

VALIDIERUNG DES MTU MIXED-MODE RISSFORTSCHRITTSGESETZES

Guido Dhondt* und Daniel Bremberg#*

*MTU Aero Engines

#KTH Stockholm

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren wurde bei der MTU Aero Engines ein neues mixed-mode Rissfortschrittsgesetz entwickelt. Es sagt für eine beliebige Kombination von Mode I, Mode II und Mode III die Richtung und die Größe des nächsten Rissfortschrittsinkrements voraus. Für Mode-I Belastung bekommt man das übliche Mode-I Gesetz. Zur Validierung des nicht-ebenen Rissfortschritts wurden im letzten Jahr mehrere 4-Punktbiegeproben mit schrägem Riss getestet. Diese Versuche wurden jetzt ausgewertet. Der Vortrag vergleicht die Probenergebnisse mit den Vorhersagen des Rissfortschrittsgesetzes und klärt, ob eine Anwendung des klassischen Mode-I Gesetzes auf den äquivalenten Spannungsintensitätsfaktor die richtige Rissfortschrittsgeschwindigkeit liefert.

Stichwörter

Rissfortschritt, mixed-mode, 4-Punktbiegeproben, Rissfortschrittsgesetz

Abstract

In recent years a new mixed-mode crack propagation law has been developed at MTU. Based on the maximum principal asymptotic stresses at the crack tip the crack propagation angle and speed is predicted using the mixed-mode K-factors. The prediction of the crack propagation speed is based on the use of a mode-I crack propagation law applied to an equivalent K-factor. To verify this approach 4-point bending specimens with slanted cracks were subjected to cyclic loading and the propagating crack faces were monitored. The present paper compares the test results with the analytically predicted crack shapes.

Keywords

Crack propagation, mixed-mode, 4-point bending specimens, crack propagation law

Einleitung

Wirtschaftlichkeitsüberlegungen im Flugverkehr fordern eine Reduzierung des Gewichts und der benötigten Treibstoffmenge. Diese Ziele führen zu geringeren Wandstärken und erhöhten thermischen Belastungen im Triebwerksbau. Demzufolge ist die Wahrscheinlichkeit, dass Risse sich bilden, über die Jahre ständig angestiegen. Außerdem verlangen die Fluglinien eine Verlängerung der Wartungsintervalle, was häufig ohne Berücksichtigung des Rissfortschrittslebens nicht möglich ist. Damit ist die Fähigkeit, Rissfortschritt zuverlässig vorherzusagen zu können, extrem wichtig. Bei der MTU wurde in den vergangenen Jahren ein Verfahren entwickelt (CURVED-CRACK), um vollautomatisch gekrümmte Risse in bestehende Bauteile einzufügen [1]. Es basiert auf eine Kombination von Hexaederelementen innerhalb eines flexiblen Zylinders um der Rissspitze und eine Tetraedervernetzung überall sonst. Die Spannungsintensitätsfaktoren werden bestimmt auf Basis der Spannungen in den reduzierten Integrationspunkten der Hexaederelemente unmittelbar vor der Risspitze.

ze. Die K-Verteilung entlang der Rissfront ist die Information, aus der der Rissfortschrittswinkel und die Geschwindigkeit errechnet wird.

Das Rissfortschrittsgesetz

Die Spannung an der Risspitze in einer linear elastischen Rechnung weist eine Singularität auf der Form:

$$\sigma(r, \varphi, z) \approx \frac{\sigma^*(\varphi, z)}{\sqrt{2\pi r}} + O(1)$$

In obiger Formel ist r der Abstand von der Risspitze, φ ist der Winkel um der Risspitze und z ist eine Koordinate entlang der Rissfront. Der Term σ^* hat die Einheit eines Spannungsintensitätsfaktors und wird im weiteren Verlauf der Spannungsintensitätstensor genannt. Dieser Tensor ist nicht mehr von r abhängig. Wählt man außerdem einen bestimmten z -Wert (man konzentriert sich auf eine Stelle entlang der Rissfront) so ist der Spannungsintensitätstensor nur noch von der Winkel φ abhängig. Man bekommt also für jeden Wert von φ einen Tensor zweiter Ordnung, dessen Eigenwerte und Eigenvektoren man bestimmen kann. Durch Multiplikation des Spannungsintensitätstensors mit der Normale auf einer Ebene durch die Rissfront bekommt man einen Spannungsintensitätsvektors, dessen Komponenten in einem lokalen Koordinatensystem die Spannungsintensitätsfaktoren sind. Für die Ebenen senkrecht zu den Eigenvektoren reduzieren sich diese Spannungsintensitätsfaktoren zu einem Mode-I Faktor, das heißt, Mode-II und Mode-III sind nicht vertreten. Das ist in Bild 1 skizziert (für den zweidimensionalen Fall).

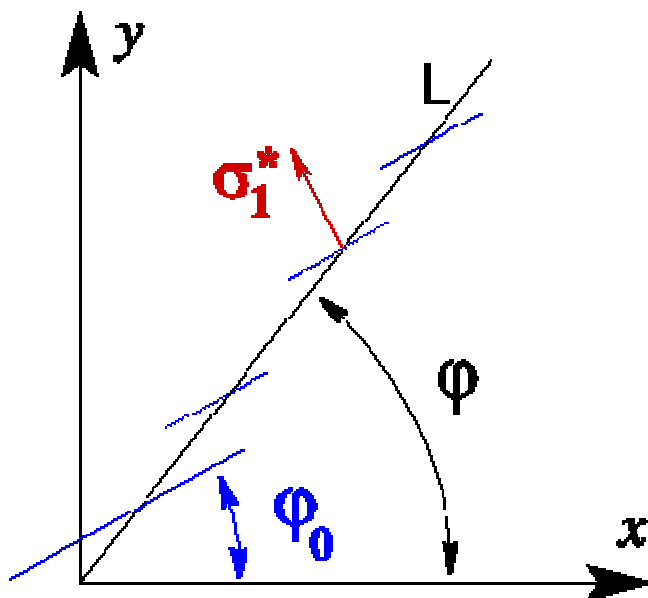


Bild 1: Hauptspannungsintensitätsfaktoren – Principal stress intensity factors

Jetzt enthalten diese Hauptebenen nicht unbedingt die Rissfront. So können die Hauptebenen für einen Spannungsintensitätstensor, der für den Winkel φ berechnet wurde, einen Winkel φ_0 ungleich φ aufweisen. Uns interessieren jedoch nur Span-

nungsintensitätsfaktoren auf Ebenen, die die Risspitze enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass der Rissfortschritt in solch einer Hauptebene stattfindet, das heißt, in einer Ebene, in der die Schubspannungsintensitätsfaktoren Null sind. Daraus resultiert die Hauptforderung, dass nur solche Winkel φ für die Rissausbreitungsebene zugelassen sind, wofür $\varphi = \varphi_0$. Dies führt in den meisten Fällen schon zu einer eindeutigen Festlegung der Rissfortschrittsebene. Zusammengefasst gelten die folgenden regeln:

1. Der Riss breitet sich aus in einer Hauptebene des Spannungsintensitätsfaktors
2. Die Hauptebene muss die Risspitze enthalten
3. Gibt es mehrere Hauptebenen, die die Regeln 1 und 2 erfüllen, breitet der Riss sich in der Ebene aus, die den größten Hauptspannungsintensitätsfaktor aufweist.

Die Lage der Hauptebene bestimmt den Ablenkwinkel und Verdrehwinkel [2-3], der Hauptspannungsintensitätsfaktor wird als äquivalenter Spannungsintensitätsfaktor gewertet. Analysen haben ergeben, dass nur für Mode-II-III Kombinationen größere Abweichungen von anderen Kriterien auftauchen, zum Beispiel von dem Kriterium, das an der Uni Paderborn benutzt wird [4].

Die 4-Punktbiegeversuche

Es wurden etwa 15 4-Punktbiegeproben aus Titan mit schrägem Anfangskerbe bei verschiedenen Temperaturen (50°C bis 350 °C) zyklisch getestet (Bild 2).

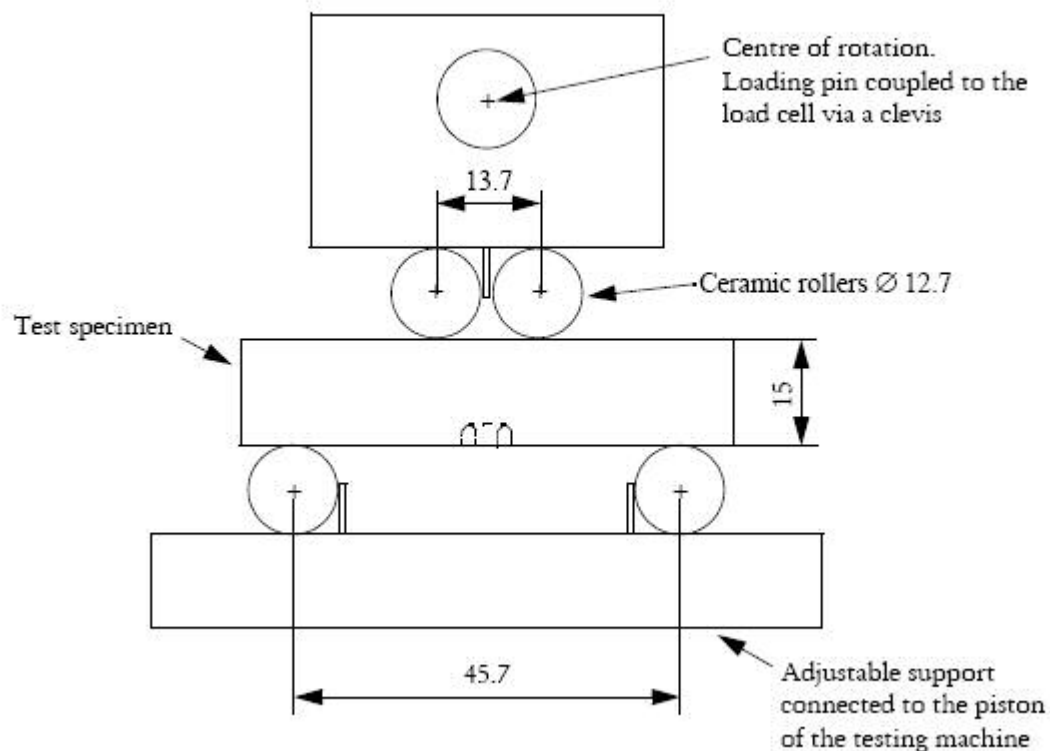


Bild 2: Versuchsanlage – Test setup

Die Kerbe hat eine tiefe von 3 mm, vor Anfang der Tests wurde zusätzlich ein Anfangsriß von etwa 0.4 mm Länge generiert. Der Rissfortschritt wurde mit der Potential Drop Methode und mit Marker Loads überwacht. Die Tests wurden bis Versagen gefahren. Eine typische Bruchfläche ist in Bild 3 dargestellt.

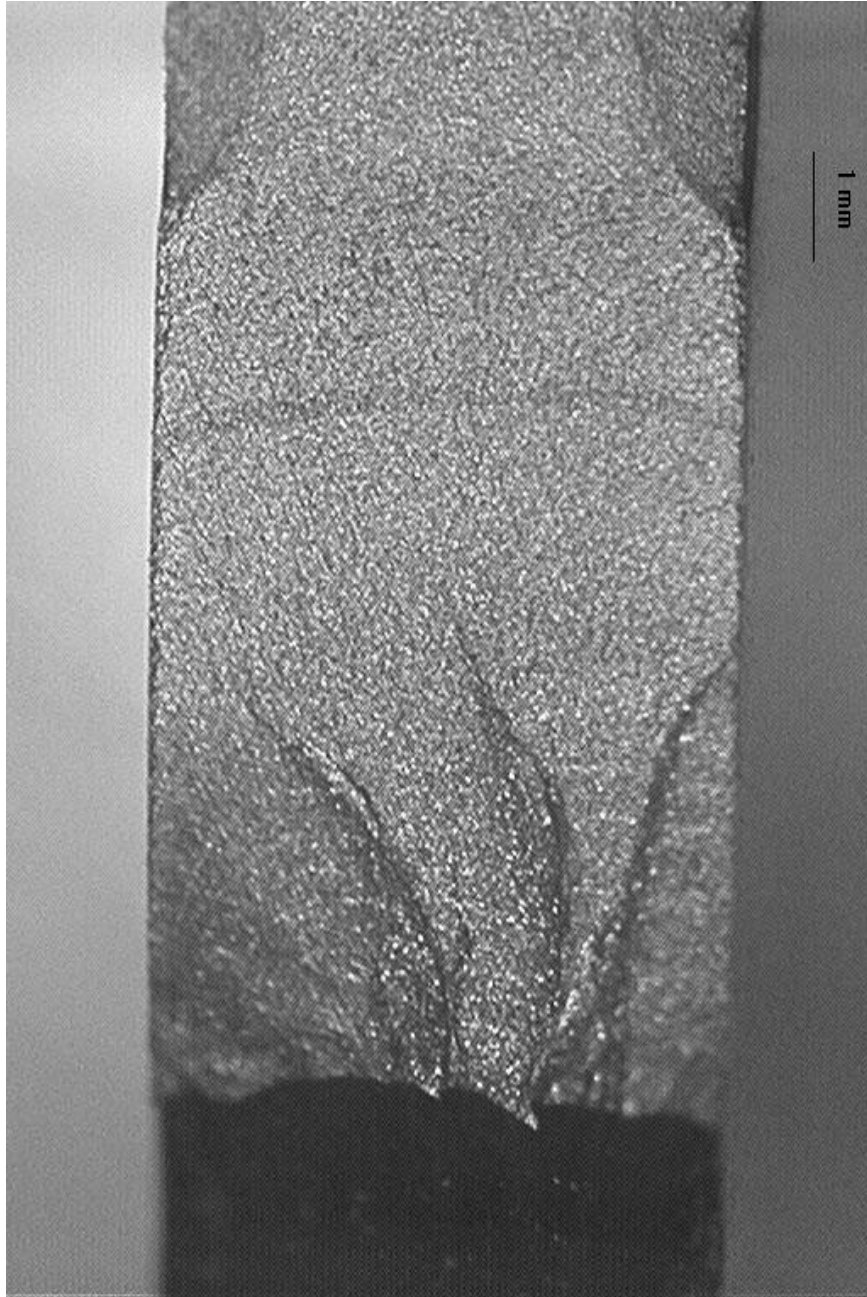


Bild 3: typische Bruchfläche – typical fracture surface

Das Anfangsrißwachstum weist ein Factory Roof Muster auf, geht aber mit abnehmendem mixed-mode Verhältnis in eine glatte Oberfläche über. Gut sichtbar ist eine Markierung bei fortgeschrittenem Risswachstum und der Gewaltbruch. Nach Abschluss der Versuche, wurden die Bruchflächen 3-dimensional im Lichtmikroskop punktweise vermessen und elektronisch gespeichert. Dabei wurde anhand

der Markierungen der Bezug zu den Zyklenzahlen hergestellt. Die Markierungen waren am sichtbarsten bei den höheren Temperaturen. Schließlich wurden die gemessenen Punkte durch eine Dreiecksvernetzung zu einer Fläche verknüpft. Es soll noch darauf hingewiesen werden, dass die Factory Roof Klüfte dabei geglättet wurden.

Die Finite-Elemente Simulation

Ausgangspunkt für die Simulation mit CURVEDCRACK ist eine Eingabedatei der ungerissenen Struktur, eine Beschreibung des Anfangsrisses und die Parameter des Rissfortschrittsgesetzes. Dabei hat die Vernetzung der ungerissenen Struktur kein Einfluss auf die nachfolgenden Vernetzungen der gerissenen Strukturen. Die 4-Punktbiegeprobe hat eine sehr einfache Geometrie und die Vernetzung stellt dementsprechend kein Problem dar. Die Kerbe wurde nicht in die ungerissene Struktur eingebracht, sondern gleich als schräger Anfangsriss modelliert. Für die Rissfortschrittparameter wurde das übliche Mode-I Rissfortschrittsgesetz aus der MTU Materialdatenbank herangezogen. CURVEDCRACK ist ein iteratives Programm, das in periodischen Abständen eine neue Finite-Elemente Rechnung durchführt, um die K-Faktoren neu zu bestimmen. Ein Vergleich der Rissfortschrittsfläche für ein konkreter Versuch bei 250°C ist in Bild 4 dargestellt.

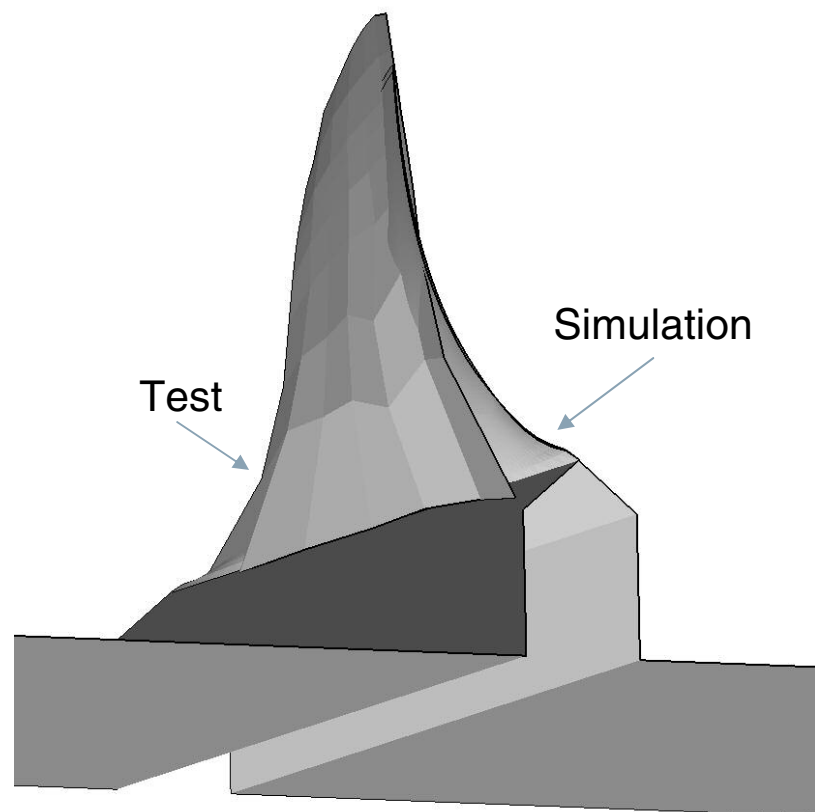


Bild 4: Simulation und Versuchsergebnis der Rissfortschrittsfläche – simulation and test result of the crack propagation shape

Die Fläche, die von der Kerbspitze ausgeht, ist die Simulation. Im Versuch ist der Anfangsriss jedoch nicht überall entlang der Kerbe von der Spitze ausgegangen. Tatsächlich ist der Riss in der Nähe der freien Oberfläche wie aus Bild 4 ersichtlich neben der Spitze losgegangen, und zwar so, dass der schräge Kerbwinkel dadurch reduziert wurde. In den ersten Simulationen wurde dieser abweichender Anfangsrissort noch nicht berücksichtigt. Man sieht jedoch aus Bild 4, dass dieser Unterschied während des Wachstums stetig reduziert wird und die simulierte Fläche und das Testergebnis letztendlich zusammenfallen.

Bild 5 vergleicht die Zyklenzahlen zwischen Simulation und Versuch versus der Risslänge. Referenzpunkt für die Risslängenberechnung war der Symmetriepunkt auf der Unterseite der Probe. Da die Länge entlang der Rissfront variiert, wurde der minimale und der maximale Abstand berechnet.

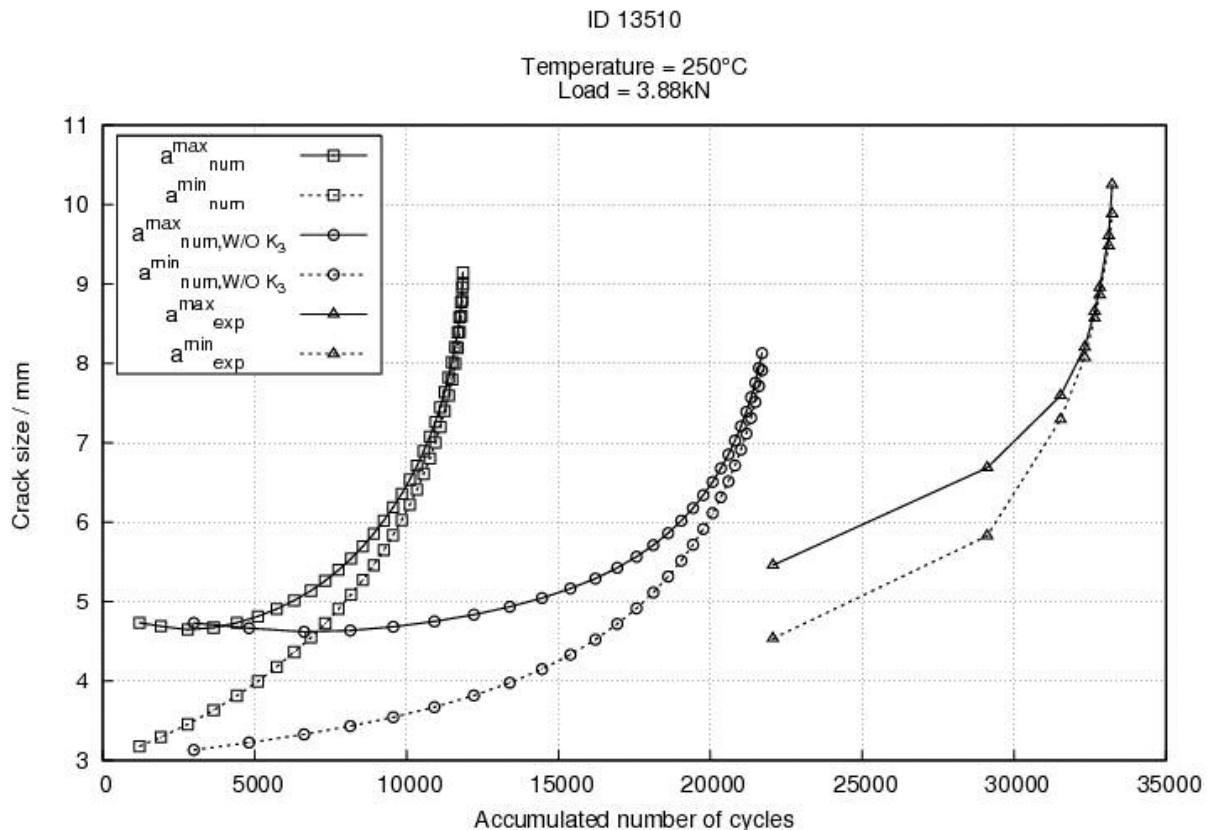


Bild 5: Zyklusvergleich zwischen Simulation und Test –
Comparison of accumulated cycles between simulation and test

Die linke Kurven stellen die Risslänge in der Simulation dar, die rechte Kurven sind das Testergebnis. In der Simulation wurde der äquivalente K-Faktor gemäß des MTU Gesetzes bestimmt und in das Mode-I Rissfortschrittsgesetz substituiert. Der Unterschied ist etwa ein Faktor 3.

Nähere Untersuchungen haben ergeben, dass vor allem am Anfang der Rechnung Mode-III einen erheblichen Beitrag zu dem äquivalenten K-Faktor liefert. Geht man davon aus, dass Mode-III nur zu der Zerklüftung der Rissfläche führt, aber keinen Beitrag zum Rissfortschritt liefert, bekommt man die mittleren Kurven in Bild 5 (in dem man K_{III} in der Berechnung des Spannungsintensitätstensors auf Null setzt).

Damit bekommt man rechnerisch 2/3 vom Leben im Test. Die Form der Rissfläche ändert sich dadurch praktisch nicht, wie aus Bild 4 hervorgeht: die Simulationsfläche besteht eigentlich aus zwei Flächen, die nahezu zusammenfallen.

Bilder 6 und 7 zeigen, wie die K-Faktoren sich während des Rissfortschritts ändern.

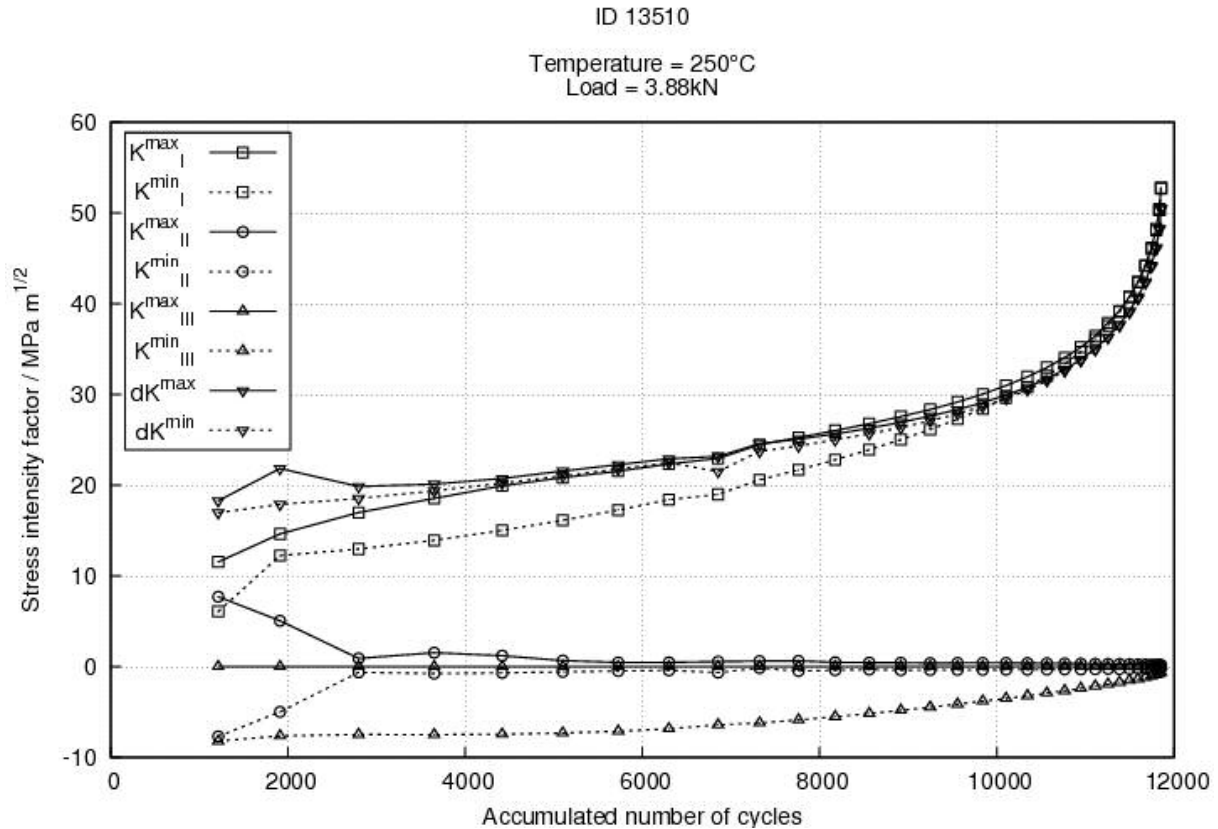


Bild 6: K-Faktoren mit Berücksichtigung von Mode-III –
K-factors taking into account Mode-III for propagation purposes

In Bild 6 wurde K_{III} berücksichtigt bei der Berechnung des äquivalenten K-Faktors. Man sieht, wie Mode-II rasch zu Null wird, dadurch, dass der Riss abgelenkt wird. Bei Mode-III ist das Abklingen viel langsamer. Der wesentliche Einfluss von Mode-III ist eben der Factory-Roof Effekt, der nicht stetig modelliert werden kann. Am Ende der Rechnung bleibt praktisch nur Mode-I übrig.

Wird K_{III} nicht in der äquivalenten K-Faktor berücksichtigt, bekommt man Bild 7. Qualitativ baut sich Mode-II genau so rasch ab, der äquivalente K-Faktor bleibt jedoch viel kleiner, und damit ist der Rissfortschritt entsprechend langsamer.

Schlussfolgerungen

Es wurde eine Methode vorgestellt, um, ausgehend von dem Spannungsintensitätstensors an der Risspitze, den Ablenkwinkel, den Verdrehungswinkel und das Rissfortschrittsinkrement zu berechnen. Anwendung auf die Simulation von 4-Punktbiegeversuchen hat ergeben, dass die Form der Rissfläche gut wiedergegeben wird, die Zyklenzahl jedoch um einen Faktor 3 auf der konservativen Seite liegt. Geht man davon aus, das Mode-III keinen Einfluss auf die Rissfortschrittsgeschwindigkeit hat, kann man diesen Faktor weiter auf etwa 3/2 reduzieren.

ID 13510

Temperature = 250°C
Load = 3.88kN

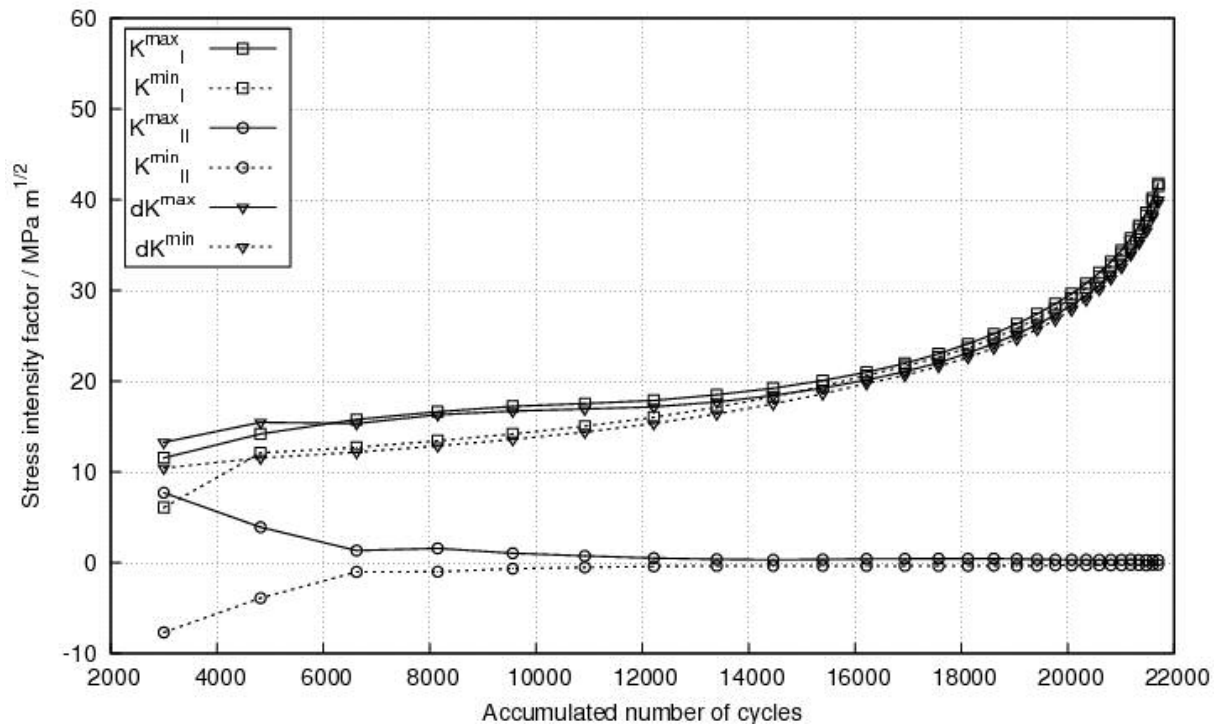


Bild 7: : K-Faktoren ohne Berücksichtigung von Mode-III –
K-factors not taking into account Mode-III for propagation purposes

Literatur

- [1] Bremberg, D. and Dhondt, G., Modeling of 3-D Fatigue Crack Growth in Real-Life Components, International Conference on Crack Paths, Vicenza 2009.
- [2] Dhondt, G., A New Three-Dimensional Fracture Criterion, Key Engineering Materials, 251-252 (2003), 209-214
- [3] Chanel, B. and Dhondt, G., Generalization of the MTU 3-D Crack Propagation Criterion for anisotropic materials, DVM-Bericht 239 (2007), 133-142.
- [4] Richard, H.-A., Schöllmann, M., Buchholz, F.G., Fulland, M., DVM Bericht 235 (2003), 335.