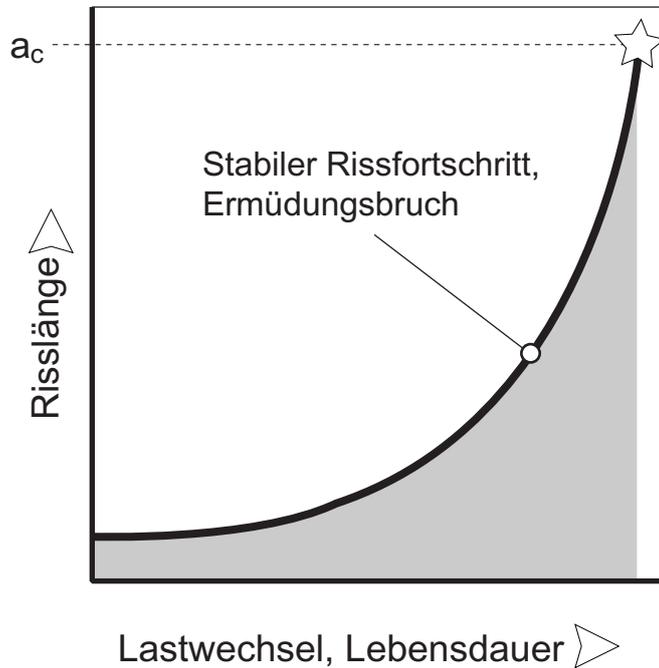


4.3 Anriss und Rissfortschritt



Bevor auf die einzelnen belastungsspezifischen Schadensmechanismen in gesonderten Kapiteln näher eingegangen wird, in denen auch die Anrissentstehung (Kapitel 5.4.3.2) und der Restbruch (Kapitel 4.4 und Kapitel 5.2.1) eingehend behandelt werden, soll das Entstehen und das Wachstum von Rissen bis zum unmittelbaren Versagen des Bauteils betrachtet werden. Die Erkenntnisse der **Bruchmechanik** sind wichtige Voraussetzungen für das Verständnis dieser Vorgänge.

Der Anriss und der unterkritische Rissfortschritt (Bild 4.3-1 und Bild 4.3-2) können sowohl unter statischer (Zeitstandbelastung, Bild 5.3.2-7) als auch unter dynamischer Last (LCFHCF; Bild 4.3-3) oder deren Kombinationen (überlagert oder zeitlich getrennt) erfolgen.

Bei dynamischer Beanspruchung wird unter **Rissfortschrittsgeschwindigkeit** in der Bruchmechanik der auf einen Lastwechsel bezogene Fortschritt ($\Delta a/\Delta N$) verstanden. Nicht dagegen der Fortschritt in der Zeiteinheit. Das heißt, die Schwingfrequenz geht in diese Größe nicht ein, obwohl sich natürlich bei höherer Frequenz ein Riss schneller ausbreiten wird. Bruchmechanische Betrachtungen kommen häufig im Zusammenhang mit hohen zyklischen Beanspruchungen, wie bei Start/Abstell-Zyklen rotierender Komponenten (z.B. Turbomaschinen, Schwungräder), zur Anwendung. Dies hat mehrere Gründe:

Bei HCF-Beanspruchung (Bild 5.4-1) handelt es um eine dynamische Beanspruchung die über 10^5 Anrisslastwechsel benötigt. Derartig viele Lastwechsel werden gewöhnlich nur bei hochfrequenten Schwingungen erreicht. Entsprechend der Frequenz erfolgt ein sehr schneller Rissfortschritt, der es kaum erlaubt, den Riss vor dem Bruch durch eine Zwischeninspektion abzufangen. Selten ist der Zeitpunkt der Schwingbeanspruchung, die Zahl der Zyklen bis zum Anriss und die Beanspruchungshöhe bekannt, der Anrisszeitpunkt also nicht bestimmbar. Damit verlieren bruchmechanische Betrachtungen für die Schadensverhütung an Bedeutung.

Erfolgt die **Rissbildung und der unterkritische Fortschritt unter statischer Last** ist die gleichzeitige Einwirkung zusätzlicher Effekte wie Spannungsrisskorrosion oder Temperatur (Zeitstand) notwendig (Bild 4.3-12 und Bild 4.3-13). Ist der Anrisszeitpunkt (z.B. bei Korrosion) oder die Rissfortschrittsgeschwindigkeit nicht ausreichend genau vorausbestimmbar, hat die Anwendung

der Bruchmechanik für Risikoabschätzungen und die Festlegung von Inspektionsintervallen enge Grenzen.

Bei der LCF-Beanspruchung mit Anrisslastwechseln unter 10^6 sind die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung der Bruchmechanik zur Schadensverhütung in akuten Fällen gut. Voraussetzung ist, dass sowohl die Zahl der relevanten Zyklen bis zum Anriss als auch die Höhe der Beanspruchung ausreichend genau bekannt sind. Dafür sind die Auslegungsdaten für die Lebensdauer und/oder eine Bruchflächenanalyse (Bild 4.3-1) geeignet. Es handelt sich in erster Linie um instationäre Zustände wie Start/Abstell Vorgänge und Leistungsänderungen. Auch im Fall einer Rissbildung in Wellen, beispielsweise Radwellen von Zügen, wird entsprechend vorgegangen. Dazu müssen natürlich die relevanten Belastungszyklen bekannt sein. Die zyklische Beanspruchung ergibt sich bei Rotoren aus Fliehkräften, Biegebeanspruchung, und Wärmespannungen (Kapitel 5.4.2). Der Anrisszeitpunkt und der Rissfortschritt pro Lastwechsel sind somit gut abschätzbar, vorausgesetzt die notwendigen Werkstoffdaten liegen vor. Das ermöglicht Maßnahmen bei akuten Schäden. Hierzu zählt die Festlegung von **sicheren Restlaufzeiten** und/oder **ausreichenden Inspektionsintervallen**, bevor das Risiko eines Versagens durch einen Bruch des Bauteils zu hoch wird.

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten Anriss und Rissfortschritt

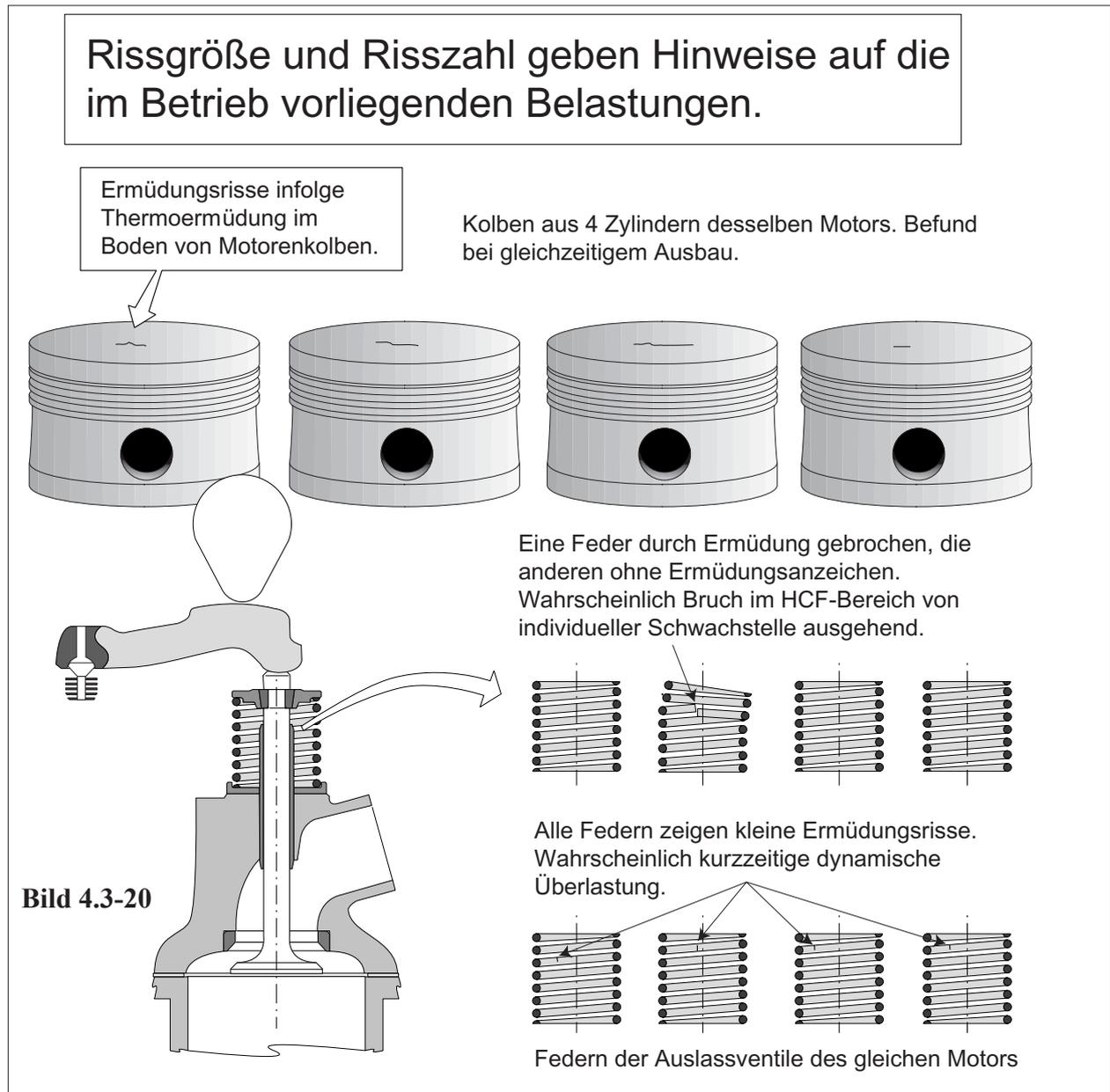


Bild 4.3-20: Der makroskopische äußere Befund einer Rissbildung an mehreren verschiedenen, gleichen oder ähnlichen Bauteilen kann etwas über den **Zeitpunkt und die Höhe der schadensauslösenden dynamischen Beanspruchung** aussagen.

Schwingerermüdung im HCF-Bereich: Ein typisches Beispiel sind Risse und/oder Brüche an Federn (Skizze unten rechts, Lit. 4.3-23).

Wenn **mehrere gleiche Bauteile** (z.B. Schaufeln einer Stufe einer Turbomaschine) **angerissen** sind, kann dies unterschiedliche Ursachen haben:

Gewöhnlich ist dies ein deutliches Zeichen für eine derart hohe Beanspruchung, dass an allen Bauteilen nahezu gleichzeitig ein Anriss erfolgte (Bild 4.3-21). Diese Beanspruchung kann zum Zeitpunkt des Anrisses kurzzeitig im LCF-Bereich gelegen haben, der Rissfortschritt erfolgte jedoch unter HCF-Bedingungen bei deutlich niedrigerer Beanspruchung. Denkbar ist die kurzzeitige Fehlfunktion der Regelung als Folge einer Stoßbelastung oder eines Anstreifvorgangs..

Ist die Spannungsverteilung, z. B. die Schwingform (Knotenlinienverlauf) so, dass der Riss

in ein dynamisch und statisch ausreichend niedriges Spannungsniveau verläuft, kann der Riss ebenfalls zum Stillstand kommen und mehrere Teile anreißen. Dies sollte aber mit einer mikroskopischen Bruchflächenanalyse erkennbar sein (Bild 2.2.2.4-3 und Bild 4.4-3).

Rissbildung und Risswachstum können zum ausreichenden Abbau der dynamischen Beanspruchung und einem Rissstillstand führen. Gründe sind die **Dämpfung infolge Reibung der Rissufer** und/oder der **Frequenzabfall** (Querschnittsschwächung) mit dem **Austritt aus der Resonanz**.

Ist die **Risslage** überall ähnlich, unterstützt dies die Vermutung, dass als Hauptanrissursache ein **diskreter Fehler** (z.B. Riefe oder Festigkeitsabfall, z.B. durch einen Schweißspritzer) **ausscheidet**. Weisen die Risse eine systematische bzw. **periodische Verteilung**, z.B. **an Schaufeln am Umfang** eines Rotors auf, kann dies Hinweis auf den Schwingmodus sein (Bild 5.4.3.1-4 und Bild 5.4.3.1-6). Damit besteht die Möglichkeit, einen Resonanzfall zu erkennen und gezielte Maßnahmen einzuleiten. Falls Bauteile wie Schaufeln unterschiedlicher Stufen mit unterschiedlichen Eigenfrequenzen Rissbildung zeigen, ist eine Resonanz weniger wahrscheinlich. In einem solchen Fall ist eher von einer gewaltsam angeregten Schwingung (z.B. von Pumpstößen „angestoßen“) auszugehen.

Schwingerermüdung im LCF-Bereich: Typisches Beispiel sind **Risse in Kolbenböden** (Skizzen oben). Zeigen ein oder mehrere Bauteile Risse in vergleichbarer Länge, ist zu vermuten, dass es sich um Thermoermüdungsrisse handelt. Deren Fortschritt hat sich mit der Risslänge deutlich verlangsamt oder ist zum Stillstand gekommen (Bild 4.3-11 und Bild 4.3-18). Eine derartige Rissbildung ermöglicht die **Überwachung und „Beherrschung“ der Rissbildung** (Bild 4.3-22). LCF Risse treten wegen der hohen Belastung (im plastischen Bereich) im Gegensatz zu HCF-Rissen oft an mehreren gleichen Teilen einer Maschine gleichzeitig auf (Bild 4.3-21).

Bild 4.3-21: Typisch für die hohe kurzzeitige dynamische Beanspruchung (in diesem Fall LCF und hochfrequent!) eines Zahnrads sind **mehrere angerissene Zähne**.

Nicht nur das äußere Schadensbild sondern auch die **Auswertung der Riss- bzw. Bruchfläche** (Bild 4.4-2 und Bild 4.4-3) lassen wichtige Rückschlüsse auf Schadensursachen und -ablauf zu. Hierfür ist eine makroskopische und elektronenmikroskopische (REM, Bild 2.2.2.4-3) Untersuchung anzuraten.

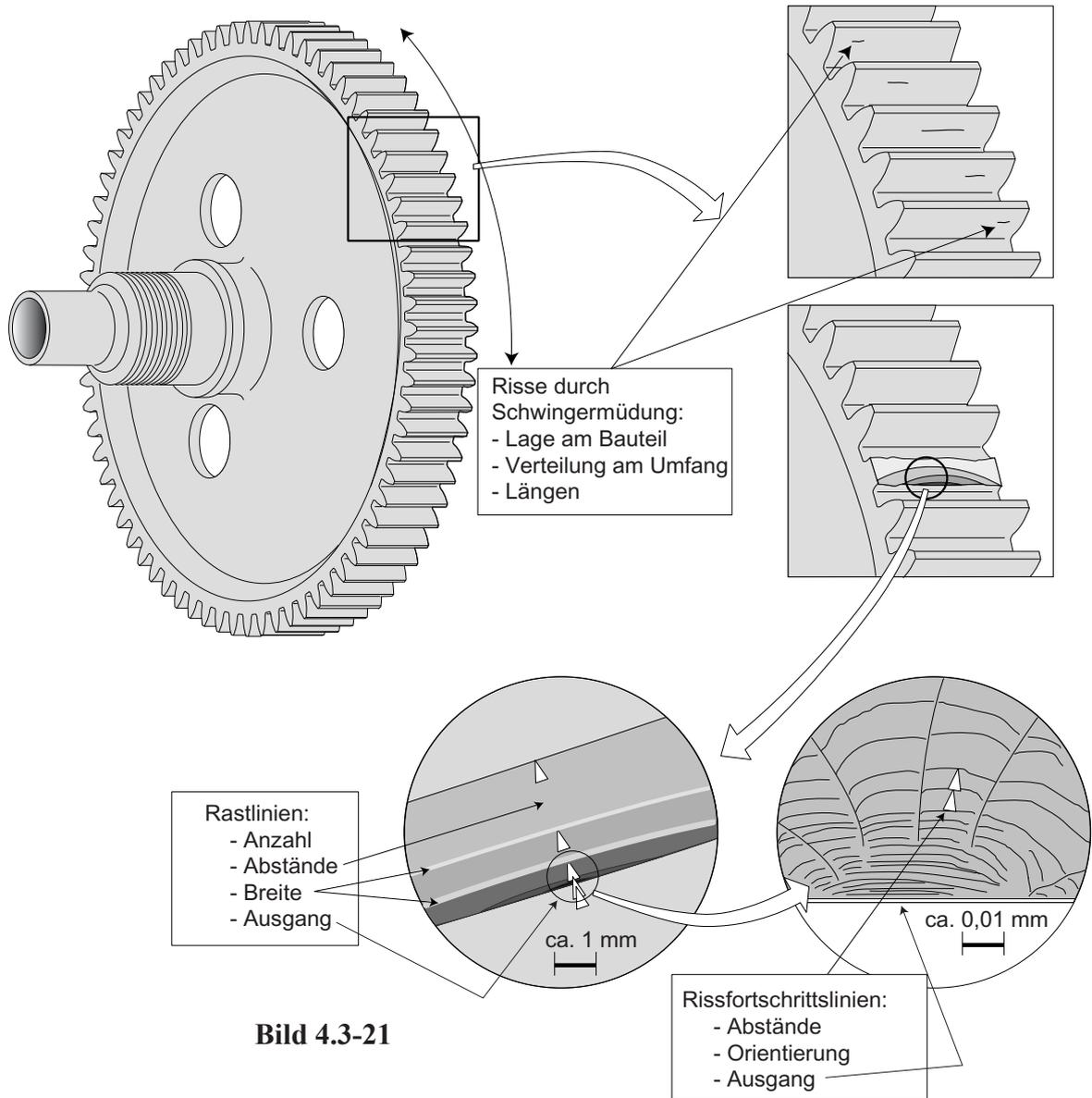
Makroskopische Untersuchung mit unbewaffnetem Auge und Binokular: Bruchflächen mit ähnlichen Schwingbruchgrößen bzw. Risslängen (Skizzen unten links) sprechen für eine, zu einem besonderen Zeitpunkt **hohe dynamische Überlastung** (wahrscheinlich im LCF-Belastungsbereich, Bild 5.4-1). Gehen die Risse von Schwachstellen aus, die innerhalb der Bauteilspezifikationen liegen (z.B. Bearbeitungsriefen oder Erosionskerben) und haben sie gleiche Anrisslagen am Bauteil, unterstützt dies die Annahme hoher dynamischer Überlastung (Bild 4.3-20).

Vergleichbare **Rastlinienmuster** erhärten den Verdacht eines gleichzeitigen Anrisses (Detail unten links). Unter Umständen lässt sich die Schadensentstehung mit einer Auswertung der Rastlinienabstände und -breiten am Schwingbruchende (letzter Verlauf der Schwingriss-Spitze) und einem Vergleich der Risse zeitlich zurückverfolgen. Eine übereinstimmende Rastlinienbildung lässt die Annahme zu, dass alle Bauteile zum gleichen Zeitpunkt dynamisch überlastet wurden. Zahl und Verteilung der Rastlinien lassen auf Zeitpunkt und Ursache des Anrisses schließen (z.B. Anstreifvorgang, Strömungsstörung, Unwuchten)

Elektronenmikroskopische Untersuchung (REM, Bild 2.2.2.4-3): Mit diesem Gerät ist gegebenenfalls eine Auswertung von Rissfortschrittslinien (engl. striations) möglich (Detail unten rechts). Jede dieser Linien entspricht einem Lastwechsel (Bild 4.3-6.2). Gelingt die Auswertung, sind sowohl die Lastwechselzahl für den gesamten Rissfortschritt, als auch die

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten Anriss und Rissfortschritt

Der Rissfortschritt kann viel über die schadensursächlichen Einflüsse aussagen.



Lastwechselzahlen bei bestimmten, den Rastlinien zuordenbaren Ereignissen abschätzbar. Aus dem Striation-Abstand können direkt die zugehörigen Rissfortschrittsgeschwindigkeiten ($\Delta a/\Delta N$) bestimmt werden. Damit wird eine **Abschätzung der dynamischen Beanspruchung während des Rissfortschritts** möglich, wenn für den fraglichen Werkstoff ein „Paris-Diagramm“ (Bild 4.3-3) vorliegt. Leider nicht

möglich ist eine gesicherte **Aussage über die dynamische Beanspruchung während der Schädigungsphase (Inkubation)** bevor sich der Makroanriss bildete. Die Auswertung des Striation „Musters“ (Lit. 4.3-10) lässt den Anrissbereich eindeutig identifizieren und damit gewöhnlich auch die den Anriss auslösende Schwachstelle bzw. den Fehler.

Wie groß ist die Chance, einen Riss rechtzeitig zu erkennen und zu beherrschen?

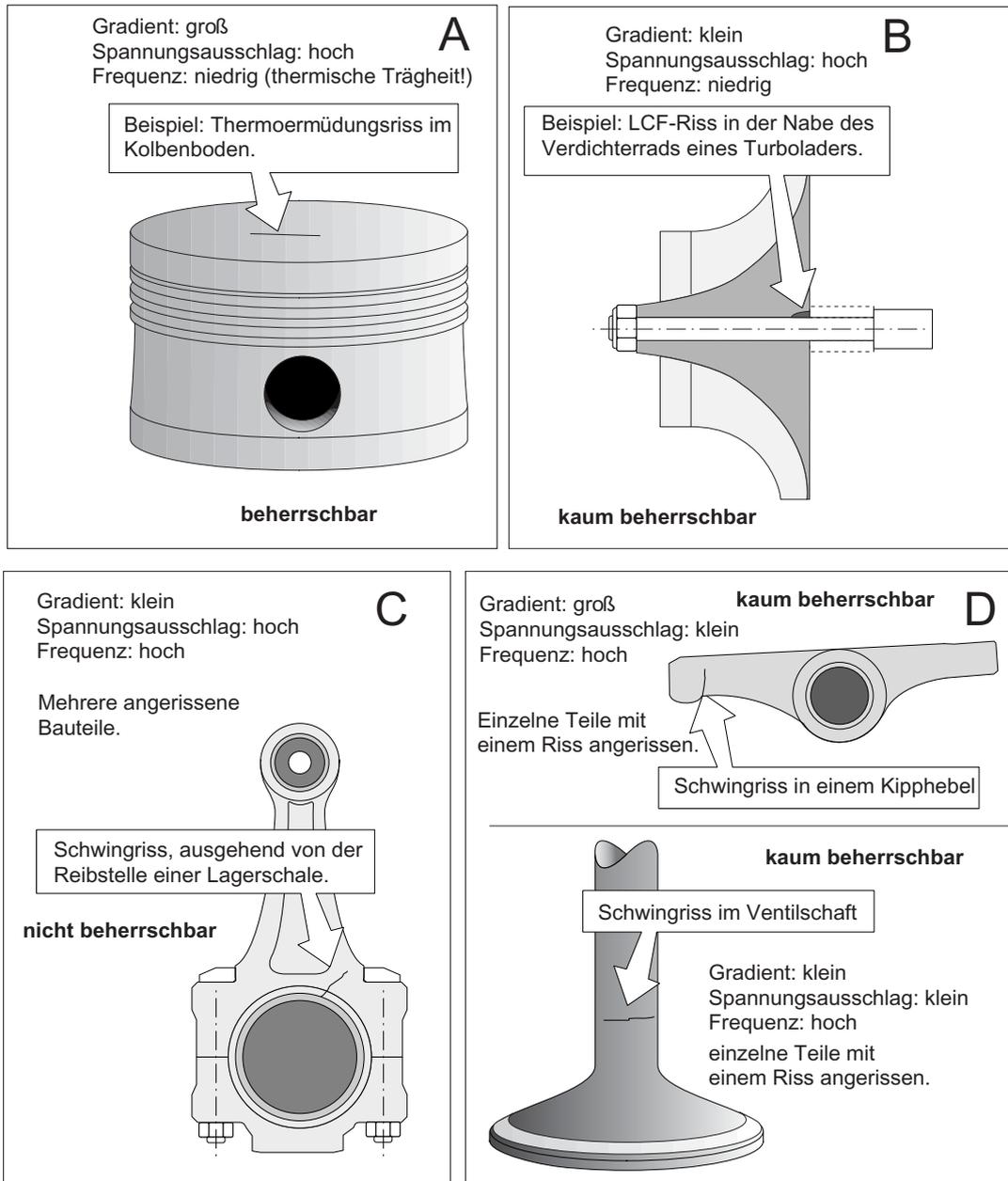


Bild 4.3-22

Bild 4.3-22 (Lit. 4.3-21: Die Abschätzung des Risikos einer ganzen betroffenen Flotte gleicher Maschinen bei akuten Schadensfällen ist von großer Bedeutung für einzuleitende Maßnahmen bzw. zur Risikominimierung. Hierzu gehört die Identifikation betroffener Bauteile,

die Festlegung von Inspektionsintervallen, die Definition der anzuwendenden Verfahren und die Erarbeitung bzw. Einleitung von Abhilfen. Für dieses Vorgehen muss die Chance abgeschätzt werden, den Anriss rechtzeitig vor dem Versagen des Bauteils (meist dem Bruch)

Die Risslage zur Beanspruchungsrichtung bestimmt entscheidend die Gefährlichkeit.

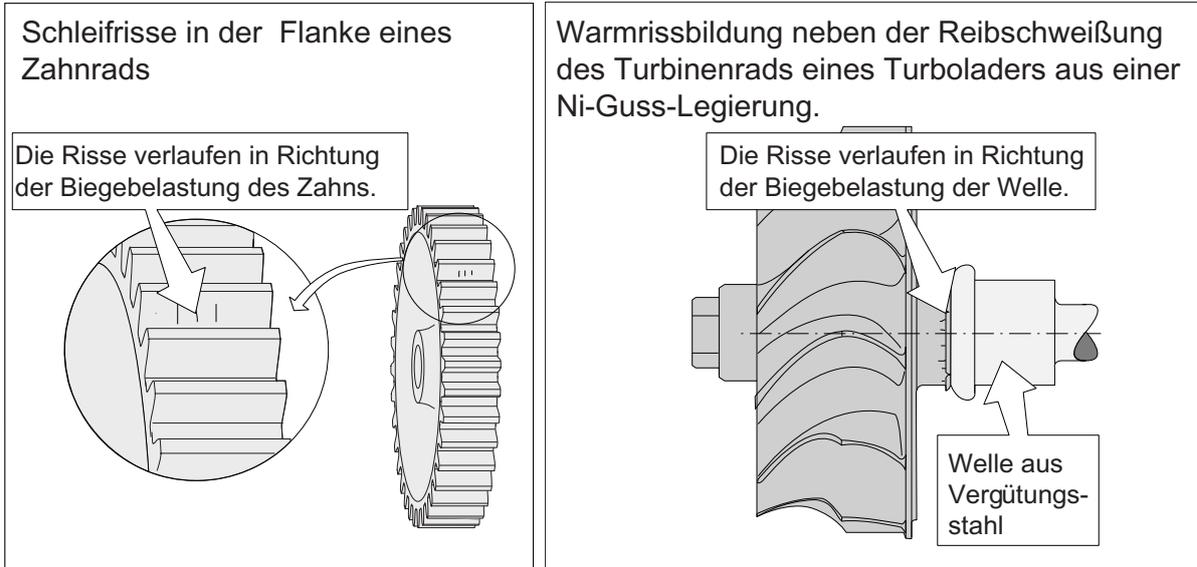


Bild 4.3-23

abzufangen (Bild 4.3-24). Das ermöglicht den Austausch des schadhaften Bauteils. In den Skizzen **A, B, C** und **D** sind dem Risiko eines Bruchs, trotz einer Rissüberwachung typische Belastungsmerkmale, zugeordnet.

Kriterien:

- **Spannungsgradient** (siehe Bild 4.3-11)
- **Spannungsausschlag** (LCF, HCF, siehe Bild 5.4-1)
- **Mittelspannung**
- **Spannungskonzentration** (Einfluss vorhandener Kerben und Anrisse).
- **Risszähigkeit** des Werkstoffs (Bild 4.3-4 und Bild 4.3-8)
- **Belastungsfrequenz**: Bei hohen Frequenzen wird in kürzester Zeit (z.B. Sekunden) infolge der vielen Lastwechsel sehr viel Schädigung akkumuliert und das zeitliche Risswachstum unkontrollierbar.

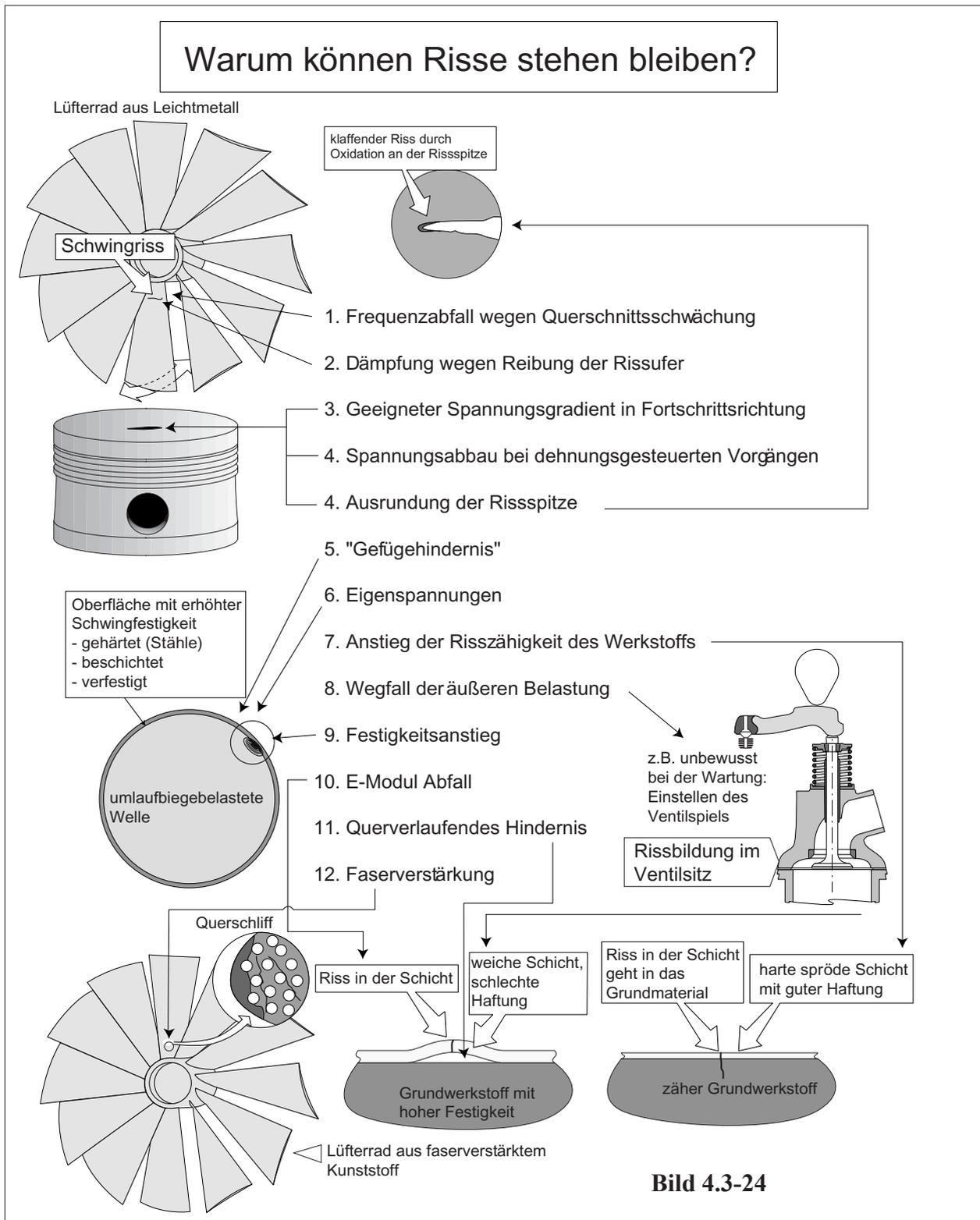
Im Fall des Kolbens eines Verbrennungsmotors („A“) ist für die Thermoermüdung nicht jede einzelne Zündung entscheidend. Auf Grund der thermischen Trägheit wirken sich

lediglich Start-/Abstellzyklen und größere Leistungsänderungen aus. Damit ist die Belastungsfrequenz relativ niedrig (Bild 5.4.1.2-3)

- **Zahl der angerissenen Bauteile** (siehe Bild 4.3-20 und Bild 4.3-21).
- **Erfahrungen** mit schadensrelevanten Bauteilen.

Bild 4.3-23: Es ist leicht einzusehen, dass die Lage des Risses zur **schadensrelevanten Beanspruchungsrichtung** für ein Risswachstum von großer Bedeutung ist. Bei einer günstigen Risslage zur **Hauptbeanspruchungsrichtung** kann erfahrungsgemäß die Betriebssicherheit durchaus gegeben sein. Ein Beispiel ist ein quer zur Zahnflanke verlaufender Schleifriss (Skizze links). Ein solcher Riss verläuft parallel zur Spannung durch die Hauptbeanspruchung (Zahnbiegung).

Die rechte Skizze zeigt Warmrisse in einer Reibschweißung. Diese laufen in Richtung der Wellenachse. Sie sind sowohl längs- (Biegung) als auch querbelastet (Fliehkraft, Wärmespannungen, Torsion). Die Erfahrung zeigt, dass



unter den Betriebsbedingungen mit ausreichender Sicherheit **kein Risswachstum** auftritt. Damit sind die Risse als **bauteiltypische Schwachstelle** einzustufen und entsprechend in die Vorschriften aufzunehmen.

Bild 4.3-24: Gewöhnlich führt die Schwächung des tragenden Querschnitts und die Kerbwirkung eines Risses zum beschleunigten Risswachstum. Es gibt jedoch einige Ausnahmen bei denen der **Rissfortschritt sich verzögert**

oder der **Riss ganz zum Stehen** kommt. Einige dieser Ausnahmen sollen im Folgenden dargestellt werden:

„1“: Die **Querschnittsschwächung** führt zu einem Anstieg der elastischen Nachgiebigkeit des Bauteils. Dadurch fällt die **Eigenfrequenz** der Schwingform, die den Riss ursächlich bedingt, ab. Ist der Frequenzunterschied zwischen Anregung und Schwingfrequenz ausreichend groß, kommt das Bauteil gegebenenfalls aus einer **Resonanz** und die Schwingbelastung fällt deutlich ab.

„2“: Bei der Schwingung bewegen sich die zumindest im Mikrobereich gezackten Rissufer gegeneinander. Entsteht dabei ausreichend Reibung, wirkt diese auf die Schwingung **dämpfend**, wobei die Schwingbelastung absinkt.

„3“: Liegt ein steil abfallender **Zugspannungsgradient** (Spannungsgradient, siehe Bild 4.3-11) in Rissfortschrittsrichtung vor oder wird eine Druckspannungszone erreicht, fällt die Rissfortschrittsgeschwindigkeit ab (Bild 4.3-3). Unterhalb des sog. Threshold der Spannungskonzentration kommt der Riss zum Stehen. Solche Spannungsgradienten bilden sich unter dem Einfluss von Wärmespannungen (Bild 5.4.2.1-2). Auch Druckeigenstressungen können auf einen Riss abbremsend wirken.

„4“: Hat ein Riss bereits eine sehr niedrige Fortschrittsgeschwindigkeit (z.B. bei Thermoermüdung), kann die **Oxidation** zur Abrundung der Risspitze führen (Bild 4.3-16) und damit die Spannungskonzentration so weit absenken, dass der Riss zum Stehen kommt.

„5“: **Gefügeheterogenitäten** können das Risswachstum verzögern. Ein typischer Fall sind faserverstärkte Werkstoffe (FVK, KFK, Bild 3-11). Für einen **Risstopper-Effekt** darf die Faser nicht zu fest mit der Matrix verbunden sein, um ein Durchlaufen der Risse von der Matrix in die Faser zu verhindern.

„6“: Wie bereits in „4“ erwähnt, können **Druckeigenstressungen** die Spannungskonzentration beim Rissfortschritt so weit absenken, dass es zumindest zeitweilig zum Rissstillstand kommt. Solche Eigenstressungen sind in oberflächengehärteten (Einsatzhärten, Nitrieren) Stahlteilen (Bild 4.3-18) zu erwarten. Dabei kann sich ein Riss im **Querschnittsinneren** bilden und nach außen hin sehr viel langsamer wachsen als in den Querschnitt.

„7“: Steigt die **Risszähigkeit** des Werkstoffs vor der Risspitze deutlich an, dass sie über der herrschenden Spannungskonzentration liegt, kommt der Riss zum Stillstand. Ein solcher Fall ist z.B. bei sehr **dünnen spröden Schichten** auf einem zähen Werkstoff gegeben. Die kurzen Risse in der dünnen Schicht weisen eine relativ niedrige Spannungskonzentration auf. Typisches Beispiel sind Diffusionsschichten auf Nickellegierungen. Hierzu gehören auch **hartverchromte Bauteile** deren Chromschicht gewöhnlich Risse aufweist, die jedoch bei ausreichend niedriger Schwingbeanspruchung nicht in den Grundwerkstoff wachsen. Ein zusätzlicher Effekt wird mit dem Einbringen von Druckspannungen durch Kugelstrahlen erreicht.

„8“: Ist die für das Risswachstum notwendige Beanspruchung ausreichend kurz und der Riss noch nicht so weit gewachsen, dass er unter den normalen Betriebsspannungen weiter wächst, kommt es zum Rissstillstand. Solche Bedingungen können bei Anstreichvorgängen und Pumpstößen auftreten.

„9“: Steigt die **Festigkeit eines zähen Werkstoffs** vor der Risspitze stark an, wie dies z.B. bei Wärmedämmschichten auf Nickellegierungen der Fall ist, bleiben Risse in der Wärmedämmschicht und verlaufen nicht in den Grundwerkstoff (Segmentierungsrisse). Dieses Verhalten ist eine Voraussetzung für die Funktion **keramischer Wärmedämmschichten**.

oder der **Riss ganz zum Stehen** kommt. Einige dieser Ausnahmen sollen im Folgenden dargestellt werden:

„1“: Die **Querschnittsschwächung** führt zu einem Anstieg der elastischen Nachgiebigkeit des Bauteils. Dadurch fällt die **Eigenfrequenz** der Schwingform, die den Riss ursächlich bedingt, ab. Ist der Frequenzunterschied zwischen Anregung und Schwingfrequenz ausreichend groß, kommt das Bauteil gegebenenfalls aus einer **Resonanz** und die Schwingbelastung fällt deutlich ab.

„2“: Bei der Schwingung bewegen sich die zumindest im Mikrobereich gezackten Rissufer gegeneinander. Entsteht dabei ausreichend Reibung, wirkt diese auf die Schwingung **dämpfend**, wobei die Schwingbelastung absinkt.

„3“: Liegt ein steil abfallender **Zugspannungsgradient** (Spannungsgradient, siehe Bild 4.3-11) in Rissfortschrittsrichtung vor oder wird eine Druckspannungszone erreicht, fällt die Rissfortschrittsgeschwindigkeit ab (Bild 4.3-3). Unterhalb des sog. Threshold der Spannungskonzentration kommt der Riss zum Stehen. Solche Spannungsgradienten bilden sich unter dem Einfluss von Wärmespannungen (Bild 5.4.2.1-2). Auch Druckeigenstressungen können auf einen Riss abbremsend wirken.

„4“: Hat ein Riss bereits eine sehr niedrige Fortschrittsgeschwindigkeit (z.B. bei Thermoermüdung), kann die **Oxidation** zur Abrundung der Risspitze führen (Bild 4.3-16) und damit die Spannungskonzentration so weit absenken, dass der Riss zum Stehen kommt.

„5“: **Gefügeheterogenitäten** können das Risswachstum verzögern. Ein typischer Fall sind faserverstärkte Werkstoffe (FVK, KFK, Bild 3-11). Für einen **Risstopper-Effekt** darf die Faser nicht zu fest mit der Matrix verbunden sein, um ein Durchlaufen der Risse von der Matrix in die Faser zu verhindern.

„6“: Wie bereits in „4“ erwähnt, können **Druckeigenstressungen** die Spannungskonzentration beim Rissfortschritt so weit absenken, dass es zumindest zeitweilig zum Rissstillstand kommt. Solche Eigenstressungen sind in oberflächengehärteten (Einsatzhärten, Nitrieren) Stahlteilen (Bild 4.3-18) zu erwarten. Dabei kann sich ein Riss im **Querschnittsinneren** bilden und nach außen hin sehr viel langsamer wachsen als in den Querschnitt.

„7“: Steigt die **Risszähigkeit** des Werkstoffs vor der Risspitze deutlich an, dass sie über der herrschenden Spannungskonzentration liegt, kommt der Riss zum Stillstand. Ein solcher Fall ist z.B. bei sehr **dünnen spröden Schichten** auf einem zähen Werkstoff gegeben. Die kurzen Risse in der dünnen Schicht weisen eine relativ niedrige Spannungskonzentration auf. Typisches Beispiel sind Diffusionsschichten auf Nickellegierungen. Hierzu gehören auch **hartverchromte Bauteile** deren Chromschicht gewöhnlich Risse aufweist, die jedoch bei ausreichend niedriger Schwingbeanspruchung nicht in den Grundwerkstoff wachsen. Ein zusätzlicher Effekt wird mit dem Einbringen von Druckspannungen durch Kugelstrahlen erreicht.

„8“: Ist die für das Risswachstum notwendige Beanspruchung ausreichend kurz und der Riss noch nicht so weit gewachsen, dass er unter den normalen Betriebsspannungen weiter wächst, kommt es zum Rissstillstand. Solche Bedingungen können bei Anstreichvorgängen und Pumpstößen auftreten.

„9“: Steigt die **Festigkeit eines zähen Werkstoffs** vor der Risspitze stark an, wie dies z.B. bei Wärmedämmschichten auf Nickellegierungen der Fall ist, bleiben Risse in der Wärmedämmschicht und verlaufen nicht in den Grundwerkstoff (Segmentierungsrisse). Dieses Verhalten ist eine Voraussetzung für die Funktion **keramischer Wärmedämmschichten**.