

Intrusionen hat eine scharfe Mikrokerbung der Oberfläche zur Folge, wodurch günstige Bedingungen für eine Anrissbildung geschaffen werden.

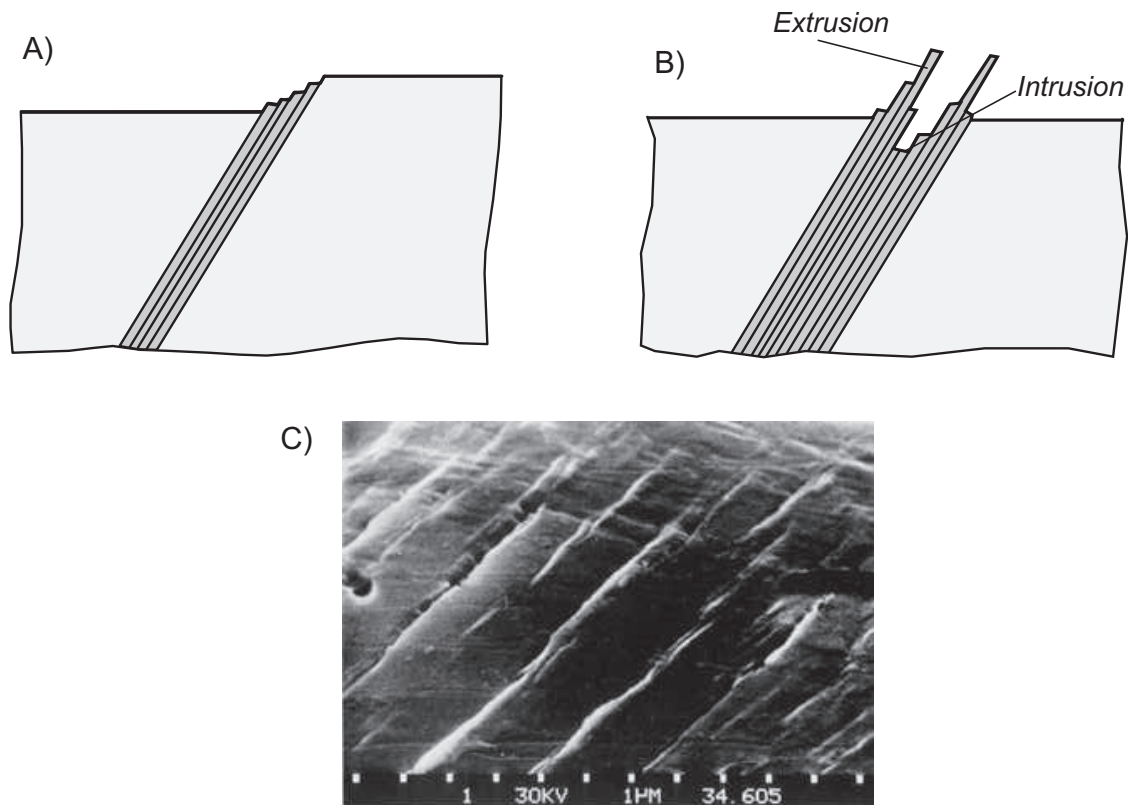


Abb. B.2-52 Oberflächenmerkmale zyklisch beanspruchter Metalle  
A) Ermüdungsgleitband, B) Ex- und Intrusionen, C) Rasterelektronenmikroskopie

Neben der Entstehung von Ermüdungsanrissen an bzw. in Gleitbändern werden Rissbildungen auch an Korngrenzen oder an Teilchen von Verunreinigungen bzw. Zweitphasen beobachtet. Normale, ausscheidungsfreie Korngrenzen kommen nur bei hohen Beanspruchungsamplituden für eine Rissbildung in Betracht, unter diesen Bedingungen wird die Kornfläche von vielen Gleitbändern mit hoher Gleitstufung durchzogen, die ihre abrupte Begrenzung an den nicht verformbaren Korngrenzen finden. Hieraus resultiert nun im Übergangsbereich zwischen Korn und Korngrenze eine intensive Kerbwirkung, die eine nachfolgende Rissbildung wahrscheinlich macht. In ähnlicher Weise führen **Einschlüsse** zu lokalen Spannungsüberhöhungen und Gleitbandbildungen. Von besonders nachteiliger Wirkung sind Einschlüsse, die die Oberfläche durchstoßen. Die Stärke der nachteiligen Wirkung randschichtnaher Einschlüsse hängt außer von geometrischen auch von Bindungseinflüssen (*Matrix/Einschluss*) ab. Auch der Einfluss von äußeren *Kerben* lässt sich in gleicher Weise erklären, sie haben lokale Spannungsspitzen zur Folge, die ihrerseits Gleitung und Ermüdungsbandbildung in verstärktem Maße fördern.

In glatten und makroskopisch homogen beanspruchten Bauteilen spielen sich die Verfestigungsvorgänge im gesamten Werkstoff ab, erst mit dem Erscheinen von Ermü-

dingungsgleitbändern setzen die lokalisierten Prozesse der Rissbildung und -ausbreitung ein. Bei gekerbten oder inhomogen beanspruchten Bauteilen sowie an hinreichend groben Einschlüssen findet die Ermüdungsverfestigung dagegen in einem begrenzten Werkstoffbereich statt. Da in allen diesen Fällen eine zunehmend inhomogenere Mikrogleitung der Rissentstehung vorausgeht, ist dieser Vorgang als charakteristischer Mechanismus für die Bildung von Ermüdungsrissen anzusehen. Erfolgt indessen die Rissbildung durch einen anderen Vorgang, beispielsweise durch Aufreißen spröder Korngrenzen, oder sind gar Risse in kritisch beanspruchten Bereichen bereits vorhanden, so entfallen natürlich die Stadien der Ermüdungsverfestigung und der Rissbildung, und es kommt nur noch zu einer zyklisch bedingten Rissausbreitung.

### 2.2.3.3 Rissausbreitung

Bei ungekerbten, einphasigen Werkstoffen wie auch bei niedrigen Beanspruchungsamplituden erfolgt die Rissbildung im Allgemeinen entlang von Ermüdungsgleitbändern. Hierbei entstehen an der Werkstoffoberfläche – oftmals zahlreiche – mikroskopische Anrisse, die durch weitere Abgleitungen in das Korninnere wachsen. Bevorzugt werden große Körner mit günstiger Orientierung, d. h. die Ausbreitungsebenen dieser Mikrorisse liegen entsprechend der Richtung maximaler Schubspannung etwa unter  $45^\circ$  zur äußeren Normalbeanspruchung. Diese Art des Rissfortschritts wird als *Stadium I der Rissausbreitung* bezeichnet, die in diesem Stadium gebildeten Risse auch als *kurze Risse*. Generell spielen sich zur Rissausbreitung führende Vorgänge ausschließlich im Bereich der Rissspitze ab, sie sind während des Stadiums I in ihrer Wirkung empfindlich von strukturellen Einflussgrößen abhängig. Mit Erreichen der Korngrenze trifft ein wachsender Mikroriss auf ein erstes Ausbreitungshindernis, da das Überwinden der Korngrenze und das Eindringen in die wahrscheinlich ungünstiger orientierten Nachbarkörner höhere Spannungen als die Rissausbreitung im Stadium I erfordert. Reicht die anliegende Spannung hierfür nicht aus, ist der Mikroriss auch nicht weiter ausbreitungsfähig.

Nur selten kommt es im Stadium I zu Risslängen, die über einen Korndurchmesser deutlich hinausgehen. Vielmehr schließt sich im Allgemeinen mit Überwindung der ersten Korngrenze ein Übergangsbereich in der Rissausbreitung an, der durch andere Ausbreitungsebenen, Korndurchmesser etc. gekennzeichnet ist. Von einer nur wenige Korndurchmesser betragenden Risslänge an kann der in die Tiefe und Breite wachsende Riss durch die äußere Zugspannungsamplitude geöffnet werden, hierdurch ändert sich der Spannungszustand an der Rissspitze bezüglich der äußeren Beanspruchung von einem Schubspannungs- in einen Normalspannungszustand. Als Folge des veränderten örtlichen Spannungszustandes schwenkt der Riss in eine zur äußeren Beanspruchung senkrecht liegende Ausbreitungsrichtung ein und befindet sich so im *Ausbreitungsstadium II* (Abbildung B.2-53).

Der diesen Übergang vollziehende Anriss wandelt sich vom kurzen Riss oder **Mikroriss** zu einem sich bei jedem Lastspiel öffnenden und wieder schließenden langen Riss

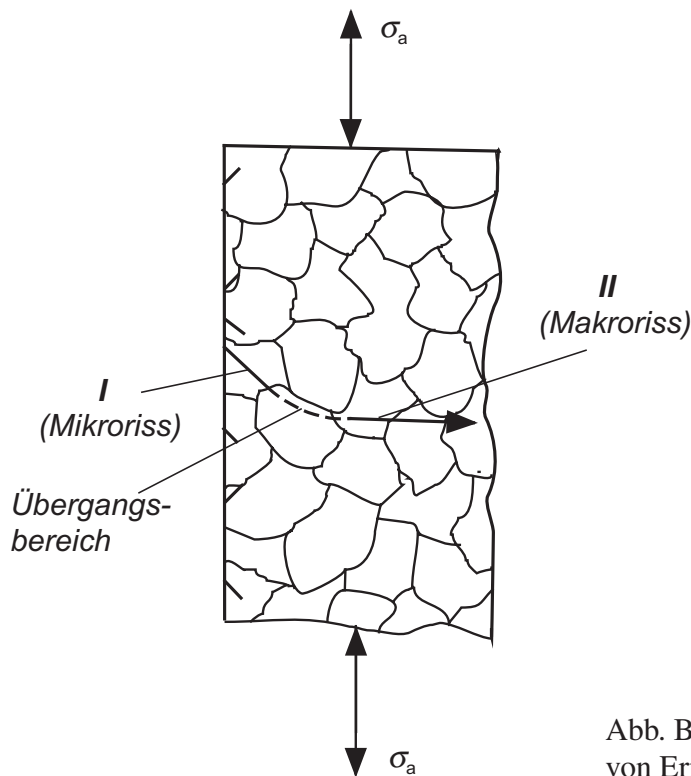


Abb. B.2-53 Stadien I und II der Ausbreitung von Ermüdungsrissen (nach Lit. B.23)

oder **Makroriss**. Seine Ausbreitungsgeschwindigkeit nimmt dabei mit ansteigender Risslänge zu, und er eilt bei niedrigen Amplituden allen anderen ausbreitungsfähigen Anrissen in einem Maße voraus, dass im Ausbreitungsstadium II meist nur noch dieser **eine** Riss weiterwächst. Bei hohen Beanspruchungsamplituden oder gekerbten Bauteilen oder heterogenen Werkstoffen wird das Ausbreitungsstadium I vernachlässigbar klein, sodass in diesen Fällen die Rissausbreitung praktisch nur im Stadium II stattfindet. Die in gebrochenen Bauteilen von der Restbruchfläche deutlich unterscheidbare Ermüdungsbruchfläche wird also immer mehr oder weniger vollständig durch Rissausbreitung im Stadium II erzeugt.

Die sich während dieser Rissausbreitung abspielenden Vorgänge hinterlassen auf der Dauerbruchfläche oftmals makroskopisch oder mikroskopisch erkennbare Merkmale, die untrügliche Zeichen für das Vorliegen eines Ermüdungsbruches darstellen und wichtige Hinweise bei der Aufklärung von Schadensfällen liefern können. Zu den *makroskopisch* erkennbaren Merkmalen gehören die häufig auftretenden sog. *Rastlinien*. Dies sind quer zur Rissausbreitung verlaufende, linienförmige Markierungen, die an der fortschreitenden Rissfront durch sich ändernde Beanspruchungsverhältnisse oder bei niedrigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten durch Oxidationsvorgänge entstanden sind. Oft kann auch die Ausgangsstelle des Dauerbruchs festgestellt und so auf die Schadensursache geschlossen werden.

*Mikroskopisch* kann ein Dauerbruch an den sog. *Schwingungstreifen* (vgl. Abbildung B.2-49, B) erkannt werden, die aus etwa senkrecht zur Rissausbreitungsrichtung angeordneten, parallelen mikroskopischen Riefen bestehen. Schwingungstreifen werden

aber nur bei mittleren Rissgeschwindigkeiten beobachtet. Ihre Entstehung ist auf das durch einzelne Schwingspiele sukzessiv erfolgende Risswachsen zurückzuführen. Da aber nicht jedes Schwingspiel einen Rissfortschritt nach sich ziehen muss, kann ein direkter Zusammenhang zwischen Riefenabstand in  $\mu\text{m}$  und Rissausbreitungsgeschwindigkeit in  $\mu\text{m}$  je Schwingspiel nicht in allen Fällen hergestellt werden. Die Ausbildung der Streifenstruktur wird im Übrigen sehr stark von den Umgebungsbedingungen beeinflusst und kann überraschenderweise im Vakuum sehr viel undeutlicher ausgeprägt sein als bei Beanspruchung unter atmosphärischen Bedingungen.

Duktile Werkstoffe zeigen bei hohen Beanspruchungsamplituden anstelle von Schwingungstreifen eine dem Duktilbruch ähnliche Wabenstruktur. Bei stark verfestigten mehrphasigen Werkstoffen liegen im mikroskopischen Bereich vielfach Bruchflächen mit duktilen und mit spröden Anteilen vor.

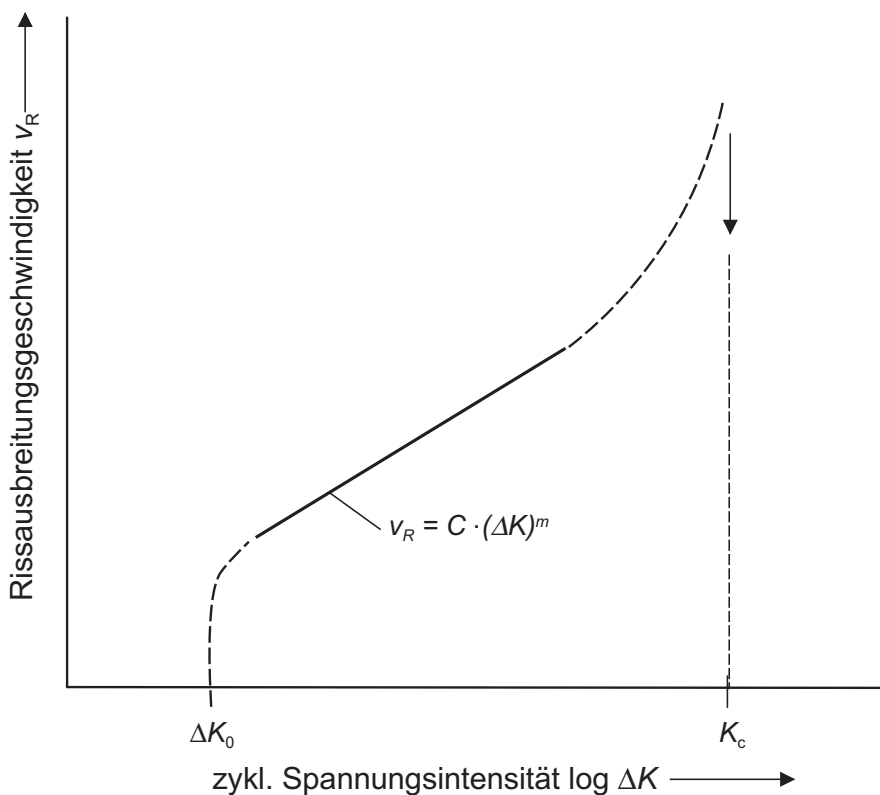


Abb. B.2-54 Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ermüdungsrissen in Abhängigkeit von der zyklischen Spannungsintensität

Das Wachsen von Makrorissen, d. h. die **Rissausbreitung im Stadium II**, geschieht ebenfalls durch mikroplastische Vorgänge in einer kleinen *plastischen Zone* vor der Risspitze, die Geschwindigkeit der Rissausbreitung hängt unter diesen Bedingungen aber nur **wenig vom strukturellen Aufbau** des Gefüges, sondern **wesentlich vom Spannungsfeld** vor der Risspitze ab. Die Bruchmechanik macht zur Beschreibung eines solchen Spannungsfeldes – wie bereits erwähnt – von dem Begriff der Spannungsintensität Gebrauch. Wird dieser Begriff auf die bei schwingender Beanspruchung