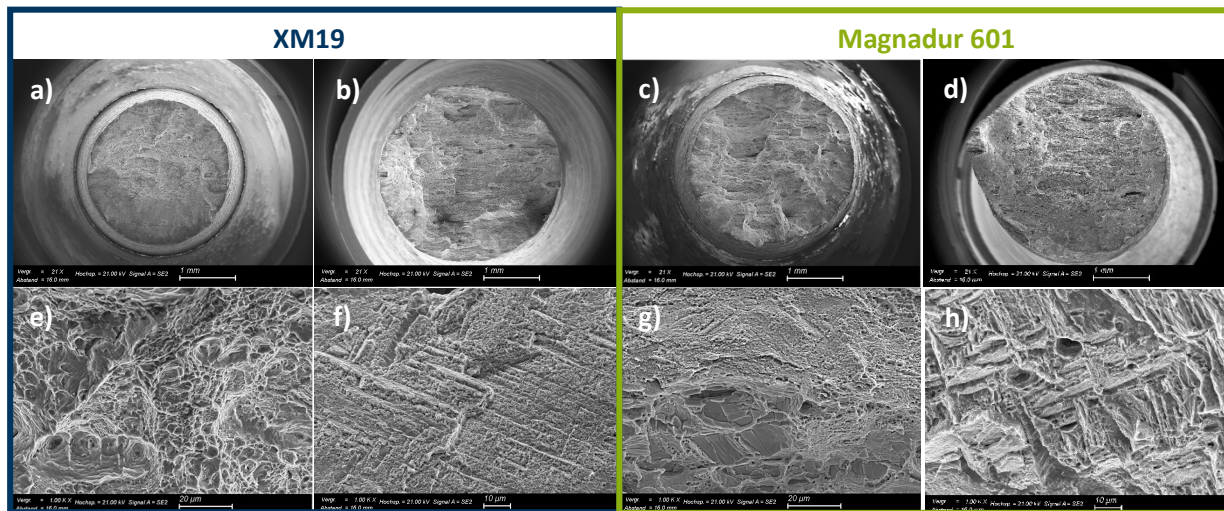
# Der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit bei Zugversuchen auf die Wasserstoffempfindlichkeit von KFZ-Materialien

S. Stolz<sup>\*1</sup>, M. Pohl<sup>1</sup>, C. Herrera<sup>2</sup>, J. Depka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ruhr-Universität Bochum, Institut für Werkstoffe, Werkstoffprüfung

<sup>2</sup> Deutsche Edelstahlwerke Witten/Krefeld GmbH & Co. KG

Kubisch-flächenzentrierte (KFZ) Materialien gelten aufgrund ihres geringen Wasserstoffdiffusionskoeffizienten und ihrer hohen Löslichkeit für Wasserstoff als geeignet für den Einsatz in wasserstoffhaltigen Umgebungen. Dennoch wird in diesen Materialien häufig der durch Wasserstoff ausgelöste Mechanismus der lokalisierte Plastifizierung (HELP) aktiviert, wenn sie Wasserstoff ausgesetzt sind. Dies führt zu einer verstärkten lokalen Versetzungsbewegung und plastischen Verformung, was letztlich eine global reduzierte Duktilität des Materials zur Folge haben kann, ohne jedoch wesentliche Veränderungen der Streckgrenze zu bewirken. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht sind KFZ-Materialien daher gut geeignet für den Bau von Komponenten in wasserstoffreichen Umgebungen, in denen die Aufrechterhaltung der strukturellen Integrität von entscheidender Bedeutung ist.



**Abb.1.** Fraktografie von XM19 (linke Seite) und Magnadur 601 (rechte Seite), wobei: a), e) und c), g) Referenzproben darstellen, und b), f) sowie d), h) Proben sind, die mit Wasserstoff vorbeladen und mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,03 mm/min getestet wurden.

Im Rahmen dieses Testprogramms wurden zwei stabile austenitische Materialien untersucht: XM19 (X2CrNiMnMoNb21-16-5-3 mit weniger Ni und Mo) und Magnadur 601. Aus beiden Materialien wurden Zugproben hergestellt, die in einem Autoklav bei 230°C und 100 bar für 21 Tage mit Wasserstoff beladen wurden. Nach der Beladung wurde der Wasserstoffgehalt mittels der TDMS-Methode analysiert. Die mechanischen Eigenschaften sowie die Bruchbilder der vorbeladenen Proben wurden mit denen von Referenzproben, die nicht mit Wasserstoff beladen wurden, verglichen. Beide Materialien wurden mit drei unterschiedlichen Dehnraten getestet: 0,12 mm/min (gemäß ASTM G142), 0,06 mm/min und 0,03 mm/min. Die Untersuchung zeigte deutlich, dass eine langsamere Prüfgeschwindigkeit dem Wasserstoff mehr Zeit gibt, in kritische Bereiche zu diffundieren und dort lokalisierte Plastizität zu verursachen, was zu einer insgesamt verringerten Duktilität der Probe führt. Spezifische Bruchmerkmale treten ebenfalls erst bei langsameren Prüfgeschwindigkeiten auf, weshalb eine langsamere Prüfgeschwindigkeit für KFZ-Legierungen eindeutig empfohlen wird.

Als Beispiel zeigt **Abb. 1** repräsentative Ergebnisse für beide Materialien, bei denen die Anwesenheit von Wasserstoff durch typische bruchmechanische Merkmale nachgewiesen wurden. Auffällig sind insbesondere treppenförmige Strukturen, die auf eine verstärkte lokalisierte Plastifizierung während der Zugversuche hindeuten. In diesen Bereichen hat das Material eine reduzierte Duktilität, wobei die Gleitebenen auf den Strukturen klar erkennbar sind.

## Künstliche Intelligenz zur Analyse komplexer Gefüge

**M. Müller<sup>1,2</sup>, B.-I. Bachmann<sup>1,2</sup>, M. Stiefel<sup>1,2</sup>, A. Herges<sup>1</sup>, D. Britz<sup>1,2</sup>, F. Mücklich<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

<sup>2</sup> Material Engineering Center Saarland, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Das Gefüge eines Werkstoffs speichert wertvolle Informationen über vorangegangene Prozessschritte und bestimmt maßgeblich dessen mechanische und funktionelle Eigenschaften. In der industriellen Praxis spielt die Gefügeanalyse daher eine zentrale Rolle – sei es in der Qualitätssicherung bestehender Hochleistungswerkstoffe, der Entwicklung neuer Materialklassen oder der Einhaltung von Normen und Kundenspezifikationen. Darüber hinaus ermöglicht sie die Korrelation zwischen Prozessparametern, Gefüge und Werkstoffeigenschaften und bildet somit die Grundlage für eine gezielte, gefügebasierte Werkstoffentwicklung und Prozessoptimierung.

Derzeit wird die Gefügeanalyse jedoch größtenteils manuell oder mit einfachen computergestützten Verfahren durchgeführt, die nur begrenzt anwendbar sind. Dies führt zu Herausforderungen wie hoher Subjektivität, eingeschränkter Reproduzierbarkeit und einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand. Zudem bleiben viele relevante Gefügemerkmale ungenutzt, wodurch wertvolle Erkenntnisse verloren gehen. Diese Limitationen machen die Gefügeanalyse zum Engpass in der modernen Werkstoffentwicklung.

Künstliche Intelligenz bietet das Potenzial, diesen Engpass zu überwinden und die Gefügeanalyse grundlegend zu transformieren. Durch den Einsatz KI-gestützter Verfahren können Mikrostrukturen effizienter, objektiver und umfassender analysiert werden, wodurch neue Möglichkeiten für die datengetriebene Werkstoffforschung und Prozessoptimierung entstehen.

# Cr-Si-Legierungen für Hochtemperaturanwendungen: Herausforderungen und Chancen

L. Pelchen, M. Kern, S. Kuntze, M. Ouardi, K. Müller, A. S. Ulrich

Metallische Werkstoffe II, Universität Bayreuth, Prof.-Rüdiger-Bormann-Str. 1,  
95447 Bayreuth, Deutschland

Vielversprechende Kandidaten für Hochtemperaturanwendungen sind Refraktärmetalllegierungen wie Cr-reiche Cr-Si-basierte Legierungen. Diese Legierungen bestehen aus einer A2-Cr-Mischkristallmatrix und verstärkenden A15-Phasen-Ausscheidungen. Sie ermöglichen eine Steigerung der Effizienz im Vergleich zu den üblicherweise verwendeten Ni-basierten Legierungen aufgrund von (i) ihrem höheren Schmelzpunkt, was eine potenzielle Erhöhung der Betriebstemperatur um 100 – 200 °C erlaubt, (ii) ihrer geringeren Dichte (~82 %) und (iii) den weltweit um den Faktor  $10^2$  höheren Ressourcen an Cr und Si. Allerdings müssen einige Herausforderungen überwunden werden, bevor Cr-basierte Legierungen als Strukturmaterialien bei Temperaturen über 1000 °C eingesetzt werden können: (i) Abhängig von der umgebenden Atmosphäre haben Cr-basierte Systeme eine geringe Oxidations- und Nitrierungsbeständigkeit (z. B. Bildung einer  $\text{Cr}_2\text{N}$ -Schicht). (ii) Die Temperatur des Spröd-Duktil-Übergangsbereichs (DBTT) liegt bei 400 – 900 °C. (iii) Herstellung von großen Bauteilen mit geringer Konzentration von Verunreinigungen. Durch die Modifikation mit weiteren Legierungselementen wie Ge und Mo konnten die nachteiligen Materialeigenschaften verbessert werden. Ge stabilisiert die Bildung der A15-Phase und verbessert die Haftung der Oxidschicht, selbst bei zyklischer Beanspruchung. Mo verringert die Kriechrate (Zugkriechbelastung), die DBTT und erhöht die Nitrierungsbeständigkeit der A2-Matrixphase. Es konnte gezeigt werden, dass die homogene Legierungsherstellung bis 400 g Ingots über das Vakuum-Induktionsschmelzverfahren möglich ist.

# Untersuchungen zum Bruch- und Ermüdungsrisswachstumsverhalten von Molybdän-Rhenium Legierungen

S. Pillmeier, S. Žák, R. Pippan, J. Eckert, A. Hohenwarter

Erich-Schmid-Institut, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Jahnstraße 12,  
8700 Leoben

In dieser Arbeit wurde das Bruch- und Ermüdungsrisswachstumsverhalten zweier Molybdänlegierungen, mit 41 gew.-% und 47,5 gew.-% Rheniumgehalt, untersucht. Diese Legierungen wurden als kaltgeschmiedete Stäbe mit einem Durchmesser von 6 mm bereitgestellt und weisen ein feinkristallines Gefüge mit stark gestreckten Körnern und einer ausgeprägten Fasertextur auf. Ähnlich verarbeitetes reines Molybdän wurde als Referenzmaterial verwendet und weist ein deutlich gröberes Gefüge auf. SEN(T)- und C(T)-Proben wurden mit R-L und L-R Orientierung getestet. Sowohl bei den quasistatischen als auch bei den Ermüdungsrisswachstumsexperimenten knickten die L-R-orientierten Risse sogleich um 90° in Richtung der Kornstreckung ab. Daraus ergeben sich Bruchzähigkeitswerte sowie effektive und Langrisschwellenwerte, die etwa doppelt so hoch sind wie für R-L-orientierte Risse. Dies ist in guter Übereinstimmung mit Berechnungen einer reduzierten lokalen Risstreibkraft. Bei beiden MoRe-Legierungen wurde bei zyklischer Belastung auch ein zyklisches R-Kurven-Verhalten bei einem Lastverhältnis von  $R=0,1$  beobachtet, welches bei MoRe47,5 auch noch bei  $R=0,7$  vorhanden war. Dies wird auf die gröbere Mikrostruktur zurückgeführt. Die effektiven Schwellenwerte  $\Delta K_{th,eff}$  beider MoRe-Legierungen sind niedrig und weichen von einer allgemein verwendeten Abschätzung ab, insbesondere für MoRe47,5. Ein Erklärungsansatz beruht auf Zwillingsbildung, was zur Emission von Partialversetzungen an der Risspitze führt. Eine Neuberechnung von  $\Delta K_{th,eff}$  unter Berücksichtigung partieller Versetzungen liefert eine gute Korrelation mit den experimentellen Werten.

# Festigkeit von dünnen Glaswafern

**P. Supancic, V. Waidbacher**

Lehrstuhl für Struktur- und Funktionskeramik, Department Werkstoffwissenschaft  
Montanuniversität Leoben

Dünne Glasschichten werden zunehmend in der Mikroelektronik- und Elektronikindustrie eingesetzt. So werden beispielsweise Glaswafer als Träger für funktionelle Schichten oder Komponenten verwendet. Auch großflächige Glassubstrate werden als Material für eine neue Generation von Leiterplatten in Betracht gezogen. Im Vergleich zu herkömmlichen Leiterplatten auf Polymerbasis zeigen Gläser generell höhere Steifigkeit und Wärmeleitfähigkeit sowie einstellbare Wärmeausdehnung. Damit könnten sich neue Möglichkeiten für die Herstellung kompakter elektronischer Systeme eröffnen.

Glas ist jedoch aufgrund seiner Sprödigkeit anfällig für spontanes mechanisches Versagen. Diese Arbeit zeigt Ergebnisse von Festigkeitsprüfungen an handelsüblichen Dünnglasscheiben (SCHOTT AF 32<sup>®</sup> eco) mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen. Mittels eigens entwickelter miniaturisierter „Ball-on-Three-Balls“ Prüfvorrichtungen wurde die biaxiale Festigkeit bestimmt und gemäß der Weibull-Theorie interpretiert.

Ergänzend wurden fraktografische Untersuchungen durchgeführt, um einen Einblick in die Arten der bruchauslösenden Defekte zu erhalten. In Abhängigkeit von der Oberflächenqualität wurde eine große Bandbreite an Festigkeitswerten festgestellt. Aber auch innerhalb einer einzelnen Stichprobe gibt es große Streuungen bei der Festigkeit, die mit außergewöhnlich niedrigen Weibull-Modulen korrespondieren, was zu einer allgemeinen Herausforderung bei der Entwicklung von Glassubstraten führt.