

## Betriebsfestigkeit und Bruchverhalten von bainitischen Schmiedestählen

Die neue Generation von bainitischen Schmiedestählen bietet auf der einen Seite ein erhebliches Festigkeitspotenzial, das es im Sinne des Leichtbaus auch für zyklisch belastete Sicherheitsbauteile zu heben gilt. Auf der anderen Seite geht mit dieser Festigkeitssteigerung im Vergleich zu Vergütungsstählen ein Verlust an Duktilität und Zähigkeit einher. Am Beispiel des Demonstratorbauteils Achsschenkel ging das Forschungsvorhaben der Frage nach, wie ein Freigabeprozess zu gestalten ist, damit das Festigkeitspotenzial der neuen Stähle zuverlässig ausgenutzt werden kann. Als Ergebnis wird eine Vorgehensweise dargestellt, die den Eigenschaften der neuen Generation von Schmiedestählen Rechnung trägt, um den sicheren Betrieb der Komponenten zu gewährleisten.

AUTOREN



**Dr. Mauro Madia**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich 9.4 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin



**Dr.-Ing. Rainer Wagener**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt



**Dr.-Ing. Wolfram Baer**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich 9.6 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin



**Dipl.-Ing. Yusuf Kiyak**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich 9.4 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin

**AUSGANGSSITUATION**

Um die Möglichkeiten des massiven Leichtbaus zu erweitern, sollte das Festigkeitspotenzial der neuen bainitischen Schmiedestähle auch für zyklisch belastete Bauteile genutzt werden. Im Vergleich zu den Vergütungsstählen verfügen sie über eine geringere Kerbschlagarbeit bei gleichzeitig gesteigerter Schwingfestigkeit. Bei den bainitischen Stählen ruft eine zyklische Verformung eine Austenit-Martensit-Phasenumwandlung hervor und bewirkt dadurch einen Gewinn an Festigkeit unter zyklischer Belastung, wogegen die Vergütungsstähle entfestigen. Demgegenüber steht in der Regel die geringere Kerbschlagarbeit der bainitischen Stähle, die jedoch als Abnahmekriterium für massivumgeformte Sicherheitsbauteile wie Nutzfahrzeug-Achsschenkel dient. Zur zuverlässigen Auslegung der zyklisch beanspruchten Sicherheitsbauteile wird ein Bemessungskonzept benötigt, das sowohl Sonderereignisse wie zum Beispiel das Anstoßen an einen Bordstein als auch die normalen Betriebslasten berücksichtigt. Führt das Sonderereignis nicht direkt zum Versagen, hat es in der Mikrostruktur des Werkstoffs und der Geometrie des Bauteils jedoch bleibende Auswirkungen, die es ebenfalls zu berücksichtigen gilt. Im Fall rissbehafteter Bauteile hat die lokale Dehnungsbehinderung an der kritischen Stelle einen wesentlichen Einfluss auf das Ermüdungs- und Bruchverhalten. Bei monotoner Belastung wirken sich dabei unterschiedliche Dehnungsbehinderungen sowohl auf die Risspitzenbelastung im Bauteil als auch auf die Bruchzähigkeit des Werkstoffs aus.

Für den Betriebsfestigkeitsnachweis, inklusive der Berücksichtigung von Sonderereignissen, wurde folgende Vorgehensweise entwickelt.

**AUSFALLKRITERIUM**

Zunächst gilt es, ein zutreffendes Ausfallkriterium zu definieren. Die alleinige Betrachtung der Kerbschlagarbeit ist hier nicht

ausreichend, zumal sich die Versuchsbedingungen erheblich von den Betriebsbedingungen unterscheiden. Im typischen Abnahmeversuch zum Nachweis der geforderten Bruchfestigkeit wird der Achsschenkel an einer starren Aufnahme befestigt, sodass die gesamte Energie vom Achsschenkel aufgenommen werden muss. Unter Betriebsbedingungen ist der Achsschenkel jedoch nicht an einer starren Aufnahme befestigt, sondern ein Teil des Fahrwerks. Zum einen wird so, aufgrund der im Vergleich zur starren Aufnahme weicheren Anbindung, ein Teil der Schlagenergie nicht vom Achsschenkel aufgenommen, sondern an die anschließenden weniger steifen Bauteile weitergeleitet. Zum anderen wird die Steifigkeit des hochbeanspruchten Achsschenkelzapfens durch die Radlager sogar noch erhöht. Daher ist es erforderlich, für diese Belastungssituation die erforderliche Auslenkung des Achsschenkelzapfens zu ermitteln, die dem Fahrer signalisiert, dass eine Beschädigung vorliegt und das Fahrzeug zu überprüfen beziehungsweise sicher abzustellen ist. Um unter diesen Bedingungen bei der Sicherheitsbewertung das Fail-Safe-Prinzip umzusetzen, welches Verformung vor Bruch gewährleistet, muss sichergestellt werden, dass ein gegebenenfalls infolge kontinuierlicher Betriebsbelastungen oder Sonderereignisse vorhandener Anriss nicht zum vollständigen Bauteilversagen führen kann.

**KRITISCHE RISSTIEFE**

Im zweiten Schritt wird für das gewählte Ausfallkriterium (Auslenkwinkel  $\alpha$ ) die Risspitzenbeanspruchung an einem Oberflächenriss an der kritischen Stelle des Achsschenkels in Abhängigkeit von der Risstiefe  $a$  bestimmt (Bild 1). Für die gewählte kritische Auslenkung darf die korrespondierende Risstiefe (kritische Risstiefe) während der Einsatzzeit nicht überschritten werden, um Verformung vor Bruch zu gewährleisten.

In der analytischen bruchmechanischen Bauteilbewertung ist es übliche Praxis, die Modellparameter Spannungsintensitäts-

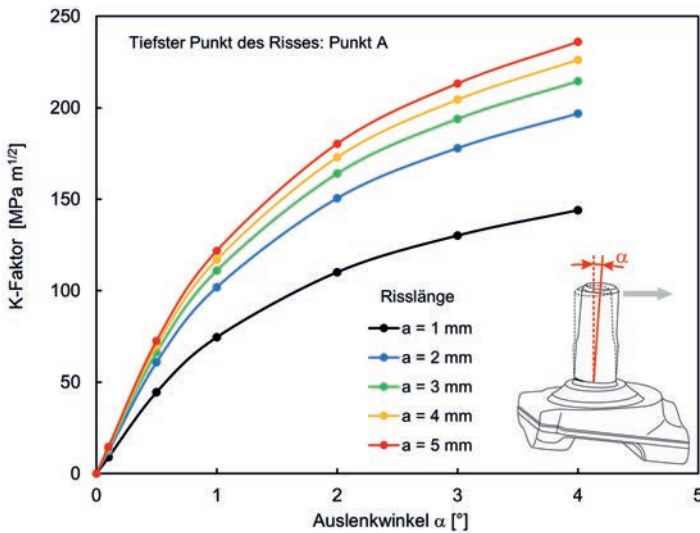


Bild 1: Bruchmechanische Rissspitzenbeanspruchung in Abhängigkeit von Risslänge und Auslenkwinkel des Achszapfens

faktor und Fließlast für reale, mittels FEM bestimmte Spannungsprofile auf der Grundlage von Ersatzgeometrien zu bestimmen. Die so ermittelte Rissspitzenbeanspruchung wird jedoch überschätzt, wenn das Bauteil, wie in dem vorliegenden Fall, im relevanten Bereich steifer ist als die Ersatzgeometrie, was zu einer inakzeptabel hohen Konservativität führen würde. Deshalb wurde ein hybrides Verfahren entwickelt, bei dem die Grundgleichungen der analytischen Methodik mit FE-basierten Modellparametern für das Bauteil kombiniert werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass der Anwender keine komplizierten bruchmechanischen oder FE-Berechnungen durchführen muss, sondern auf tabellierte Ergebnisse zurückgreifen kann. Die einzige unveränderliche Randbedingung für die Anwendung der erarbeiteten Ergebnisse ist die Geometrie des bewerteten Bauteils, in diesem Fall des Achsschenkels. Die ermittelte Rissspitzenbeanspruchung entspricht der zu fordernden Mindestbruchzähigkeit des Werkstoffs.

**BRUCHMECHANISCH BASIERTE BEMESSUNG FÜR DEN ÜBERLASTFALL BEIM SONDEREREIGNIS**

Der bruchmechanische Sicherheitsnachweis für den Überlast-

fall erfolgt durch den Vergleich der bruchmechanischen Rissspitzenbeanspruchung mit der Bruchzähigkeit des Werkstoffs unter den Belastungsbedingungen des Überlastfalls (Bild 2).

Im Hinblick auf eine möglichst niedrige Komplexität des bruchmechanischen Sicherheitsnachweises und auf einen geringen Aufwand für den Anwender und damit eine hohe Praxistauglichkeit der Methode wurde eine Vorgehensweise entwickelt, um die vorhandene Bruchzähigkeit des Werkstoffs nicht in kostenintensiven Bruchmechanikversuchen experimentell ermitteln zu müssen. Zur Abschätzung der Bruchzähigkeit wird eine im bruchmechanischen Bauteilbewertungsregelwerk etablierte empirische Korrelation auf der Basis der Kerbschlagarbeit herangezogen. Bei sprödem Bruchverhalten muss eine statistisch basierte Auswertemethodik zugrunde gelegt werden. Die Aussage über einen bestimmten abgeschätzten Bruchzähigkeitswert des Werkstoffs verknüpft diesen dann mit den Parametern Versagenswahrscheinlichkeit, Temperatur und Rissgröße (Bild 3). Die Wahl der Versagenswahrscheinlichkeit obliegt dem Anwender und hängt von der bei der Bemessung gewünschten Sicherheit ab.

**SCHWINGFESTIGKEITSNACHWEIS**

Sofern rechnerisch gezeigt werden konnte, dass das Bauteil den einzelnen Sonderereignissen standhält, gilt es im abschließenden Schritt nachzuweisen, dass unter den Betriebslasten inklusive der Sonderereignisse ein Ermüdungsriss nicht die kritische Risslänge erreicht. Für den Fall, dass ein Sonderereignis nicht direkt zum Versagen führt, ist eine Beeinflussung des zyklischen Bauteilverhaltens beziehungsweise der resultierenden Lebensdauer nicht auszuschließen. Dementsprechend wird eine Bemessungsmethode benötigt, die den Einfluss der Belastung zum Zeitpunkt ihres Auftretens berücksichtigt, sodass die folgenden Beanspruchungen ebenfalls zutreffend simuliert werden können (Bild 3).

Das örtliche Konzept bietet aufgrund der umkehrpunktweisen Überführung der Belastungs-Zeit-Funktion in die Beanspruchungs-Zeit-Funktion die besten Voraussetzungen, die Entwicklung des Werkstoffverhaltens in Abhängigkeit der fortschreitenden Schädigung berücksichtigen zu können. Dazu sind, ausgehend vom zyklischen Werkstoffverhalten, die äußeren Belastungen mit Hilfe von FE-Simulationen in lokale Bean-

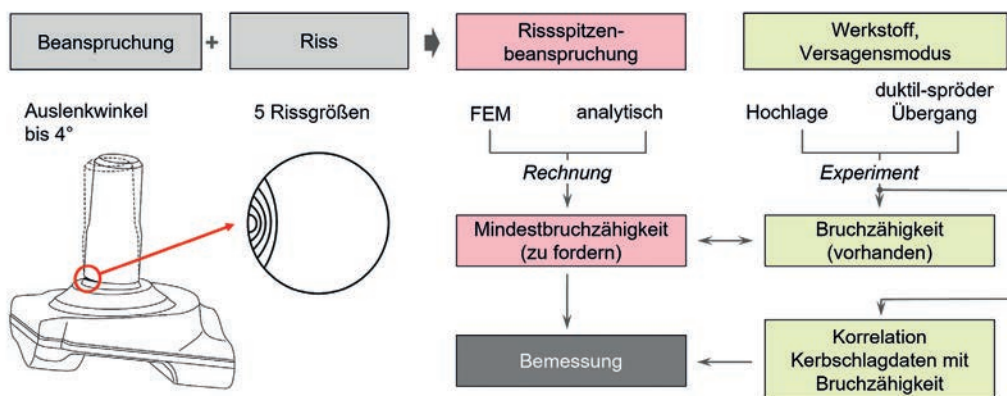


Bild 2: Schematische Darstellung der bruchmechanisch basierten Bemessung für den Überlastfall beim Sonderereignis

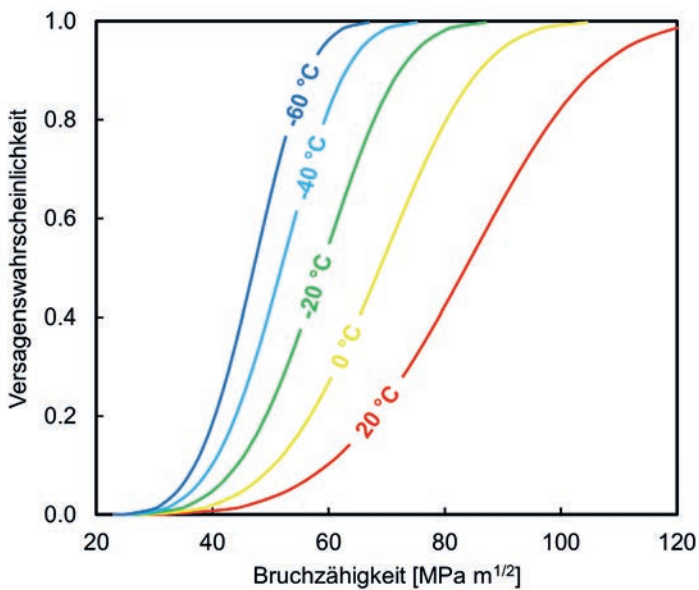


Bild 3: Beispiel der für einen bainitischen Schmiedestahl abgeschätzten Bruchzähigkeit (Beanspruchbarkeit des Werkstoffs)

spruchungen zu überführen. Dies erfolgt gemäß dem örtlichen Konzept umkehrpunktweise. Die Schädigungsbewertung der lokalen Beanspruchung erfolgt mit Hilfe eines bruchmechanisch basierten Schädigungsparameters. Dieser ermöglicht neben der Berechnung des Schädigungsbeitrags noch die Berechnung der Risslänge. Während die akkumulierte Risslänge die kritische Risslänge über die gesamte Nutzungsdauer nicht erreichen darf, wird die akkumulierte Schädigung benötigt, um das Spannungs-Dehnungs-Verhalten für die Berechnung des nächsten Beanspruchungspaths in Abhängigkeit der bis dato aufgetreten Schädigung anzupassen.

**SCHLUSSFOLGERUNGEN**

Eine gesteigerte Schwingfestigkeit in Kombination mit reduzierter Duktilität beziehungsweise Zähigkeit erfordert die Anpassung des Nachweiskonzepts, um eine ausreichende Bauteil-Betriebsfestigkeit und Bruchsicherheit gewährleisten zu

können. (Bild 4). Die Wahl des Ausfallkriteriums unter Beachtung der tatsächlichen Randbedingungen, wie Steifigkeiten, Lastpfad, nicht nur im einzelnen Bauteil, sondern in der Baugruppe beziehungsweise im Gesamtsystem oder aber die anzunehmende Risslänge, führt zu realistischen Bauteilbeanspruchungen, bei deren Absicherung werkstoffspezifische Eigenschaften zu berücksichtigen sind. Eine kleine kritische Risslänge beziehungsweise große Restbruchfläche sind nicht automatisch ein Knockout-Kriterium für die Verwendung des Werkstoffs, sondern werden als Randbedingungen für das Bemessungskonzept gewertet. Aus der Schar an verfügbaren Bemessungsmethoden gilt es, die für das Werkstoffverhalten geeigneten Methoden auszuwählen und synergistisch zusammenzuführen.

Die Langfassung des Abschlussberichts kann über die Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. beim WSM Wirtschaftsverband Stahl- und Metallverarbeitung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Die Autoren danken dem BMWK und der AiF für die finanzielle Förderung sowie der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV), dem Industrieverband Massivumformung e. V. (IMU) und der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) sowie den im PBA beteiligten Unternehmen für die Koordination und Betreuung der Forschungsarbeiten im Rahmen des IGF-Vorhabens 20873 N „B<sup>3</sup> – Bemessung und Bruchverhalten Bainit“, das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert worden ist.



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz



Forschungsnetzwerk Mittelstand

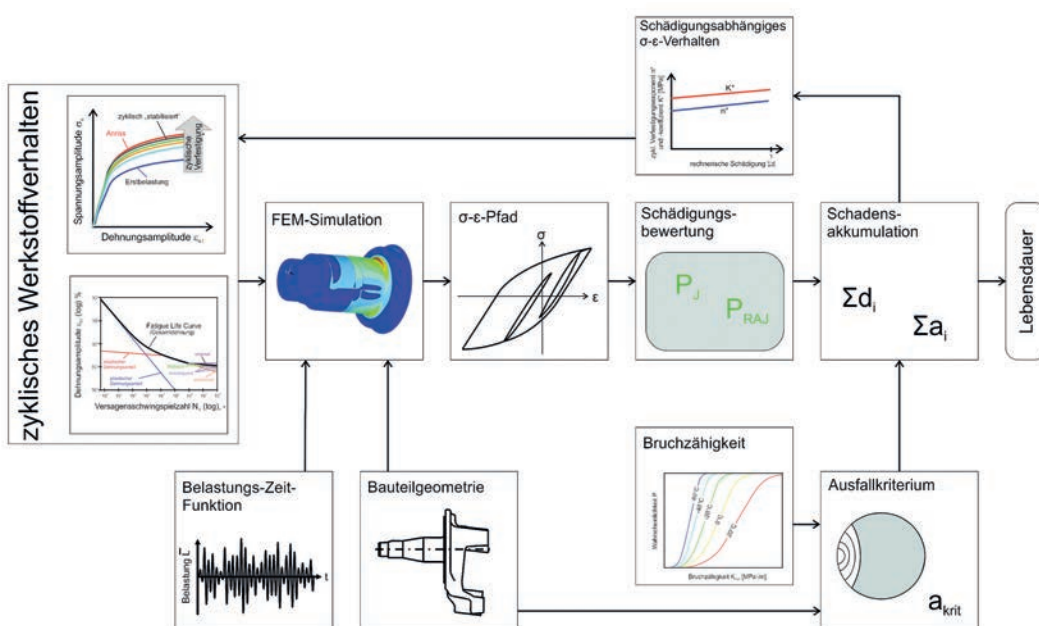


Bild 4: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Bemessung, Bilder: Autoren