

Gruppe

MESO- UND MIKROMECHANIK

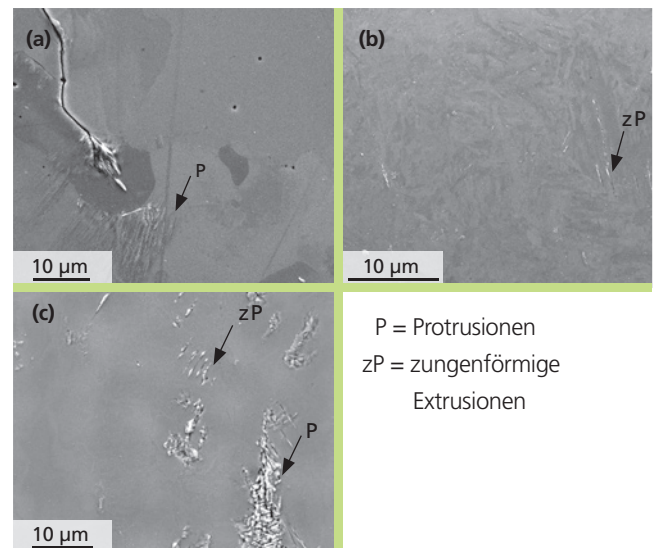
Dr. Thomas Straub | Telefon +49 761 5142-537 | thomas.straub@iwm.fraunhofer.de

ERMÜDUNGSMECHANISMEN AUF MIKROMECHANISCHER EBENE VERSTEHEN

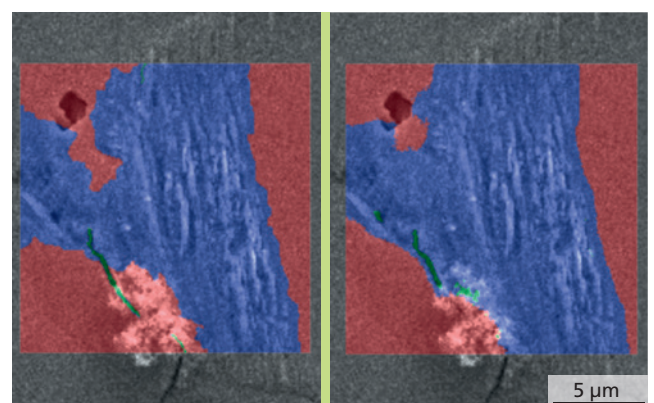
Wieso sind Materialien zwar bei einmaliger Belastung unterhalb der Streckgrenze beständig, versagen aber bei zyklischer Belastung mit ähnlichen Amplituden? Da Ermüdung die häufigste Versagensursache darstellt, besteht großes Interesse an einer zuverlässigen experimentellen und simulativen Basis für die Auslegung von Bauteilen. Das Ziel ist, bei gegebener Mikrostruktur, Belastung und Bauteilgeometrie das Ermüdungsverhalten und die Lebensdauer eines Bauteils zu prognostizieren – dies ist in allen Branchen wichtig, die hohe Sicherheitsanforderungen an Leichtbaukonstruktionen stellen. Viele Bauteilentwicklungen nutzen neue oder optimierte Materialien mit unterschiedlichen Ermüdungsmechanismen. Dabei ist ein Verständnis von Ermüdungsmechanismen über Materialdomänen und Skalen hinweg essenziell. Vor allem die ausschlaggebenden Mechanismen von Initiierung und Wachstum kurzer Risse sind dabei noch zu wenig verstanden.

Ermüdungsschädigungen und Risse optisch detektieren

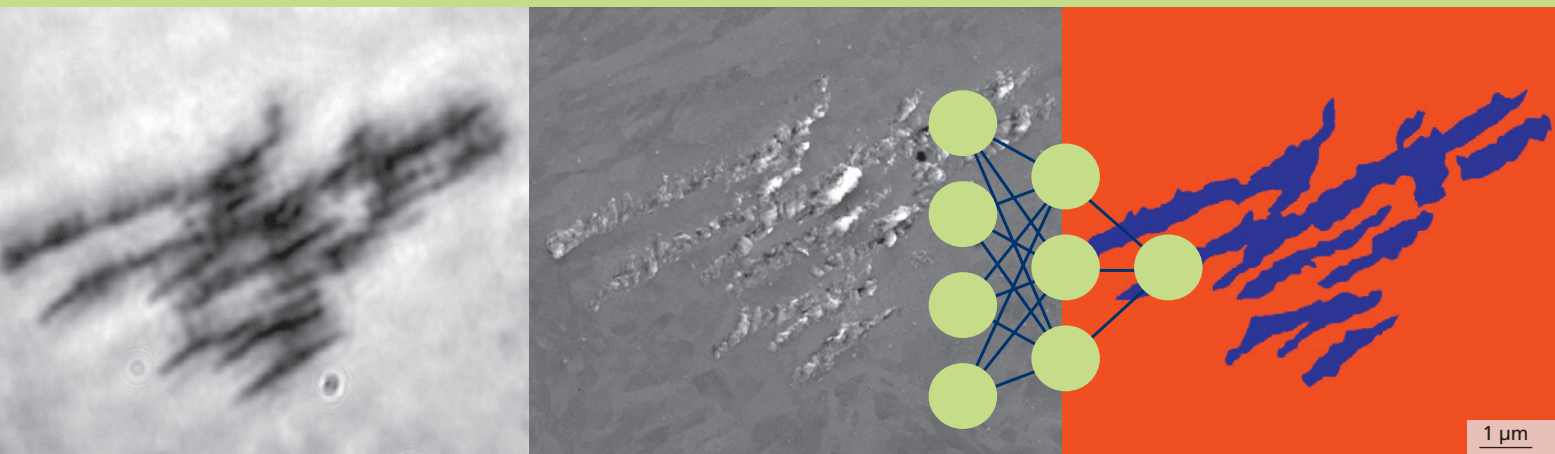
Die Beschaffenheit solcher initialer Schädigungen hängt stark vom Material (Abbildung 1) und vom Belastungsszenario ab. Die Bilddaten von Schädigungen streuen aufgrund der optischen Abbildungseinstellungen und generieren dadurch Ungenauigkeiten. Methoden des maschinellen Lernens dienen der automatisierten Detektion von Schädigungsstellen in diversen Materialien, und tiefe neuronale Netze ermöglichen im Vergleich zu konventionellen Bildverarbeitungsmethoden eine zuverlässigere Detektion der Schädigungen. Im Rahmen einer durch die Bosch-Forschungsförderung geförderten Dissertation wurde eine Methode der pixelweisen Detektion (semantische Segmentierung) von Extrusionen und Rissen an mehreren Materialien entwickelt. Eine hohe Genauigkeit ist essenziell, um eine verlässliche Zuordnung der Schädigung zu mikrostrukturellen Merkmalen der Probe zu erhalten. Diese



1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen typischer Extrusionsmorphologien in ferritischem EN 1.4003 (a), martensitischem EN 1.7228 (b) und sauerstofffreiem Kupfer (c).



2 Rasterelektronenabbildung überlagert mit Segmentierungskarten in EN 1.4003. Vergleich von manuell gelabelter Schädigungsstelle (links) und Vorhersage des tiefen neuronalen Netzes (rechts). Die Farben Rot, Grün und Blau zeigen jeweils Hintergrund-, Riss- und Extrusionsregionen auf.



3 *Detaillaufnahme zungenförmiger Extrusionen aus ROCS-Mikroskopie (links), Rasterelektronenmikroskopie (Mitte) und korrespondierende Segmentierungskarte (rechts), die mithilfe eines neuronalen Netzwerks (grün-blaues Schema) aus der rasterelektronischen Aufnahme erzeugt wurde.*

liefert Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehungen und ermöglicht eine Optimierung und Validierung von mikromechanischen Simulationsmodellen (wie Kristallplastizitätsmodellen).

Die hohe Streuung der Messdaten erfordert eine große Datenbasis für das Training eines tiefen neuronalen Netzes. Dazu dienen manuell markierte Rasterelektronenmikroskopie-Bilddaten für die in Abbildung 1 dargestellten charakteristischen Extrusionmorphologien. Hierzu wurde eine an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg entwickelte U-Net-Architektur angewandt. Um die begrenzten Datenmengen auszugleichen, wurde die Datenbasis mittels dedizierter Data Augmentation künstlich erweitert. Die Fähigkeit des Netzwerkes, das anhand von Ferrit-Schädigungsaufnahmen trainiert wurde, um daraufhin Schädigungen in martensitischem Stahl und Kupfer zu segmentieren (Abbildung 1), wurde evaluiert. Zudem wurde ein mit Materialdatenkombinationen trainiertes Modell an den drei Materialien getestet.

Auswahl von Bildtransformationen wichtig für Modelltraining

Die Ergebnisse zeigen, dass für Materialien mit ähnlicher Extrusionsmorphologie das Netzwerk übertragbar ist. So konnten mit dem anhand von Ferritdaten trainierten Modell flächigere Extrusionen (Protrusionen) in Kupfer vorhergesagt werden. Dagegen stellte die Vorhersage zungenförmiger Extrusionen eine Herausforderung dar. Als entscheidend für die Übertragbarkeit auf mehrere Materialien hat sich die Auswahl von Bildtransformationen der Data Augmentation ausgewirkt: Sowohl Risse als auch Extrusionen konnten in allen Materialien erfolgreich mit einem einzigen trainierten Modell segmentiert werden. Hierzu war eine repräsentative Datenbasis mit Trainingsdaten aus mindestens zwei Materialdomänen mit verschiedenen Extrusionsmorphologien notwendig.

Die drei geprüften Legierungen decken einen weiten Bereich auftretender Schädigungsmorphologien ab, sodass eine Übertragbarkeit auf weitere metallische Materialien zu erwarten ist. Eine Anwendung der Methode auf lichteoptische Aufnahmen ist beabsichtigt. Höchstauflösende optische Verfahren, wie die am Lehrstuhl für Bio- und Nanophotonik der Universität Freiburg entwickelte Rotating Coherent Scattering (ROCS) Mikroskopie (Abbildung 3 links), liefern einen für die Detektion von Extrusionen in martensitischen Materialien angemessenen Detailgrad. Diese Methode wurde mit einer empfindlichen Ermüdungsapparatur zu einem in situ-Aufbau integriert und trägt zum Verständnis der initialen Ermüdungsmechanismen an Luft bei. Neben der Schädigungssegmentierung startete eine Kooperation mit der Universität des Saarlandes und dem Material Engineering Center Saarland (MECS) zur Segmentierung lattenförmiger Bainit-Phasen in Multi-Phasen-Stählen. Dazu wurden lichtmikroskopische Aufnahmen angeätzter Oberflächen verwendet und die Übertragbarkeit der Methode auf andere materialwissenschaftliche Fragestellungen demonstriert.

Ali Riza Durmaz, Dr. Thomas Straub