

Gefügeabdrücke an zeitstandbeanspruchten Bauteilen – Chancen und Grenzen der Lebensdauerabschätzung

Dr.-Ing. Peter Seliger, Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft mbH Dresden

1 Einleitung

Die Untersuchung der Mikrostruktur von Werkstoffen stellt eines der wichtigsten Verfahren der Werkstoffprüfung dar. In Abhängigkeit vom Werkstoff und vom Untersuchungsziel stehen hierfür langjährig erprobte und in der Spezialliteratur nachvollziehbare Präparationstechnologien zur Verfügung. Die Herstellung eines metallografischen Schliffes bedingt in den meisten Fällen eine Probenentnahme aus dem zu untersuchenden Bauteil. In vielen Fällen führt eine Probenentnahme zur Zerstörung des betroffenen Bauteiles. Um dies zu vermeiden, wurde in der Vergangenheit die sogenannte „Replica- bzw. Gefügeabdrucktechnik“, eine Form der ambulanten Metallografie, entwickelt.

2 Historische Entwicklung

Bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts wusste man nicht, ob die Legierungen als ein Gemenge der reinen Metalle, als Mischkristalle oder als Verbindungen der Metalle angesehen werden müssen. Mit der Einbeziehung und Nutzung des Mikroskopes als Werkstoffprüfeinrichtung durch Martens [1] wurde bei der Untersuchung des Gefügebau von Legierungen ein riesiger Fortschritt erzielt. „Es begann damit die Entwicklung der Metallografie, die als zentraler Teil der Metallkunde die anderen Gebiete derselben außerordentlich befruchtete“ [2].

Wenn man zur Geschichte der „Replica“-Entwicklung etwas sagen will, muss man den Bogen sicher etwas weiter spannen. Das Wort Replica bzw. Replication (lat.) wird in den verschiedensten Bereichen verwendet, wie beispielsweise in der Archäologie, der Medizin, der Kunst und eben auch in der Werkstoffprüfung und bedeutet soviel wie Kopieren, Nachbildung, Verdopplung oder Vervielfältigung. Zumeist wird das Ziel verfolgt, dem Original so gut es geht identisch zu sein bzw. nahezu kommen. Man denke nur an die Kopien der Bilder berühmter Maler oder von Skulpturen von Bildhauern. Ein weiteres einfaches Beispiel eines Replica ist der oft in der Vergangenheit benutzte, teilweise auch noch heute angewandte Siegelabdruck auf einem Dokument. Nicht umsonst hat man noch vor zwanzig, dreißig Jahren von Lackabdrücken gesprochen, wenn man metallografische Untersuchungen

an Kraftwerksbauteilen meinte, weil man damals vorwiegend flüssige, aushärtende Materialien (z. B. Flüssiglack, Gießharze) verwendete.

Der zeitliche Beginn der Anwendung von Replica in der Werkstoffprüfung ist sicher nicht leicht zu definieren, liegt aber gewiss weit vor dem Zeitpunkt der Nutzung für die Untersuchung warmfester Stähle bzw. Bauteile in der Kraftwerkstechnik, worauf die folgende Abhandlung reflektieren wird. Bereits 1973 wurde auf der Metallografie-Tagung in Iserlohn ein Vortrag [3] gehalten, der Präparationstechnik und Vorteile des Verfahrens, auch an konkreten Beispielen ausführlich darstellte.

3 Normung und Richtlinien

Die in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts verstärkte Anwendung der ambulanten Metallografie verlangte nach einer Bündelung der Erfahrungen und der Festlegung grundlegender Vorgehensweisen. Im Jahr 1974 hat die „International Organisation of Standardization“ erstmals eine Norm zu diesem Thema herausgegeben, die ISO 3057-1974 [4]. Auf der Grundlage dieser Norm entstand in der deutschen Arbeitsgruppe D1F „Oberflächenverfahren“ im Fachnormenausschuss Materialprüfung (FNM) die noch heute gültige Norm DIN 54 150 „Abdruckverfahren für die Oberflächenprüfung (Replica-Technik) [5]. Da diese Norm sehr abstrakt gehalten ist und auf Einzelheiten nicht genügend eingeht, wurden 1978 in einer Verbändevereinbarung [6] wichtige Fragen wie Auswahl der Prüfbereiche, Oberflächenvorbereitung, Ätzung, Auswertung u. a. näher spezifiziert und erstmals auch eine Gefügeklassifizierung manifestiert. Diese Klassifizierung war noch sehr einfach und auf 6 Klassen begrenzt. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Verdienste von Neubauer [7], [8] zu würdigen, der diese Technik und deren Nutzung in Deutschland wesentlich vorangetrieben hat und mit seinen Veröffentlichungen der nationalen und internationalen Fachwelt enorme Impulse gab. Mit dem legendären Diagramm der Zuordnung von Kriechstadium zu Schädigungsgrad (**Bild 1**) wurde dem Betreiber erstmals ein Hilfsmittel in die Hand gegeben, um aus den ermittelten Befunden eine Empfehlung hinsichtlich Prüffristplanung bzw. einem notwendigen Bauteilwechsel abzuleiten.

Ein wesentlicher Schritt bei der Vereinheitlichung der Präparationstechniken und Prüfbefundbeurteilung stellte 1992 die Herausgabe der VGB-TW 507 [9] dar. Für eine ganze Reihe typischer warmfester Stähle wurden die einzelnen Beurteilungsklassen auch bildlich dargestellt, so dass der Metallograf durch einfachen Vergleich den Befunden eine entsprechende Beurteilungsklasse zuordnen konnte. Darüberhinaus wurde eine feinere

Abstufung der Klassen 2 und 3 vorgenommen, da die Anzahl und Orientierung der Schädigungen grundsätzliche Hinweise auf verschiedene Stadien der Bauteilerschöpfung geben.

Die in einem VGB-Arbeitskreis erarbeitete zweite Ausgabe dieser Richtreihe [10] erschien 2005 und enthält wesentliche Veränderungen und Ergänzungen gegenüber der Erstausgabe:

- Erstmalig theoretische Abhandlung metallkundlicher Grundlagen des Schadensmechanismus
- Darstellung von möglichen unterschiedlichen Ausgangsgefügen eines Stahls
- Darstellung von Sonderfällen und Abnormitäten
- Aufnahme vorher nicht enthaltener Stähle (15CrMoV5-10, 9%-Cr-Stähle)
- Überarbeitetes Bildmaterial.

Durch die Ausgabe als Ringbuch ist seitens des Herausgebers VGB die Möglichkeit gegeben, zukünftig Zusatz- oder Austauschseiten anzubieten.

Zum Abschluss sollte aber noch kurz auf die internationale Normung geschaut werden, wobei dies keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Da ist zum einen das amerikanische Regelwerk zu nennen, welches mit der ASTM E1351-01(2006) [11] aufwartet. Für die nordeuropäischen Länder wurde 1991 eine Richtlinie, die sogenannte Nordtest method 010 [12] erarbeitet, in der ebenfalls generelle Forderungen für die Präparation und Auswertung festgeschrieben sind. Es werden aber auch Hinweise für Prüfzeiten in Abhängigkeit vom Befund gegeben. Darüberhinaus gibt es noch einen Nordtest-report [13], der Referenzbilder enthält und eine feinere Einteilung der Klassen vorgibt, die sich nach der Anzahl der Poren bzw. Mikrorisse pro Flächeneinheit richtet!

4 Derzeitiger Stand bei der Anwendung der Replica-Technik

Die VGB-TW 507 nennt vier grundsätzlich mögliche Aufgaben bzw. Ziele der Replica-Technik, die da wären:

1. Nullaufnahme des Gefüges (Dokumentation des Ausgangszustandes)
2. Nachweis bzw. Beurteilung thermischer Gefügeänderungen
3. Nachweis der Schädigungsentwicklung (Poren etc.)
4. Identifizierung von Herstellungsfehlern bzw. deren betriebsbedingten Veränderungen.

Grundlegende Voraussetzung zur Erfüllung dieser Ziele ist die Herstellung eines qualitativ hochwertigen und damit auswertbaren Replicas. Dies stellt hohe Anforderungen an das Qualitätssicherungssystem der Prüffirma und an das mit der Durchführung beauftragte Prüfpersonal.

Im folgenden wird überblicksartig auf die einzelnen Schritte des Verfahrens eingegangen.

Auswahl der Replicaentnahme-Stellen:

Da mittels des Gefügeabdruckes nur eine begrenzte Fläche betrachtet werden kann, sind die entsprechenden Bauteile und Prüfpositionen technisch sinnvoll auszuwählen. Die Auswahl der Bauteile richten sich nach deren Beanspruchungsart und -höhe, aber auch nach Schadensrisiko und -potential. Das können Bereiche mit hoher Beanspruchung/Mehrachsigkeit sein, aber auch Bereiche mit Anzeigen aus vorangegangenen Oberflächenrissprüfungen. Typische Replica-Entnahmepositionen sind z. B. der Extrados von Rohrbogen, die Sattelpunkte von T-Stücken, Schweißnähte, Turbinen-Radscheiben, Querschnittsübergänge und Nuten in Turbinen- und Armaturengehäusen etc.. Hinweise geben hier entsprechende Richtlinien wie beispielsweise für den Rohrleitungsbereich die VGB-R 509L [14]. Wichtig für Wiederholungsprüfungen ist die Kennzeichnung der Entnahmepositionen.

Mechanisches Schleifen:

Die Prüfstellen müssen zunächst so beschliffen werden, dass verzünderte bzw. auf- und entkohlte Bereiche entfernt sind. Überhitzungen und Verformungen durch zu hohen Anpressdruck oder durch zu hohe Schleifgeschwindigkeit sind genauso zu vermeiden, wie ein zu großer Wanddickenabtrag (bis zu 10% lokal zulässig).

Polieren:

In der Praxis werden sowohl das mechanische als auch das elektrolytische Polieren angewandt. Allerdings ist die Gefahr der Bildung von Artefakten beim elektrolytischen Polieren und Ätzen wesentlich größer. Herausgelöste Einschlüsse, verwaschene Korngrenzen und unscharfe Rissränder können in diesem Fall die Beurteilung des Gefüges bzw. der Schadstelle erschweren oder sogar zu Fehlinterpretationen führen. In der Regel sind die Porenzahlen beim elektrolytischen Polieren höher als beim mechanischen Polieren.

Für hochlegierte martensitische Stähle wird ein elektrolytisches Polieren und Ätzen grundsätzlich abgelehnt. Dies steht auch im Einklang mit den Ergebnissen eines 1992/93 durchgeführten Round-Robin-Tests [15] an Proben aus X20CrMoV12-1, an dem sich 8 deutsche Unternehmen beteiligt hatten.

Ätzen:

Das Ätzmittel muss auf den zu untersuchenden Werkstoff abgestimmt und möglichst frisch angesetzt sein. Die Ätzzeit richtet sich nach der Bauteiltemperatur. Ggf. ist auch ein Zwischenätzen erforderlich.

Replica-Entnahme:

Während in der Vergangenheit neben den Folienabdrücken auch sogenannte Lackabdrücke [16] (aushärtender Fließlack mit relativ langer Aushärtzeit) entnommen wurden, werden heute fast ausschließlich Acetat-Folien verwendet, auf denen die Gefügestruktur als Negativ abgebildet wird. Es empfiehlt sich eine umgehende Besputterung aus Gründen der besseren Kontrastierung, Haltbarmachung und einer möglichen Untersuchung im Raster-elektronenmikroskop.

Auswertung/ Dokumentation/ Archivierung:

Die Erfahrungen zeigen, dass es schwierig ist, unter realen Kraftwerksbedingungen und unter möglichem Zeit- und Kostendruck in jedem Fall ein Replica zu erzeugen, das von der Qualität her dem Laborschliff gleicht. Dies ist bei der Beurteilung der erzeugten Gefügaufnahmen zu berücksichtigen. Auch wenn in der Richtreihe VGB-TW507 Hinweise zu den einzelnen Beurteilungsklassen und deren Abgrenzungskriterien gegeben werden (**Tabelle 1**), müssen folgende zusätzliche Einschränkungen erwähnt werden:

- Herstellungsbedingte und präparationsbedingte porenähnliche Hohlräume sind mitunter schwer von Zeitstandporen zu unterscheiden.
- Bei bestimmten Beanspruchungszuständen (z. B. keine ausgeprägte Hauptspannung) kann die Orientierung der Poren unterdrückt sein.
- Bei martensitischen Stählen wird die Beurteilung der Porenorientierung durch die Substruktur erschwert.
- Die Porenanzahl kann von subjektiven Faktoren und vom Präparationsverfahren abhängen.

Nach der ordnungsgemäßen Dokumentation ist das Replica in geeigneter Weise zu archivieren, um es im bei wiederkehrenden Prüfungen zu Vergleichszwecken zur Verfügung zu haben.

5 Mikrostruktur und Restlebensdauerabschätzung

Es hat in der Vergangenheit nicht an Versuchen gefehlt, aus den Ergebnissen der am Bauteil durchgeführten Mikrostrukturuntersuchung auf die Restlebensdauer desselben zu schließen. Bild 2 [17] zeigt für die Schädigungsklasse 2 (Einzel-Poren) einen abgeschätzten Lebensdauerverbrauch im Bereich von 5 % bis 45 %. Das Auftreten von Mikrorissen (Schädigungsklasse 4) ist bei dieser Darstellung in einem noch breiteren Bereich von 30 % bis 85 % angesiedelt. Der Hintergrund dafür ist eigentlich simpel. Der Lebensdauerverbrauch wird im Allgemeinen auf der Grundlage der Ist-Geometrie und der Betriebsbeanspruchung berechnet. Die Größe, die die Lebensdauer aber am meisten beeinflusst, nämlich die Zeitstandfestigkeit, fließt in die Berechnung mit den Mindestdaten ein, d. h. es wird unabhängig vom tatsächlich vorhandenen Zustand die untere Streubandgrenze des Zeitstandfestigkeitsstreubandes verwendet. Ansätze dafür, die Zeitstandfestigkeit eines Werkstoffes aus anderen Kenngrößen bzw. deren Beziehungen untereinander abzuleiten (Z-Faktor-Konzept [18], Data-Mining-Methode [19]) hat es bereits gegeben. Hier bleibt aber aufgrund des zumeist zu kleinen werkstoffspezifischen Datenpools und der großen Einzelstreuungen noch weiterer Forschungsbedarf. Dass ohne genauere Einschränkung des Zeitstandfestigkeitsniveaus einer Werkstoffcharge oder eines Bauteils keine exakte Lebensdauer vorhersage möglich ist, sei an Hand eines einfachen Beispiels dargelegt.

Durch langjährige Untersuchungen [20] ist vom warmfesten Stahl 15CrMoV5-10 bekannt, dass die Zeitstandfestigkeit mit dem Anteil von Bainit- bzw. Zwischenstufengefüge steigt. Im **Bild 3** ist ein Ausgangszustand mit mehr als 80 % Zwischenstufengefügeanteil gezeigt. Bei diesem Ausgangszustand ist mit einer sehr guten Zeitstandfestigkeit (mindestens Mittelwert

des Streubandes) zu rechnen. Betrachtet man

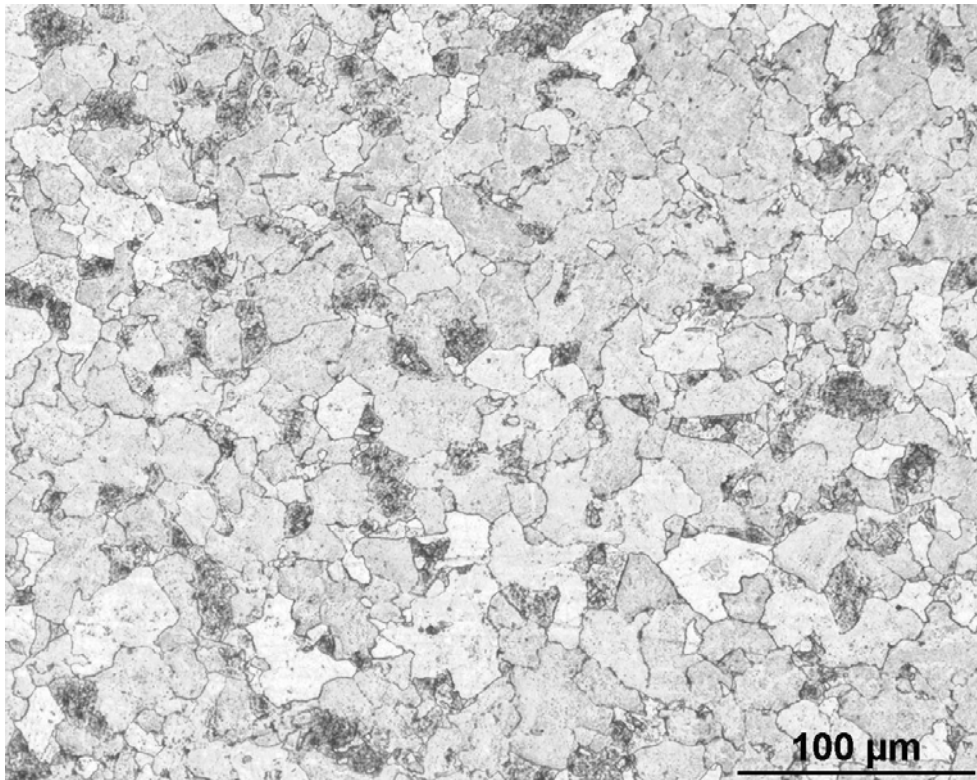
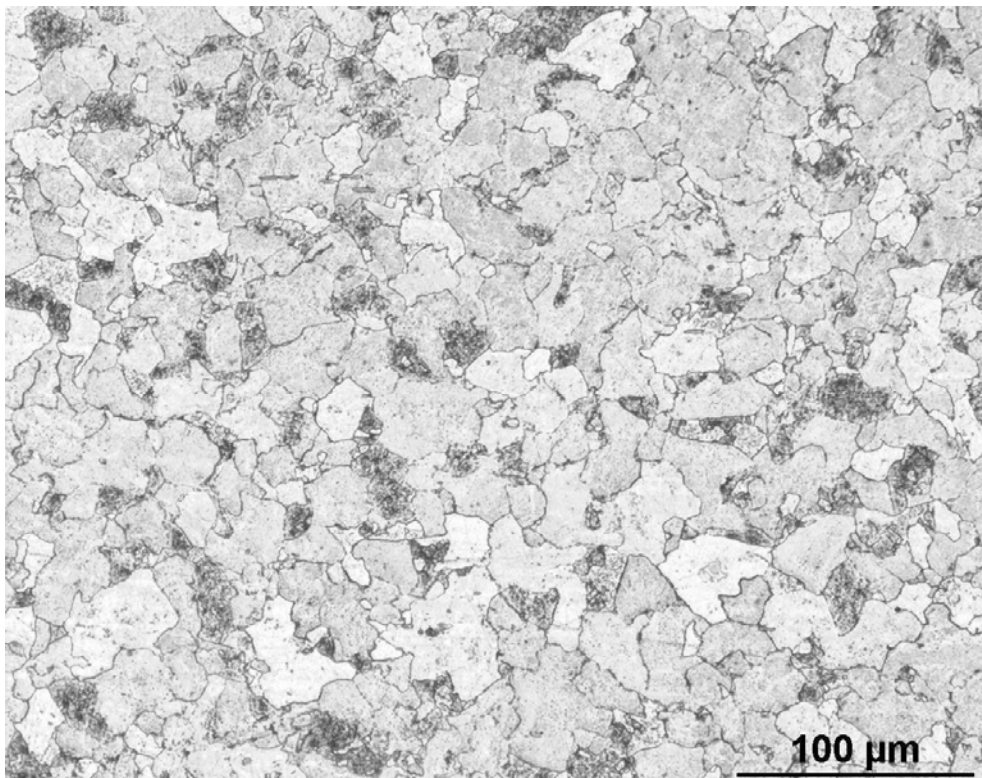


Bild 4, so findet sich hier ein Zwischenstufengefügeanteil von unter 20 %. Man muss damit rechnen, dass die dazugehörige Zeitstandfestigkeit nicht viel besser als die untere Streubandgrenze (Mittelwert minus 20 %) ist. Nun ist weiterhin bekannt, dass der zeitstandfestere, im **Bild 3** dargestellte Zustand eher zur Porenbildung neigt als der



weichere, im

Bild 4 gezeigte Zustand. Dies geht konform mit der Tatsache, dass Werkstoffe und Werkstoffchargen mit geringerem Zeitbruchverformungsvermögen früher und mehr Poren entwickeln als solche mit hohen Zeitbruchverformungswerten. Allein die Betrachtung der Porenanzahl als Maß für die Bauteilerschöpfung würde hier zu völlig falschen Schlussfolgerungen führen. Folgendes lässt sich feststellen:

1. Eine genaue Restlebensdauerbestimmung allein aus der Replica-Auswertung ist nicht möglich, das Gefüge gibt aber erste Hinweise auf das Lebensdauerstadium und auf zukünftig notwendige Inspektionsintervalle. Die nach gewissen Zeiten wiederholende Prüfung kann durch direkten Vergleich natürlich Hinweise auf die zeitliche Schädigungsentwicklung geben.
2. Die Aussagen aus einer Replica-Untersuchung werden wesentlich fundierter, wenn Bilder vom Ausgangszustand vorhanden sind und man klar zwischen rein thermisch aktivierten und/oder aus der mechanischen Beanspruchung resultierenden Schädigungszuständen differenzieren kann.
3. Erst die komplexe Betrachtung des Gefügestandes und der aktuellen Beurteilungsklasse nach VGB-TW 507 in Verbindung zur Berechnung des Bauteils mit möglichst eingegrenzten Zeitstandfestigkeitskennwerten führt zu einer abgesicherten und weitestgehend realen Restlebensdauereinschätzung. Das zur Absicherung der Bauteilintegrität natürlich auch die klassischen zerstörungsfreien Prüfverfahren (wie UT, PT, MT etc.) eingesetzt werden müssen, versteht sich von selbst.
4. Nichtzuletzt lassen sich aus dem Umfang (flächenmäßig) und dem Gradient (tiefenmäßig) der gefundenen Schädigungen wesentliche Erkenntnisse zum Erschöpfungszustand und Versagensrisiko des betreffenden Bauteiles ableiten.

6 Zusammenfassung

In Tabelle 2 sind noch einmal die Vorteile und Grenzen der Gefügeuntersuchung mittels Replica-Technik zusammengefasst.

Replica sind bisher die einzige Möglichkeit, zeitstandbedingte Schädigungen zweifelsfrei zu detektieren. Dabei kann bereits frühzeitig zwischen reversiblen (Einformungen, Karbidwachstum etc.) und irreversiblen (Porenbildung und -wachstum) unterschieden werden. Allerdings können und dürfen Replica nie das einzige Mittel für eine

Restlebensdauervorhersage sein. Die Entnahme von Replica und deren Auswertung hinsichtlich Zeitstandschädigung ist erfahrenen Metallografen zu überlassen.

7 Referenzen

- [1] Kallen, H.
Der Werkstoff Stahl in der technischen Entwicklung der letzten hundert Jahre
Stahl u. Eisen 80 (1960), Nr. 25, S.1864-1876
- [2] Siebel, E.
Handbuch der Werkstoffprüfung, Zweite Auflage
Springer-Verlag Berlin/ Göttingen/ Heidelberg, 1958
- [3] Diesner, K.
Beitrag zur zerstörungsfreien metallografischen Untersuchung großer Bauteile
Praktische Metallografie 11 (1974), S. 441-55
(Vortrag gehalten auf Metallographie-Tagung Iserlohn, 12.09.1973)
- [4] ISO3057-1974
Non-destructive testing – Metallographic replica techniques of surface examination
International Organization for Standardization
- [5] DIN 54 150
Abdruckverfahren für die Oberflächengefügeprüfung (Replica-Technik)
Beuth-Verlag GmbH, August 1977
- [6] Verbändevereinbarung Dampfkessel 451-83/6
Oberflächengefügeuntersuchung zeitstandbeanspruchter Bauteile gemäß TRD 508
Erstausgabe 7/1978
- [7] Arnswald, W., Blum, R., Neubauer, B. und Poulsen, K.E.
Einsatz von Oberflächengefügeuntersuchungen für die Prüfung zeitstandbeanspruchter
Kraftwerksbauteile
VGB Kraftwerkstechnik, 59 (1979) H. 7, S. 581-593
- [8] Neubauer, B. und Ahrens-Fischer, F.
Bestimmung der Restlebensdauer kriechbeanspruchter Kraftwerksbauteile
VGB Kraftwerkstechnik 63 (1983), H.7, S. 637-646
- [9] VGB-TW 507, 1. Ausgabe
Richtreihen zur Bewertung der Gefügeausbildung und –schädigung zeitstand-
beanspruchter Werkstoffe von Hochdruckrohrleitungen und Kesselbauteilen
Essen, 1992
- [10] VGB-TW 507, 2. Ausgabe
Richtreihen zur Bewertung der Gefügeausbildung und Zeitstandschädigung warmfester
Stähle für Hochdruckrohrleitungen und Kesselbauteilen
Essen, 2005
- [11] ASTM E1351-01(2006)
Standard Practice for Production and Evaluation of Field Metallographic Replicas

- [12] Nordtest method NT NDT 010
High temperature components in power plants/
Remnant lifetime assessment, replica inspection
Espoo (Finnland), 05/1991
- [13] Nordtest report 170
Reference micrographs for evaluation of creep damage in replica inspections
Espoo (Finnland), 03/1992
- [14] VGB-R 509L
Wiederkehrende Prüfungen an Rohrleitungsanlagen in fossilbefeuerten
Wärmeleistungswerken
VGB PowerTech Essen, Zweite Ausgabe 2002
- [15] Trück, B. u.a.
Round-Robin-Test "Metallografische Untersuchungen an zeitstandbeanspruchten
Proben aus X20CrMoV12-1"
Projektgruppe W12, AG Warmfeste Stähle, 1992/93
- [16] Kunze, E. und Klomp, F.
Zerstörungsfreie Gefügeuntersuchung an Bauteilen mit Hilfe der Lackabdrucktechnik
TÜ 18 (1977) Nr. 3, S. 87-89
- [17] Auerkari, P. und Salonen, J.
Accuracy Requirements for Life Assessment
Int. J. Pres. Ves. Piping 39 (1989), S. 135-144
- [18] Melzer, B.
Patent Nr. DD 283 059 A (Aktenzeichen G01N/316 3 89 6)
Verfahren zur Ermittlung der Zeitstandfestigkeit von Bauteilen (mittels ambulanter
Prüfverfahren), Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft mbH Dresden, 1988
- [19] Balos, D., Klenk, A. und Maile, K.
Anwendung von neuronalen Netzen zur Ermittlung des schmelzenabhängigen
Zeitstandverhaltens (AVIF-Projekt A198)
30. Vortragsveranstaltung der AGW und AGHT, Düsseldorf, 24.11.2006
- [20] Schenk, U.
Richtreihe für die Ausgangsgefüge der sowjetischen Rohrstähe 12Ch1MF und
15Ch1M1F
Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft mbH Dresden (vormals KAB), 1980

8 Tabellen- und Bildanhang

Tabelle 1 Einteilung der Beurteilungsklassen nach VGB-TW507 [10]

Beurteilungs- klasse	Gefüge- bzw. Schädigungszustand	Abgrenzungskriterium
0	Lieferzustand, ohne thermische Betriebsbeanspruchung	
1	Zeitstandsbeansprucht ohne Kriechporen	
2a	Vereinzelte Kriechporen	Bis zu 150 Poren pro mm ²
2b	Zahlreiche Kriechporen ohne Orientierung	Mehr als 150 Poren pro mm ²
3a	Zahlreiche Kriechporen mit Orientierung	
3b	Kriechporenketten; vereinzelte Korngrenzentrennungen	Mindestens 2 hintereinander liegende Korngrenzen mit mindestens je 3 Poren
4	Mikrorisse	Mehr als eine Korngrenzenlänge
5	Makrorisse	

150 Poren pro mm² entsprechen bei 500-facher Vergrößerung:

- rund 14 Poren bei einem Bildformat von 13 x 18 cm oder
- rund 8 Poren im Format 10 x 14 cm
- rund 5 Poren im Format 8 x 11 cm

Tabelle 2 Vorteile und Grenzen der Replica-Technik

Vorteile, Möglichkeiten	Nachteile, Grenzen
quasi zerstörungsfrei	untersuchte Fläche lokal begrenzt
relativ preiswert	auf Oberfläche beschränkt
Frühzeitige Detektion von Zeitstandschädigung möglich	allein daraus noch keine exakte Restlebensdauervorhersage möglich
Schnelle Aussage möglich	
hohes Auflösungsvermögen	
ist automatisch die Dokumentation der Prüfung	
Verfahren ist mit der Richtlinie VGB-TW507 sehr gut beschrieben und nachvollziehbar	

GEFÜGEABDRÜCKE

konservative Lebensdauerabschätzung bis 3 Jahre

Basis: Betriebsbeanspruchung und Schädigungsgrad des Bauteils

Vorteil: zerstörungsfrei, kostengünstig

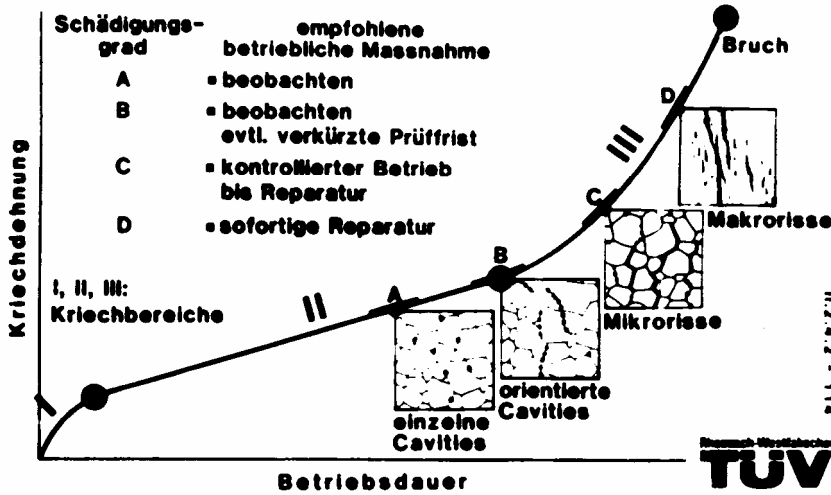


Bild 1 Zusammenhang zwischen Kriechstadium und Schädigungsausbildung (schematisch) nach Neubauer [8]

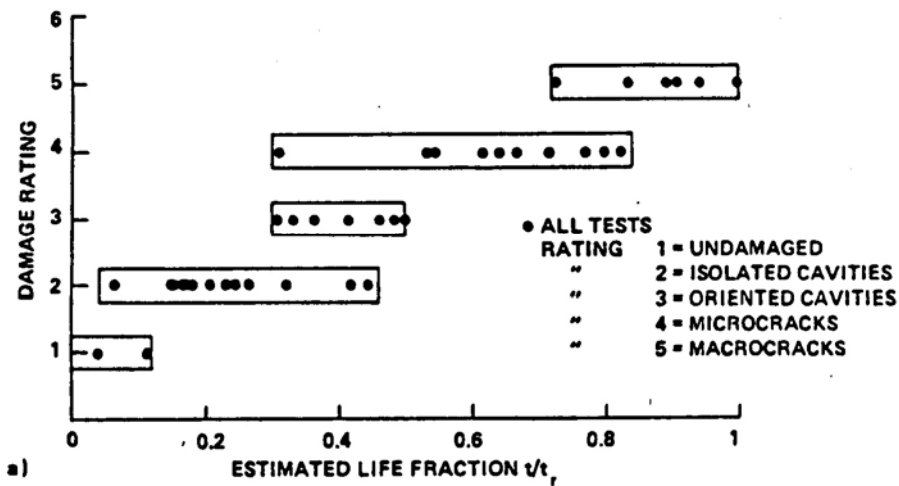


Bild 2 Schädigungsklasse in Abhängigkeit von der Lebensdauer [17]

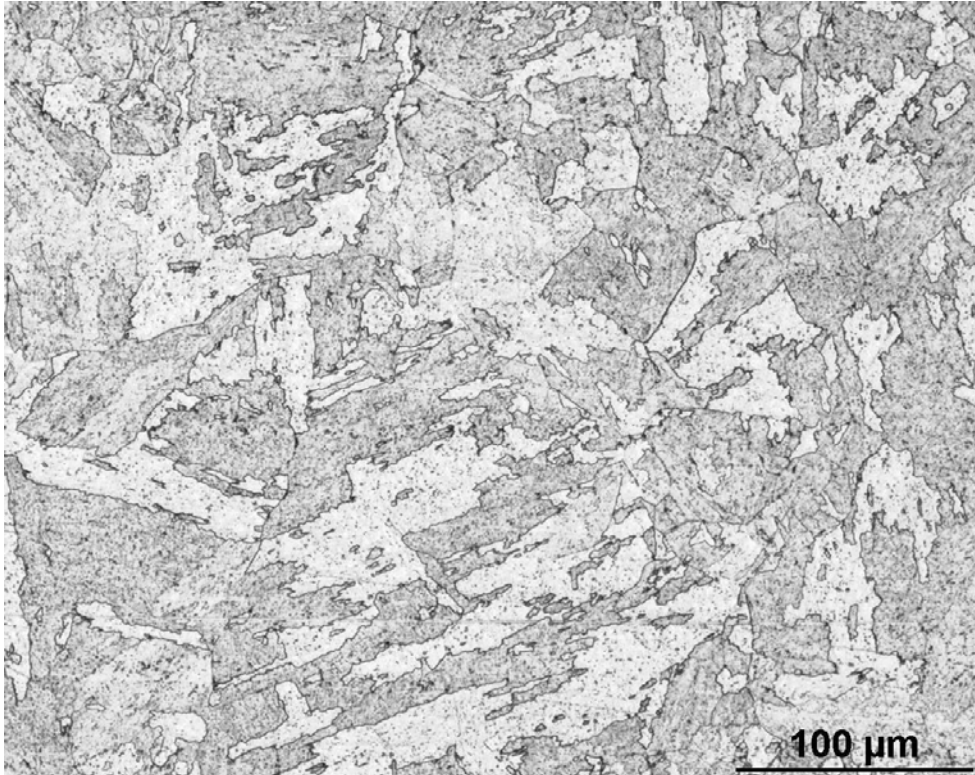


Bild 3 Ausgangsgefüge 15CrMoV5-10, Bainitgehalt > 80 %, hohe Zeitstandfestigkeit, geringe Zeitbruchverformung

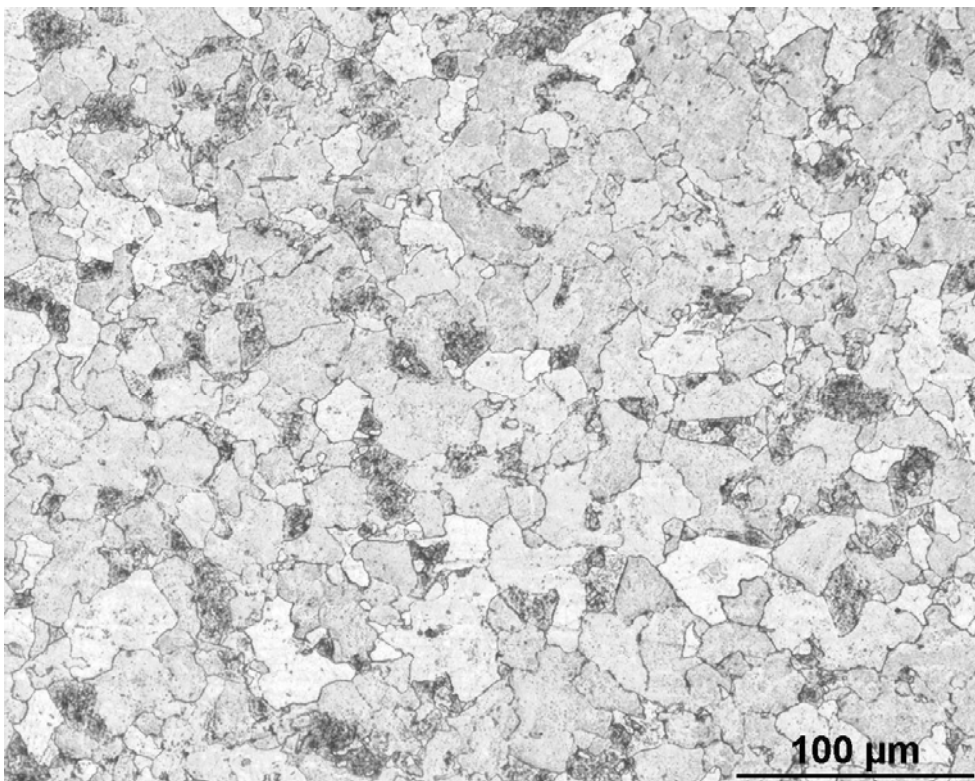


Bild 4 Ausgangsgefüge 15CrMoV5-10, Bainitgehalt < 20 %, geringe Zeitstandfestigkeit, hohe Zeitbruchverformung