

Mechanismenorientierte Simulation der mikrostrukturbestimmten Kurzrisssausbreitung

B. Künkler¹, C.-P. Fritzen¹, O. Düber², U. Krupp² und H.-J. Christ²
kuenkler@imr.mb.uni-siegen.de

¹Institut für Mechanik und Regelungstechnik - Mechatronik

²Institut für Werkstofftechnik

Universität Siegen, Paul-Bonatz-Str. 9-11, 57068 Siegen

Kurzfassung

Basierend auf experimentellen Untersuchungen und dem Modell von *Navarro* und *de los Rios* wurde ein erweitertes numerisches Rissmodell entwickelt [1]. Dieses Modell bildet Ermüdungsrisse und ihre plastischen Zonen mit Hilfe einer Randelementemethode nach und ist in der Lage, das für kurze Risse charakteristische Ausbreitungsverhalten auf diskreten Gleitebenen im Stadium I mechanismenbasiert elastisch-plastisch zu beschreiben. Dabei wird die sehr wichtige Barrierewirkung von Korngrenzen auf das Risswachstum berücksichtigt. Zur Bestimmung des Übergangs zur Rissausbreitung auf wechselnden Gleitebenen wird mit Hilfe von zusätzlichen Randelementen die Schubspannung vor der Rissspitze eines Stadium I-Risses bestimmt. Kommt es dann auf einer zusätzlichen Gleitebene zum Überschreiten einer kritischen Spannungsintensität, wird auf dieser Ebene eine Versetzungsquelle aktiviert und das Risswachstum findet nun auf wechselnden Ebenen statt. Dadurch stellt sich eine Ausbreitung senkrecht zur maximalen Normalspannung ein [2]. Diese Erweiterung auf den Übergang Einfach-/Mehrfachgleiten ermöglicht es, Simulationen der Schädigungsentwicklung unter zyklischer Beanspruchung vom mikrostrukturell kurzen Anfangsrisse bis in den Bereich des als mikrostrukturunabhängig angesehenen Langrisses durchzuführen, wobei der Rissfortschritt physikalisch sinnvoll wiedergegeben wird. Zur Verifikation des Modells werden entsprechende Simulationen mit experimentellen Ergebnissen verglichen [3]. Das numerische Verfahren wird zur Modellierung der Rissausbreitung in synthetischen, auf *Voronoi*-Diagrammen basierenden Gefügen mit dem Ziel der Lebensdauervorhersage und Werkstoffoptimierung genutzt.

1 Einleitung

Unter zyklischer Belastung tritt Bauteilversagen bei Beanspruchungsamplituden auf, die deutlich unterhalb der statisch ertragbaren Beanspruchung liegen. Dieses als Ermüdung bezeichnete Phänomen lässt sich bei metallischen Werkstoffen auf das Wachstum von Rissen bis zum Bauteilversagen zurückführen. Bei rel. niedrigen Beanspruchungsamplituden und somit hohen Bruchlastspielzahlen (high-cycle fatigue, HCF) wird dabei ein Großteil der Lebensdauer durch die Rissinitiierung und mikrostrukturelle Kurzrisssausbreitung bestimmt. Die Kurzrisssausbreitungsphase lässt sich weiter in die Ausbreitung auf einer Gleitebene (Stadium I, in Richtung der maximalen Schubspannung) und die Ausbreitung auf wechselnden Gleitebenen (senkrecht zur max. Normalspannung) unterteilen. Zu Beginn erfolgt die Rissausbreitung in den ersten Körnern oftmals im Stadium I. Nach dem anschließenden Risswachstum infolge Wechselgleitung, das sich durchaus über mehrere Körner erstrecken kann, breitet sich der mittlerweile „lange“ Riss

dann mikrostrukturunabhängig im Stadium II (bruchmechanischer Modus I) aus. Die verschiedenen Phasen sind zur Verdeutlichung in Bild 1 schematisch dargestellt. Aufgrund der bei kurzen Rissen starken Wechselwirkung mit der Mikrostruktur des Werkstoffs ist eine Beschreibung mit Hilfe der linear-elastischen Bruchmechanik in diesem Bereich aber nicht möglich. Es wurde daher das nachfolgend vorgestellte Modell entwickelt, das den Riss und seine plastische Zone mit Hilfe einer Randelementemethode nachbildet und das für kurze Risse charakteristische Ausbreitungsverhalten mechanismenbasiert beschreibt.

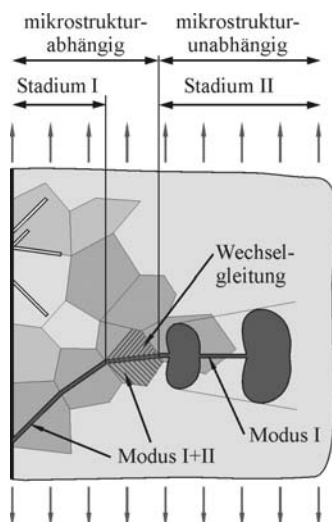


Bild 1: Phasen der Rissausbreitung in metallischen Werkstoffen

2 Kurzrissmodell im Stadium I

Zur Beschreibung der Stadium I-Rissausbreitung wird der Riss mit seiner plastischen Zone als Fließstreifen modelliert. Der Riss selbst darf sich öffnen, in der plastischen Zone werden aber lediglich tangentiale Verschiebungen entlang der Gleitebene zugelassen. Man erhält ein Randwertproblem, das mit Hilfe der Theorie verteilter Versetzungen gelöst wird. Dazu erfolgt eine Diskretisierung des Risses und der plastischen Zone mit Randelementen, die eine konstante Verschiebung innerhalb der Elemente beschreiben. Die Versetzungsverteilung lässt sich dann numerisch berechnen [1].

Zwei Typen von Elementen finden Anwendung: Risselemente, die Normal- und Tangentialverschiebungen darstellen können, und Elemente in der plastischen Zone, die lediglich Tangentialverschiebungen beschreiben (Bild 2b). Außerdem können sog. „Sensorelemente“ integriert werden, die zwar keine Verschiebungen darstellen, mit deren Hilfe sich jedoch der Spannungszustand an beliebigen Stellen bestimmen lässt. Das Materialverhalten in der plastischen Zone wird als elastisch/ideal-plastisch angesetzt. Jedes Element besteht jeweils aus einer negativen Versetzung am Elementbeginn und einer positiven Versetzung am Elementende. Dadurch kann eine über die Elementlänge konstante Verschiebung beschrieben werden. Aus der Superposition der Spannungsfelder der beiden durch das Randelement dargestellten Versetzungen wird die sog. Einflussfunktion G^{ij} ermittelt (siehe z.B. [1]), welche die Spannungen auf den Mittelpunkt des Elements i , verursacht durch die Verschiebung im Element j , beschreibt.

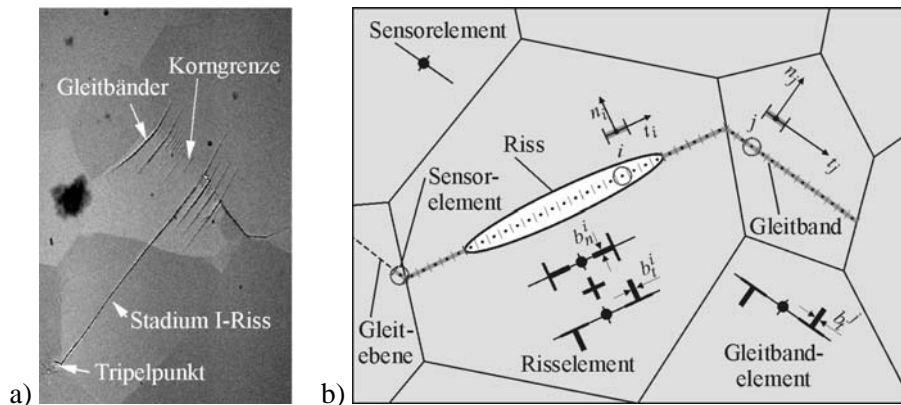


Bild 2: a) Stadium I-Riss und b) Modell mit Randelementen

Aus der Superposition aller Spannungen der Elemente j sowie der äußeren Spannung $\sigma^{i\infty}$ errechnet sich die Gesamtspannung auf ein Element i . Für p Risselemente und q „aktive“ Elemente in der plastischen Zone ergibt sich schließlich für die Spannungen ein lineares Gleichungssystem, welches folgende Randbedingungen erfüllen muss:

- Die Normalspannung σ_{nn}^i am Riss muss, wenn dieser offen ist, verschwinden.
- Im Rissbereich soll Schubspannungsfreiheit ($\tau_{nt}^i = 0$) herrschen (keine Reibung zwischen den Rissflanken).
- In der plastischen Zone darf die Reibspannung τ^b (die mikrostrukturelle zyklische Fließspannung gegen Abgleiten) nicht überschritten werden.
- Es darf am Riss keine negative Normalverschiebung b_n auftreten, da sich die Rissufer sonst durchdringen würden.

Man erhält einen Satz von Ungleichungen für die Normal- und Schubspannungen im Ligament, die linear von den Elementverschiebungen abhängen, sowie für die Restriktion bzgl. der Normalverschiebungen

$$\begin{aligned}
 \sigma_{nn}^i &= \sum_{j=1}^p G_{nn,n}^{ij} b_n^j + \sum_{j=1}^{p+q} G_{nn,t}^{ij} b_t^j + \sigma_{nn}^{i\infty} && \leq 0 \quad i=1 \dots p \\
 \left| \tau_{nt}^i \right| &= \left| \sum_{j=1}^p G_{nt,n}^{ij} b_n^j + \sum_{j=1}^{p+q} G_{nt,t}^{ij} b_t^j + \tau_{nt}^{i\infty} \right| && \begin{cases} = 0 & i=1 \dots p \\ \leq \tau^b & i=p+1 \dots p+q \end{cases} \quad (1) \\
 b_n &\geq 0 && i=1 \dots p.
 \end{aligned}$$

Aus dem zu lösenden Ungleichungssystem (1) ergeben sich die Normal- und Tangentialverschiebungen für die p Elemente im Rissbereich und die q Tangentialverschiebungen für die Elemente in der plastischen Zone und somit auch die entsprechenden plastischen Risspitzenabgleitungen $CTSD$ (crack tip slide displacement). Aus der Schwingbreite der Risspitzenabgleitung folgt das Risswachstum je Zyklus [4]

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta CTSD^m. \quad (2)$$

3 Rissausbreitung auf wechselnden Gleitebenen

Um die Mechanismen, die dem Übergang von der Rissausbreitung auf einer Gleitebene zur Rissausbreitung auf wechselnden Gleitebenen zugrunde liegen, zu identifizieren, wird zunächst das Schubspannungsfeld in einem konstanten Radius vor der Rissspitze eines linear-elastischen Mixed-Mode-Risses mit dem Schubspannungsfeld eines linear-elastischen, ideal-plastischen Stadium I-Risses verglichen (Bild 3). Dabei zeigt sich, dass im rein elastischen Riss die Schubspannung $\tau_{r\phi}$ vor der Rissspitze in Richtung des Risses nahezu maximal ist (graue Kurve in Bild 3b). Da bei metallischen Werkstoffen die plastische Verformung durch das Abgleiten kristallographischer Ebenen erfolgt, wächst ein mikrostrukturell kurzer Riss zunächst schubspannungskontrolliert im Stadium I auf einer einzelnen Gleitebene, denn für einen sehr kurzen Riss ist die Schubspannung auch für den elastisch-plastischen Riss in Richtung des Risses maximal. Mit zunehmender Risslänge steigt die Schubspannung um die Rissspitze herum an, wird jedoch infolge der Abgleitung auf dem risstragenden Gleitband im Stadium I direkt vor der Rissspitze auf die zyklische Fließspannung reduziert. Durch die Abgleitung sinkt zwar auch die Schubspannung in den anderen Bereichen um die Rissspitze, jedoch ist dieser Spannungsabfall deutlich geringer als direkt vor der Rissspitze (schwarze Kurve in Bild 3b). Somit steigt bei einem Stadium I-Riss die Schubspannung auf zusätzliche Gleitebenen mit zunehmender Risslänge. Dies führt zur Aktivierung von Versetzungsquellen und damit zur Abgleitung auf zusätzlichen Ebenen. Somit scheint die Ursache für den Übergang von der Rissausbreitung im Stadium I zur Rissausbreitung infolge wechselnder Abgleitung die mit zunehmender Risslänge ansteigende Schubspannung auf zusätzliche Gleitebenen zu sein.

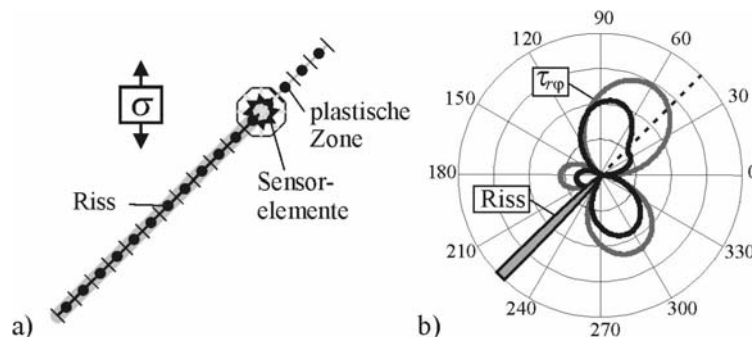


Bild 3: Riss mit Sensorelementen an der Rissspitze (a) und Schubspannungsverteilung in konstantem Abstand um die Rissspitze (b).

Der Rissfortschritt setzt sich nun nicht mehr nur aus dem Risswachstum auf einem Gleitband, sondern aus dem gleichzeitigen Risswachstum auf zwei Gleitbändern zusammen (vgl. Bild 1). Der Riss schwenkt infolge dessen auf eine Ausbreitungsrichtung senkrecht zur maximalen Normalspannung um (Bild 4b) und weist nun, im Gegensatz zum reinen Stadium I-Riss, auch eine Rissspitzenöffnung auf.

Für die weitere Beschreibung des ebenfalls nachbildbaren geometrischen Risschließens, des verwendeten Lösungsalgorithmus für das Ungleichungssystem und eine detailliertere Beschreibung des Modells sei auf [1,2] verwiesen.

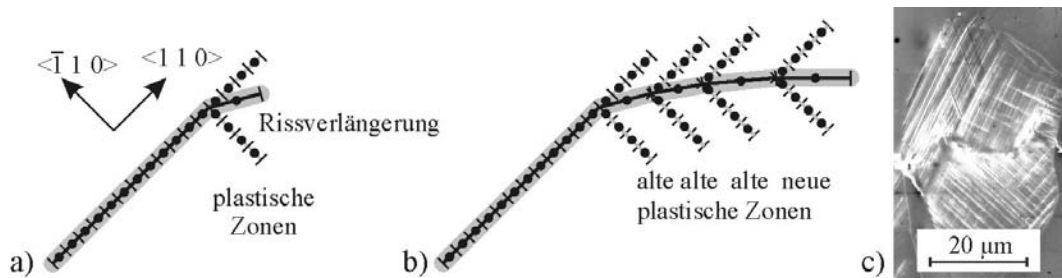


Bild 4: Simulation (a, b) und REM-Aufnahme (c) der Rissausbreitung im Wechselgleitmechanismus

4 Ergebnisse und Diskussion

Zur Verifikation des Modells und des Rissausbreitungsgesetzes wurden aus Ermüdungsversuchen real entstandene Rissgeometrien in das Modell implementiert, indem die Rissgeometrie ausgemessen und als Risspfad im Modell definiert wurde. Der im Experiment festgestellte Anfangsriss wurde ebenso ins Modell übertragen und einer zyklischen Berechnung unterzogen [1,2]. Die Risswachstumskurven aus der Simulation wurden mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Als Untersuchungswerkstoffe dienten dabei die Titanlegierung TIMETAL®LCB sowie der Duplexstahl 1.4462. Die Simulationen zeigten, dass wichtige Einflüsse der Mikrostruktur auf die Rissausbreitung, wie die Barrierewirkung von Korn- und Phasengrenzen, die durch die Kornorientierung vorgegebene Lage der Gleitebenen und die Anordnung der Phasen im zweiphasigen Duplexstahl von dem vorgestellten Modell nachgebildet werden können. Der Übergang von Einfachgleitung zu Wechselgleitung und das anschließende Risswachstum im Wechselgleitmechanismus konnten ebenfalls dargestellt werden.

Mit den verifizierten Modellen zur Kurzrisssausbreitung in Einfach- und Wechselgleitung lassen sich nun Risssimulationen mit dem Ziel der Lebensdauervorhersage bzw. Werkstoffoptimierung in statistischen Gefügen (hier durch sog. *Voronoi*-Zellen erzeugt) durchführen, die selbständig ihren Pfad suchen. Die Gefüge werden durch die Korndurchmesserverteilung, die Orientierungsverteilung sowie die Gitterstruktur charakterisiert. Zum Vergleich des Risswachstums in Einfach- und Wechselgleitung werden nachfolgend vier Simulationen vorgestellt, wobei sich der Übergang zum Wechselgleiten automatisch aus der Rechnung ergibt. Im ersten Fall erfolgt die Aktivierung sekundärer Gleitsysteme bereits im Startkorn, während im letzten Fall der Riss durch 13 Körner im Stadium I wächst. Die berechneten Rissverläufe sind in Bild 5 gezeigt, wobei nur der Risspfad ohne plastische Zonen dargestellt ist. Der Übergang zum Wechselgleiten ist markiert. Wie erwartet knicken die Risse dabei in die Ebene senkrecht zur maximalen Normalspannung ab.

Zur Beurteilung des Ausbreitungsverhaltes der unterschiedlichen Risse ist in Bild 5 die Risslänge über der Zyklenzahl aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass die Rissgeschwindigkeit nach dem Übergang zum Wechselgleiten (gekennzeichnet durch einen Punkt), analog zu experimentellen Untersuchungen [2], stark zurückgeht. Dieses Verhalten wird bei Riss 1 am deutlichsten, wo es nach dem noch im Startkorn erfolgten Übergang fast zu einem Rissstillstand kommt. Der Hauptgrund dafür ist, dass die plastische Verformung sich jetzt auf zwei Gleitbänder aufteilen kann. Mit zunehmender Risslänge steigt die Aus-

breitungsgeschwindigkeit im Wechselgleitmechanismus an. Als Abbruchkriterium, ab dem die Risswachstumssimulation gefügeunabhängig nach Langrisskonzepten fortgesetzt werden kann, wird ein Ausbreiten der plastischen Zone über mehrere Körner angesehen.

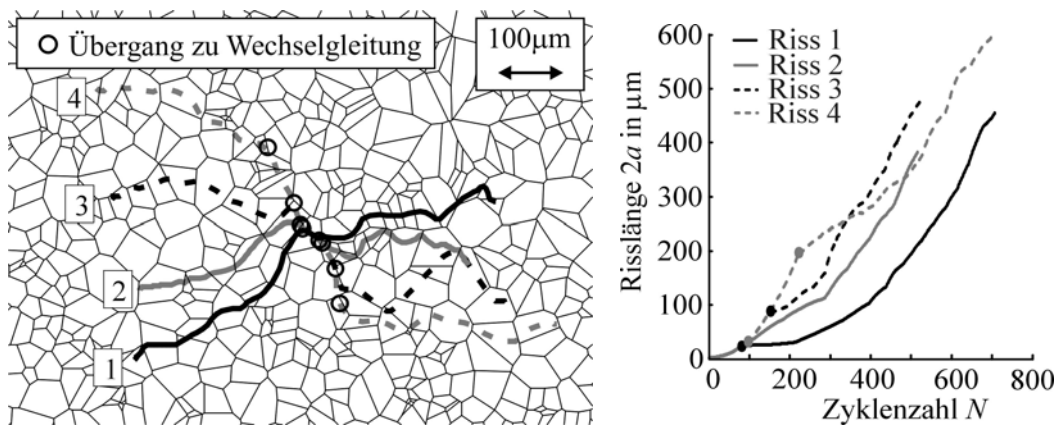


Bild 5: Rissausbreitung in statistischen Gefügen

Das vorgestellte Modell zur Simulation der mikrostrukturbestimmten Kurzrisssausbreitung ist somit in der Lage, wichtige Einflüsse, wie den Übergang von Einfach- zu Wechselgleitung, die Barrierewirkung von Korngrenzen, Riss schließen [1] und die Phasenordnung auf die Kurzrisssausbreitung zu reproduzieren und erlaubt Simulationen der Schädigungsentwicklung unter zyklischer Beanspruchung vom mikrostrukturell kurzen Anfangsriß bis in den Bereich des als mikrostrukturunabhängig angesehenen Langrisses, wobei der Rissfortschritt physikalisch sinnvoll wiedergegeben wird.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung dieses interdisziplinären Gemeinschaftsprojekts.

Literatur

- [1] Schick, A.: Ein neues Modell zur mechanismenorientierten Simulation der mikrostrukturbestimmten Kurzrisssausbreitung, Dissertation, Universität Siegen, 2004.
- [2] Künkler, B., Fritzen, C.-P., Düber, O., Krupp, U., Christ, H.-J.: Short Crack Propagation in Duplex Steel – Modelling and Experimental Verification, ICF11 – 11th International Conference on Fracture, 20.-25. März 2005, Turin, Italien, CD-Rom.
- [3] Düber, O., Künkler, B., Krupp, U., Christ, H.-J., Fritzen, C.-P.: Experimental Characterisation and Two-Dimensional Simulation of Short Crack Propagation in an Austenitic-Ferritic Duplex Steel. International Journal of Fatigue, akzeptiert 2005.
- [4] Wilkinson, A.J., Roberts, S.G., Hirsch, P.B.: Modelling the Threshold Conditions for Propagation of Stage I Fatigue Cracks. Acta Mater. 46 (1998), S. 379-390.