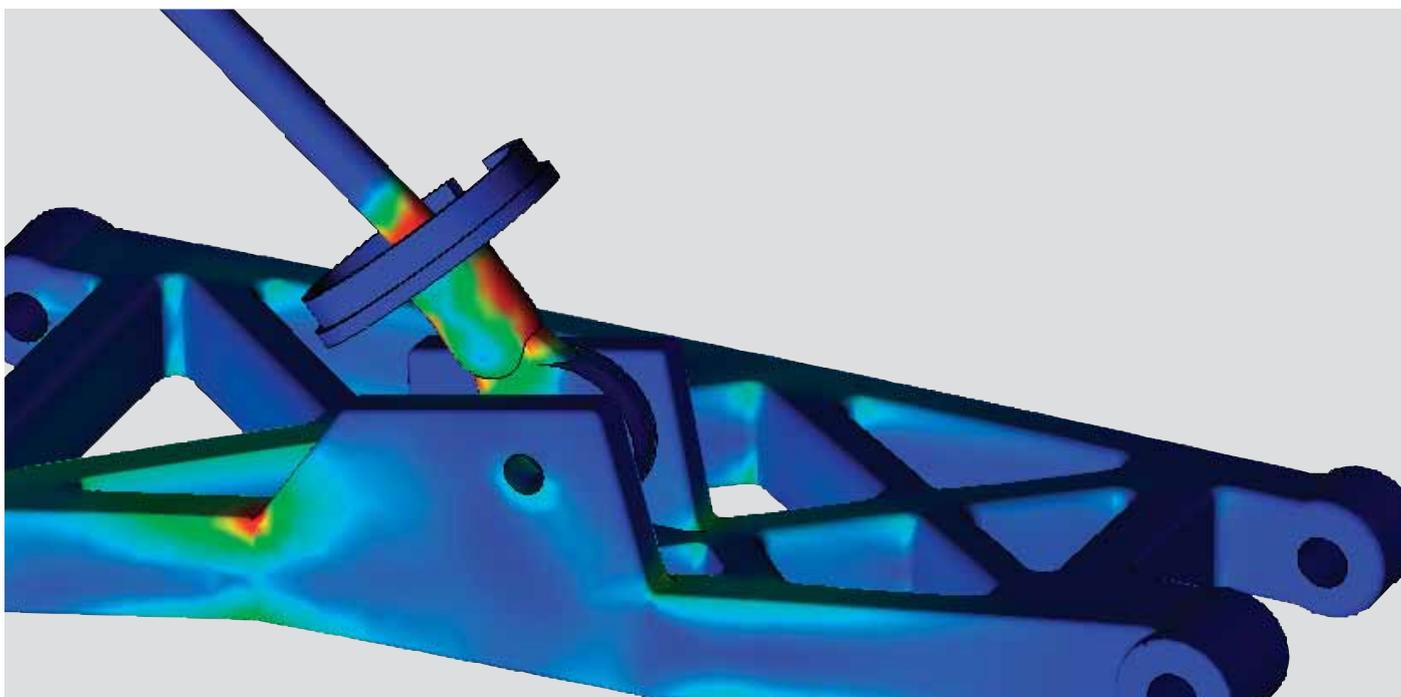

ERMÜDUNGSFREIE KONSTRUKTION

Übersicht

Zwei Abstürze des weltweit ersten Verkehrsflugzeugs, der De Havilland Comet, im Jahre 1954 sorgten dafür, dass der Begriff „Metallermüdung“ in die Schlagzeilen kam und sich tief in das Bewusstsein der Öffentlichkeit eingrub. Die Fenster des Flugzeugs, das ebenfalls eines der ersten mit einer Druckkabine war, waren quadratisch. Das Ausdehnen und Zusammenziehen der Druckkabine beim Auf- und Abstieg des Flugzeugs führte in Kombination mit der wiederholten Flugbelastung zu Rissen an den Ecken der Fenster. Im Laufe der Zeit breiteten sich die Risse weiter aus, bis die Kabine regelrecht auseinanderbrach. Diese Comet-Katastrophen stellten nicht nur eine menschliche Tragödie dar, bei der 68 Menschen den Tod fanden, sondern ließen auch die Ingenieure in ihrem Bestreben aufhorchen, sichere und dauerfeste Konstruktionen zu erstellen.



Seitdem hat sich die Materialermüdung als Ursache für das Versagen vieler mechanischer Komponenten erwiesen. Zu nennen wären beispielsweise Turbinen und andere rotierende Geräte, die während des Betriebs intensiver, zyklischer Belastung unterliegen.

Als Hauptwerkzeug für die Beurteilung, Vorhersage und Vermeidung von Ermüdung hat sich die Finite-Elemente-Analyse (FEA) bewährt.

Was ist Ermüdung?

Konstrukteure betrachten in der Regel die Gesamtfestigkeit einer Komponente, Baugruppe oder eines Produkts als wichtigstes Sicherheitskriterium. Daher sind sie bemüht, eine Konstruktion zu entwickeln, die der wahrscheinlichen Höchstbelastung standhält. Um sich abzusichern, kalkulieren sie einen Sicherheitsfaktor mit ein.

Es ist jedoch höchst unwahrscheinlich, dass die Konstruktion während des Betriebs statischen Lasten unterliegt. Weitaus häufiger kommen zyklische Lastwechsel zum Tragen, die mehrfach aufgebracht werden und im Laufe der Zeit zum Versagen führen können.

Ermüdung lässt sich de facto wie folgt definieren: Alterung eines Materials unter wiederholter oder variierender Belastung, deren Intensität nicht ausreicht, um zu einem Versagen des Materials in einem einzelnen Belastungsschritt zu führen. Ein Zeichen für Ermüdung sind örtlich begrenzte Risse, die durch plastische Verformung ausgelöst werden. Eine solche Verformung wird in der Regel durch eine Spannungskonzentration auf der Oberfläche einer Komponente oder durch einen vorhandenen, praktisch nicht erkennbaren Fehler auf oder unmittelbar unter der Oberfläche hervorgerufen. Während die Modellierung solcher Fehler im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse u. U. schwierig oder sogar unmöglich ist, sind Materialschwankungen eine Konstante und die Wahrscheinlichkeit kleiner Fehler ist hoch. Mit der Finite-Elemente-Analyse können Bereiche mit Spannungskonzentration und die voraussichtliche Lebensdauer der Konstruktionen bis zum Versagen im Voraus bestimmt werden.

Der Ermüdungsprozess lässt sich in die folgenden drei zusammenhängenden Phasen unterteilen:

1. Rissbildung
2. Risswachstum
3. Bruch

Mit der FE-Spannungsanalyse kann die Rissbildung vorhergesagt werden. Anhand einer Reihe von anderen Techniken, darunter die dynamische nicht-lineare Finite-Elemente-Analyse, lassen sich die am Risswachstum beteiligten Dehnungsfaktoren untersuchen. Da Konstrukteure hauptsächlich daran interessiert sind, die Bildung von Ermüdungsrissen von Beginn an zu verhindern, wird die Ermüdung in diesem Dokument in erster Linie unter diesem Gesichtspunkt behandelt. Ausführliche Informationen zum Wachstum von Ermüdungsrissen finden Sie in Anhang A.

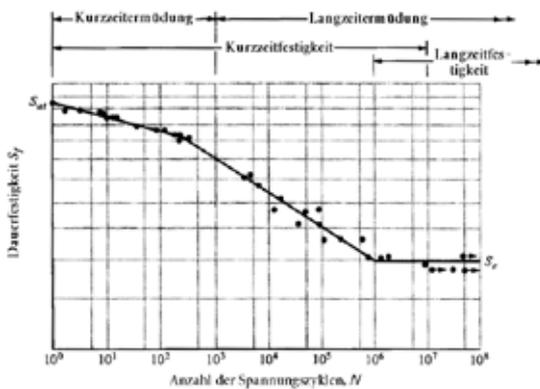
Ermüdung lässt sich de facto wie folgt definieren: Alterung eines Materials unter wiederholter oder variierender Belastung, deren Intensität nicht ausreicht, um zu einem Versagen des Materials in einem einzelnen Belastungsschritt zu führen.

Bestimmen der Dauerfestigkeit von Materialien

Zwei Hauptfaktoren beeinflussen die Zeit, die vergeht, bis sich ein Riss bildet und ausreichend ausbreitet, um zum Versagen einer Komponente zu führen: das Komponentenmaterial und der Spannungsbereich. Die ersten methodischen Dauerfestigkeitsversuche wurden im 19. Jahrhundert von August Wöhler durchgeführt. Bei den Standardlaborversuchen, wie z. B. Umlaufbiegeversuch, Druck-Zug-Versuch und Torsionsversuch, werden zyklische Lasten aufgebracht. Wissenschaftler und Ingenieure stellen die aus diesen Versuchen gewonnenen Daten in der so genannten Wöhlerkurve dar, in der die Spannungsamplitude in Abhängigkeit zur Anzahl der wiederholten Lastzyklen bis zum Versagen angegeben ist. Aus dieser Wöhlerkurve lässt sich die Spannungsamplitude ableiten, der ein Material über eine bestimmte Anzahl von Zyklen standhalten kann.

In der Kurve wird zwischen der Kurzzeit- und der Langzeitermüdung unterschieden. In der Regel tritt die Kurzzeitermüdung nach weniger als 10.000 Zyklen ein. Die Form der Kurve hängt vom getesteten Materialtyp ab. Bei einigen Materialien, wie z. B. bei kohlenstoffarmem Stahl, flacht die Kurve ab einer bestimmten Spannungsamplitude ab. Dieser Bereich wird als Dauerfestigkeitsgrenze bezeichnet. Materialien ohne Eisengehalt zeigen keine Dauerfestigkeitsgrenze. Im Prinzip sollten Komponenten, die so konstruiert sind, dass die aufgebrachten Spannungen die bekannte Dauerfestigkeitsgrenze nicht überschreiten, während des Betriebs nicht versagen. Bei den Berechnungen der Dauerfestigkeitsgrenze werden örtlich begrenzte Spannungskonzentrationen jedoch nicht berücksichtigt, die u. U. trotz einer scheinbar unterhalb der normalen Grenze liegenden Spannungsamplitude zur Rissbildung führen können.

Die ersten methodischen Dauerfestigkeitsversuche wurden im 19. Jahrhundert von August Wöhler durchgeführt.

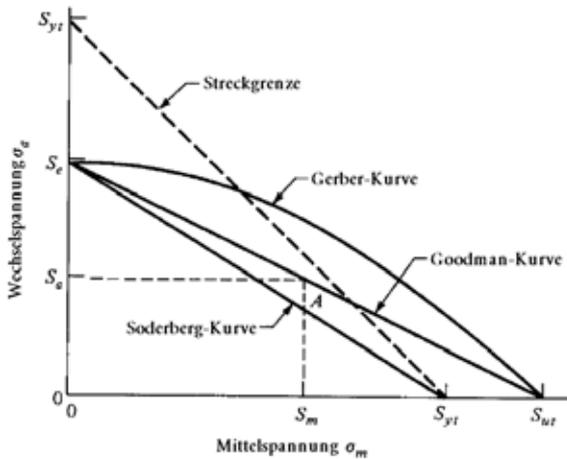


Beispiel für eine Wöhlerkurve (Spannungsamplitude in Abhängigkeit zur Anzahl der Zyklen)

Der Ermüdungslastverlauf, der anhand von Umlaufbiegeversuchen bestimmt wird, liefert Informationen zur Mittel- und Wechselspannung. In Versuchen hat sich gezeigt, dass der Grad des Risswachstums mit dem Spannungsverhältnis des Lastzyklus und der Mittelspannung der Last zusammenhängt. Risse breiten sich nur unter Zugbelastung aus. Wenn daher im Lastzyklus auf den Rissbereich eine Druckspannung aufgebracht wird, führt dies nicht zur Ausbreitung des Risses. Wenn die Mittelspannung jedoch ergibt, dass im gesamten Lastzyklus eine Zugbelastung aufgebracht wird, kommt es während des gesamten Lastzyklus zu einer Beschädigung.

Viele Betriebslastverläufe weisen eine Mittelspannung ungleich Null auf. Damit Ermüdungsversuche nicht mit verschiedenen Mittelspannungen durchgeführt werden müssen, wurden drei Korrekturmethode für die Mittelspannung entwickelt:

- **Goodman-Methode:** im Allgemeinen für spröde Materialien geeignet
- **Gerber-Methode:** im Allgemeinen für zähe Materialien geeignet
- **Soderberg-Methode:** im Allgemeinen die konservativste Methode



Korrekturmethode für die Mittelspannung

Alle drei Methoden sind nur anwendbar, wenn alle assoziierten Wöhlerkurven auf einer reinen Wechselbelastung basieren. Diese Korrekturen sind weiterhin nur dann von Bedeutung, wenn die angewendeten Ermüdungslastzyklen verglichen mit dem Spannungsbereich große Mittelspannungen aufweisen. Im vorstehenden so genannten Goodman-Diagramm ist die Beziehung zwischen der Wechsellastspannung, den Materialspannungsgrenzen und der Mittelspannung der Belastung dargestellt.

Versuchsdaten haben ergeben, dass das Versagenskriterium zwischen der Goodman- und der Gerber-Kurve liegt. Daher würde bei einem pragmatischen Ansatz das Versagen auf der Grundlage beider Kurven berechnet und das konservativste Ergebnis verwendet.

Methoden zur Berechnung der Ermüdungslebensdauer

Physikalische Tests sind eindeutig nicht für jede Konstruktion geeignet. In den meisten Anwendungsbereichen ist für die ermüdungsfreie Konstruktion die Vorhersage der Komponentenermüdungslebensdauer erforderlich, bei der erwartete Betriebslasten und Materialien berücksichtigt werden.

In CAE-Programmen werden drei Hauptkonzepte zur Bestimmung der Gesamtermüdungslebensdauer verwendet. Diese sind:

Spannungskonzept (Wöhlerkonzept)

Dieses Konzept basiert ausschließlich auf Spannungsamplituden und der Wöhlermethode. Das Konzept eignet sich zwar nicht für Komponenten mit plastischen Zonen und liefert ungenaue Ergebnisse für die Kurzzeitermüdung, es ist jedoch am einfachsten zu implementieren, stützt sich auf ausreichend Daten und bietet eine gute Darstellung der Langzeitermüdung.

Dehnungskonzept

Dieses Konzept bietet eine detailliertere Analyse der örtlich begrenzten plastischen Verformung und eignet sich für Anwendungen der Kurzzeitermüdung. Die Ergebnisse weisen jedoch gewisse Unsicherheiten auf.

Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM)

Bei diesem Konzept wird davon ausgegangen, dass bereits ein Riss vorhanden ist und erkannt wurde. Vorhergesagt wird das Risswachstum in Bezug auf die Spannungsintensität. Dies ist u. U. bei großen Strukturen im Zusammenhang mit Computercodes und regelmäßigen Prüfungen hilfreich.

Aufgrund der einfachen Implementierung und der Menge der verfügbaren Materialdaten wird das Wöhlerkonzept am häufigsten verwendet.

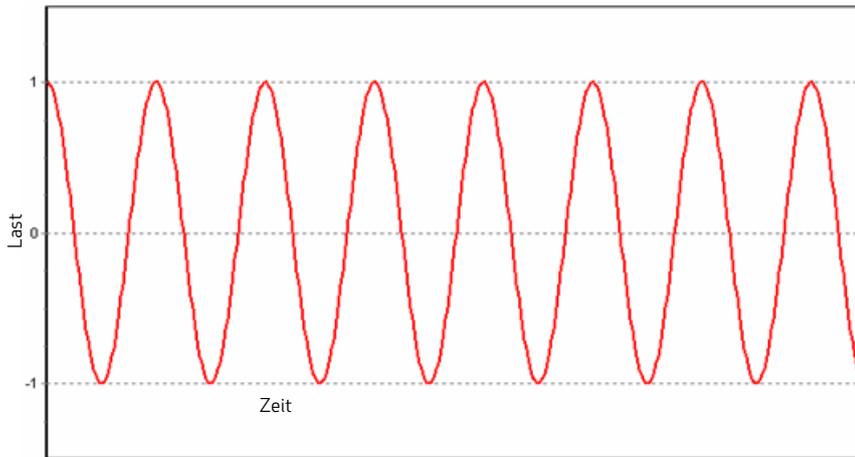
Unternehmen möchten und müssen das Gewicht und die Materialmenge reduzieren und gleichzeitig ein Versagen aufgrund von Ermüdung vermeiden, das, selbst wenn es keine fatalen Folgen hat, durchaus sehr kostspielig sein kann. All diese Faktoren haben dazu beigetragen, dass Dauerfestigkeitsuntersuchungen zu einem früheren Zeitpunkt des Konstruktionsprozesses stark an Bedeutung zugenommen haben.

Physikalische Tests sind eindeutig nicht für jede Konstruktion geeignet. In den meisten Anwendungsbereichen ist für die ermüdungsfreie Konstruktion die Vorhersage der Komponentenermüdungslebensdauer erforderlich, bei der erwartete Betriebslasten und Materialien berücksichtigt werden.

Berechnung der Ermüdungslebensdauer anhand der Wöhlermethode für Konstrukteure

Bei der Berechnung der Ermüdungslebensdauer können Belastungen mit konstanter und variabler Amplitude berücksichtigt werden. Es folgt eine kurze Beschreibung der unterschiedlichen Ergebnisse.

Belastung mit konstanter Amplitude:



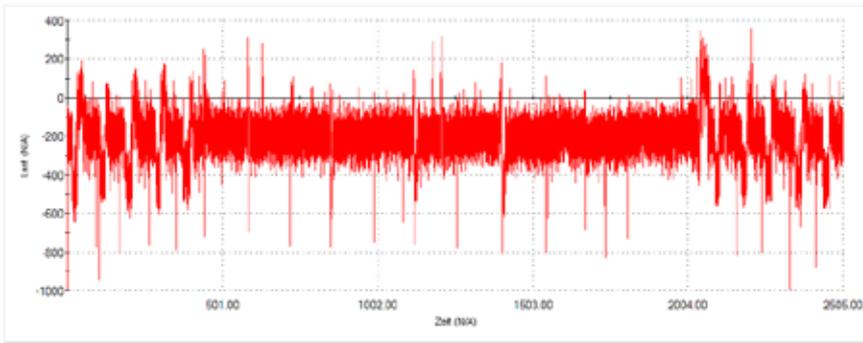
Belastung mit konstanter Amplitude

Bei dieser Methode wird eine Komponente einem Lastzyklus mit konstanter Amplitude und konstanter Mittelspannung ausgesetzt. Mithilfe einer Wöhlerkurve können Konstrukteure die Anzahl der Zyklen bis zum Versagen der Komponente schnell berechnen.

In Fällen, in denen die Komponente mehreren Lasten unterliegt, können mit der Miner-Regel der Schaden pro Lastfall und der Gesamtschaden berechnet werden. Das Ergebnis, auch „Schadensfaktor (D)“ genannt, wird als prozentualer Anteil der Lebensdauer bis zum Versagen ausgedrückt. Die Komponente versagt bei einem Schadensfaktor von $D = 1,0$. Ein Schadensfaktor von $D = 0,35$ bedeutet somit, dass 35 % der Komponentenlebensdauer abgelaufen sind. Bei dieser Theorie wird außerdem davon ausgegangen, dass zwischen dem durch einen Spannungszyklus verursachten Schaden und dem Zeitpunkt der Entstehung im Lastverlauf sowie zwischen dem Grad der Schadensakkumulation und der Spannungsamplitude keine Abhängigkeiten bestehen.

Bei der Berechnung der Ermüdungslebensdauer können Belastungen mit konstanter und variabler Amplitude berücksichtigt werden.

Belastung mit variabler Amplitude:



Belastung mit variabler Amplitude

Unter realen Betriebsbedingungen unterliegen die meisten Komponenten einem Lastverlauf mit variabler Amplitude und variabler Mittelspannung. Daher wird in einem weitaus allgemeineren und realistischeren Ansatz eine Belastung mit variabler Amplitude berücksichtigt, bei der die Spannungen, obwohl sie im Verlauf wiederholt aufgebracht werden, eine variable Amplitude aufweisen und dadurch in „Lastkollektive“ unterteilt werden können. Zur Lösung dieser Belastungsart wird die so genannte Rainflow-Zählung verwendet. Anhang B enthält weitere Informationen zur Untersuchung von FE-Ermüdungsergebnissen und zur Rainflow-Zählung.

Die Finite-Elemente-Analyse bietet hervorragende Werkzeuge zur Untersuchung der Ermüdung anhand des Wöhlerkonzepts, da ein linear-elastisches Spannungsfeld zugrunde liegt. Außerdem ermöglicht die Finite-Elemente-Analyse die Berücksichtigung möglicher Interaktionen mehrerer Lastfälle. Wenn die Belastung im ungünstigsten Fall berechnet werden soll (typischer Ansatz), kann das System eine Reihe von unterschiedlichen Ermüdungsergebnissen, einschließlich Lebensdauerdarstellungen, Schadensdarstellungen und Darstellungen des Faktors der Sicherheitsverteilung, berechnen. Außerdem können das Verhältnis der kleineren wechselnden Hauptspannung zur größeren wechselnden Hauptspannung in einer so genannten Biaxialitätsindikatoranzeige dargestellt und ein Rainflow-Matrix-Diagramm erstellt werden. Ein Rainflow-Diagramm ist ein 3D-Histogramm, in dem die X- bzw. Y-Achse die Wechsel- bzw. Mittelspannungen und die Z-Achse die Anzahl der Zyklen darstellt.

Fazit

Die in diesem Dokument behandelten Werkzeuge und Konzepte können Konstrukteure bei der Verbesserung der Komponentensicherheit unterstützen und gleichzeitig zu einer reduzierten Anzahl von überkonstruierten, schweren und kostspieligen Konstruktionen beitragen. Durch den Einsatz der heute zur Vermeidung von Ermüdung verfügbaren Techniken lassen sich Katastrophen häufig abwenden. Im alltäglichen Betrieb wird mit der ermüdungsfreien Konstruktion die Anzahl von Betriebsausfällen reduziert. Konstrukteure müssen nicht mehr so viel Zeit für die Behebung alter Probleme aufwenden, sondern können sich verstärkt auf die Konstruktion neuer Produkte konzentrieren.

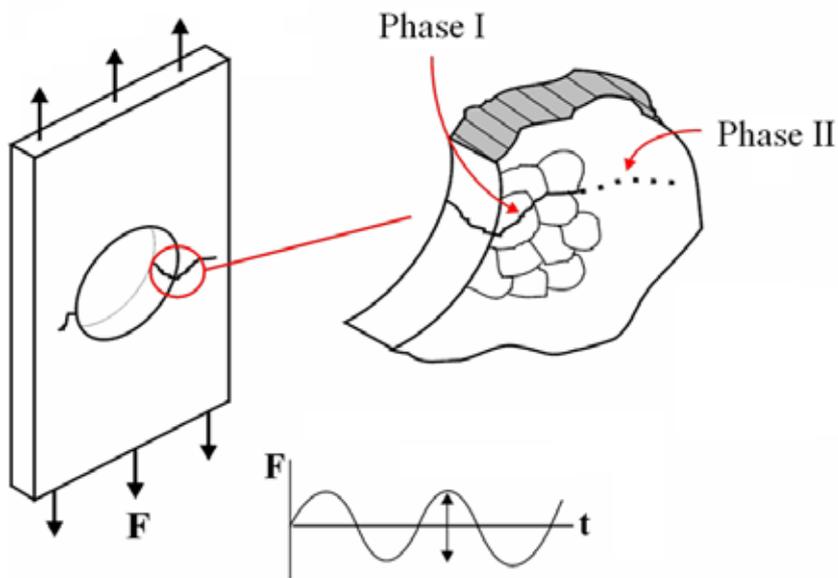
Die Finite-Elemente-Analyse bietet hervorragende Werkzeuge zur Untersuchung der Ermüdung anhand des Wöhlerkonzepts, da ein linear-elastisches Spannungsfeld zugrunde liegt. Außerdem ermöglicht die Finite-Elemente-Analyse die Berücksichtigung möglicher Interaktionen mehrerer Lastfälle.

Anhang A - Risswachstum

Das Wachstum von Ermüdungsrissen wird durch zwei physikalische Vorgänge begünstigt. Unter einer zyklischen Belastung kommt es zu einer Abscherung der Gleitebenen in der Mikrostruktur des Materialkorns. Die so entstehenden Erhebungen und Vertiefungen (Extrusionen und Intrusionen) auf der Komponentenoberfläche, die mit einer Größe von 1 bis 10 Mikron zwar nicht erkennbar sind, stellen Keime für die Rissbildung dar (Phase I).

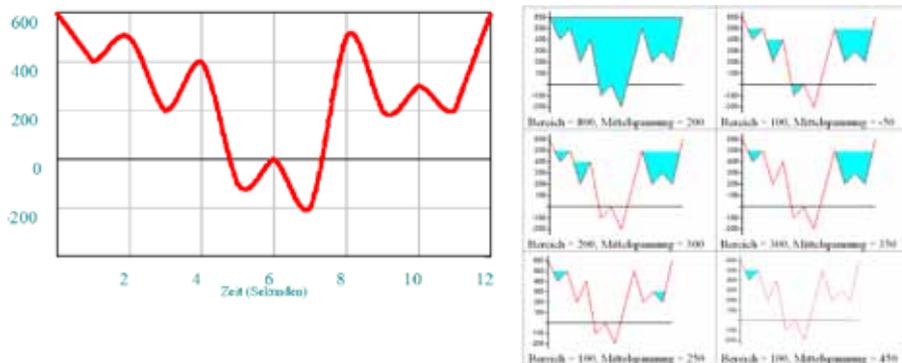
Wenn ein Riss der Phase I die Korngrenze erreicht, setzt sich die Rissbildung im angrenzenden Korn fort. In Phase I breiten sich Risse in der Richtung der größten Schubspannung, also 45 Grad zur Belastungsrichtung aus.

Wenn der Riss etwa die Größe von drei Körnern erreicht hat, ändert sich das Rissverhalten, da der Riss nun groß genug ist, um eine geometrische Spannungskonzentration zu erzeugen (Phase II). In Phase II bildet sich an der Rissspitze eine plastische Zone aus. Danach breitet sich der Riss senkrecht zur Richtung der aufgebrachtten Last aus.

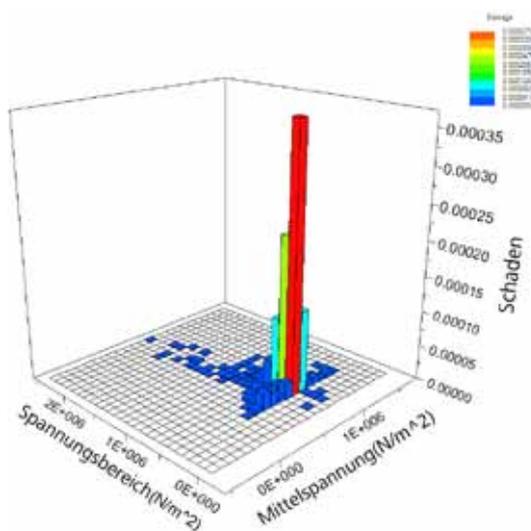


Anhang B - Rainflow-Zählung

Wenn die Lasten mit variabler Amplitude grafisch dargestellt und die Höchst- und Tiefstpunkte des Lastverlaufs extrahiert werden, können der Spannungsbereich und die zugehörige Mittelspannung bestimmt werden. Die Höchst- und Tiefstpunkte können dabei als Dächer betrachtet werden, über die Regen abläuft. Der im Diagramm dargestellte Lastverlauf ist anfangs „mit Regen gefüllt“.



Der Spannungsbereich und die zugehörige Mittelspannung werden aus dem im Diagramm gezeigten Lastverlauf entnommen. Der grafisch dargestellte Lastverlauf ist „mit Regen gefüllt“. Nachdem der Spannungsbereich und die Mittelspannung bestimmt wurden, läuft der „Regen“ vom untersten Punkt ab. Anschließend werden der Spannungsbereich und die Mittelspannung für alle verbleibenden „mit Regen gefüllten“ Bereiche bestimmt. Anhand der Ergebnisse lässt sich mit der Miner-Regel die Ermüdungslebensdauer berechnen.



Rainflow-Schadensmatrix

Unternehmenssitz
Dassault Systèmes
SolidWorks Corp.
300 Baker Avenue
Concord, MA 01742 USA
Telefon: +1-978-371-5011
E-Mail: info@solidworks.com

Hauptsitz Europa
Telefon: +33-(0)4-13-10-80-20
E-Mail: infoeurope@solidworks.com

Niederlassung Deutschland
Telefon: +49-(0)89-612-956-0
E-Mail: info@solidworks.com

