

HANSER

Leseprobe

Andreas Neidel

Handbuch Metallschäden

REM-Atlas und Fallbeispiele zur Ursachenanalyse und Vermeidung

Beiträge von Lothar Engel, Hermann Klingele, Jörg Völker, Biljana
Matijasevic-Lux

ISBN: 978-3-446-42775-4

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42775-4>

sowie im Buchhandel.

3.2.1 Mechanische Brüche

3.2.1.1 Zäher Gewaltbruch

3.2.1.1.1 Zäher Gewaltbruch bei Raumtemperatur

Die Metalle besitzen die Fähigkeit, sich unter dem Einfluss äußerer Kräfte zu verformen. Sie bauen Spannungen durch Gleitprozesse ab. Je nach Art des Metallgitters gibt es in den Kristalliten eine mehr oder weniger große Zahl von Gleitsystemen, d.h. Kombinationen von Gleitrichtung und Gleitebene bezüglich des Kristallgitters. Das Gleiten ist nicht eine gleichzeitige Verschiebung vieler Atome in gleicher Richtung und um die gleiche Strecke. Vielmehr werden die Atome einzeln verschoben.

Die verschiedenen linienförmigen Verschiebungsfronten, die örtlich Fehler im regelmäßigen Aufbau des Gitters darstellen, werden mit dem Begriff Versetzungen zusammengefasst (Bild 1). Das Ergebnis einer Vielzahl von Versetzungsbewegungen, die sich auch durchdringen und überschneiden können, ist nach außen hin eine Veränderung der Gestalt. An Oberflächen werden dabei Gleitlinien sichtbar (Bild 43). Der beschriebene Vorgang ergibt die plastische Verformung eines Werkstückes. Mit steigender Verformung

nimmt die Zahl der Gitterfehler zu. Die Versetzungen behindern sich gegenseitig und werden auch durch „Fremdkörper“, d.h. durch Ausscheidungen behindert. Dadurch werden die Gleitmöglichkeiten immer mehr verringert und schließlich erschöpft, so dass es keine weitere Verformungsmöglichkeit mehr gibt. Die bei diesem Vorgang zu verzeichnende Zunahme der Härte und Zugfestigkeit wird Kaltverfestigung genannt. Bei weiterer Krafteinwirkung kommt es zur Trennung des Werkstoffes.

Der beschriebene Vorgang trifft nur für hochreine Werkstoffe zu. Diese schnüren sich im Zugversuch immer mehr ein und werden schließlich längs eines Grades oder an einer verbleibenden Spitze getrennt (Punkteinschnürung). An den Oberflächen erkennt man die sich überschneidenden Gleitpakete. Diese Art der Verformung und Trennung wird vorzugsweise an Einkristallen beobachtet. Technische Metalle sind nicht rein. Sie bestehen aus einer Vielzahl dicht aneinandergfügter Kristallite mit Durchmessern im μm -Bereich und enthalten Verunreinigungen im weitesten Sinn (Bild 1). Manche dieser Verunreinigungen – bei denen es sich um beabsichtigte Legierungselemente oder um unbeabsichtigte echte Verunreinigungen handeln kann – sind in das Kristallgitter eingebaut. Es gibt aber immer Fremdphasen die isoliert und abgegrenzt im Metall sitzen. Das bedeutet, dass die Metallmatrix mit Löchern durchsetzt ist, in denen die Fremdphasen liegen.

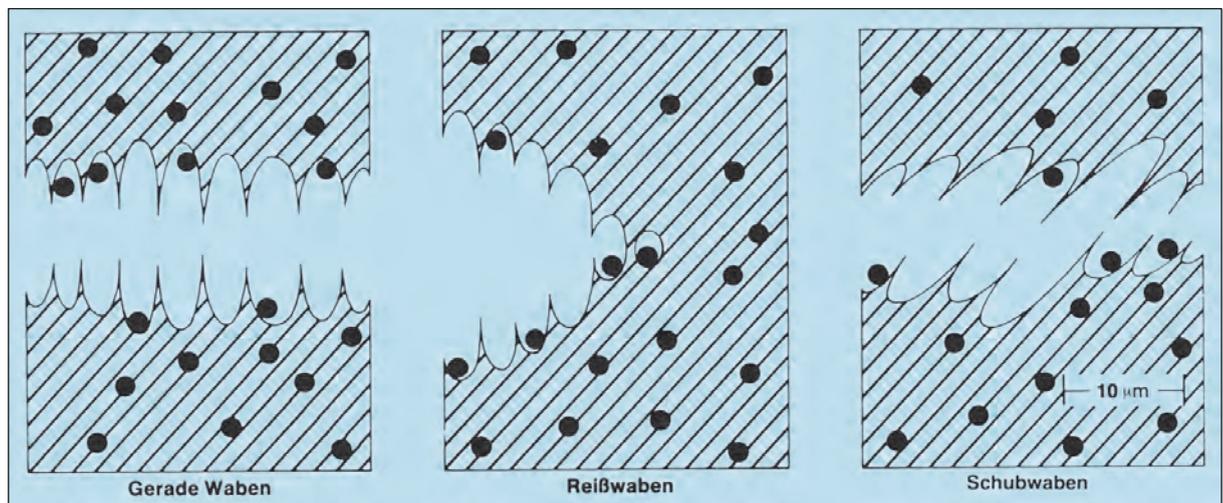


Bild 41: Gerade Waben, Reißwaben und Schubwaben

Bei der plastischen Dehnung eines Bereiches werden die Löcher erweitert. Der Werkstoff zwischen den Löchern schnürt sich ein, dabei wird das Material der Trennwände einer intensiven Schubbeanspruchung unterworfen. Bei fortschreitender Dehnung bleiben nur noch dünne, gratartige Trennwände zwischen den Löchern übrig. Schließlich werden die letzten Verbindungen getrennt, und es bleiben zwei von „Halblöchern“ durchsetzte Bruchflächen zurück (Bild 41).

Diese Löcher werden im englischen Schrifttum „dimples“ genannt, im deutschen Schrifttum spricht man von Waben. Die Wabenstruktur ist das am sichersten erkennbare Bruchmerkmal. Sie bildet sich in allen Metallen gleichartig aus. Oft findet man in den Waben noch die Einschlüsse, die zu deren Entstehung geführt haben. Es kann jedoch nicht in jeder Wabe ein Einschluss liegen, da sich die Einschlüsse auf beide Bruchflächen verteilen. Außerdem können die Einschlüsse beim Bruch, beim Transport und bei Ultraschallreinigung herausfallen.

Die Größe und Form der Waben richtet sich nach den Einschlüssen. Zeilenförmige Einschlüsse hinterlassen rinnenförmige Waben. Deshalb sind die Waben in stark gewalzten Erzeugnissen immer nach der Walzrichtung orientiert.

Zwischen dichten Zeilen von langgestreckten Mangansulfiden bilden sich lange durchgehende Grate aus. In Brüchen mit stangenförmigen Mangansulfiden kann man auch oft beobachten, wie die ehemals dicht an den Mangansulfiden anliegenden Röhren des Grundwerkstoffs vor dem Bruch aufgeweitet werden.

Die Tiefe der Waben, d. h. die Höhe der sie begrenzenden Grate ist ein Maß für die Verformungsfähigkeit und Bruchzähigkeit der Matrix. Duktile Werkstoffe, wie austenitische Stähle oder Kupfer, bilden sehr tiefe Waben. Wenig verformbare Werkstoffe oder Werkstoffe, deren Verformungsvermögen durch Kaltverformung weitgehend erschöpft ist, bilden ganz flache Waben.

Die bei der plastischen Verformung herrschenden Spannungen und daraus hervorgehenden Relativbewegungen vor dem Bruch bestimmen die Ausrichtung der Waben. Durch gleichmäßig verteilte Normalspannungen entstehen gerade Waben. Ungleichmäßig verteilte Normalspannungen erzeugen Reißwaben (Bild 41).

Reißwaben treten immer bei gewaltsamen Anrissen an Oberflächen auf, da der dort herrschende ebene Spannungszustand den Verformungsbruch begünstigt. Werden Risse im Labor aufgebrochen, so entstehen im Rissgrund ebenfalls Reißwaben. In einigen Fällen werden dort auch Schubstufen zwischen den Reißwaben gefunden.

Unter Schubspannungen bilden sich Schubwaben, die im Extremfall sehr stark in die Länge gezogen sein können. Die Schubwaben findet man immer in den Schublippen von Gewaltbrüchen. Die Schublippen sind unter ca. 45° zur übrigen Bruchfläche geneigte Flächen. Sie treten an den Stellen auf, wo der sich ausbreitende Riss die gegenüberliegenden Oberflächen erreicht. Dort breitet sich der Bruch im ebenen Spannungszustand aus. Unter Torsion ordnen sich die Schubwaben kreisförmig an.

Die Innenflächen der Waben sind nach der vorangegangenen starken Verformung nicht glatt, sondern von Gleitlinienfeldern durchsetzt. Besonders die in vielkristallinen Metallen auftretende Mehrfachgleitung, die jedem einzelnen Korn durch die Nachbarkörner aufgezungen wird, ruft schlangenförmige Gleitmuster hervor (Serpentingleiten).

Waben bilden sich, wenn verformbare Bereiche mit Fremdpartikeln durchsetzt sind. Dies kann auch an Korngrenzen der Fall sein. Wenngleich die Wabenstruktur häufiger in transkristallinen Brüchen zu finden ist, gibt es doch viele Fälle mit Waben auf den Korngrenzflächen. In diesem Fall sind die korngrenznahen Bezirke verformungsfähiger als das Korninnere. Die Freilegung von Ausscheidungen im Wabenbruch ist manchmal die einzige Möglichkeit, diese einer Mikroanalyse im Rasterelektronenmikroskop zugänglich zu machen.

Verwandt mit dem Wabenbruch ist der Quasi-Spaltbruch, der bei vergüteten Stählen im Temperaturbereich unterhalb der Sprödbrech-Übergangstemperatur auftritt. Obwohl nach den mechanischen Kennwerten ein spröder, d. h. verformungsarmer Bruch vorliegt, enthalten die Bruchflächen eindeutig Anzeichen plastischer Verformung.

Das Bruchaussehen mit vielen flachen, aber leicht konkaven Flächen oder Facetten entsteht durch Vereinigung vieler einzelner Anrisse (Bild 42). Jeder Anriss breitet sich von einem zentralen Anfangspunkt

ausgehend konzentrisch aus. Dabei ist zwar die etwa kreisrunde Rissfront plastisch aufgeweitet, aber der entstehende Hohlraum ist im Gegensatz zu den Waben mehr linsenförmig. Bei der Vereinigung der Risse bleiben hochgezogene Grate stehen, die Reißkämme oder Kämme genannt werden (Bild 42).

Die Facetten sind transkristallin und zeigen keinen Zusammenhang mit den Gefügemerkmalen. Auch weitgehend ebene Bereiche sind nicht nach kristallo-

grafischen Ebenen orientiert. Einzelne Risse werden sehr groß und teilen sich bei der radialen Ausbreitung in mehrere Sektoren, die untereinander durch Reißkämme getrennt sind. An solchen Rosetten ist die plastische Hochwölbung der etwa kreisrunden Rissfront besonders gut zu erkennen.

Die häufig mit den Quasi-Spaltbruch-Facetten und -Rosetten vermischten Waben unterstreichen die Verwandtschaft der beiden Bruchtypen.

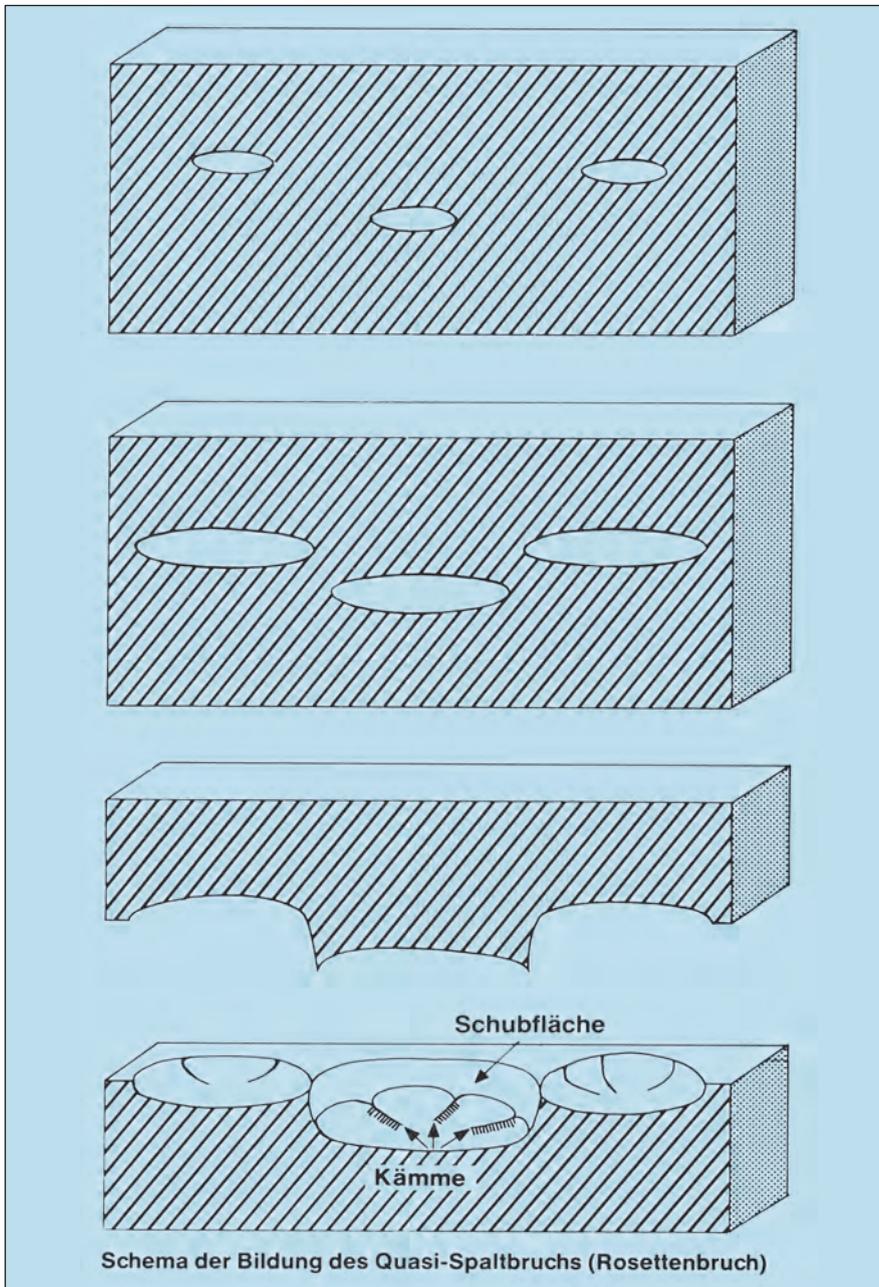


Bild 42: Schema der Bildung des Quasi-Spaltbruchs (Rosettenbruch)

Bild 43: Gleitlinien und ein Anriss auf der Zugseite eines elektrolytisch polierten und anschließend gebogenen Bleches aus Nickelwerkstoff mit Cr, Fe und Ti.
5000:1



Bild 44: Zähne Anrisse mit Wabenstruktur in einem hochlegierten Stahl.
An der Oberfläche sind die Gleitspuren zu erkennen.
600:1



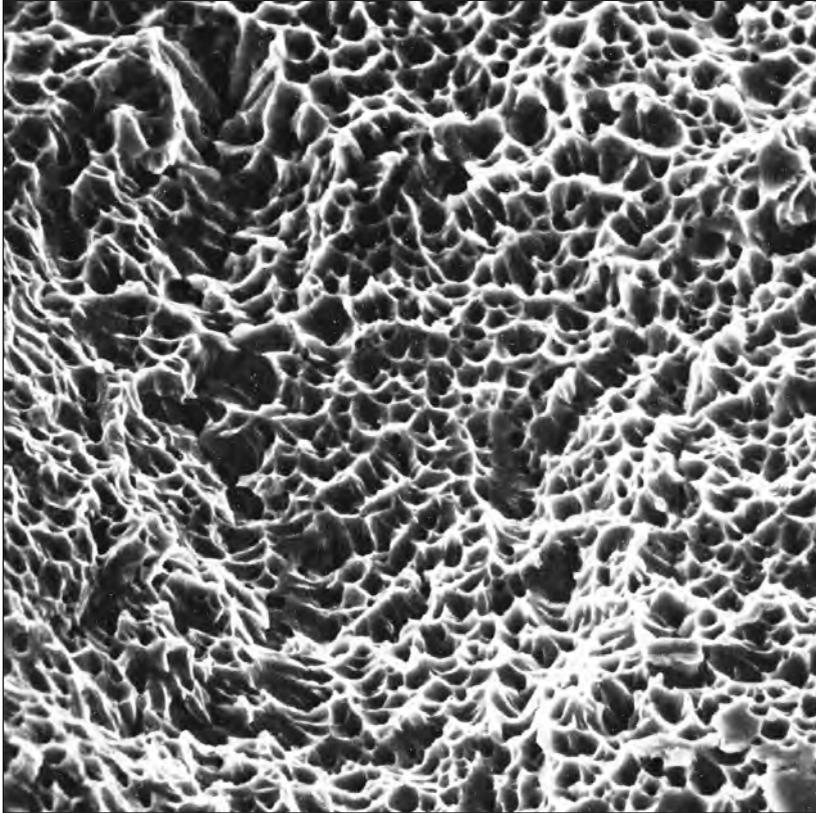


Bild 45: Gerade Waben im Rest-Gewaltbruch einer Stahlfeder.
1000:1

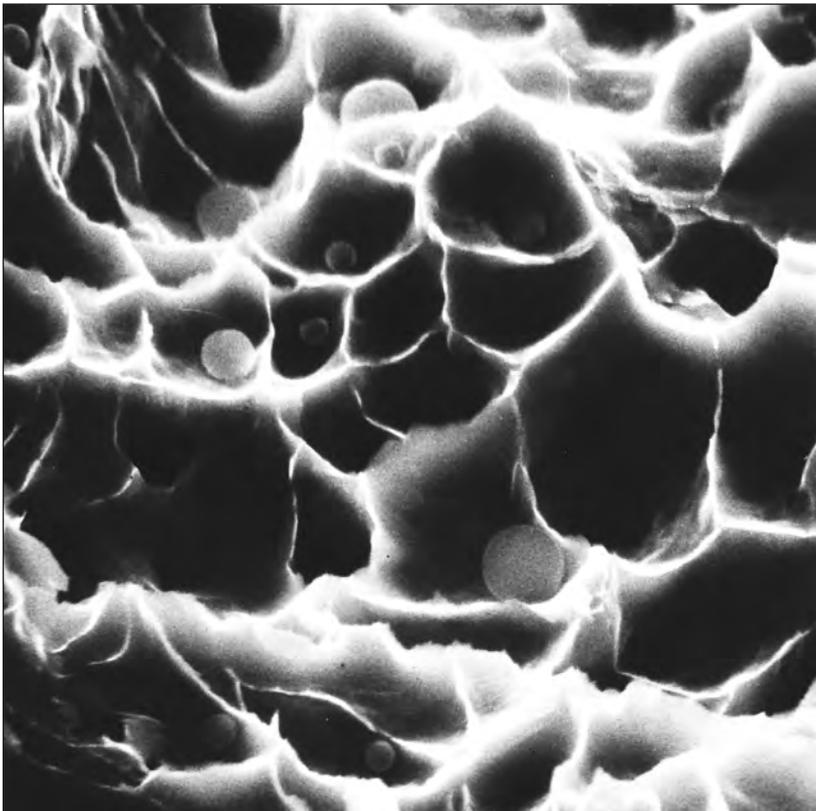


Bild 46: Silikateinschlüsse bestimmen Wabenform und Wabengröße in der Schweißnaht eines unlegierten C-Stahls.
5500:1

Bild 47: Zeilige Wabenstruktur um Mangansulfidzeilen beim zähen Bruch eines Stahls.
1000:1

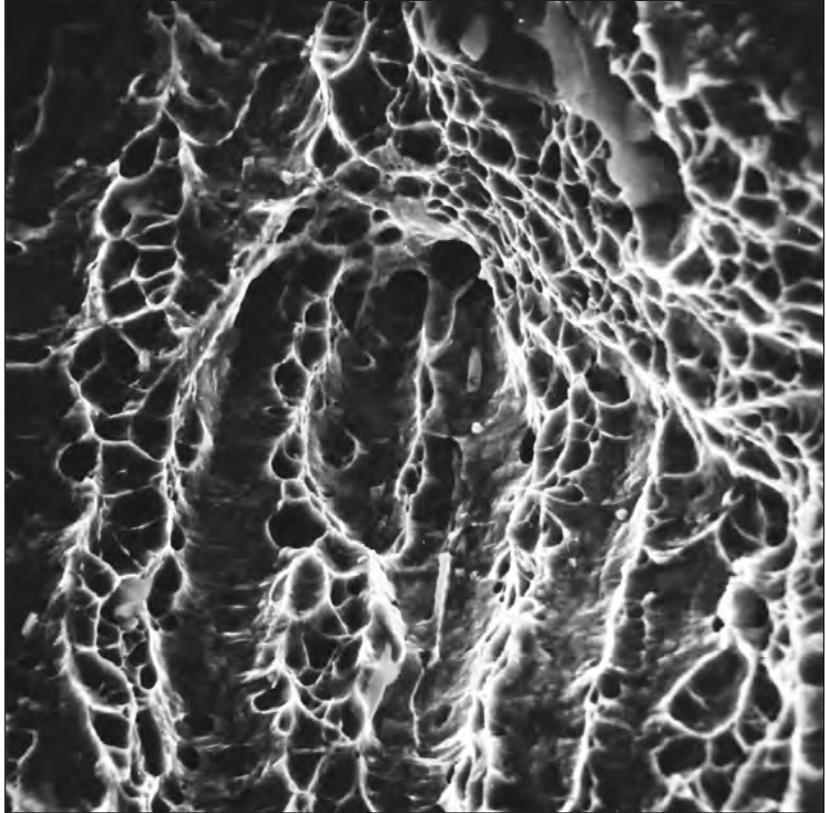
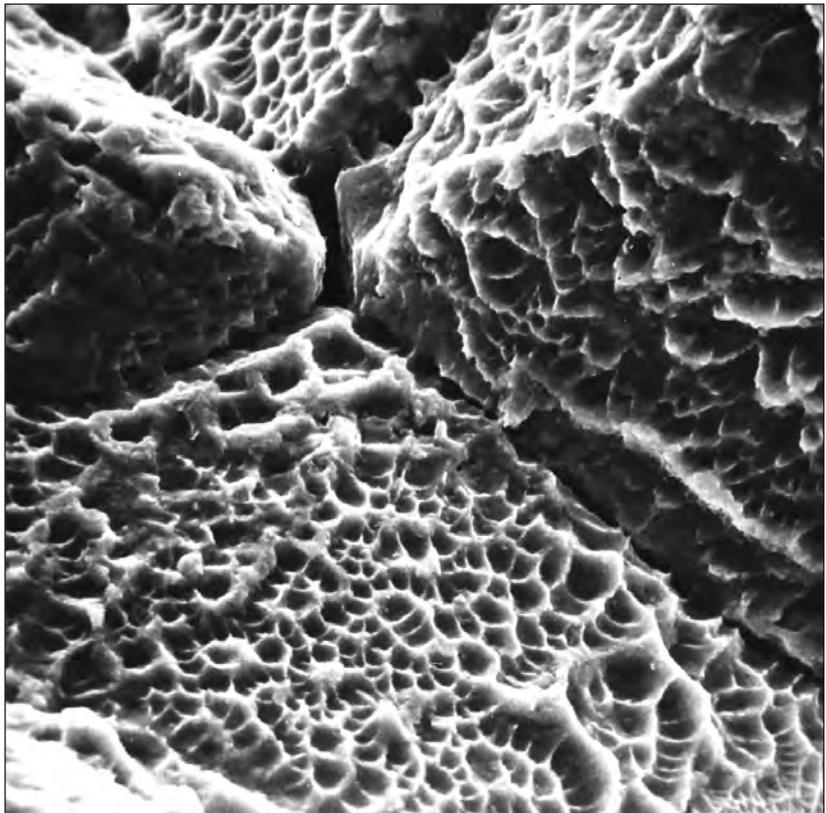


Bild 48: Zäher Wabenbruch auf Korngrenzflächen bei Stahl.
2000:1



II

3.1.2.11 Bruchuntersuchung eines Öldruckrohres

Autor: Horst Wanzek, Lufthansa Technik

3.1.2.11.1 Einführung

Hoher Ölverbrauch in einem Triebwerk eines Zivilflugzeuges war Anlass den Flug abbrechen und zum Startflughafen zurückzukehren. Die Ursache dafür konnte am Boden nicht eindeutig geklärt werden, so dass man sich zum Wechsel des Triebwerkes entschied. Das defekte Triebwerk wurde zur Reparatur in die Triebwerkswerkstatt der Lufthansa Technik nach Hamburg geliefert.

Nachdem die Triebwerksverkleidung entfernt wurde, war an der Außenseite im Bereich des Diffuser Gehäuses eine großflächige, dunkle Verfärbung zu erkennen (Abb. 1). Eine Ölversorgungsleitung innerhalb des Gehäuses war gerissen, so dass Öl ausgetreten war und sich im Inneren des Gehäuses entzündete.

Das Triebwerk war seit der letzten Überholung 3347 Stunden in Betrieb. Es stellte sich heraus, dass das schadensursächliche Öldruckrohr im Rahmen der letzten Triebwerksüberholung als ein repariertes Rohr eingebaut worden war. Die Reparatur an dem Öldruckrohr beinhaltet die schweißtechnische Res-

tauration der Kolbenringdichtung auf dem Schutzrohr sowie den Austausch von Isolationsmaterial und die Erneuerung zweier Blechhalbschalen. An der eigentlichen Öldruckleitung werden keine Reparaturen durchgeführt.

3.1.2.11.2 Funktionsbeschreibung:

Die Ölleitung zur Versorgung des Triebwerkwellenlagers No.4 führt konstruktionsbedingt durch das Diffuser Gehäuse. Die hier vorliegenden Betriebstemperaturen von ungefähr 500°C machen es erforderlich das Öl vor Überhitzung zu schützen. Aus diesem Grund ist die ölführende Leitung im Bereich des Heißluftstromes von einem zweiten, als Hitzeschutz fungierendes Rohr, umhüllt. Außerhalb des Heißluftstromes ist die Öldruckleitung mit Isolationsmaterial und einer zweigeteilten Blechhülle ummantelt. Um Druckverluste oder Leckagen der Heißluft zu vermeiden, dichtet eine auf dem Schutzrohr befindliche Kolbenringdichtung die Sektion im Diffuser Gehäuse ab (Abb. 2). Diese Dichtung verschleißt im Flugbetrieb und kann schweißtechnisch repariert werden.

Die Öldruckleitung muss zur Kompensierung von Einbauspannungen und Vibrationen aus dem Flugbetrieb, innerhalb des Hitze-Schutzrohres über ein geringes Maß an Beweglichkeit verfügen. Dies erreicht man dadurch, dass die Öldruckleitung an dem

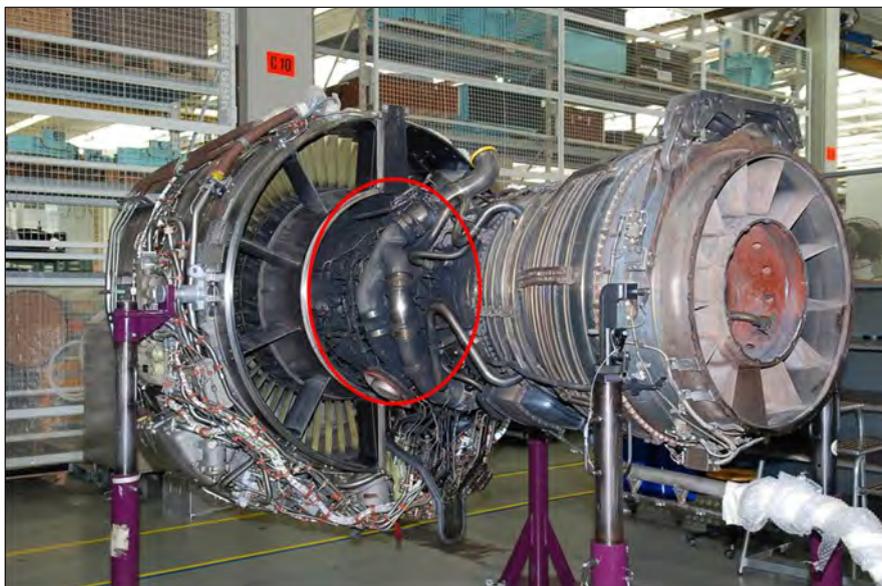


Abb 1: Die Markierung zeigt den verfärbten Bereich an der Außenseite des Diffuser Gehäuses

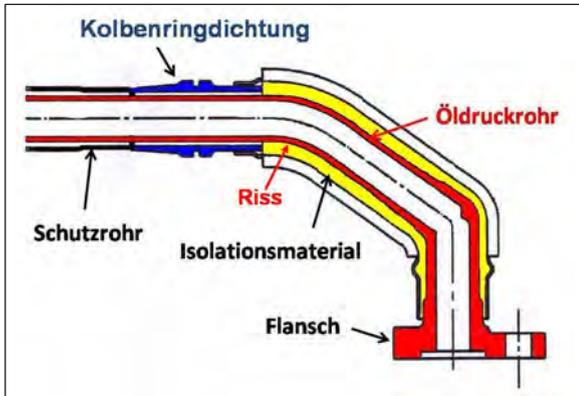


Abb 2: Schematischer Aufbau der Öldruckleitung

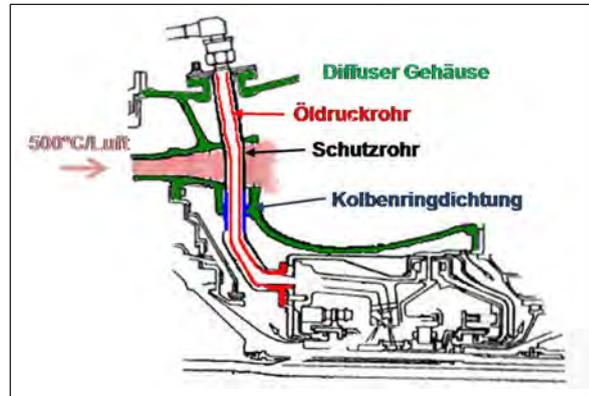


Abb 3: Skizze vom Aufbau Öldruckleitung / Diffuser Case



Abb 4: Öldruckleitung im eingebauten Zustand mit Verbrennungsrückständen.

Hitzeschild zum Lagergehäuse und das Schutzrohr über die Kolbenringdichtung, unabhängig von der Öldruckleitung, an dem Diffuser Gehäuse befestigt sind (Abb. 3 und 4).

3.1.2.11.3 Werkstoffspezifikation:

Das Öldruckrohr ist aus der γ' -ausscheidungshärtenden Nickelbasis Legierung Inconel 718 hergestellt. Die chemische Zusammensetzung der Legierung ist der Tabelle 1 zu entnehmen:

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung von Inconel 718 (wt%)

Ni	Cr	Fe	Nb	Ti	Al	Mo
Basis	19,0	18	5,1	0,9	0,6	3,0

3.1.2.11.4 Sichtprüfung

Die Öldruckleitung war durch das Feuer mit Ölkohle und verbranntem Isolationsmaterial kontaminiert (Abb. 5). Nach Entfernung der Rückstände und Reinigung des Rohres wurde am Innenradius des Rohrbogens, ein 6 mm langer, in Umfangsrichtung verlaufender Riss sichtbar (Abb. 6). Parallel zum Hauptriss verlaufende Schleifriefen waren Ausgangsbereiche für weitere, zahlreiche Sekundärrisse (Abb. 7 und 8).

Im weiteren Verlauf der Sichtprüfung wurde die Öldruckleitung auf äußere Beschädigungen hin inspiziert, die Maßhaltigkeit überprüft und einer Röntgenprüfung unterzogen.



Abb. 5: Öldruckleitung mit verbranntem Isolationsmaterial



Abb. 6: Gereinigte Öldruckleitung



Abb. 7: In Umfangsrichtung verlaufender Riss

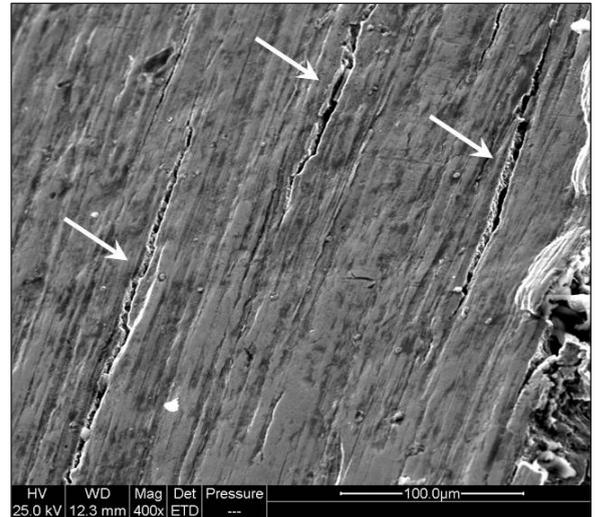


Abb. 8: Sekundärrisse orientieren sich entlang der Schleifriefen

Kleinere Beschädigungen auf der Oberfläche des Schutzrohres und der Öldruckleitung waren von sekundärer Bedeutung und wurden nicht weiter behandelt. Auf dem Röntgenfilm war im Bereich der geschweißten Kolbenringdichtung eine Wurzelüberhöhung zu erkennen (Abb. 9). Nach dem Durchtrennen der Rohre war diese auch mit dem Auge deutlich zu sehen (Abb. 10).

Die Wurzelüberhöhung auf der Innenseite des Schutzrohres führte zu einer außermittigen Positionierung der Öldruckleitung, was die Schlussfolgerung zu-



Abb. 9: Auf dem Röntgenfilm ist die Wurzelüberhöhung deutlich sichtbar

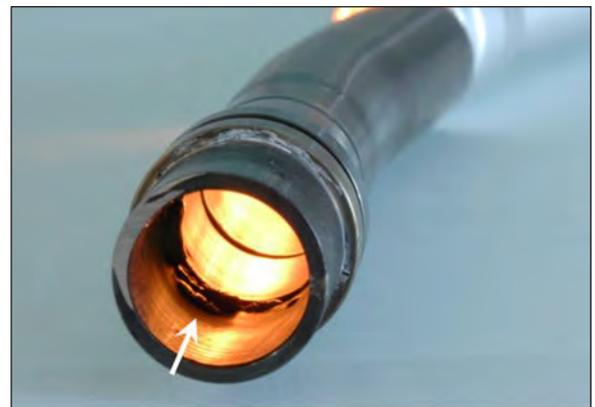


Abb. 10: Wurzelüberhöhung an der Innenseite des Schutzrohres

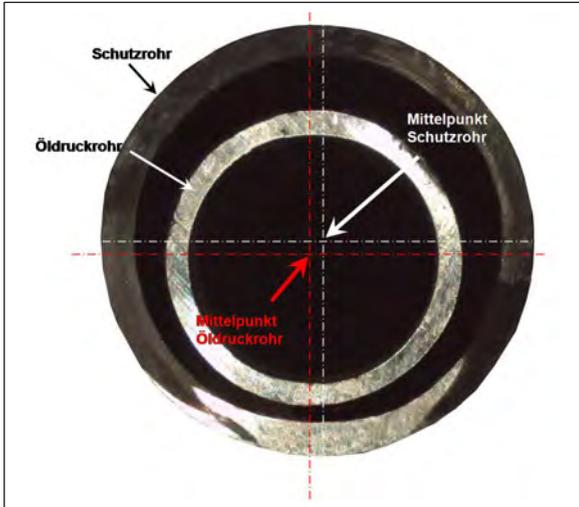


Abb. 11: Das Öldruckrohr liegt außermittig

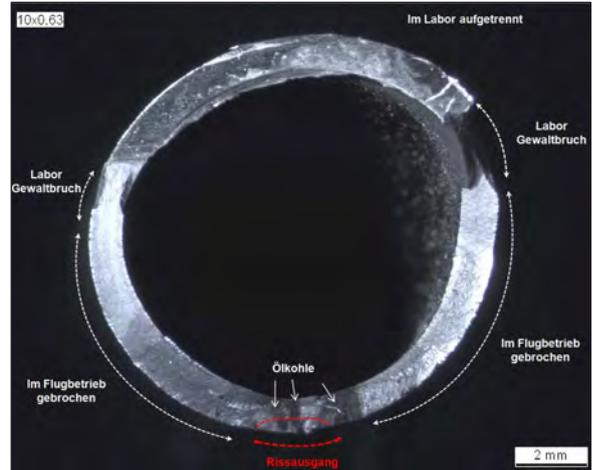


Abb. 13: Übersicht des geöffneten Risses

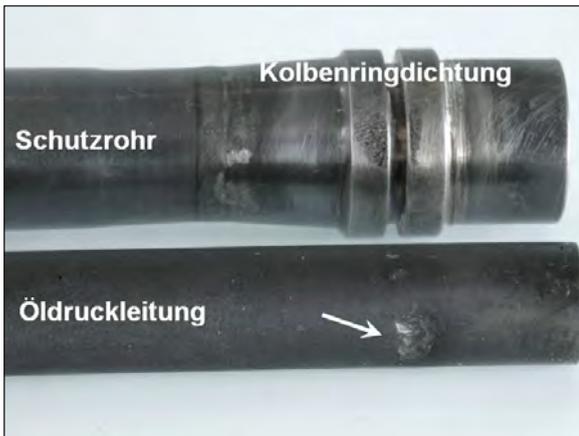


Abb. 12: Durch die Wurzelüberhöhung verursachte Reibspuren auf der Oberfläche des Öldruckrohres

lässt, dass diese hohen Biegekräften ausgesetzt gewesen sein muss (Abb. 11). Bestätigt wird dies durch Reibspuren auf der Außenseite der Öldruckleitung im direkten Kontaktbereich zur Wurzelüberhöhung (Abb. 12).

3.1.2.11.5 Mikrofraktographische Untersuchung

Zur Bestimmung des Rissmodus wurde der Riss geöffnet. Der Rissausgang lag in 6:00 Uhr Position, im Innenradius des Rohrbogens. Drei, in unterschiedlichen Ebenen entstandene Schwingungsrisse penetrierten bis zu 0,5 mm tief in die Rohrwandung (Abb. 13 und 14). Im Stadium I erfolgte die Rissaus-

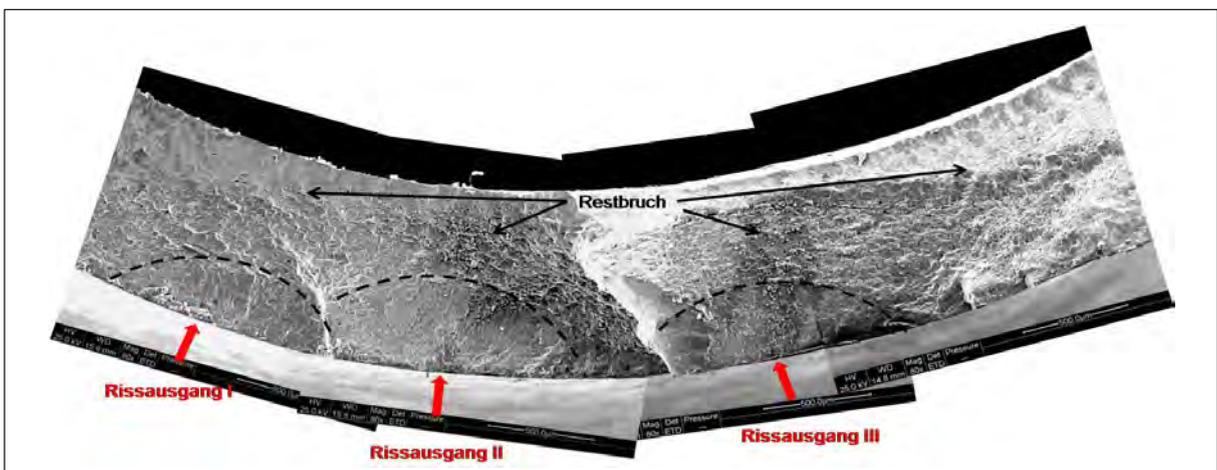


Abb. 14: In drei unterschiedlichen Ebenen entstandener Schwingungsrisse, hoher Restbruchanteil, Rissausgang mit Ölkohle kontaminiert



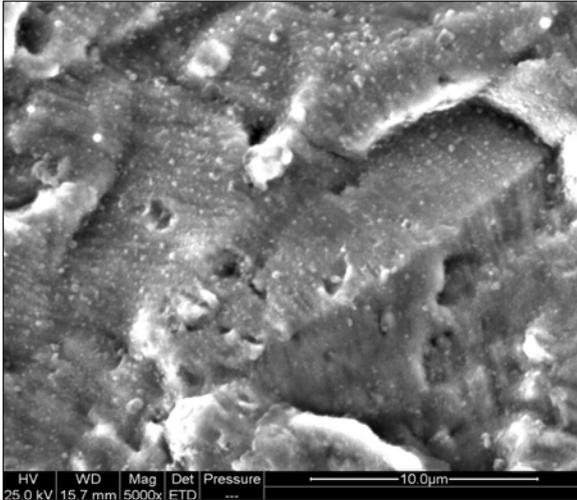


Abb. 15: Stadium I der Schwingungsrissausbreitung kristallographisch orientiert (HCF)

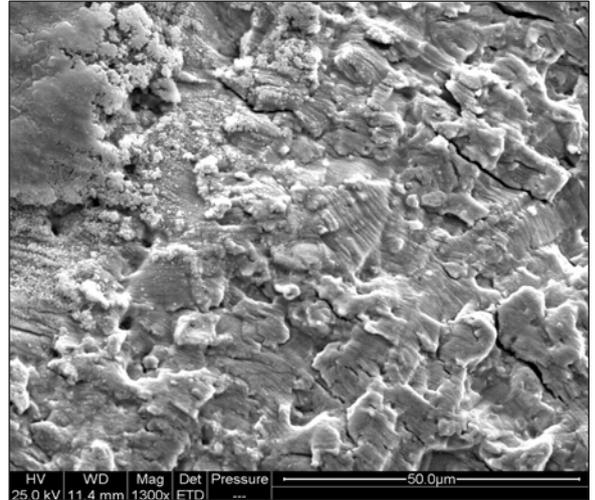


Abb. 16: Transkristalliner Schwingungsriss – niedrige Frequenz hoher Anteil plastischer Verformung (LCF)

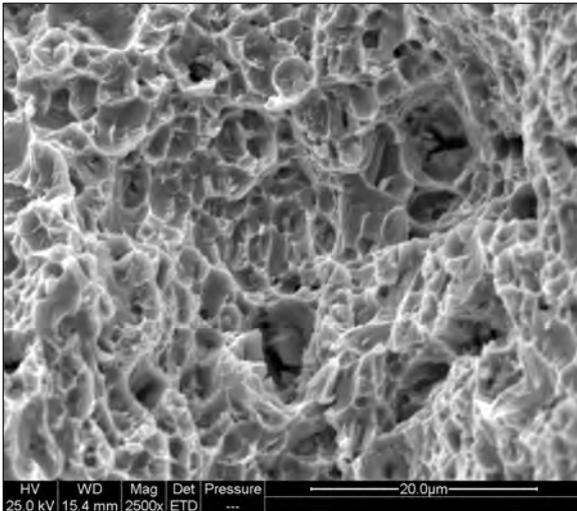


Abb. 17: Duktiler Wabenbruch im Restbruchbereich

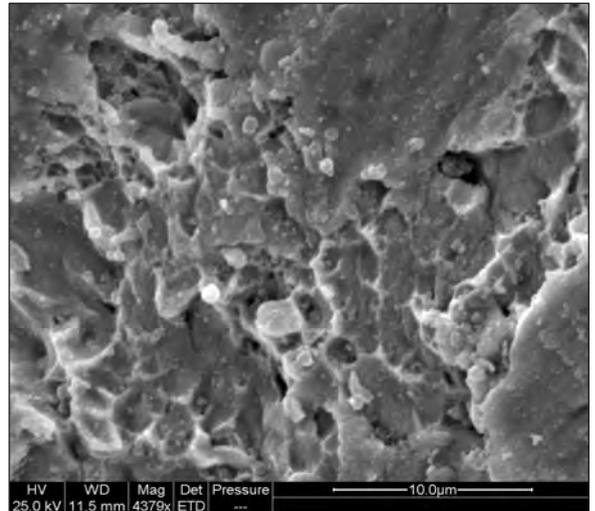


Abb. 18: Wabenbruchstrukturen im Anschluss an den Schwingungsrissbereich

breitung kristallographisch orientiert, im weiteren Rissfortschritt war in Folge erhöhter Spannungen die Rissausbreitung überwiegend transkristallin (Abb. 15 und 16). Im Restbruchbereich der Rohrwandung waren die als Indiz eines duktilen Werkstoffzustandes geltenden Wabenbruchstrukturen vorhanden (Abb. 17 und 18). Verkockte Ölreste im Anrissbereich erschwerten die fraktographische Auswertung.

3.1.2.11.6 Metallographische Untersuchung

Für die metallographische Untersuchung wurden die relevanten Sektionen des Öldruckrohres in Längs- und Querrichtung lichtoptisch ausgewertet. Im Schliff quer zum Rissausgang waren an der Oberfläche des Rohres, ausgehend von kerbartigen Vertiefungen (Schleifriefen), zahlreiche bis zu 0,070 mm tiefe Sekundärrisse vorhanden (Abb. 19 und 20). Das Gefüge zeigte die feinkörnige, austenitische Matrix einer Nickelbasis Superlegierung, mit eingelagerten M₂₃C₆ Karbiden und einem hohen Anteil der me-

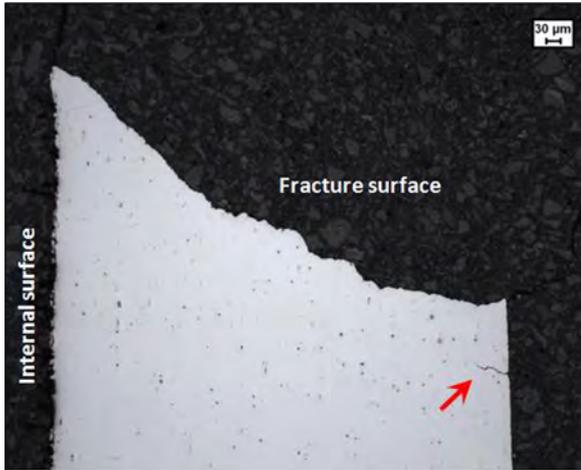


Abb. 19: Querschliff durch einen der drei Rissausgangsbereiche. Der rote Pfeil zeigt auf einen Sekundärriss

tastabilen δ -Phase, die sich temperatur-zeitgesteuert erst oberhalb 700 °C bildet.

3.1.2.11.7 Ergebnis

Das Öldruckrohr ist im Modus eines Schwingungsrisse gebrochen. Ausgehend von kerbartigen Vertiefungen an der Oberfläche im Innenradius des Rohrbogens breitete sich der Riss in drei Ebenen 6 mm breit und 0,5 mm tief aus. Im Stadium I erfolgte die Rissausbreitung kristallographisch orientiert, d.h. unter hoher Frequenz und niedriger Belastungsamplitude (HCF), im weiteren Rissfortschritt erfolgte die Ausbreitung in Folge erhöhter Spannungen überwiegend transkristallin, d.h. unter niedriger Frequenz und einer hohen Belastungsamplitude (LCF). Der Restbruchanteil von nahezu 50% des Rohrquerschnittes untermauert die Aussage, dass das Rohr einer hohen Spannung ausgesetzt gewesen war. Die im Restbruchbereich vorhandenen Scherzugwaben sind als Indiz eines intakten, duktilen Werkstoffzustandes anzusehen.

Durch den offenen Riss konnte Öl austreten und sich in der heißen Umgebungsluft entzünden, was letztlich zum Feuer im Diffuser Case führte.

Schwingungsrisse entstehen unter Wechselbiegebelastung in spannungskritischen Bereichen, wie im vorliegenden Fall an den kerbartigen Vertiefungen im Innenradius des Rohrbogens.

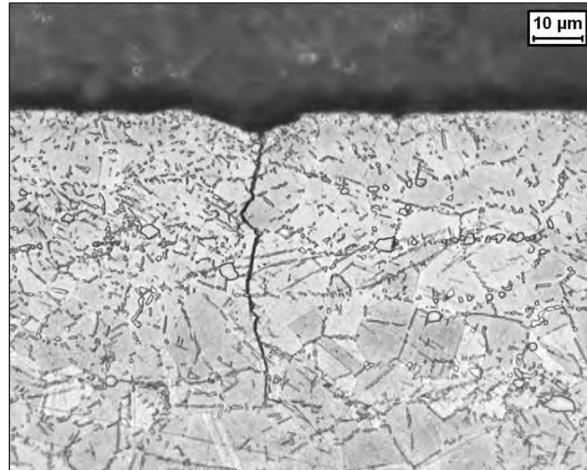


Abb. 20: Schwingungsrisse ausgehend aus einer kerbartigen Vertiefung an der Rohroberfläche (Ätzung: Kalling's Etch).

Durch die eingeschränkte Beweglichkeit des Öldruckrohres im Schutzrohr, ausgelöst durch die Wurzelüberhöhung, wirkten auf das Öldruckrohr ungewöhnlich hohe Biegekräfte. Die Reibspuren an der Außenwand der Öldruckleitung sind als Beweis für den Kontakt zwischen der Wurzelüberhöhung und der Öldruckleitung anzusehen.

Die Wurzelüberhöhung ist bei der Schweißreparatur der Kolbenringdichtung entstanden. Da in dem bisherigen Reparaturablauf eine Röntgenprüfung nicht vorgesehen war und der Bereich der Wurzelüberhöhung durch eine Sichtkontrolle nicht eingesehen werden konnte, blieb dieser Fehler unerkannt.

3.1.2.11.8 Maßnahmen

Als Folge dieses Schadensfalles wurde die Schweißreparatur an der Kolbenringdichtung modifiziert. Gleichwohl die seinerzeit durchgeführte Schweißreparatur in Übereinstimmung mit den gültigen Vorgaben durchgeführt wurde, offenbarten sich grundlegende handwerkliche Fehler. Zur Vermeidung zukünftiger Fehler und Sicherstellung, dass nur einwandfreie Druckleitungen eingebaut werden, wurden folgende Maßnahmen eingeleitet:

- 1) Um die Entstehung einer Wurzelüberhöhung zu vermeiden darf grundsätzlich die Rohrwandung des Schutzrohres nicht durchgeschweißt

werden. Dies wird durch eine zusätzlich eingeführte Röntgenprüfung sichergestellt. Wie die nachträglich angefertigte Röntgenaufnahme zeigte, hätte die Wurzelüberhöhung erkannt werden können.

- 2) Jegliche Art einer mechanischen Bearbeitung an der Oberfläche der ölführenden Druckleitung ist unzulässig.
- 3) Alle reparierten Rohre werden nachträglich einer Röntgen- und Sichtkontrolle unterzogen

3.1.2.12 Inter- und transkristalliner Schwingbruch in der Nickel Basis Legierung Inconel 718

Autoren: Horst Wanzek und Annett Fruhner,
Lufthansa Technik AG

3.1.2.12.1 Einführung

Schwingbruch ist eine der am häufigsten festgestellten Schadensmechanismen an Triebwerksbauteilen. Häufig erfolgt die Rissausbreitung transkristallin, seltener liegt ein interkristalliner Rissfortschritt vor. Interkristallin verlaufende Schwingungsrisse können aufgrund fehlender Schwingungsstreifen oder durch Belegung mit Korrosionsprodukten oftmals nicht erkannt und somit auch nicht richtig gedeutet werden. Da vielfach auf den freiliegenden Korngrenzflächen keine Schwingungsstreifen erkennbar sind, kann es an interkristallinen Schwingbrüchen zur Verwechslung mit interkristalliner Spannungsrisskorrosion kommen.

Dass sowohl die interkristalline als auch transkristalline Rissausbreitung auf ein und derselben Bruchfläche vorzufinden sind, ist eher die Ausnahme. An der gebrochenen Schaufelaufnahme einer Turbinenlaufscheibe einer Auxiliary Power Unit (APU) konnten beide Rissmodi nachgewiesen werden.

Die schadensursächliche Turbinenlaufscheibe war seit neu 21131 Stunden und 27438 Zyklen in Betrieb. Die Laufscheibe wurde während ihrer Betriebszeit mehrmals überholt und auf eventuelle Schäden hin geprüft. Die Betriebszeit von 21131 Stunden entspricht in etwa einer Lebensdauer von 15–20 Jahren (Abbildungen 1 und 2).

3.1.2.12.2 Funktionsbeschreibung

Der Bruch der Turbinenlaufscheibe hatte den Ausfall der APU und hohe Kosten zur Folge. Die APU befindet sich unter dem Seitenleitwerk, am Heck eines jeden größeren Flugzeuges. Über dieses Triebwerk wird ein Generator angetrieben, der am Boden die gesamte Strom- und Luftversorgung eines Flugzeuges übernehmen muss und zusätzlich den Strom zum Anlassen der Haupttriebwerke liefert. Während des Reisefluges ist die APU ausgeschaltet. Bei der angesprochenen APU handelt es sich um einen Radialverdichter, wobei sich Kompressor und Turbine auf einer Welle befinden. Die Drehzahl eines solchen Triebwerkes beträgt bis zu 50.000 Rpm.

Über zwei getrennte Lufteinlässe unter dem Seitenleitwerk saugt der Verdichter Luft für die Versorgung der Passagiere und Luft für die Verbrennung in der Brennkammer der APU an. Die Luft wird über ein Verdichterlaufrad komprimiert und mit hohem



Abb. 1 und 2: Darstellung der gebrochenen Schaufelaufnahme

Druck in die Brennkammer geleitet, in der unter Zufuhr von Kerosin ein Luft/Kerosingemisch bei ca. 1300 °C zur Verbrennung gebracht wird. Mit hoher Energie trifft der heiße Gasstrahl auf die zweistufige Hochdruckturbinen- und versetzt diese in Rotation. Über diese Welle wird gleichzeitig der Generator zur Stromerzeugung angetrieben.

3.1.2.12.3 Werkstoffspezifikation

Die Turbinenlaufscheibe ist aus der γ' -ausscheidungshärtenden Nickelbasis Legierung Inconel 718 hergestellt. Die Härte der Legierung betrug 440-450HV10.

Die werkstofftechnischen Kenndaten sind im Teil IV unter 4.25 aufgeführt.

3.1.2.12.4 Sichtprüfung:

Auf der Turbinenlaufscheibe sind 38 Laufschaufeln in tannenbaumartigen Verzahnungen der Schaufelaufnahmen aufgesteckt. Ein schmaler, an der Unterseite des Schaufelfußes eingesetzter und an den Enden umgebogener Flachniet, verhindert das axiale Auswandern der Laufschaufel.

Eine dieser tannenbaumartigen Schaufelaufnahme war gebrochen. Die beiden in dieser Aufnahme sitzenden Laufschaufeln verloren ihren Halt, wurden

herausgeschleudert und richteten an den restlichen Laufschaufeln und in der Folge an dem gesamten Motor einen erheblichen Schaden an (Abbildung 3).

Die schadensbehaftete Turbinenlaufscheibe wurde einer Rissprüfung unterzogen, weitere 9 Schaufelaufnahmen hatten Rissbefunde. Alle Risse lagen im ersten Verzahnungsgrund. Die Lage der Risse war somit identisch mit der Bruchebene der gebrochenen Schaufelaufnahme (Abbildungen 4 und 5).

3.1.2.12.5 Mikrofraktographische Untersuchung

Die Bruchfläche der Schaufelaufnahme zeigte Strukturen eines Schwingbruches (Abbildung 6). Der hohe Restbruchanteil deutet auf eine hohe Belastung in der Aufnahme hin. Der Bruchausgang lag im Kontaktbereich zwischen der Turbinenlaufschaufel und der Schaufelaufnahme, ungefähr 2mm hinter der Stirnseite. Die Bruchfläche war mit Korrosionsbelägen kontaminiert. Der Rissausgang war durch extreme plastische Verformung beschädigt (Abbildung 7).

Makroskopisch waren auf der Bruchfläche abwechselnde, halbkreisförmige Schattierungen „rauher“ und „glatter“ Topographien zu erkennen (Abbildung 8). In den „rauhem“ Topographien verlief der Rissfortschritt interkristallin, in den „glatten“ dagegen transkristallin (Abbildungen 9 bis 10).

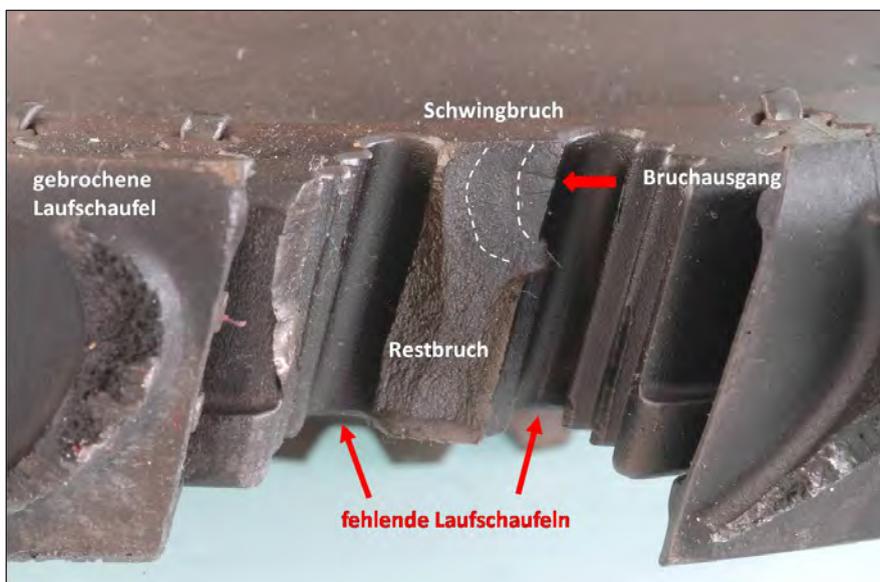


Abb. 3: gebrochene Schaufelaufnahme



Abb. 4 und 5: Rissbefunde in der Schaufelaufnahme, die Lage der Risse ist identisch mit der Bruchebene

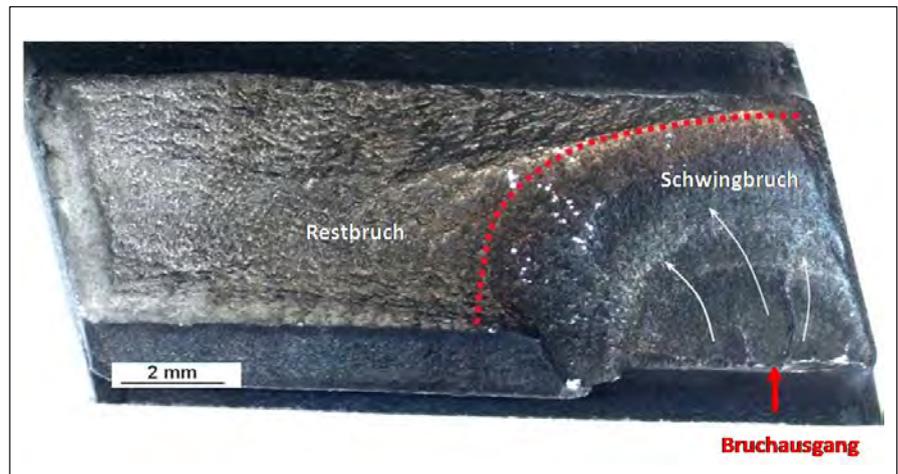


Abb. 6: Übersicht der Bruchfläche an der Schaufelaufnahme

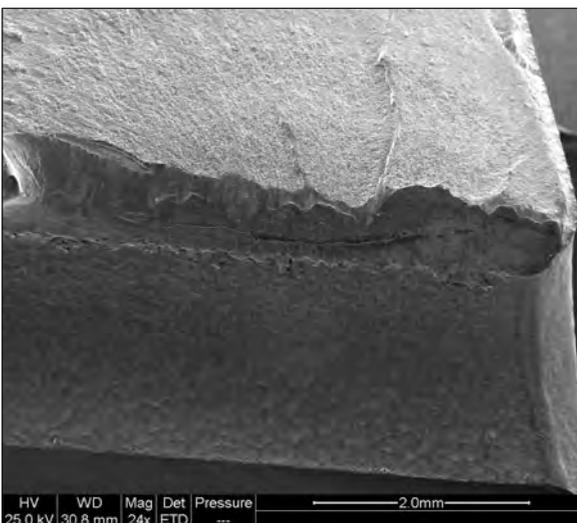


Abb. 7: Reibverschleiß, extreme plastische Verformung an der Kante zur Bruchfläche

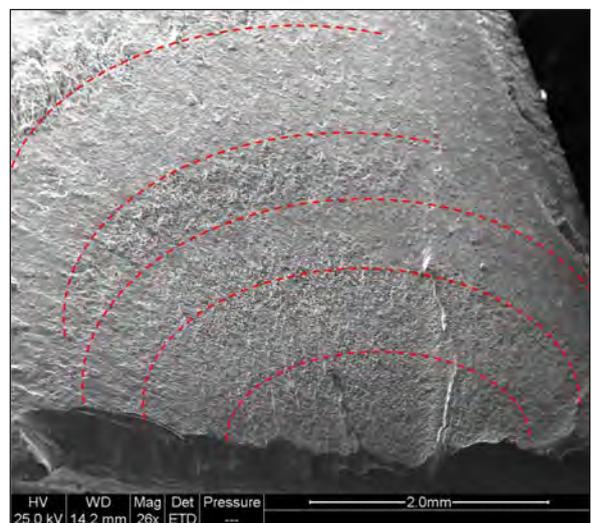


Abb. 8: REM Aufnahme der Bruchfläche zeigt abwechselnde „raue“ und „glatte“ Topographien

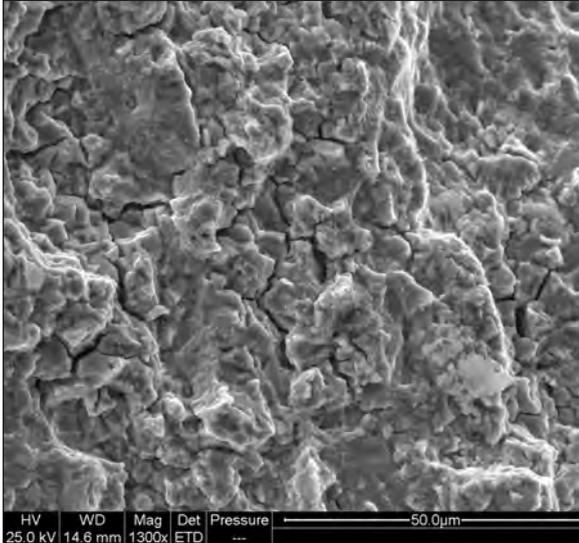


Abb. 9: Interkristalliner Schwingungsriß

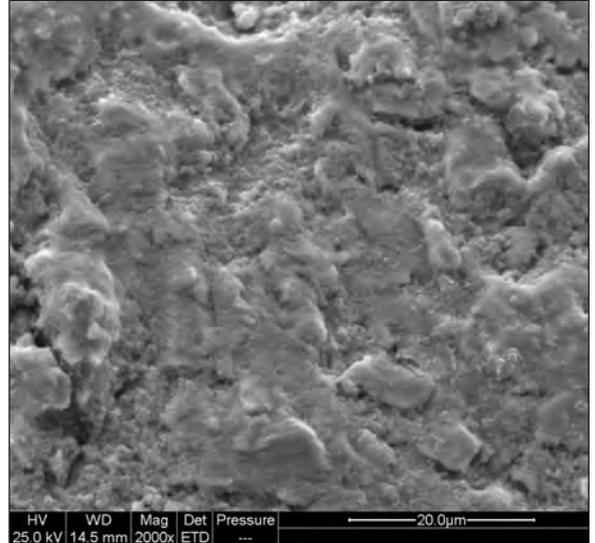


Abb. 10: Transkristalliner Schwingungsriß

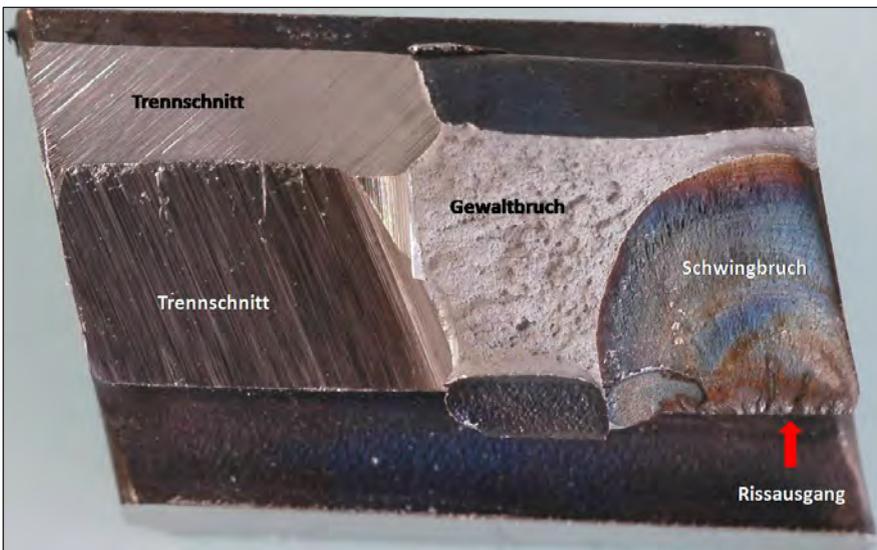


Abb. 11: Der geöffnete Riss zeigt ähnliche Strukturen wie die gebrochene Schaufelaufnahme

Nach ungefähr 6 mm Rissfortschritt erfolgte der Rest- oder Gewaltbruch mit der für einen duktilen Werkstoffzustand charakteristischen Wabenbruchstruktur.

Für weitere Untersuchungen wurden die Risse der 9 schadhafte Schaufelaufnahmen geöffnet. Makroskopisch hatten alle Risse ein nahezu identisches Aussehen. Die Rissausbreitung in axialer Richtung betrug 6mm, an der Stirnseite der Schaufelaufnahme 7 mm. Die sehr dünnen oxydischen Interferenzschichten verfärbten die Rissoberfläche

braun-violett (Abbildung 11). Schemenhaft waren die halbkreisförmig verlaufenden „rauh“ und „glatten“ Topographien zu erkennen (Abbildung 12). Bei höherer Auflösung im Rasterelektronenmikroskop war die abwechselnd verlaufende inter- und transkristalline Rissausbreitung zu beobachten (Abbildungen 13 und 14).

Der Rissausgang lag, wie an der gebrochenen Verzahnung, ungefähr 2 mm hinter der Stirnseite. Der Kontaktbereich zwischen Schaufelaufnahme und Turbinenlaufschaufel zeigt Reiboxidation und massive plastische Verformung (Abbildung 15).