

Bewertung von Einschlussgrößenverteilungen im Hinblick auf die Dauerfestigkeit von hochfesten Stahlwerkstoffen

AiF-Nr.:
18973 N

Obmann:
Silke Rösch

beteiligte Unternehmen

SchaefflerTechnologies AG & Co.KG, Aßmann
Ingenieurdienste, Georgsmarienhütte GmbH,
ECOROLL AG, Robert Bosch GmbH, ZF-
Friedrichshafen AG, Maschinenfabrik ALFING
Kessler GmbH, Steinhoff GmbH & Cie. OHG,
I-Deal Technologies GmbH, Deutsche
Edelstahlwerke GmbH, Thermo Fisher
Scientific GmbH, Eich Rollenlager GmbH

Laufzeit:
01.12.2015 – 28.02.2018

Erstelldatum:
07.11.2018

Forschungsstelle:
IWT Leibniz-Institut für Werkstofforientierte
Technologien
bime Bremer Institut für Strukturmechanik
und Produktionsanlagen

Projektleiter:
Brigitte Clausen
Thomas Hochrainer

Sachbearbeiter:
Jens Schumacher
Phil Daro Krummrich

Forschungsvereinigung:
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss
FA 21 (Gefüge und mechanische
Eigenschaften)

Zielsetzung und Lösungsweg

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, eine Methode zu entwickeln, mit der die Wirkung von Einschlüssen und Einschlussgruppen in Stählen auf die Dauerfestigkeit von Proben und Bauteilen, die aus der entsprechenden Charge gefertigt werden, quantifiziert werden kann. Hierbei wird angenommen, dass die Größe des größten Einschlusses mit steigendem Probenvolumen zunimmt und sich dieser Zusammenhang mathematisch beschreiben lässt. Dieser Hypothese folgend soll basierend auf den Größen der Einschlüsse, die in metallografischen Schliffen, in Bruchflächen von wasserstoffbeladenen Zugproben, die per Ultraschalluntersuchungen oder durch ein Verfahren, das auf optischer Emissionsfunken-spektroskopie beruht, gefunden werden, die Größe der versagenskritischen Einschlüsse oder Einschlussgruppen in Proben und Bauteilen unterschiedlicher Größe vorhergesagt werden. Diese Vorhersage dient als Grundlage für die Berechnung der Dauerfestigkeit der Proben und Bauteile.

Als Datenbasis für die Ermittlung der Parameter des Berechnungsmodells werden unterschiedliche hochfeste Stähle in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen herangezogen, die in den letzten

Jahrzehnten in unterschiedlichen Forschungsvorhaben am IWT untersucht wurden. Ein bruchmechanischer Ansatz wird angewandt, um den Einfluss von Versagen verursachenden Einschlüssen auf die Dauerfestigkeit quantitativ bewerten zu können. Um Eigenspannungen in den Proben, Mittelspannungen während der Belastung sowie mehrachsige Spannungszustände, die beispielsweise in Kerben auftreten, berücksichtigen zu können, werden verschiedene Schwingfestigkeitshypothesen bei der Modellbildung berücksichtigt.

Der Threshold-Wert der zyklischen Rissausbreitung wird für die unterschiedlichen Einschlusstypen ermittelt, um den Einfluss der Einschlusstypen Oxid, Sulfid, Karbid und Nitrid auf die Dauerfestigkeit von Stählen mit unterschiedlichen Härten bewerten zu können. Basierend auf den derart ermittelten Modellparametern werden auf Basis der vorhergesagten Einschlussgrößen die Dauerfestigkeiten von Proben oder Bauteilen berechnet.

Parallel hierzu wird der Einfluss von Einschlussgruppen auf die Schwingfestigkeit von Proben untersucht. Hierzu wird die Spannungsüberhöhung, die von einer Einschlussgruppe erzeugt wird, mit der Spannungs-

überhöhung, die von einzelnen Einschlüssen der Gruppe hervorgerufen werden, für unterschiedliche Orientierungen verglichen.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde die Dauerfestigkeit von kleinen, mittleren und großen Ermüdungsproben, die aus einer Charge des

Wälzlagerstahls 100Cr6 entnommen wurden, experimentell ermittelt. Diese Versuchsergebnisse dienen als Bewertungsgrundlage für die Qualität der Vorhersage von Einschlussgrößen und Dauerfestigkeiten.

Ergebnisse

Vorhersage der Einschlussgrößenverteilung in Proben

Um die Schwingfestigkeit einer Probe oder eines Bauteils auf Basis der versagenskritischen Einschlussgröße berechnen zu können, muss die Defektgröße im Vorhinein bekannt sein. Bei metallografischen Reinheitsgraduntersuchungen wird eine Referenzfläche oder ein Referenzvolumen untersucht. Eine Aussage über die erwartete Einschlussgröße, die zum Versagen des Bauteils oder der Probe führt, wird jedoch nicht getroffen. Im Folgenden werden vier Ansätze vorgestellt, die im Rahmen dieses Vorhabens angewendet werden, um auf Basis von Größenverteilungen in einer Referenzfläche oder einem Referenzvolumen auf die Größenverteilung des größten Einschlusses im hochbeanspruchten Volumen einer Probe oder eines Bauteils schließen zu können.

Die Ergebnisse der Reinheitsgradanalyse nach der ASTM-Norm E2283 sind eine geeignete Datenbasis für die Vorhersage des größten Einschlusses in einem Referenzvolumen. Die experimentellen Schwingfestigkeitsuntersuchungen haben gezeigt, dass vornehmlich globulare Oxide zum Versagen der Ermüdungsproben führen. Aus diesem Grund werden als Datenbasis die größten globularen Oxide aus 25 Schliften, die jeweils eine Fläche von 210 mm² aufweisen, herangezogen. Bei der Auswertung nach ASTM E2283 werden die umformbedingten Hohlräume an den Einschlüssen bzw. kleinere Mangansulfide, die an den Oxiden anhafteten, bei der Ermittlung des Feret-Durchmessers mit berücksichtigt. Bei der folgenden Auswertung werden nur die Feret-Durchmesser der Oxid-Einschlüsse betrachtet, sodass angenommen werden kann, dass der Feret-Durchmesser mit dem Durchmesser d des globularen Oxids übereinstimmt. In Bild 1 ist die Größenverteilung der größten globularen Oxide dargestellt, die in den Schliften gefunden werden.

Für die mathematische Beschreibung der Größe der größten Oxide in der Schlifffläche werden die Gumbel-Verteilung F_{Gumbel} (Gleichung 1) und die Fréchet-Verteilung $F_{\text{Fréchet}}$ (Gleichung 2) herangezogen.

$$F_{\text{Gumbel}}(d) = \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{d-\lambda}{\delta}\right)\right)\right) \quad (1)$$

$$F_{\text{Fréchet}}(d) = 2 \left(\frac{d}{d_{0,v0}}\right)^{-c} \quad (2)$$

Die Parameter λ und δ in Gleichung 1 beschreiben dabei die Größe bzw. die Streuung der ermittelten Feret-Durchmesser. Der Parameter d_0 ist der Median der Fréchet-Verteilung und der Parameter c beschreibt die Streuung der Einschlussgröße in Gleichung 2. Die Fréchet-Verteilung und die Gumbel-Verteilung werden an die Datenpunkte angepasst und sind ebenfalls in Bild 1 dargestellt. Die dazugehörigen Verteilungsparameter sind in Tabelle 1 aufgelistet.

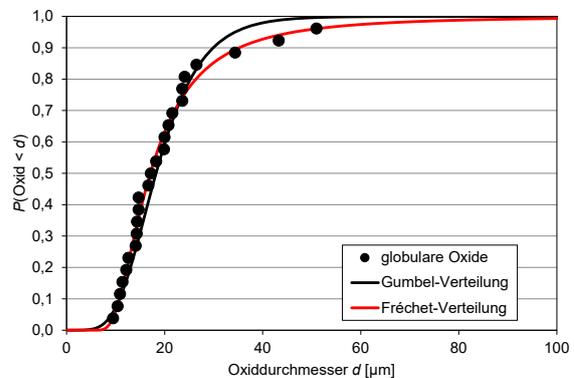


Bild 1: Größenverteilung der größten Oxide in den Schliften

Wie in Bild 1 zu erkennen ist, beschreibt die Fréchet-Verteilung die Datenpunkte im Bereich der großen größten Einschlüsse besser als die Gumbel-Verteilung. Dies zeigt, dass die Fréchet-Verteilung für die Vorhersage der Einschlussgrößen besser geeignet sein sollte als die Gumbel-Verteilung.

Für die Vorhersage des größten Einschlusses in dem Volumen V der Ermüdungsproben wird außerdem die Größe des Referenzvolumens V_0 benötigt, auf das sich die ermittelten Verteilungsparameter in Tabelle 1 beziehen.

Tabelle 1: Parameter der Gumbel- und Fréchet-Verteilung

Gumbel-Verteilung			Fréchet-Verteilung		
λ	δ	V_0	$d_{0,v0}$	c	V_0
16,0 µm	6,2 µm	3,35 mm ³	17,1 µm	2,6	3,58 mm ³

Hierfür wird ein Berechnungsansatz von Murakami [MUR02] verwendet. Um die Größenverteilungen nicht auf eine Fläche, sondern auf ein Volumen beziehen zu können, wird der lichtmikroskopisch untersuchten Fläche S_0 eine Dicke zugeordnet. Bei dem Ansatz mit der Fréchet-Verteilung wird der Median der ermittelten Fréchet-Verteilung $d_{0,v0}$ verwendet und im Fall der Gumbel-Verteilung der

Parameter λ . Die berechneten Referenzvolumina sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgelistet.

Basierend auf wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen können in Kenntnis der Parameter in Tabelle 1 mit Gleichung 3 für die Gumbel-Verteilung und Gleichung 4 für die Fréchet-Verteilung die Größe des größten Oxideinschlusses $d_{0,V}$ in einer Probe mit dem Volumen V berechnet werden.

$$d_{0,V} = \lambda - \delta \cdot \ln\left(-\frac{V_0}{V} \cdot \ln(0,5)\right) \quad (3)$$

$$d_{0,V} = d_{0,V_0} \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^{1/c} \quad (4)$$

Alternativ zu der zuvor dargestellten Methode können die Einschlussgrößenverteilungen der größten Einschlüsse in Ermüdungsproben auf Basis der Größenverteilung der einzelnen Einschlussgrößen durchgeführt werden. Hierbei werden nicht nur die jeweils größten Einschlüsse je Schlieffläche erfasst, sondern alle Einschlüsse, deren Größe oberhalb eines Grenzwertes liegen. Da auch kleinere Einschlüsse berücksichtigt werden, muss die Einschlussgrößenmittlung mit einer hohen Auflösung erfolgen. Aus diesem Grund wird die Messung der Einschlussgröße mit einer Partikelanalysesoftware am Rasterelektronenmikroskop und nicht lichtmikroskopisch durchgeführt. Da bei dieser Methode keine Einschlüsse unterhalb des Erfassungsgrenzwertes x_u detektiert werden, liegen keine Informationen über die Anzahl und die Größe der kleinen Einschlüsse vor. Die Gesamtzahl der Einschlüsse N_{Gesamt} innerhalb der untersuchten Schlieffläche ist daher auch nicht bekannt. Die Anpassung der Verteilungsfunktion (Gleichung 5) erfolgt unter der Bedingung, dass die Einschlüsse kleiner als der Durchmesser d aber größer als der Erfassungsgrenzwert x_u sind.

$$F_{\text{Einschluss}}(d) = 2 - \left(\frac{d}{d_{0V}}\right)^{-c_V} \quad (5)$$

Bei der Auswertung der Messdaten, die mit der Partikelanalysesoftware ermittelt werden, werden nur die oxidischen, aluminiumhaltigen Einschlüsse berücksichtigt. Die ausgewertete Schlieffläche beträgt insgesamt $A_{\text{Schliff}} = 1200 \text{ mm}^2$. Als Einschlussgröße d wird in diesem Fall der äquivalente Kreisdurchmesser verwendet, der auf Basis der gemessenen Einschlussfläche berechnet wird. Als unterer Grenzwert wird eine Einschlussgröße von $x_u = 9,5 \mu\text{m}$ festgelegt. In Bild 2 sind die Messergebnisse mit der dazugehörigen Verteilungsfunktion dargestellt.

Durch diesen Berechnungsansatz ist nun die Größenverteilung der oxidischen Einschlüsse im Schliff und deren Anzahl pro Quadratmillimeter bekannt. Für die Berechnung der erwarteten versagenskritischen Einschlussgröße ist aber nicht die Größenverteilung der ermittelten Schnittkreise in einer Fläche, sondern die Größenverteilung der Kugeldurchmesser der Einschlüsse im Volumen von Interesse. Da die Einschlüsse im Allgemeinen nicht in der Ebene ihrer größten Abmessung geschnitten

werden, ist die maximale projizierte Einschlussfläche größer oder gleich der im Schliff ermittelten Querschnittsfläche. Demzufolge weicht die am Schliff ermittelte Einschlussgrößenverteilung von der tatsächlichen Größenverteilung der Einschlüsse im Volumen ab. Von Gegner, Henninger und Öchsner wird die Methode von Scheil und Saltykov beschrieben, mit der die Größenverteilung der Einschlüsse im Volumen auf Basis der Größenverteilung in den Schnittebenen berechnet werden kann [GEG04]. Die aus der Umrechnung resultierenden Verteilungsparameter und die Anzahl an Oxideinschlüssen pro Kubikmillimeter sind in Tabelle 2 aufgelistet.

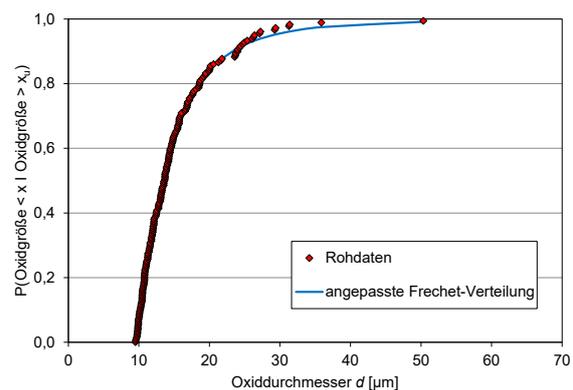


Bild 2: Größenverteilung der Oxideinschlüsse, die größer als der Grenzwert $x_u = 9,5 \mu\text{m}$ sind

Tabelle 2: Parameter der berechneten Größenverteilung der Einschlüsse in Volumen

d_{0V}	c_V	N_{0V}
12,0 μm	4,0	14,8

In Kenntnis des hochbeanspruchten Volumens V der Ermüdungsproben lässt sich auf Basis der Größenverteilung der einzelnen Einschlüsse die Größenverteilung des größten Einschlusses der Probe ermitteln. Der Median der Verteilung ergibt sich nach wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen zu:

$$d_{0,V} = d_{0V} \cdot \left(\frac{V}{V_0} \cdot N_{0V}\right)^{1/c_V} \quad (6)$$

Von Thermo Fisher Scientific SARL wurden 25 Proben, die aus den Halbzeugen entnommen wurden, mit dem firmeneigenen System ARL iSpark OES untersucht. Mit diesem Messsystem können für unterschiedliche chemische Zusammensetzungen der Einschlüsse die jeweilige Anzahl der Einschlüsse in unterschiedlichen Größenkategorien bestimmt werden. Die Größe wird dabei als äquivalenter Kugeldurchmesser angegeben. Das Prüfvolumen während der Messung ist dabei bekannt, sodass die Anzahl der Einschlüsse pro Kubikmillimeter ermittelt wird. Aufgrund des primären Versagens der Ermüdungsproben an Aluminiumoxid-Einschlüssen wird sich auf diesen Einschlusstyp bei der Vorhersage des größten Einschlusses beschränkt. Dabei werden alle unterschiedlichen Aluminiumoxidtypen für die

Auswertung zusammengefasst. Basierend auf allen untersuchten Proben wird die Anzahl an Einschlüssen N_{AlO} , die den äquivalenten Durchmesser d überschreiten, bestimmt. Hierbei wird angenommen, dass die Größenverteilung der Aluminiumoxide $F_{\text{Aluminiumoxidgröße}}$ einer Fréchet-Verteilung gehorcht:

$$F_{\text{Aluminiumoxidgröße}} = 2 \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-c} \quad (7)$$

Der Parameter d_0 steht dabei für den Median des Aluminiumoxidurchmessers und der Parameter c beschreibt die Streuung der Oxidgrößen. Basierend auf der Fréchet-Verteilung kann die Überschreitungshäufigkeit N_{AlO} für ein Volumen von einem Kubikmeter wie folgt berechnet werden:

$$N_{\text{AlO}} = N_{0,\text{AlO}} \cdot \left(1 - 2 \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-c} \right) \quad (8)$$

Hierbei ist $N_{0,\text{AlO}}$ die Gesamtanzahl an Aluminiumoxiden, die sich in einem Probenvolumen von einem Kubikmillimeter befinden.

In Bild 3 sind die experimentell ermittelten Überschreitungshäufigkeiten dargestellt.

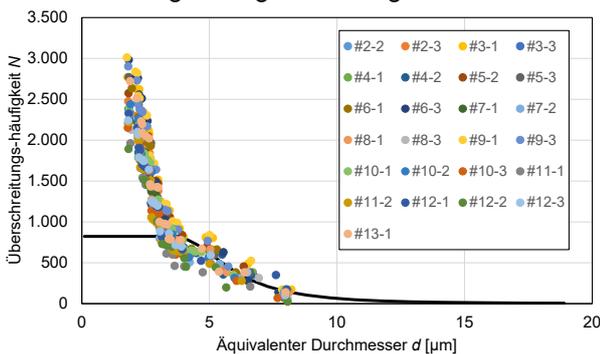


Bild 3: Anzahl an Oxiden in einem Volumen von einem Kubikmillimeter, deren äquivalenter Durchmesser den Durchmesser d überschreitet

Wie in Bild 3 zu erkennen ist, liegt bei einem äquivalenten Durchmesser von 5 μm bei den experimentell ermittelten Oxidgrößen eine Stufe vor. Vermutlich liegen in dem Stahl Oxideinschlüsse vor, die aufgrund ihrer Entstehungsgeschichten unterschiedlichen Größenverteilungen zuzuordnen sind. Aus diesem Grund werden bei der Parameteranpassung von Gleichung 8 nur die Oxideinschlüsse berücksichtigt, die rechts von der Stufe, d. h. größer als 5 μm sind. Die resultierende Kurve ist in Bild 3 dargestellt und die dazugehörigen Parameter sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Parameter $N_{0,\text{AlO}}$, d_0 und c der Überschreitungshäufigkeitsfunktion für sämtliche Oxideinschlüsse deren äquivalenter Durchmesser 5 μm überschreitet.

$N_{0,\text{AlO}}$	d_0	c
823	5,91 μm	4,12

Durch Einsetzen der ermittelten Parameter in Gleichung 6, wobei in der Gleichung $N_{0,\text{V}}$ durch $N_{0,\text{AlO}}$, $d_{0,\text{V}}$ durch d_0 und c_{V} durch c ersetzt werden, ergibt sich der Median des größten Aluminiumoxids $d_{0,\text{V}}$ in einer Probe mit dem Volumen V .

Bei der Zugprüfung der wasserstoffbeladenen Ermüdungsproben wurde nur bei einer Probe eine Rissinitiierung an einem Oxid-Einschluss festgestellt. Folglich kann auf Basis dieses Ergebnisses keine Vorhersage der versagenskritischen Einschlussgröße für die zyklische belasteten Ermüdungsproben gemacht werden. Vermutlich war das Prüfvolumen der Zugprobe zu gering, um ein Einschlussversagen zu ermöglichen.

Bei der Ultraschallprüfung der Halbzeuge wurden vereinzelt makroskopische Einschlüsse gefunden. Die statistische Auswertung der Ultraschallergebnisse ergab eine Wahrscheinlichkeit von unter einem Prozent für das Auftreten eines Makroeinschlusses in dem Prüfvolumen der großen Proben. Da in den Bruchflächen der Ermüdungsproben auch keine Makroeinschlüsse gefunden wurden, konnte die Vorhersage, dass nahezu keine Makroeinschlüsse im Prüfvolumen gefunden werden, bestätigt werden.

Die Vorhersage der größten Einschlüsse im hochbeanspruchten Volumen der Ermüdungsproben erfolgt, wie zuvor beschrieben, mit vier Ermittlungsmethoden. Zwei der Methoden, bei denen die Gumbel-Verteilung bzw. die Fréchet-Verteilung für die Beschreibung der Einschlussgrößenverteilung herangezogen werden, basieren auf einem modifizierten Murakami-Ansatz. Bei der Einzeleinschluss-Methode werden sämtliche Oxideinschlüsse in einer Schlieffläche, deren Größe einen bestimmten Grenzwert überschreitet, herangezogen, um die Größenverteilung zu ermitteln. Für eine mathematische Beschreibung der Größenverteilung wird hierbei die Fréchet-Verteilung verwendet. Bei der PDA-OES-Methode erfolgt die Ermittlung der Einschlussgrößen durch Funken-spektroskopie. Wie bei der Einzeleinschluss-Methode wird auch bei dieser Methode eine Fréchet-Verteilung an sämtliche Einschlussgrößen angepasst, deren Größe einen bestimmten Grenzwert überschreitet.

Um die Genauigkeit der Oxidgrößenvorhersage bewerten zu können, sind in Bild 4 die mit den verschiedenen Ansätzen berechneten Oxidgrößen den experimentell ermittelten Oxidgrößen gegenübergestellt. Um einen direkten Größenvergleich der berechneten äquivalenten Durchmesser d mit den experimentell ermittelten $area^{0,5}$ -Oxidgrößen aus den Bruchflächen zu ermöglichen, werden die berechneten äquivalenten Durchmesser $d_{0,\text{V}}$ in $\sqrt{area_{50,\text{V}}}$ -Werte umgerechnet (Gleichung 9).

$$\sqrt{area_{50,\text{V}}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot d_{0,\text{V}} \quad (9)$$

Der Murakami-Ansatz mit der Gumbel-Verteilung führt zu einer guten Abschätzung der tatsächlich auftreten Oxidgrößen in den Bruchflächen. Mit den drei übrigen Methoden wird die Größe der rissinitiierenden Oxide überschätzt. Mit steigendem

hochbeanspruchten Volumen werden dabei die auftretenden Abweichungen größer.

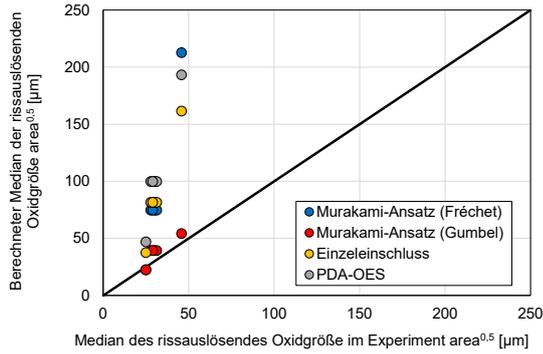


Bild 4: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten rissauslösenden Oxidgrößen mit den berechneten größten Oxiden im hochbeanspruchten Probenvolumen

Wie in Bild 1 zu erkennen ist, beschreibt die Fréchet-Verteilung die Größenverteilung der ermittelten größten Oxide besser als die Gumbel-Verteilung. Dennoch werden mit der Gumbel-Verteilung bessere Vorhersagen erzielt. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die experimentell ermittelte Einschlussgrößenverteilung das Resultat von mehreren sich überlagernden Größenverteilungen ist. Beispielsweise können die im Schliff gefundenen Oxide unterschiedliche Entstehungsgeschichten haben, sodass sie vermutlich auch unterschiedlichen Größenverteilungen gehorchen. Da aber im Schliff diese unterschiedlichen Entstehungsgeschichten nicht erkannt werden können und alle Oxide gemeinsam ausgewertet werden, ergibt sich eine Größenverteilung, die die Streuung der einzelnen Oxidtypen überschätzt. Folglich werden auf Basis dieser Verteilungsparameter bei einer Einschlussgrößenvorhersage für Volumina, die größer als das Referenzvolumen sind, die Einschlussgrößen überschätzt. Die Stufe bei den Einschlussgrößen, die per PDA-OES ermittelt werden (Bild 3), ist ein Hinweis auf Oxide, die unterschiedlichen Größenverteilungen gehorchen. Wie in Bild 1 zu erkennen ist, unterschätzt die Gumbel-Verteilung die Streuung der Oxidgrößen, die im Schliff gefunden werden. Folglich kompensiert dies die aufgrund der sich überlagernden Größenverteilungen überschätzte Streuung der Oxidgrößen. Somit erfolgt auf Basis der Gumbel-Verteilung die beste Größenvorhersage der rissinitiiierenden Oxide in den Ermüdungsproben.

Zusammenhang zwischen Einschlussgröße und Dauerfestigkeit

Ziel der Methodenentwicklung ist es, einen Zusammenhang zwischen der versagenskritischen Einschlussgröße und der Dauerfestigkeit für eine Grenzschwingspielzahl von 10 Millionen Lastwechseln herzustellen. Die im Folgenden beschriebene Methode basiert auf einem bruchmechanischen Ansatz und ist vergleichbar mit dem Ansatz von Murakami [MUR02]. Murakami betrachtet Einschlüsse als Risse, deren Größe mit

der Einschlussgröße übereinstimmt. Folglich kann für die unterschiedlichen Einschlussgrößen die Schwingbreite der Spannungsintensität ΔK in Abhängigkeit von der lokalen Spannungsamplitude σ_{av} berechnet werden:

$$\Delta K \cong \sigma_{av} \sqrt{\pi \sqrt{area}} \quad (10)$$

Als Defektgröße wird dabei die Wurzel der Fläche $area^{0,5}$ senkrecht zur Belastungsrichtung angegeben. Um den tatsächlichen Einfluss von Einschlüssen auf die Dauerfestigkeit bewerten zu können, wird der prinzipielle Ansatz von Murakami verwendet und auf Einschlüsse, die zum Versagen geführt haben, angewendet. Für den Threshold-Wert der zyklischen Rissausbreitung ΔK_{th} wird dabei folgende Art der Gleichung gewählt:

$$\Delta K_{th} = C_1 \cdot (H_V + C_2) \cdot (\sqrt{area})^{C_3} \quad (11)$$

Die Parameter C_1 , C_2 und C_3 werden dabei an die Versuchsergebnisse angepasst, die aus den vorherigen Projekten stammen (Bild 5). Als Einflussgrößen auf den Threshold-Wert der zyklischen Rissausbreitung werden dabei die Einschlussgröße $area^{0,5}$ und die Härte H_V des Stahls berücksichtigt.

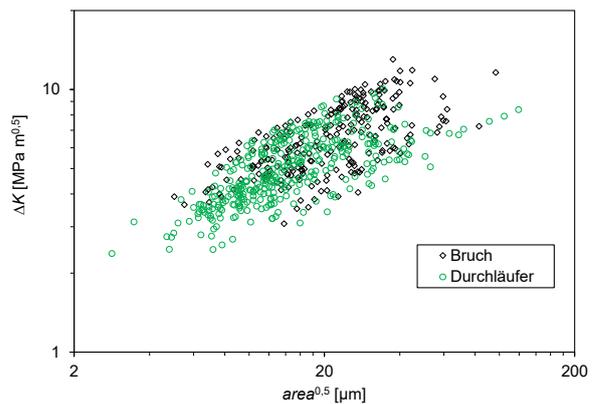


Bild 5: Datenbasis, die für die Parameterermittlung verwendet wird.

Für sämtliche Proben, die gebrochen sind, wird die Schwingbreite der Spannungsintensität ΔK mit Gleichung 10 auf Basis der Spannungsamplitude und der Einschlussgröße, die am Rasterelektronenmikroskop ermittelt wird, berechnet. Im Fall der Durchläuferproben, die die Grenzschwingspielzahl erreicht haben, ohne zu brechen, kann die Schwingbreite der Spannungsintensität nicht berechnet werden, da die Einschlussgrößen unbekannt sind. Aus diesem Grund wurden die meisten Ermüdungsproben erneut bei einer höheren Lastamplitude geprüft. Bei der höheren Beanspruchung versagen die Ermüdungsproben und der Typ und die Größe des versagenskritischen Einschluss können in der Bruchfläche analysiert werden. Mit dieser Information kann die Schwingbreite der Spannungsintensität, die zuvor zu keinem Ermüdungsversagen geführt hat, berechnet werden.

Abhängig von der Belastungsart müssen Mittelspannungen bei der Dauerfestigkeitsbewertung berücksichtigt werden. Außerdem können mehrach-

sige Lastspannungen durch mehrachsig aufgebrachte Belastungen auftreten oder bei einachsiger Belastung im Bereich von Kerben entstehen. Des Weiteren können mehrachsige Eigenspannungszustände durch die Probenfertigung oder die Wärmebehandlung in dem hochbeanspruchten Bereich der Proben auftreten, die bei der Bewertung ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Im Rahmen dieses Vorhabens werden daher vier Schwingfestigkeitshypothesen evaluiert, um mehrachsige Spannungen, Mittelspannungen und Eigenspannungen berücksichtigen zu können. Am besten ließen sich die Ermüdungsergebnisse mit der Schwingfestigkeitshypothese von Bomas [BOM10] beschreiben:

$$\sigma_{av} = 2 \cdot (\tau_{a,max} + \alpha \cdot p_m) \quad (12)$$

Für die Ermittlung der Vergleichsspannungsamplitude σ_{av} nach Bomas wird die maximale Schubspannungsamplitude $\tau_{a,max}$ und die mittlere hydrostatische Spannung p_m benötigt. Der Gewichtungparameter α in Gleichung 12 hängt von dem jeweiligen Werkstoff ab und muss für gewöhnlich experimentell ermittelt werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird der Parameter α jedoch mit der Mittelspannungsempfindlichkeit M der Stähle korreliert. Dabei wird eine lineare Abhängigkeit der Mittelspannungsempfindlichkeit von der Härte angenommen, die mit den Parametern A und B beschrieben werden kann. Für den Parameter α ergibt sich dabei folgende Abhängigkeit von der Härte der Stahlproben:

$$\alpha = \frac{3}{2} \cdot A \cdot H_V + \frac{3}{2} \cdot B \quad (13)$$

Die Ermüdungsergebnisse von Einsatzstählen, Vergütungsstählen und Wälzlagerstählen in unterschiedlichen Wärmebehandlungszuständen, die in den letzten zwei Jahrzehnten in Forschungsvorhaben am IWT ermittelt wurden, werden als Datenbasis genutzt, um die Parameter zu ermitteln (Bild 5). Insgesamt konnten 603 Proben für die Parameterermittlung berücksichtigt werden. Oxide, Sulfide, Karbide und Nitride sind dabei die Versagen verursachenden Einschlüsse. Für alle diese Proben werden die lokalen Spannungsamplituden und Mittelspannungen am Ort des Einschlusses berechnet. Im Fall von gekerbten Proben oder komplexen Belastungen wird der gesamte mehrachsige Spannungszustand berücksichtigt. Des Weiteren werden die Eigenspannungen und die Härte am Ort des Rissausgangs ermittelt. Die Einschlussgrößen der bei der Parameteranpassung berücksichtigten Proben (Bild 5) liegen zwischen 2,8 μm und 119 μm . Da die Härte der untersuchten Proben zwischen 357 HV und 776 HV variiert, streuen auch die ΔK -Werte, die zu einem Bruch oder einem Durchläufer führen (siehe Bild 5). Dennoch ist eine Zunahme der Schwingbreite der Spannungsintensität mit steigender Einschlussgröße erkennbar.

Insgesamt zeigt die Auswertung der Ermüdungsdaten aus den vorangegangenen Forschungsvorhaben, dass unterschiedliche Ein-

schlusstypen für die Rissinitiation bei einer Ermüdungsbelastung verantwortlich sind. Abhängig vom Einschlusstyp werden unterschiedliche mittlere Versagen verursachende Einschlussgrößen festgestellt. Unter der Berücksichtigung, dass der Threshold-Wert mit der Einschlussgröße zunimmt, ist zwischen der Wirkung der verschiedenen Einschlusstypen kein Unterschied festzustellen. Dies bedeutet, dass bei der Berechnung der Dauerfestigkeit nicht zwischen den Einschlusstypen unterschieden werden muss.

Um den Einfluss der Einschlussgröße, der Härte und der Belastungsart auf die Dauerfestigkeit bewerten zu können, wird die gesamte Datenbasis aus Bild 5 herangezogen, ohne zwischen den verschiedenen Einschlusstypen zu unterscheiden. Für die Schwingfestigkeitshypothese von Bomas werden die Parameter C_1 , C_2 , C_3 , A und B , die die experimentelle Datenbasis am besten beschreiben, ermittelt (Tabelle 4). Mit diesen Parametern wird das Versagensverhalten der Ermüdungsproben besser beschrieben als mit dem Murakami-Ansatz [MUR02], dessen Berechnungsmethode als Referenz ebenfalls angewendet wurde.

Tabelle 4: Parameter A , B , C_1 , C_2 und C_3

A [HV ⁻¹]	B	C_1	C_2	C_3
0,00128	-0,383	0,00290	95	0,384

Die Wechselfestigkeit σ_W einer Probe berechnet sich dabei auf Basis der Gleichungen 10 und 11 mit den Parametern C_1 , C_2 und C_3 sowie der Einschlussgröße $area^{0,5}$ und der Härte H_V wie folgt:

$$\sigma_W = \frac{1000 \cdot C_1 \cdot (H_V + C_2)}{\sqrt{\pi} \cdot (\sqrt{area})^{(0,5-C_3)}} \quad (14)$$

Vorhersage kritischer Einschlussanhäufungen

Eine bedeutende Rolle bei der Streuung der Dauerfestigkeit spielen Gruppen von Defekten [KRE15]. Des Weiteren besitzen Gruppen von Defekten in bestimmten Konstellationen zur Belastungsrichtung verstärkende oder abschirmende Wirkungen [SAL14]. Im Rahmen dieses Vorhabens wird ein Gruppenkriterium, d. h. Konstellationen von Partikeln, wie sie beispielsweise in Reinheitsgradnormen zur Beschreibung von kritischen Einschlussanhäufungen Anwendung finden, überprüft. Mittels einer Parameterstudie wird der tatsächliche Einfluss des Gruppenkriteriums auf die Spannungsüberhöhung an Einschlussgruppen dargestellt. Dies wird unter der Verwendung eines pixelbasierten Ansatzes und der Finite-Elemente-Methode erarbeitet.

Hierfür werden Längsschliffbildern eines hochfesten Stahls Gruppen von drei Einschlüssen entnommen. Diese Einschlussgruppen werden mittels Imagej ausgemessen und in normierte Testbilder umgewandelt. Der variable Parameter der Studie ist die Größe des Dreiecks, das durch die Einschlüsse aufgespannt wird. Die Einschlussgruppen werden

unter uniaxialer Zuglast in einer Scheibe simuliert und die maximale Normalspannung und die von Mises Vergleichsspannung bestimmt. Die resultierenden Spannungsverläufe werden im Zusammenhang mit dem Gruppenkriterium überprüft, um Indizien für das Gruppenkriterium als geeignetes Maß zur Beschreibung von kritischen Einschlussanhäufungen zu finden.

Im Rahmen der Bewertung von kritischen Einschlussanhäufungen konnten Variationen von sechs verschiedenen Einschlussanhäufungen aus Längsschliffbildern, basierend auf der FEM und einem Pixelierungsansatz, weitestgehend automatisiert numerisch modelliert und die resultierenden Spannungsverteilungen analysiert werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Gruppenkriterien der Reinheitsgradnorm DIN EN 10247:2007 werkstoffmechanisch nicht belegt werden können.

Für die Einschlussgruppen gilt, dass die Eintritte der Gruppenkriterien mit Hochpunkten als auch Tiefpunkten der Spannungskonzentrationen zusammenfallen und die Bereiche der Gruppenkriterien sich mit steigenden als auch sinkenden Verläufen von Spannungskonzentrationen decken. Im Falle von harten Einschlüssen gilt ebenso, dass sich die Bereiche der Gruppenkriterien mit steigenden als auch sinkenden Verläufen decken. Die Datenlage lässt keinen kausalen Zusammenhang eines Gruppenkriteriums und einer erhöhten Spannungsverstärkung zu. Das Gruppenkriterium nach DIN EN 10247:2007 ist somit kein geeignetes Maß für die Bestimmung von kritische Einschlussgruppen.

Die Verläufe der Spannungskonzentrationen der einzelnen Einschlussgruppen unterscheiden sich stark. Deshalb sollte ein Gruppenkriterium nicht allein auf mittleren Entfernungen basieren. Vielmehr sollte es weitere Parameter, wie z. B. die Form eines Dreiecks, das sich zwischen den Flächenschwerpunkten von drei Einschlüssen aufspannt, und die Orientierung zur Belastungsrichtung berücksichtigen.

Um diesen Einfluss weiter zu untersuchen, sollten weitere Einschlussgruppen analysiert werden. Zukünftige Gruppenkriterien sollten den Fokus von den Kantenlängen z. B. eines flächenschwerpunktverbindenden Dreiecks auf die Form und die Orientierung zur Belastungsrichtung verschieben.

Vorhersage der Dauerfestigkeit von Proben

Die Kombination der Einschlussgrößenvorhersagen mit der Dauerfestigkeitsvorhersage auf Basis der Parameter, die für die Bomas-Hypothese ermittelt werden (IWT-Threshold), sind in Bild 6 den experimentell ermittelten Dauerfestigkeiten gegenübergestellt. Für den Murakami-Ansatz mit der Fréchet-Verteilung, den Einzeleinschluss-Ansatz sowie den PDA-OES-Ansatz wird in Kombination mit dem IWT-Threshold eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Dauerfestigkeiten erzielt. Da die drei Ansätze zu ähnlichen Einschlussgrößenvorhersagen geführt haben (Bild 4), ist auch eine Vorhersage von ähnlichen Dauerfestigkeiten zu erwarten. Wie zuvor

beschrieben, werden die Einschlussgrößen mit den drei Berechnungsansätzen überschätzt. Gleichzeitig werden die Dauerfestigkeiten für diesen Stahl für die vorliegenden Einschlussgrößen mit dem IWT-Threshold überschätzt. Diese beiden Abweichungen kompensieren sich, sodass die geringen Abweichungen von den berechneten zu den experimentell ermittelten Dauerfestigkeiten zustande kommen. Die Kombination von dem auf der Gumbel-Verteilung basierenden Murakami-Ansatz mit dem IWT-Threshold führt zu einer überschätzten Dauerfestigkeit. Im Vergleich zu den drei anderen Vorhersagemethoden liefert der Murakami-Ansatz mit der Gumbel-Verteilung die beste Einschlussgrößenvorhersage. Jedoch führt die Kombination dieser realistischen Einschlussgrößen mit dem IWT-Threshold, der die Dauerfestigkeit dieses Stahls überschätzt, zu einer überschätzten Dauerfestigkeit.

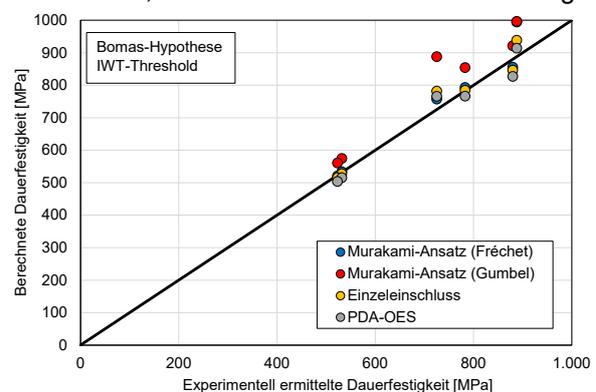


Bild 6: Vergleich der berechneten und der experimentell ermittelten Dauerfestigkeiten. Berechnung erfolgte auf Basis der vorhergesagten Oxidgrößen mit den Modellparametern, die für die Schwingfestigkeitshypothese nach Bomas ermittelt wurden.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Vorhabens wird eine Methode entwickelt, um auf Basis von metallografischen Auswertungen oder PDA-OES-Untersuchungen die Dauerfestigkeit unterschiedlicher Proben und Bauteile berechnen zu können. Der Berechnungsansatz besteht dabei aus zwei Teilen: Der Einschlussgrößenvorhersage und der Dauerfestigkeitsberechnung. Für die Berechnung der Dauerfestigkeit von hochfesten Stahlproben wird ein empirischer bruchmechanischer Ansatz entwickelt. Die Härte des Stahls und die Einschlussgröße sind dabei die entscheidenden Einflussgrößen. Die verschiedenen Einschlussstypen Oxide, Nitride, Karbide und Sulfide haben, bei gleicher Größe, den gleichen Einfluss auf die Dauerfestigkeit, sodass bei dem Berechnungsmodell nicht zwischen den unterschiedlichen Einschlussstypen unterschieden wird. Basierend auf den vorliegenden Daten wird der Threshold-Wert der zyklischen Rissausbreitung für eine Bruchwahrscheinlichkeit von 50 % ermittelt. Dieser steigt mit steigender Einschlussgröße an. Neben dem Threshold-Wert wird im Rahmen des Vorhabens ein Modell zur Berechnung des Gewichtungsfaktor α für unterschiedliche Schwing-

festigkeitshypothesen entwickelt. Dies ermöglicht in Kenntnis der Härte der Stähle komplexe Spannungszustände, Mittelspannungen und Eigen- spannungen bei der Dauerfestigkeitsberechnung zu berücksichtigen.

Im Rahmen der Bewertung von kritischen Einschlussanhäufungen konnten Variationen von sechs verschiedenen Einschlussanhäufungen aus Längsschliffbildern, basierend auf der FEM und einem Pixelierungsansatz, weitestgehend automatisiert numerisch modelliert und die resultierenden Spannungsverteilungen analysiert werden. Dabei hat sich gezeigt, dass sich das Gruppenkriterium nach DIN EN 10247:2007 werkstoffmechanisch nicht belegt werden kann.

Die Verläufe der Spannungskonzentrationen der einzelnen Einschlussgruppen unterscheiden sich stark. Deshalb sollte ein Gruppenkriterium nicht allein auf der mittleren Entfernung basieren. Vielmehr sollte es weitere Parameter berücksichtigen, wie z. B. die Form eines Dreiecks, das sich zwischen den Flächenschwerpunkten von drei Einschlüssen aufspannt, und die Orientierung zur Belastungsrichtung.

Zusammenfassend zeigt diese Untersuchung, dass eine Abschätzung der Dauerfestigkeit von Proben und Bauteilen, die an Einschlüssen versagen, auf Basis von Referenzuntersuchungen möglich ist. Das Ziel des Vorhabens wurde daher erreicht. Aktuell ermöglicht die Vorhersage der kritischen Einschlussgröße auf Basis der Gumbel-Verteilung eine zufriedenstellende Einschlussgrößen- vorhersage. Hierauf aufbauend kann eine bruchmechanische Dauerfestigkeitsbewertung mit dem IWT-Threshold und der Schwingfestigkeits- hypothese von Bomas erfolgen. Im Rahmen des Vorhabens zeigte sich, dass weitere Gefügemerkmale neben der Härte und der Einschlussgröße, berücksichtigt werden müssen, um die Dauerfestigkeitsberechnung weiter zu verbessern. Der IWT-Threshold führt bei Berücksichtigung sämtlicher Chargen zu einer höheren Vorhersagegenauigkeit als der Murakami-

Threshold. Aufgrund der bislang weiteren, nicht quantifizierten Gefügeeinflüsse führt jedoch, abhängig von der Stahlcharge, entweder der IWT- oder der Murakami-Threshold zu einer besseren Vorhersage. Aufgrund der komplexen Zusammen- hänge, die sich bei der Einschlussgruppen- bewertung herausgestellt haben, können mögliche auftretende versagenskritische Einschlussgruppen bei der Dauerfestigkeitsberechnung noch nicht berücksichtigt werden.

Literatur

- [BOM10] Bomas, H.; Bacher-Hoechst, M.; Kienzler, R.; Kunow, S.; Loewisch, G.; Muehleder, F.; Schroeder, R.: Crack initiation and endurance limit of a hard steel under multiaxial cyclic loads. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 33 (2010) 2, S. 126-139
- [GEG04] Gegner, J.; Henninger, C.; Öchsner, A.: Stereologische Analyse und Modellierung von Objektverteilungen aus Schnittbildern. *Materialwiss. u. Werkstofftechn.* 35 (2004) 1, S. 36-44
- [KRE15] Krewerth, D.; Lippmann, T.; Weidner, A.; Biermann, H.: Influence of non-metallic inclusions on fatigue life in the very high cycle fatigue regime. *International Journal of Fatigue* 84 (2015), S. 40-52
- [MUR02] Murakami, Y.: *Metal fatigue: Effects of small defects and nonmetallic inclusions.* Elsevier, Oxford, 2002
- [SAL14] Salajegheh, N.; Prasannavenkatesan, R.; McDowell, D. L.; Olson, G. B.; Jou, H.: Finite Element Simulation of Shielding/ Intensification Effects of Primary Inclusion Clusters in High Strength Steels Under Fatigue Loading. *Journal of Engineering Materials and Technology* 136 (2014) 3, Paper No: MATS-13-1083

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 18973 N der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Es wurde vom Fachausschuss 21 (Gefüge und mechanische Eigenschaften) der AWT betreut.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt: Dr.-Ing. Jens Schumacher Tel.: ++49 421 218-51375 E-Mail: schumacher@iwt-bremen.de